

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ENGENHARIA ELETRICA

LAURA RIBEIRO FARDIN

**ESTUDO SOBRE UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE
EXCITADO E SUA APLICAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA
EÓLICA**

UBERLÂNDIA

2019

LAURA RIBEIRO FARDIN

**ESTUDO SOBRE UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE
EXCITADO E SUA APLICAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA
EÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Doutor Geraldo Caixeta
Guimarães

UBERLÂNDIA

2019

LAURA RIBEIRO FARDIN

**ESTUDO SOBRE UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE
EXCITADO E SUA APLICAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA
EÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Doutor Geraldo Caixeta
Guimarães

Uberlândia, _____ de _____ de 2019.

Ph.D. Geraldo Caixeta Guimarães

Dr. Adélio José de Moraes

Me. Guilherme Henrique Alves

Dedico este trabalho aos meus pais, Clarice e Antonio e a minha irmã Ana Carolina, pelo apoio, incentivo e paciência durante todo o curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as conquistas ao longo da minha vida acadêmica que me permitiram escrever esse trabalho e concluir o curso.

Aos meus pais Antonio e Clarice e a minha irmã Ana Carolina, pela paciência e apoio ao longo de todos esses anos.

À Gabriel Zanatta por acreditar em mim mesmo quando eu não acreditava.

Ao professor Geraldo Caixeta que me orientou tanto na confecção desse trabalho como na vida acadêmica em geral, em especial, durante o período em que foi coordenador do Programa de Educação Tutorial do Curso de Engenharia Elétrica (PET-Elétrica).

Ao professor Adélio de Moraes por toda ajuda durante meu período na faculdade e por todo apoio durante o período em que coordenou o PET-Elétrica.

A todos os petianos com quem tive o prazer de trabalhar e a todos amigos e colegas que de alguma forma contribuíram no meu crescimento pessoal e acadêmico.

Agradeço também a todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

“ Não é sobre ganhar, mas sobre não desistir. Se você tem um sonho, lute por ele. Não é sobre quantas vezes você foi rejeitado, ou quantas vezes você caiu e foi derrotado. É sobre quantas vezes você levantou com coragem e seguiu em frente. ”

Stefani Joanne Angelina Germanotta – Lady Gaga

RESUMO

ESTUDO SOBRE UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE EXCITADO E SUA APLICAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

A energia eólica pode ser considerada como uma das fontes mais promissoras de energias para o futuro, uma vez que se trata de uma energia renovável, logo não se esgota, é limpa e pode ser utilizada em quase todos os países do mundo, em alguns casos substituindo o carvão mineral e contribuindo para diminuir os efeitos do aquecimento global. Em países que tem sua matriz energética baseada principalmente em usinas hidroelétricas, como o Brasil, a energia eólica pode significar uma nova forma para a geração no futuro, uma vez que apenas hidroelétricas não tem conseguido suprir toda a necessidade de energia durante o ano (principalmente durante o período de seca, onde os níveis dos reservatórios ficam muito baixos). Em países que utilizam outras formas de geração, como as termoelétricas ou usinas nucleares, a energia eólica representa uma nova forma de se gerar energia limpa e sem resíduos tóxicos. Além de possuírem a vantagem de serem utilizadas em sistemas isolados. Com base nessa premissa, vários sistemas de geração de energia eólica são apresentados neste trabalho, mostrando as vantagens e desvantagens de cada arranjo. Particularmente, o gerador de indução duplamente alimentado é focado aqui.

Palavras-Chave: Energia eólica. Gerador de indução duplamente alimentado. Sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

STUDY ABOUT A DOUBLE-FED INDUCTION GENERATOR AND ITS APPLICATION IN WIND POWER GENERATION

Wind energy can be considered as one of the most promising sources of energy for the future, as it is clean and renewable energy, so it is not exhausted and can be used in almost every country in the world, in some cases, replacing coal and helping to mitigate the effects of global warming. In countries that have their energy matrix based primarily on hydroelectric power plants such as Brazil, wind power may mean a new way for the future generation, as only hydroelectric power has not been able to meet all energy needs during the year (mainly during the dry season, where reservoir levels are very low). In countries that use other forms of generation, such as thermoelectric or nuclear power plants, wind energy represents a new way of generating clean energy without toxic waste. Besides having the advantage of being used in isolated systems. Based on this assumption, several wind power generation systems are presented in this work, showing the advantages and disadvantages of each arrangement. Particularly, the double-fed induction generation is focused here.

Key-Words: Wind energy. Double-fed induction generator. Electrical power systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema eólico com seus componentes indicados.....	19
Figura 2 – Aerogerador de eixo vertical do tipo <i>Darrieus</i>	21
Figura 3 – Aerogerador de eixo vertical do tipo <i>Savonius</i>	22
Figura 4 - Aerogerador de eixo vertical do tipo <i>Garlov</i>	23
Figura 5 - Aerogerador de eixo vertical do tipo <i>Giromill</i>	23
Figura 6 - Aerogerador de eixo horizontal	24
Figura 7 - Curva de potência de um aerogerador	25
Figura 8 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.....	28
Figura 9 - Capacidade energética relativa a energia eólica instalada entre 2001-2017 no mundo	32
Figura 10 - Capacidade acumulada de energia eólica no mundo	33
Figura 11 - 10 países com maiores novas instalações	34
Figura 12 - 10 países com maior capacidade acumulada	34
Figura 13 - Evolução da capacidade eólica no Brasil até 2019.....	35
Figura 14 - Velocidade do vento distribuída no Brasil.....	36
Figura 15 – a) Gerador de indução do tipo gaiola de esquilo; b) gerador de indução com excitação independente.....	38
Figura 16 – Comparação entre a) sistema eólico convencional e; b) sistema ólico com acionamento direto	39
Figura 17 – Esquema de montagem de um gerador de relutância chaveado aplicado em usinas eólicas	40
Figura 18 – Modelo de ligação de um gerador de indução diretamente conectado à rede	42

Figura 19 – Sistema de geração eólica utilizando um gerador de indução duplamente alimentado	43
Figura 20 – Modelo esquemático de um gerador de indução duplamente alimentado conectado a um sistema de geração de energia eólica.....	47
Figura 21 – Desenho esquemático do estator de um motor de indução	49
Figura 22 – Rotor bobinado do motor de indução.....	51
Figura 23 – Rotor em gaiola do motor de indução	52
Figura 24 – Visão geral da construção típica de um motor de indução com rotor em gaiola	52
Figura 25 – Comparação para a forma de onda da tensão de saída para diferentes tipos de retificadores	54
Figura 26 – Representação de um retificador trifásico controlado.....	55
Figura 27 – Retificador PWM trifásico de 2 níveis.....	57
Figura 28 – Forma de onda triangular referente a forma de onda senoidal da tensão de referência e forma de onda da tensão de saída do conversor utilizando uma modulação por largura de pulso de 2 níveis.....	59
Figura 29 – Forma de onda triangular referente a forma de onda senoidal da tensão de referência e forma de onda da tensão de saída do conversor utilizando uma modulação por largura de pulso de 3 níveis.....	60
Figura 30 – Forma de onda da tensão de saída do conversor utilizando uma modulação por largura de pulso e multiníveis	60
Figura 31 – Inversor trifásico tipo fonte de tensão.....	61
Figura 32 – Inversor trifásico tipo fonte de corrente	62
Figura 33 – Conversor back-to-back	63
Figura 34 – Modos de operação da máquina de indução duplamente alimentada	64

Figura 35 – Fluxo de potência em um gerador de indução duplamente alimentado
trabalhando no modo sub-síncrono 65

Figura 36 – Fluxo de potência em um gerador de indução duplamente alimentado
trabalhando no modo supersíncrono..... 66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área de varredura do rotor

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

AC - *Alternative Current*

CC – Corrente Contínua

C_p – Coeficiente de potencia

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica

d – Diâmetro da turbina

DC - *Direct Current*

DFIG - *Doubly-Feed Induction Generator*

f – Frequência em Hertz

FRT - *Fault Ride Through*

GIDA – Gerador de Indução Duplamente Alimentado

GRC – Gerador de Relutância Chaveado

GSC - *Grid Side Converter*

GWEC – *The Global Wind Energy Council*

H – Ordem harmônica

I – Corrente em Ampere

k – Variável referente ao conversor

n – Número de pulsos do conversor

N_s – Velocidade síncrona

P – Número de polos da máquina

P_{ar} – Massa específica do ar

P_{dis} – Potência disponível no eixo

P_{mec} – Potencia mecânica

PWM – *Pulse Width Modulation*

RSC - *Rotor Side Converter*

$SCIG$ - *Squirrel-Cage Induction Generator*

V – Tensão em volts

V_2 – Velocidade que o vento exerce na turbina

v – Velocidade em metros/segundos

Y – Ligação em estrela

Δ - Ligação em delta

Δl – Porção de ar

Δm – Quantidade de massa de ar

Δt – Intervalo de tempo

ΔV_{ar} – Volume de ar deslocado

ΔW_c – Energia cinética

SUMÁRIO

1.	Introdução	17
2.	A energia eólica	18
2.1.	O vento.....	18
2.2.	Conversão de energia eólica em energia elétrica.....	18
2.3.	Tipos de aerogeradores	20
2.3.1.	Aerogeradores de eixo vertical	20
2.3.1.1.	Tipo <i>Darrieus</i>	20
2.3.1.2.	Tipo <i>Savonius</i>	21
2.3.1.3.	Tipo <i>Gorlov</i>	22
2.3.1.4.	Tipo Giromill	23
2.3.2.	Aerogeradores de eixo horizontal	24
2.4.	Aproveitamento eólico.....	24
2.4.1.	Características do aerogerador	25
2.4.1.1.	Curva de potência	25
2.4.1.2.1.	Coeficiente de potência.....	27
2.4.1.4.	Rendimento de <i>Betz</i>	29
2.4.2.	Características do local	30
2.4.2.1.	Variação do vento com a altura do solo (rugosidade).....	30
2.4.2.2.	Turbulências.....	31
2.4.2.3.	Presença de obstáculos.....	31
2.4.2.4.	Variabilidade do vento	31
2.4.2.5.	Condições marítimas.....	32
2.5.	O cenário da energia eólica.....	32
2.5.1.	No mundo.....	32
1.5.2.	No Brasil	34
3.	Geração de energia elétrica em usinas eólicas.....	37

3.1.	Tipos básicos de geradores	37
3.1.1.	Geradores síncronos aplicados em usinas eólicas.....	38
3.1.2.	Gerador de relutância chaveado aplicado em usinas eólicas	39
3.1.3.	Geradores de indução aplicados em usinas eólicas.....	40
3.1.3.1.	Sistema de velocidade fixa.....	41
3.1.3.1.1.	Geradores de indução diretamente conectados à rede	41
3.1.3.2.	Sistema de velocidade variável.....	42
3.1.3.2.1.	Gerador de indução duplamente alimentado.....	43
4.	Funcionamento do gerador de indução duplamente alimentado.....	46
4.1.	Elementos que compõe o sistema de um gerador de indução duplamente alimentado.....	47
4.1.1.	Máquina de indução trifásica	47
4.1.1.1.	Constituição	48
4.2.1.1.1.	Estator	49
4.2.1.1.2.	Rotor	50
4.2.1.1.2.1.	Rotor bobinado.....	50
4.2.1.1.2.2.	Rotor em gaiola de esquilo	51
4.1.2.	Caixa de engrenagens	53
4.1.3.	Conversores AC/DC/AC.....	53
4.1.3.1.	Conversores (AC/DC).....	53
4.1.3.1.1.	Classificação de acordo com o número de fases da tensão de entrada ...	53
4.1.3.1.2.	Classificação de acordo com a direção que a corrente pode tomar	54
4.1.3.1.3.	Classificação de acordo com o tipo de conexão dos elementos retificadores	54
4.1.3.1.4.	Classificação de acordo com a capacidade de ajustar o valor da tensão de saída	55
4.1.3.1.4.1.	Retificadores controlados.....	55
4.1.3.1.4.1.1.	Retificadores PWM trifásicos	56

4.1.3.2.	Conversores (DC/AC).....	58
4.1.3.2.1.	Classificação de acordo com o número de fases da tensão de entrada ...	58
4.1.3.2.2.	Classificação de acordo com a direção que a corrente pode tomar	58
4.1.3.2.3.	Classificação de acordo com a modulação	58
4.1.3.2.4.	Classificação de acordo com o número de níveis	59
4.1.3.2.5.	Classificação de acordo com o tipo de fonte	61
4.1.3.2.5.1.	Inversores tipo fonte de tensão	61
4.1.3.2.5.2.	Inversores tipo fonte de corrente.....	62
4.1.3.3.	Conversor Back-to-back	62
4.2.	Modo de operação do GIDA.....	63
4.2.1.	Modo de operação sub-síncrono	65
4.2.2.	Modo de operação supersíncrono	65
5.	Conclusão.....	67
6.	Referências.....	68

1. Introdução

A energia eólica é produzida através da força dos ventos, que acionam hélices de uma turbina que está conectada a um gerador elétrico. É considerada uma fonte de energia renovável, limpa e atualmente é visto como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, pois está disponível livremente em qualquer região do mundo.

Esse tipo de energia pode parecer novo, devido a sua tecnologia de ponta, porém a geração de energia pelo vento já é usado a mais de 3 mil anos. Inicialmente através dos moinhos, que bombeavam água ou moíam grãos (força mecânica). Além disso, existiam os barcos a velas, que eram impulsionados pelo vento.

Contudo, foi nos anos 70 que se começou a utilizar a força dos ventos não somente para produzir força mecânica, mas também para gerar energia elétrica. Isso ocorreu devido à crise do petróleo, que levou diversos países a buscarem novas formas de geração.

Desta forma, esse trabalho visa mostrar as diferentes formas de se utilizar sistemas eólicos, apontando como o sistema funciona, seus componentes, os tipos de turbinas e suas vantagens e desvantagens, e principalmente como funciona a parte elétrica, focando nos geradores utilizados e justificando por que o gerador de indução duplamente alimentado é o mais utilizado atualmente.

2. A energia eólica

2.1. O vento

É um fenômeno meteorológico formado pela movimentação do ar na atmosfera. Ele é gerado através da movimentação natural do planeta Terra, ou seja, através dos movimentos de rotação e translação. Alguns fatores influenciam na formação dos ventos, como por exemplo, em áreas mais quentes o Sol esquentando a superfície mais rapidamente, de forma que essa transfere calor para o ar. Devido a sua menor densidade, o ar quente sobe trocando de lugar com o ar mais frio, originando assim o vento.

Um vento pode ser caracterizado de duas maneiras diferentes: horizontal ou vertical. Os ventos horizontais são caracterizados pelo aquecimento da camada de ar mais próxima ao solo que devido à baixa densidade, essa massa de ar sobe, sendo substituída por uma massa de ar mais fria que estava ao seu lado. Já os ventos verticais, o substituto da camada de ar mais quente é a camada de ar frio que está logo acima.

2.2. Conversão de energia eólica em energia elétrica

A energia eólica é a energia produzida através da energia cinética dos ventos. A turbina eólica transforma essa energia cinética em energia mecânica através da movimentação das pás e com a utilização do gerador, a energia mecânica se transforma em energia elétrica.

Assim, um sistema eólico é composto dos seguintes equipamentos, mostrados na figura 1:

- Pás: quem capta os ventos e transfere sua energia para o rotor do gerador utilizado;
- Rotor: elemento que fixa as pás e que permite que o movimento de rotação das mesmas seja transmitido para os demais equipamentos;
- Torre: elemento que sustenta todo o sistema eólico de geração de energia elétrica;
- Nacele: composto por caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais controle eletrônico e sistema hidráulico;
- Caixa de transmissão: funciona como um multiplicador de velocidade das pás, de forma que a velocidade que chega ao gerador é bem mais alta do que a velocidade propriamente dita das pás;
- Gerador: equipamento que converte a energia mecânica em elétrica;
- Anemômetro: equipamento que mede a velocidade, direção e a intensidade dos ventos.

Figura 1 - Sistema eólico com seus componentes indicados



Fonte: Atlantic Energias Renováveis S.A.¹

¹ Disponível em: <<http://atlanticenergias.com.br/saiba-como-funciona-o-aerogerador-que-transforma-vento-em-eletricidade/>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

2.3. Tipos de aerogeradores

Os aerogeradores podem ser classificados em dois grandes grupos: aerogeradores de eixo vertical e de eixo horizontal, como serão apresentados a seguir.

2.3.1. Aerogeradores de eixo vertical

É considerado o tipo menos utilizado de aerogeradores, porém, são mais baratos e não necessitam de um mecanismo para acompanhar a direção dos ventos, pois esse tipo de aerogerador está sempre alinhado com o vento. Possuem velocidade de arranque menor, quando comparadas as turbinas de eixo horizontal. Devido a isso, são montadas mais próximas ao solo, recebendo assim um fluxo de ar com maior turbulência. Portanto, operam com uma menor frequência e conseqüentemente, menor eficiência.

2.3.1.1. Tipo *Darrieus*

É constituído de pás verticais que se movimentam com a ação do vento. Seu perfil aerodinâmico é bem próximo ao das asas dos aviões, dando assim sustentação para girar e gerar energia.

É considerado o tipo de aerogerador mais eficiente dentre os de eixo vertical. Sua montagem é dada pela figura 2.

Figura 2 – Aerogerador de eixo vertical do tipo *Darrieus*



Fonte: Braga, Silva, Canzian e Khalil²

2.3.1.2. Tipo *Savonius*

Baseia-se no princípio do acionamento diferencial, ou seja, os esforços que o vento exerce em cada uma das faces ocas tem intensidades diferentes, sendo responsável pela movimentação das mesmas.

São consideradas turbinas mais baratas em comparação com o modelo anterior e possuem uma velocidade mais baixa em relação as demais turbinas eólicas. Porém, é considerado o tipo de turbina menos eficiente. Sua montagem é demonstrada na figura 3.

² Disponível em: < <https://evolucaoalp.wordpress.com/2012/06/19/especificacoes-de-projeto/>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

Figura 3 – Aerogerador de eixo vertical do tipo *Savonius*



Fonte: Marcucci³

2.3.1.3. Tipo *Gorlov*

É considerada uma variação do modelo *Darrieus*, onde as pás têm uma torção de aproximadamente 60 graus. Dentre os modelos de eixo vertical, esse pode ser considerado o mais silencioso. Além de ser mais resistente a ventos de alta velocidade e apresentarem menos vibrações. Porém, é um dos aerogeradores mais caros, devido as dificuldades de seu projeto. Sua montagem é demonstrada na figura 4.

³ Disponível em: <<https://fabricioengmec.blogspot.com/2017/07/historia-da-energia-eolica-e-suas.html>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

Figura 4 - Aerogerador de eixo vertical do tipo *Gorlov*



Fonte: Designboom⁴

2.3.1.4. Tipo Giromill

Também pode ser considerada uma variação do modelo *Darrieus*, onde as pás são retas, apresentando assim maior eficiência energética devido a área de passagem de escoamento ser maior. Porém, possui maiores esforços estruturais, como demonstrado na figura 5.

Figura 5 - Aerogerador de eixo vertical do tipo *Giromill*



Fonte: Energia Renovável⁵

⁴ Disponível em: <<https://www.designboom.com/technology/skypump-electric-charging-station/>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

⁵ Disponível em: <<https://sites.google.com/site/electrorenovavel/darrieus>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

2.3.2. Aerogeradores de eixo horizontal

É o tipo mais comum de aerogeradores, sendo amplamente utilizado pelo mundo. Porém, são mais caros e necessitam de um mecanismo para acompanhar a direção dos ventos, além de apresentarem maior eficiência. São montadas através de torres, de forma a alcançar ventos com velocidades superiores, dessa forma as torres variam de 80 a 100 metros acima do solo.

Esse tipo de turbina pode ter uma, duas, três ou mais pás, sendo que as mais utilizadas são as de duas e três pás, uma vez que a eficiência é maior para esses casos, como mostra a figura 6.

Figura 6 - Aerogerador de eixo horizontal



Fonte: O petróleo⁶

2.4. Aproveitamento eólico

Depende principalmente das características do aerogerador, do local de instalação e do regime dos ventos. Características que serão analisadas a seguir.

⁶ Disponível em: < <https://www.opetroleo.com.br/5-fatos-importantes-e-estatisticas-sobre-turbinas-eolicas/>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

2.4.1. Características do aerogerador

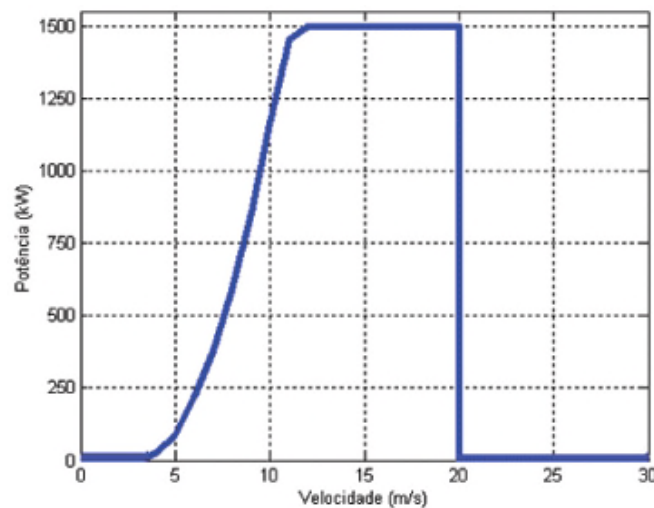
2.4.1.1. Curva de potência

A curva de potência de um aerogerador, demonstrada na figura 7, é um gráfico que indica qual a potência gerada (quantidade de energia por segundo) para determinadas velocidades de ventos. Essas curvas são fornecidas pelo fabricante.

Essa curva é obtida experimentalmente, de tal forma que a turbina eólica, ligada a uma carga, é exposta a diferentes velocidades de ventos e mede-se o valor da queda de potencial (V) bem como a corrente (A) que passa pela carga, de acordo com a equação 1:

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

Figura 7 - Curva de potência de um aerogerador



Fonte: Leite, Falcão e Borges⁷

⁷ Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592006000200006>. Acesso em: 13 fev. 2019.

Observando a figura 7 se percebe três pontos importantes e que merecem atenção:

- Velocidade mínima: é a mínima velocidade do vento com que o aerogerador começa a gerar energia. Para a análise realizada, essa velocidade seria de aproximadamente 4 m/s;
- Velocidade nominal: é a velocidade do vento em que o aerogerador atinge a potência nominal (que muitas vezes é a potência máxima do mesmo). Para a análise realizada, essa velocidade seria de aproximadamente 12 m/s;
- Velocidade de corte: é a velocidade do vento em que o aerogerador para de gerar energia evitando que o sistema trabalhe em níveis prejudiciais ao mesmo. Para o caso acima, essa velocidade seria de 20 m/s.

2.4.1.2. Eficiência

Antes de se analisar a eficiência de um aerogerador é necessário entender alguns conceitos relacionados com a energia disponível para uma turbina eólica.

A energia que é disponível para uma turbina eólica é a energia cinética (ΔW_c), obtida pela equação 4, de uma certa porção de ar (Δl) que está em movimento em uma velocidade (v) que se considera como constante. Em um intervalo de tempo (Δt) essa massa de ar vai atravessar o rotor da turbina movimentando assim uma quantidade de massa de ar (Δm), que é dada pela equação 3 (seu valor depende da massa específica do ar (ρ_{ar}) e do volume de ar deslocado (ΔV_{ar}), que é dado pela equação 2).

$$\Delta V_{ar} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \Delta l \quad (2)$$

Onde, d é o diâmetro da turbina.

$$\Delta m = \rho_{ar} \cdot \Delta V_{ar} \quad (3)$$

$$\Delta W_c = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v^2 \quad (4)$$

Assim, temos que a potência disponível no eixo através da equação 5:

$$P_{dis} = \frac{\Delta W_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot v^3 \quad (5)$$

Porém, essa potência disponível calculada anteriormente não é totalmente transformada em energia mecânica. Uma maneira de analisarmos a eficiência desse sistema é através do coeficiente de potência.

2.4.1.2.1. Coeficiente de potência

O coeficiente de potência é uma maneira de se analisar a eficiência de uma turbina eólica de transformar a energia do vento em energia mecânica. Ele é obtido dividindo-se a potência elétrica disponível pela potência eólica de entrada, como indicado pela expressão 6:

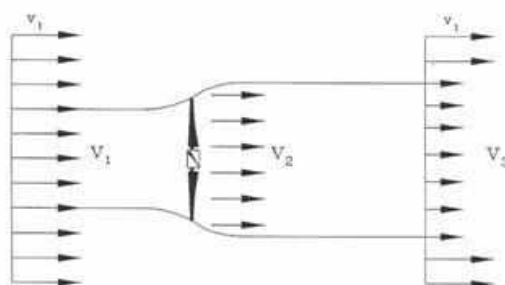
$$C_p = \frac{P_{ele}}{P_{dis}} < 0,593 \quad (6)$$

Esse valor de 0,593 nunca é alcançado, pois trata-se de um limite teórico calculado para um projeto aerodinâmico perfeito.

A potência eólica de entrada, ou a potência dissipada, foi dada pela equação 05. A questão agora é analisar a potência elétrica disponível para a turbina.

A potência que a turbina vai extrair do vento depende da velocidade que o vento vai exercer na mesma. Por isso, observe a imagem 8:

Figura 8 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito - CRESESB⁸

Como a turbina funciona como um bloqueio para os ventos, se a velocidade que o vento exerce na turbina (V_2) é menor que a velocidade incidente na mesma (V_1). Após essa passagem pela turbina, existe um vento com características turbulentas e com uma velocidade reduzida (V_3).

Assim, a potência elétrica disponível para a turbina pode ser dada pela equação 7:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (V_1^2 - V_3^2) \quad (7)$$

Onde, o fluxo da massa de ar que atravessa a turbina é dado pela equação 8:

⁸ Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=221>. Acesso em: 16 fev. 2019.

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot V2 \quad (8)$$

Onde A é a área de varredura do rotor.

Considerando que a velocidade que o vento exerce na turbina é dado pela expressão 9:

$$V2 = \frac{V1+V3}{2} \quad (9)$$

Desta forma, uma equação teórica que representa a potência elétrica disponível é dada pela equação 10:

$$Pmec = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (V1 + V3) \cdot (V1^2 - V3^2) \quad (10)$$

2.4.1.4. Rendimento de Betz

Como foi observado anteriormente, não é extraída toda a potência fornecida pelo vento, uma vez que para que isso ocorresse seria necessário que a velocidade V3 fosse nula, interrompendo o deslocamento do vento e consequentemente levando a uma potência nula. Mas, se a velocidade do vento na saída da turbina for igual a velocidade incidente ($V3 = V1$), isso significa que a potência extraída será novamente nula. Assim, a velocidade que se refere a potência máxima está entre V1 e V3 [1].

Sabe-se que quanto menor a velocidade do vento na saída, maior vai ser a potência extraída pela turbina. Porém, observando a equação 09, se a velocidade de saída cair

muito isso significa que a velocidade que o vento exerce na turbina diminui também e consequentemente a potência extraída pela turbina. Desta forma, existe um limite no qual a velocidade de saída pode diminuir de forma que a potência seja máxima. Esse limite recebe o nome de Rendimento de *Betz*.

Criado por um físico alemão, esse limite afirma que a máxima potência extraída por uma turbina eólica é igual a 59% da energia total da coluna de ar que atravessa a área varrida pelas pás. Na prática, esse rendimento fica entre 0,35 e 0,45 [1].

2.4.2. Características do local

A variação do vento com a altura do solo, também chamado de rugosidade, turbulência, presença de obstáculos, variabilidade do vento, condições marítimas, além de diversos efeitos podem influenciar no aproveitamento da energia eólica. Desta forma, antes de se instalar um aerogerador é necessário observar atentamente o local, de forma a se analisar a possível presença de algum desses fatores.

2.4.2.1. Variação do vento com a altura do solo (rugosidade)

A velocidade do vento diminui à medida que se aproxima do solo devido a fricção que ocorre entre o ar e a superfície terrestre. Somente para alturas maiores de 2 km que o solo deixa de ter influência sobre o regime de ventos. Quanto maior a rugosidade maior a influência sobre os ventos. Florestas e cidades possuem uma rugosidade muito alta, enquanto que para o mar a rugosidade é bem próxima de zero.

2.4.2.2. Turbulências

São movimentações irregulares no fluxo de ventos, de forma caótica. Ocorrem devido a uma mudança brusca da velocidade, pressão do ar ou temperatura. Além disso, áreas com grande rugosidade ou com uma grande concentração de obstáculos (como prédios e montanhas) podem influenciar na formação de turbulências.

As turbulências aumentam o esforço mecânico exigido pelos aerogeradores, aumentando assim os desgastes e podendo ocasionar possíveis rupturas na estrutura das pás.

2.4.2.3. Presença de obstáculos

A presença de obstáculos como árvores, montanhas, prédios, dentre outros, pode diminuir a velocidade dos ventos além de ser um fator importante no surgimento de turbulências.

2.4.2.4. Variabilidade do vento

A velocidade do vento está sempre variando devido a diversos fatores, como condições climáticas ou condições do local. Essa variabilidade afeta a produção energética das turbinas. Pequenas mudanças na velocidade dos ventos não tem uma forte influência sobre a turbina, uma vez que a inércia mantém as pás girando na maior velocidade. O mesmo não pode ser dito para grandes alterações de velocidade.

2.4.2.5. Condições marítimas

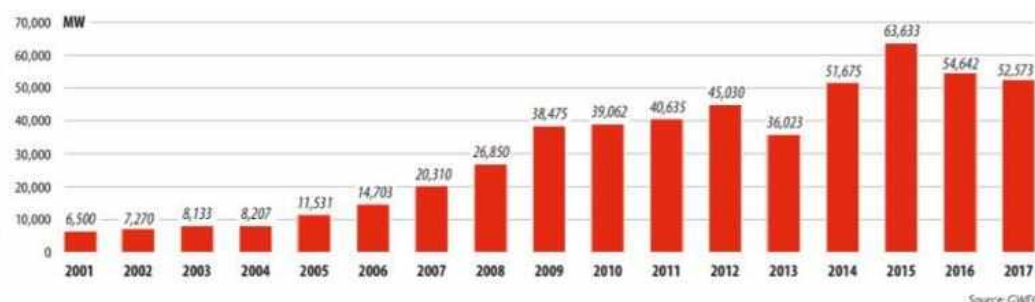
Em geral, as características do mar fornecem condições favoráveis para a instalação de usinas eólicas. Isso se dá pela baixíssima rugosidade, pouca presença de obstáculos além, é claro, da baixa existência de turbulências. Dessa forma, é de se esperar que os aerogeradores tenham maior vida útil e eficiência nesses locais. Porém, a instalações nesses locais são mais caras quando comparada com a instalação em terra.

2.5. O cenário da energia eólica

2.5.1. No mundo

Segundo os últimos dados divulgados pelo Conselho Global de Energia Eólica (*The Global Wind Energy Council – GWEC*) publicado em 2018, a capacidade mundial instalada em 2017 caiu, quando comparada ao ano anterior, como pode-se observar na figura 9:

Figura 9 - Capacidade energética relativa a energia eólica instalada entre 2001-2017 no mundo



Fonte: EcoDebate⁹

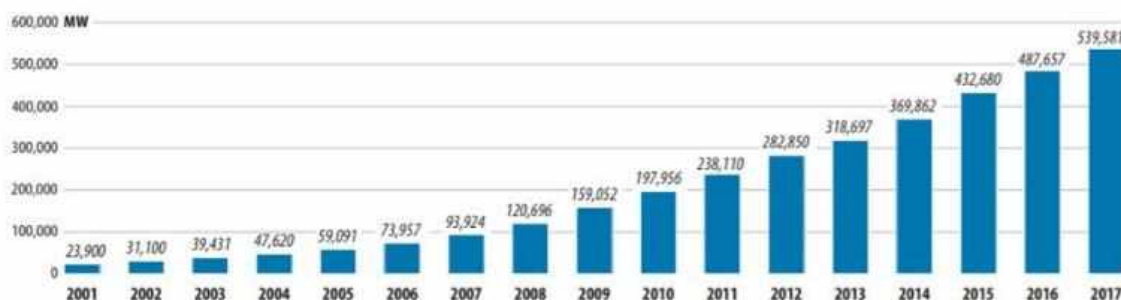
Essa queda se deu devido a diminuição de subsídios em diversos países, prejudicando assim o investimento nessa fonte de energia. Além disso, a energia eólica,

⁹ Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2018/02/19/o-crescimento-da-energia-eolica-no-mundo-em-2017-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

em grande parte dos países, está passando por uma fase de transição, onde as regras do mercado começaram a ser aplicadas.

Já a capacidade global acumulada de produção de energia eólica cresceu, como vem acontecendo desde 2001, como pode-se observar na figura 10:

Figura 10 - Capacidade acumulada de energia eólica no mundo

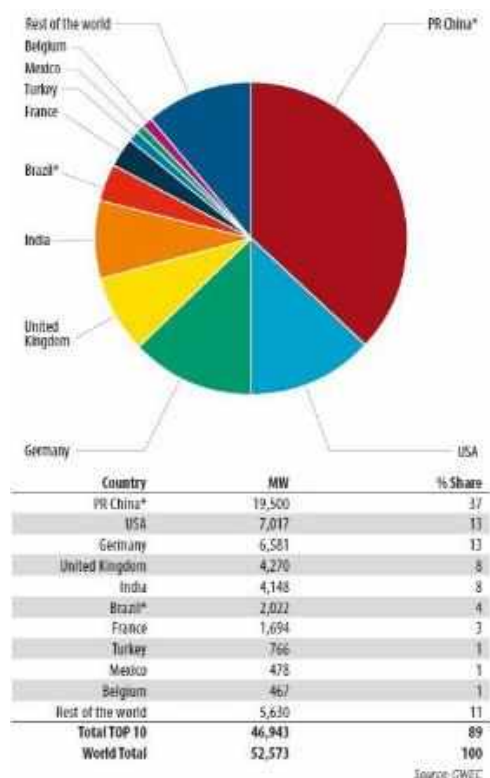


Fonte: EcoDebate⁹

O país com a maior capacidade instalada é a China com 188,2 GW de energia eólica em 2017 (aproximadamente 35% de toda a capacidade instalada mundial). Em seguida, temos os Estados Unidos com 89 GW (17% do total mundial), e boas perspectivas para o futuro uma vez que grandes empresas como *Facebook*, *Apple*, *Nike* realizaram compras corporativas de energias renováveis.

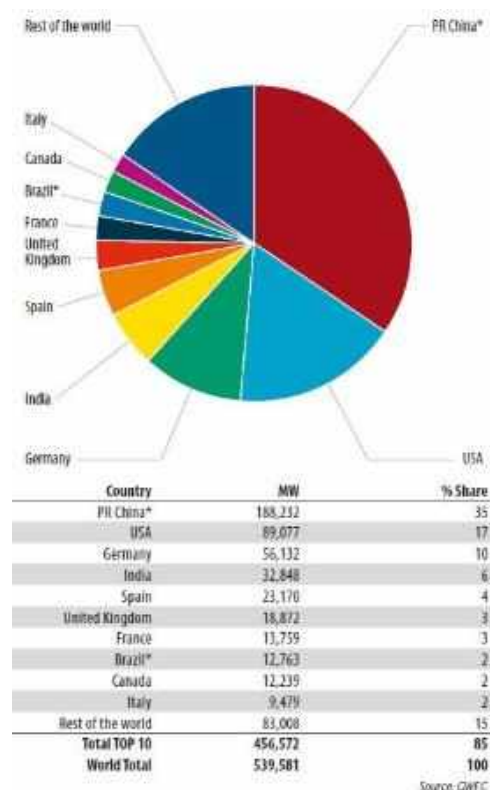
Em terceiro lugar temos a Alemanha com 56,1 GW (10% do total mundial). O *ranking* completo dos 10 países com as maiores instalações do mundo pode ser observado nas figuras 11 e 12:

Figura 11 - 10 países com maiores novas instalações



Fonte: EcoDebate⁹

Figura 12 - 10 países com maior capacidade acumulada



Fonte: EcoDebate⁹

Em conjunto, a Europa possuiu uma capacidade instalada de 169 GW, a frente dos Estados Unidos, porém ainda atrás da China.

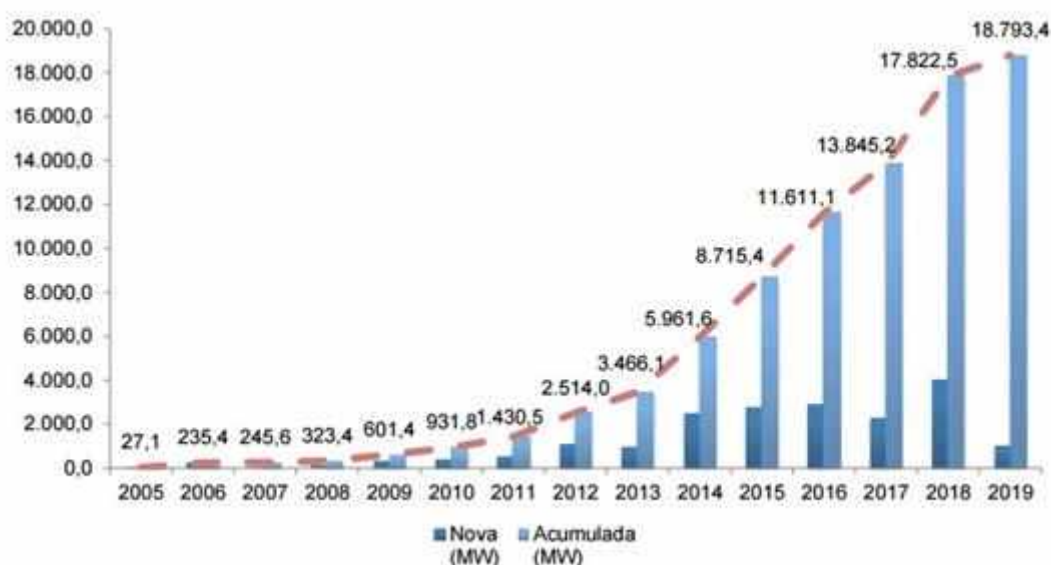
O Brasil ocupa o 8º lugar no *ranking*, com uma potência instalada igual a 12,7 GW (correspondente a 2% da potência mundial).

1.5.2. No Brasil

Apesar das crises econômicas que o Brasil vem sofrendo, em 2017 houve um aumento de na capacidade da energia eólica, como se observa na figura 13. Com mais de

500 parques eólicos instalados no país, 11% da energia brasileira é proveniente dessa forma de energia, sendo que no Nordeste essa porcentagem chega a 64% (local onde a maior parte dessas usinas estão instaladas).

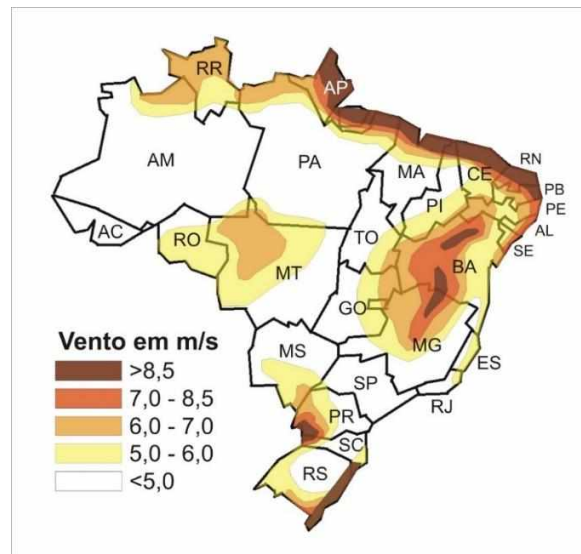
Figura 13 - Evolução da capacidade eólica no Brasil até 2019



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica)

A região Nordeste é a principal área de produção de energia eólica, devido ao seu potencial eólico, que pode ser observado na figura 14. Possuindo 135 parques, o Rio Grande do Norte é o estado que mais produz esse tipo de energia, com 3678 MW de capacidade. Em segundo lugar, temos o estado da Bahia, com 93 parques instalados e capacidade de 2410 MW. Em terceiro lugar, com 74 parques e uma capacidade de 1935 MW, temos o estado do Ceará.

Figura 14 - Velocidade do vento distribuída no Brasil



Fonte: Atlas da energia eólica no Brasil

3. Geração de energia elétrica em usinas eólicas

A energia eólica é a energia renovável mais promissora para o futuro próximo. Seu sistema e funcionamento já foram indicados anteriormente, porém existe diversos tipos de geradores que podem ser utilizados para converter a energia cinética dos ventos em energia eólica.

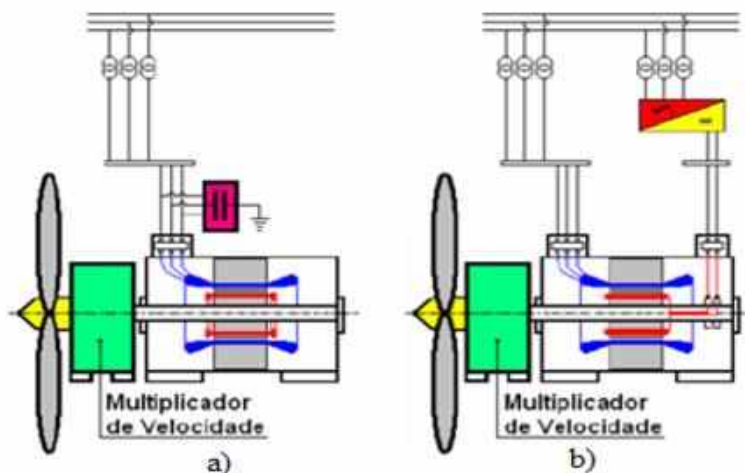
3.1. Tipos básicos de geradores

Existem dois tipos básicos de geradores que podem ser aplicados em usinas eólicas, conforme demonstrado na figura 15: gerador de indução ou gerador síncrono, sendo que normalmente o mais utilizado é o gerador de indução, uma vez que este permite uma variação de velocidade (dependendo do tipo de sistema utilizado).

O gerador síncrono tem a característica de trabalhar com rotação constante e exige que haja um sincronismo com a rede em que ele está inserido. Esses aspectos fazem com que seja considerada uma máquina mais rígida, quando comparada com a máquina de indução. Porém, um gerador de indução necessita de compensação de reativo (em alguns casos), enquanto que o síncrono compensa reativo através da sua excitação independente.

Desta forma, utiliza-se com maior frequência geradores de indução em sistemas eólicos devido as vantagens que este sistema possui, em comparação com o síncrono, como por exemplo: menor custo, possibilidade de variação da velocidade e consequentemente melhoria da eficiência.

Figura 15 – a) Gerador de indução do tipo gaiola de esquilo; b) gerador síncrono com excitação independente



Fonte: Rangel Guarabira e Bizerra de Aguiar¹⁰

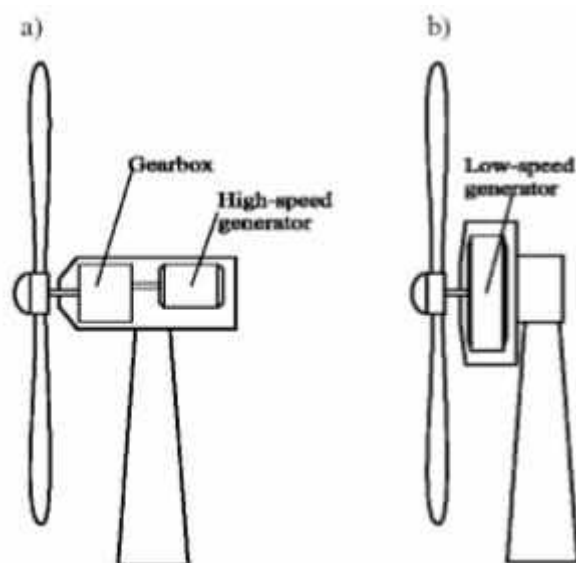
3.1.1. Geradores síncronos aplicados em usinas eólicas

Quando se trata de geradores síncronos pode-se utilizar a máquina de ímãs permanentes na configuração de acionamento direto, indicada na figura 16, onde não há o multiplicador de velocidades, reduzindo assim os custos, as perdas e as manutenções. Esse tipo de gerador é projetado para baixa velocidade e frequência e possui um ciclo de carga específico para eólica afim de se obter um máximo aproveitamento.

Porém esse tipo de gerador é mais caro e menos eficiente quando comparado a um gerador de indução, fazendo com que seja menos utilizado na construção de usinas eólicas.

¹⁰ Disponível em: < <https://cientefico.emnuvens.com.br/cientefico/article/viewFile/394/386> >. Acesso em: 27 nov. 2019.

Figura 16 - Comparação entre a) sistema eólico convencional e; b) sistema eólico com acionamento direto



Fonte: Rocha Silva¹¹

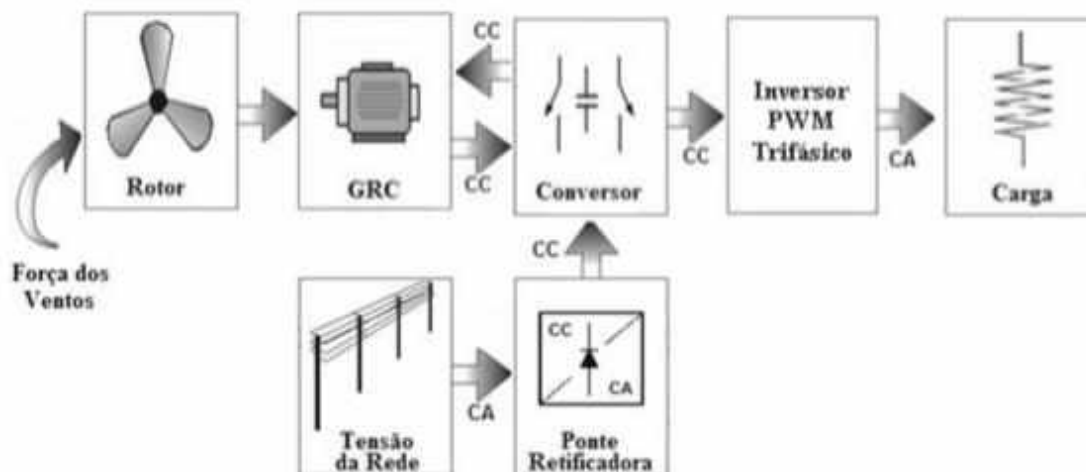
3.1.2. Gerador de relutância chaveado aplicado em usinas eólicas

Além do tipo mencionado anteriormente, pode-se usar também o gerador de relutância chaveado (GRC), que tem se tornado uma máquina muito promissora para esse tipo de aplicação, uma vez que é possível trabalhar com velocidades variáveis. É uma máquina robusta, confiável e que não necessita da caixa de câmbio para regular as velocidades, ao contrário do gerador de indução, conforme indicado na figura 17. Sua única desvantagem é o preço, que é superior quando comparado com a máquina de indução.

¹¹

Disponível em:
<http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/Pos_Tecnico/Especializacao_Energia_Eolica/Tecnologia_Aerogeradores/Apostila.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2019.

Figura 17 - Esquema de montagem de um gerador de relutância chaveado aplicado em usinas eólicas



Fonte: Coelho¹²

3.1.3. Geradores de indução aplicados em usinas eólicas

Os tipos de geradores de indução mais utilizados em sistemas eólicos são o gerador de indução de gaiola de esquilo (SCIG – em inglês Squirrel-Cage Induction Generator) e o gerador de indução duplamente excitado (DFIG – em inglês Doubly-Feed Induction Generator). A maior diferença entre esses dois tipos de geradores se deve ao fato de que SCIG é utilizado em aplicações de velocidade fixa, enquanto que DFIG é considerado para operações em velocidade variável. Desta forma todo gerador de indução que será apresentado a seguir pode ser classificado em sistema de velocidade fixa e sistema de velocidade variável.

¹² Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-21072011-101445/publico/Alexandre.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

3.1.3.1. Sistema de velocidade fixa

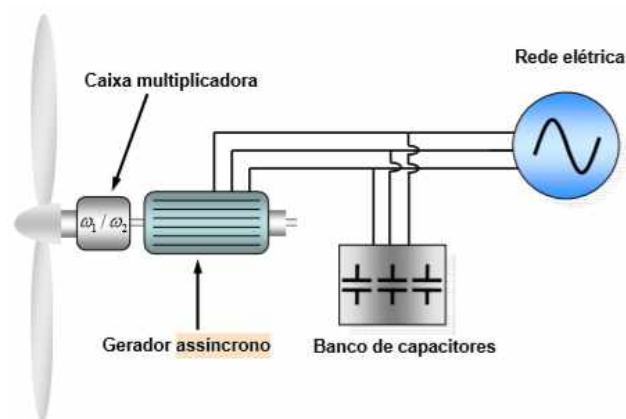
São característicos dos primeiros tipos de geradores eólicos. Neste caso, o controle de potência e otimização se dá pela variação dos ângulos das pás. Possuem construção simples, de baixo custo e manutenção, além de ter um controle fácil. Porém, a construção e o desempenho desse tipo de turbina dependem das características de circuitos mecânicos. O tempo de resposta de alguns desses circuitos é de dezenas de milissegundos. Consequentemente, cada vez que a turbina é submetida a uma rajada de vento ocorre uma variação rápida e forte da potência elétrica de saída, exigindo assim, uma rede elétrica rígida para que ocorra uma operação estável e um projeto mecânico estruturado para absorver altas tensões mecânicas. Isso torna o projeto mecânico da máquina mais caro à medida que a potência aumenta.

Além disso, esse sistema tem a característica de não trabalhar sempre no ponto ideal, diminuindo assim a eficiência do mesmo. Possui ainda como desvantagem a necessidade de se compensar o reativo e uma fraca capacidade de FRT (em inglês Fault Ride Through, que é a capacidade dos geradores elétricos para ficar conectado em curtos períodos de menor tensão da rede elétrica).

3.1.3.1.1. Geradores de indução diretamente conectados à rede

É composto pela caixa de engrenagens (ou multiplicador de velocidade), gerador de indução e bancos de capacitores para corrigir o fator de potência, conforme indicado na figura 18:

Figura 18 - Modelo de ligação de um gerador de indução diretamente conectado à rede



Fonte: Alves de Aguiar Junior¹³

Possui a característica de transmitir a rede grande parte das flutuações do vento. Não é um sistema muito adotado no Brasil.

3.1.3.2. Sistema de velocidade variável

Por ser possível realizar a variação da velocidade do rotor, através de técnicas de controle vetorial, esse tipo de sistema possui uma grande gama de velocidades que podem ser trabalhadas, permitindo assim que o controle encontre o ponto de operação ideal para que a máxima energia seja absorvida. Não é necessário realizar a compensação de reativo, além de ter uma alta capacidade de FRT e de ser um sistema adequado para altas potências.

Para conectar um sistema de velocidade variável a rede é necessário um conversor eletrônico de potência, por isso esse sistema é caracterizado por ter um controle

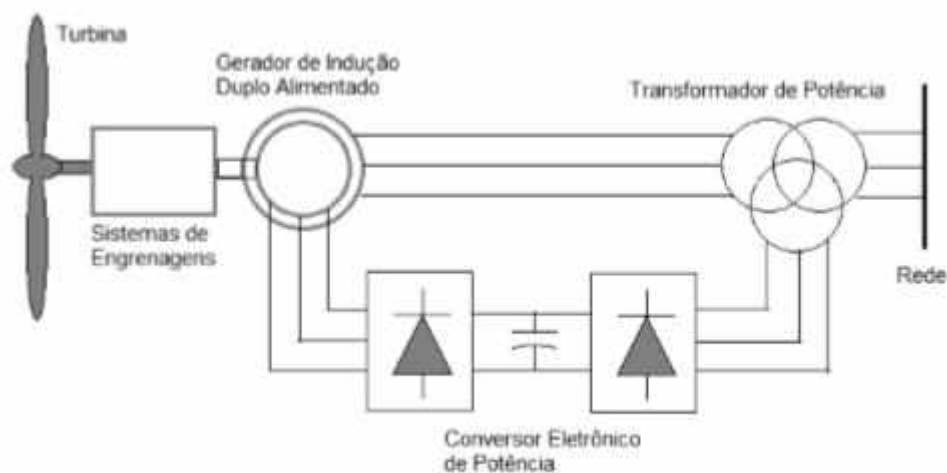
¹³ Disponível em: < <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2007-1/2007041201-2007041201/file>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

relativamente complexo e por exigir conversores maiores, e consequentemente, com um custo elevado. O uso do conversor também gera perdas adicionais para o sistema.

3.1.3.2.1. Gerador de indução duplamente alimentado

O gerador de indução duplamente alimentado é uma máquina assíncrona trifásica de rotor bobinado, onde o rotor encontra-se ligado à rede através de um conversor AC/DC/AC (em uma configuração *back-to-back*), enquanto seu estator é ligado diretamente à rede, como demonstra a figura 19:

Figura 19 - Sistema de geração eólica utilizando um gerador de indução duplamente alimentado



Fonte: Silva Junior¹⁴

Devido ao conversor, é possível que haja um fluxo bidirecional de potência no rotor, dependendo apenas da velocidade do mesmo.

¹⁴ Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012814.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2019.

As vantagens desse tipo de gerador são [2]:

- Utilização de um conversor de energia mais barato e menor, uma vez que pode-se dimensionar o conversor do rotor em aproximadamente 30% da potência nominal do sistema;
- Obtenção da potência máxima disponível pelo vento através de seu sistema de velocidade variável, pois, a máxima potência disponível pelo vento é uma razão entre sua velocidade e a velocidade do gerador;
- Menor desgastes das partes mecânicas do sistema, devido ao sistema de velocidade variável, que altera a velocidade do gerador a medida que os ventos aumentam ou diminuem. Em sistemas de velocidade fixa, o gerador sofre um desgaste maior pelo fato de que quando ocorre uma alteração da velocidade dos ventos há uma necessidade de se alterar os ângulos das pás muito rapidamente;
- Aumento da eficiência do sistema, devido as menores perdas, uma vez que geradores de indução duplamente alimentados procuram sempre trabalhar na posição de máxima potência;
- Menor custo do sistema em geral, uma vez que se utiliza uma máquina de indução de rotor bobinado com 2 ou 3 pares de polos, devido a presença de caixa redutora de velocidade (o que não acontece com alguns sistemas exemplificados anteriormente). Isso faz com que a construção da máquina fique mais barata quando comparada com sistemas que utilizam máquinas mais complexas e com mais polos;
- Controle das potências ativas e reativas através do controle do conversor, permitindo assim que o sistema opere com fator de potência unitário ou até mesmo que forneça reativo para a rede.

Entre as desvantagens:

- Necessidade de uma caixa de engrenagens, que necessita de manutenção constante e possui baixa vida útil;

- Complexidade no seu sistema de controle;
- Alta manutenção e baixa vida útil nos anéis coletores presentes no rotor do gerador.

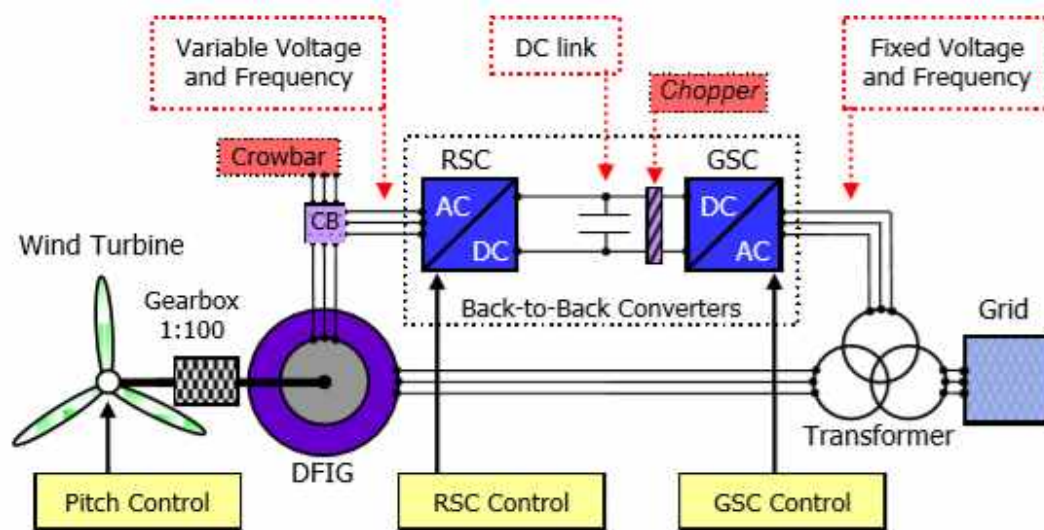
4. Funcionamento do gerador de indução duplamente alimentado

Dentre os tipos de geradores apresentados anteriormente, fica claro que o tipo mais utilizado atualmente, devido a sua quantidade de vantagens perante as demais máquinas, é o gerador de indução duplamente excitado (GIDA). Esse gerador só se tornou tão competitivo devido ao avanço da eletrônica de potência, que permitiu técnicas avançadas de controle de forma que a máquina possa trabalhar com velocidades variáveis a fim de sempre ter a maior eficiência possível independente da velocidade dos ventos.

Consiste de um gerador de indução do tipo rotor bobinado, onde o enrolamento do rotor, através de dois conversores (RSC, em inglês rotor side converter e GSC, e inglês grid side converter) ligado por um elo CC, é ligado a rede elétrica (por isso se usa o rotor bobinado, pois existe um acesso ao rotor através das escovas e anéis coletores). O RSC é responsável por regular a velocidade do rotor e controlar a quantidade de energia reativa que é inserida na rede, enquanto que o GSC regula a potência ativa que é inserida ou consumida da rede.

O estator é ligado diretamente à rede elétrica ou a um transformador, que eleva a tensão ao nível da rede. Além disso, o sistema ainda é composto por uma caixa de engrenagens, que tem como função igualar as velocidades do eixo da turbina com a do gerador; um crowbar, que é um circuito responsável por proteger o rotor em casos de picos de tensão, devido a uma falta, por exemplo; e um filtro, afim de diminuir as harmônicas inseridas na rede devido ao uso de elementos não lineares (conversores). Todos os componentes indicados anteriormente podem ser observados na figura 20.

Figura 20 - Modelo esquemático de um gerador de indução duplamente alimentado conectado a um sistema de geração de energia eólica



Fonte: B. C. Salles, Hameyer, R. Cardoso, P. Grilo, Rahmann¹⁵

4.1. Elementos que compõe o sistema de um gerador de indução duplamente alimentado

4.1.1. Máquina de indução trifásica

Pode funcionar como motor ou gerador.

O princípio de funcionamento como motor parte do pressuposto que o estator será alimentado com tensões trifásicas equilibradas (pode ser alimentado com tensões desequilibradas, porém para essa análise considera-se a rede equilibrada). Consequentemente tem-se correntes trifásicas equilibradas no rotor que geram uma força magneto motriz girante no estator. As leis do eletromagnetismo ditam que quando um condutor se movimenta com uma velocidade qualquer em relação a uma densidade de

¹⁵ Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/43336370_Crowbar_System_in_Doubly_Fed_Induction_Wind_Generators. Acesso em: 28 nov. 2019.

fluxo magnético (gerado pela força magneto motriz) surge uma tensão induzida no condutor. Para esse caso, o condutor (que é o rotor da máquina) está parado e a densidade de fluxo magnético está se movendo. Desta forma, existe uma tensão induzida no rotor e como se trata de um circuito fechado, existe também correntes circulando no rotor, gerando assim uma componente de força magneto-motriz do rotor. Assim há duas componentes de força magneto motriz, uma proveniente do estator com velocidade igual a síncrona, e uma proveniente do rotor com velocidade menor que a síncrona. Essa segunda tenta sempre alcançar a força magneto-motriz do estator, gerando um conjugado, o que faz com que o rotor gire, caracterizando assim a máquina como um motor.

Já quando a máquina funciona como um gerador, ocorre a presença de uma turbina, por exemplo, que faz o eixo do rotor se movimentar com velocidade maior que a síncrona. Da mesma maneira que foi explicado anteriormente, existe também para esse caso o estator da máquina ligado à rede, de forma a ter uma corrente no mesmo e consequentemente uma força-magneto motriz e um fluxo magnético. Pelas leis do eletromagnetismo, citadas anteriormente, há um condutor (rotor) se movimentando em relação a um fluxo magnético, gerando assim uma tensão induzida e consequentemente uma corrente e força magneto-motriz relativa ao rotor. Essa última, possui velocidade acima da síncrona, ao contrária da relativa ao estator que possui velocidade síncrona. Desta forma, a força magneto motriz do estator tenta alinhar com a do rotor, caracterizando a máquina como um gerador.

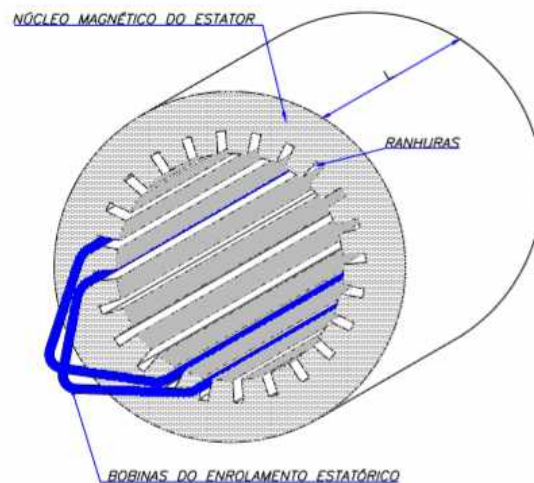
4.1.1.1. Constituição

As máquinas de indução são constituídas por duas partes principais: estator e o rotor.

4.2.1.1.1. Estator

O estator é caracterizado por ser a parte fixa da máquina. É composto por chapa de aço magnético ou silício bem finas com camadas de isolantes entre elas de forma a minimizar as correntes parasitas e o efeito da histerese. Essas chapas formam um anel com ranhuras para que os três enrolamentos do estator sejam dispostos nas mesmas, como demonstrado na figura 21. Esses enrolamentos são responsáveis por criar o campo magnético do estator.

Figura 21 - Desenho esquemático do estator de um motor de indução



Fonte: PEA 2211 – Introdução à Eletromecânica e à Automação

Os enrolamentos estão dispostos a 120° mecânicos um do outro e podem ser ligados em delta (Δ) ou estrela (Y). São alimentados por uma fonte de alimentação em corrente alternada de forma a se produzir um fluxo que atravessa o entreferro (espaço entre o estator e o rotor que para as máquinas é preenchido com ar) e o rotor. Esse fluxo é chamado de campo girante, pois gira com a velocidade síncrona (dada pela equação 11).

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (11)$$

Onde f é a frequência em Hz e P é o número de polos da máquina.

4.2.1.1.2. Rotor

O rotor é caracterizado por ser a parte móvel da máquina. É composto também por chapa de aço magnético ou silício bem finas com camadas de isolantes entre elas de forma a minimizar as correntes parasitas e o efeito da histerese. Essas chapas formam um anel onde os enrolamentos do rotor estão alojados longitudinalmente. Esses enrolamentos são responsáveis por criar o campo magnético do rotor.

Existem dois tipos diferentes de rotores para máquinas de indução: rotor bobinado e rotor gaiola de esquilo.

4.2.1.1.2.1. Rotor bobinado

O Rotor bobinado, ou rotor de anéis, é composto por um núcleo cilíndrico feito de material ferromagnético, onde na superfície existem ranhuras onde o enrolamento trifásico do rotor é alojado, conforme demonstrado na figura 22. Os terminais desses enrolamentos são conectados aos anéis coletores (por isso do nome). Através das escovas de carvão é possível ter acesso ao rotor, podendo modificar alguns parâmetros do mesmo, como a resistência. Dessa forma, o sistema anéis mais escovas permite que seja possível o acesso ao rotor mesmo que a máquina esteja em movimento.

Figura 22 - Rotor bobinado do motor de indução

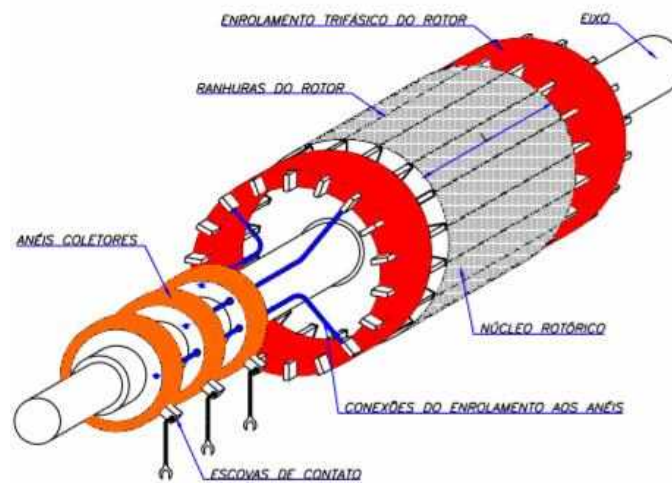


Figura 2. Rotor bobinado do motor de indução.

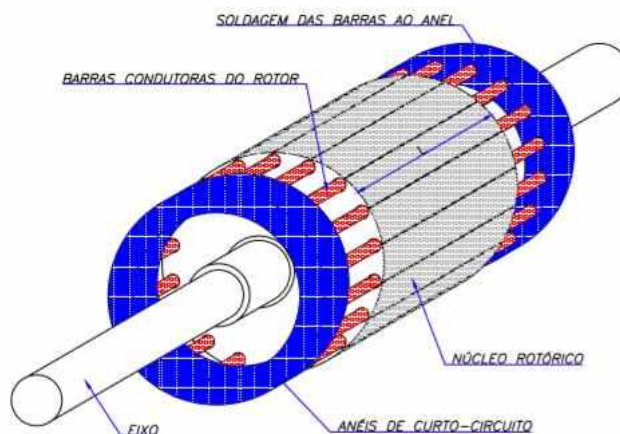
Fonte: PEA 2211 – Introdução à Eletromecânica e à Automação

4.2.1.1.2.2. Rotor em gaiola de esquilo

O Rotor em gaiola de esquilo, ou rotor em curto-circuito, também é composto por um núcleo cilíndrico feito de material ferromagnético, onde na superfície existem ranhuras onde um tipo especial de enrolamento trifásico do rotor é alojado, conforme figura 23. Esse enrolamento é constituído por barras condutoras que pode ser de cobre ou alumínio, eletricamente conectadas em cada extremidade a anéis condutores, por isso do nome gaiola de esquilo. Dessa forma, não há nenhum acesso ao rotor.

Na maior parte das aplicações industriais esse é o tipo de configuração é o mais utilizado.

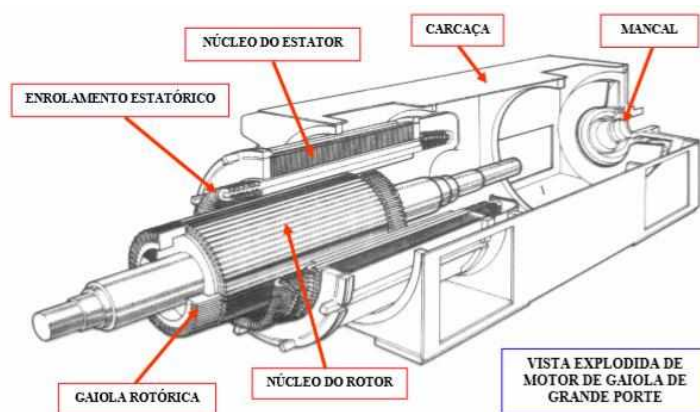
Figura 23 - Rotor em gaiola do motor de indução



Fonte: PEA 2211 – Introdução à Eletromecânica e à Automação

Independente da montagem do rotor, ele será construído dentro do estator e sustentado através de um sistema de mancais suportados na estrutura mecânica da máquina, como demonstrado na figura 24:

Figura 24 - Visão geral da construção típica de um motor de indução com rotor em gaiola



Fonte: PEA 2211 – Introdução à Eletromecânica e à Automação

4.1.2. Caixa de engrenagens

A caixa de engrenagens ou multiplicadora possui a finalidade de acoplar o eixo da turbina com o gerador, de forma que suas velocidades fiquem compatíveis, uma vez que turbinas eólicas trabalham com uma velocidade muito baixa (em torno de 20 a 150 rpm), quanto os motores funcionam com velocidades elevadas (entre 1200 e 1800 rpm).

4.1.3. Conversores AC/DC/AC

É composto por um inversor (DC/AC) e um retificador (AC/DC) ligados na configuração back-to-back.

4.1.3.1. Conversores (AC/DC)

Também conhecido como retificador, é um equipamento que transforma a tensão alternada (AC) em contínua (DC). Podem ser classificados de diversas formas:

4.1.3.1.1. Classificação de acordo com o número de fases da tensão de entrada

Podem ser monofásicos, trifásicos ou n-fásicos, dependendo do sistema onde o conversor será instalado.

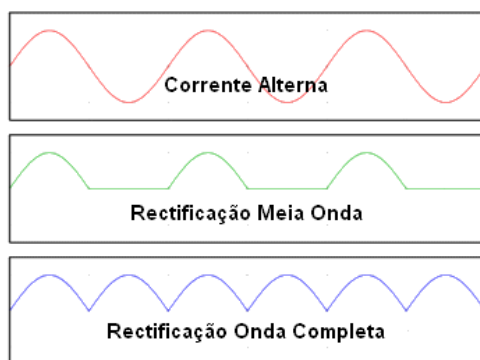
4.1.3.1.2. Classificação de acordo com a direção que a corrente pode tomar

Podem ser unidirecionais, quando a corrente somente tem um caminho a seguir, ou bidirecionais, quando a corrente pode seguir ambos os caminhos.

4.1.3.1.3. Classificação de acordo com o tipo de conexão dos elementos retificadores

Podem ser retificadores de meia onda, que permite a passagem de apenas um dos semiciclos da tensão de entrada para a saída. Enquanto que os retificadores de onda completa permitem a passagem de ambos semiciclos, porém a parte negativa do semiciclo é projetada para a parte positiva (o contrário também pode ocorrer), conforme mostrado na figura 25.

Figura 25 - comparação para a forma de onda da tensão de saída para diferentes tipos de retificadores



Fonte: Electronica PT¹⁶

¹⁶ Disponível em: < <https://www.electronica-pt.com/diodos-rectificadores>>. Acesso em: 16 jun. 2019.

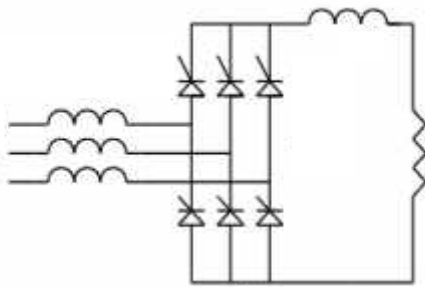
4.1.3.1.4. Classificação de acordo com a capacidade de ajustar o valor da tensão de saída

Podem ser controlados, onde é possível ajustar o valor da tensão, para isso eles utilizam diodos na sua composição. Ou podem ser não controlados, não tendo assim essa opção. Sua composição se dá através de tiristores ou transistores.

4.1.3.1.4.1. Retificadores controlados

É um retificador controlado que opera com tiristores segundo a montagem indicada pela figura 26. Esses dispositivos permitem o atraso do instante de condução através de um ângulo de disparo (chamado de ângulo α). A alteração do valor desse ângulo que permite que o conversor controle a tensão de saída do mesmo.

Figura 26 - Representação de um retificador trifásico controlado



Fonte: Módulo 2: Tiristores e retificadores controlados, FEEC - UNICAMP¹⁷

Porém, o uso de equipamentos eletrônicos como os tiristores causam um aumento significativo de elementos não lineares no sistema, se tornando assim uma fonte geradora de harmônicos nas correntes de entrada. Consequentemente, ocorre uma diminuição do

¹⁷ Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/ee833/Modulo2.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2019.

fator de potência do sistema. Essa presença de harmônicos nas correntes também ocasiona a distorção das tensões da alimentação, comprometendo possíveis equipamentos ligados a mesma. Também ocorre um aumento nas perdas, necessidade de se gerar mais reativo, diminuição do rendimento e interferências nos sistemas de telecomunicações.

A ordem harmônica a ser gerada depende do número de pulsos do conversor, sendo dada pela expressão 12:

$$H = n . k \pm 1 \quad (12)$$

Onde H indica a ordem harmônica, n é o número de pulsos do conversor e k é uma variável de 1 até infinito. Porém, quanto maior a ordem harmônica presente, menor é a sua influência sobre o sistema, pois por mais que ela exista seu valor é muito pequeno não ocasionando nenhum problema para o sistema em geral. Por esse motivo, os filtros são apenas para as primeiras ordens harmônicas, uma vez que suas magnitudes são mais expressivas. Em consequência ao grande número de harmônicos, sistemas com conversores possuem baixo fator de potência além de interferências eletromagnéticas.

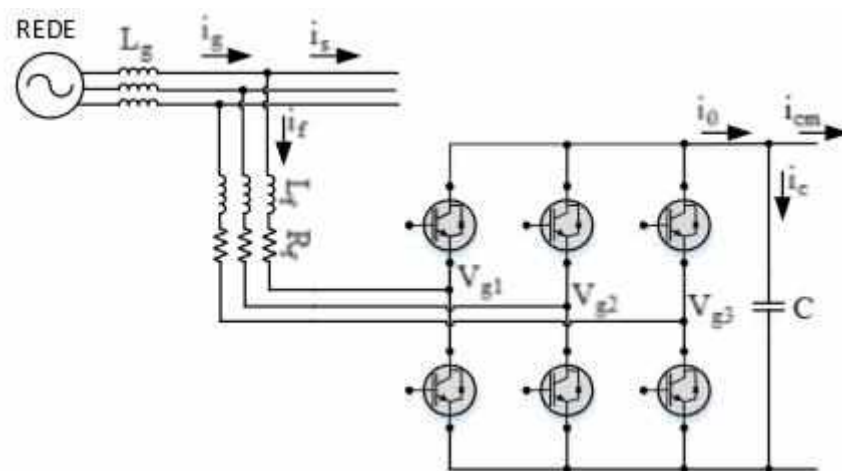
Para solucionar tais problemas, utiliza-se o conversor na operação retificador PWM.

4.1.3.1.4.1.1. Retificadores PWM trifásicos

Baseado no funcionamento do conversor *boost* CC-CC, o retificador PWM controla a corrente de saída e consequentemente as correntes drenadas da rede. Ele realiza esse controle através do acionamento de interruptores, de forma a tornar a corrente senoidal e em fase com a tensão de alimentação.

Retificadores desse tipo tem diversas topologias, dependendo da tensão da rede e a tensão CC, sendo as mais comuns as de 2 ou 3 níveis. Para tensões elevadas recomenda-se a utilização de retificadores PWM trifásicos de três níveis, uma vez que a tensão sobre as chaves será a metade da tensão CC, enquanto que os retificadores PWM trifásicos de dois níveis são utilizados para médias e baixas tensões, pois a tensão sobre os interruptores é exatamente a tensão CC. O mais utilizado para sistemas eólicos são os retificadores de 2 níveis, conforme a figura 27:

Figura 27 - Retificador PWM trifásico de 2 níveis



Fonte: ROCHA, Marco Aurélio¹⁸

Detalhe para o capacitor que mantém a tensão na carga constante e o indutor que mantém a continuidade da corrente e melhora o fator de potência.

¹⁸Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153628/rocha_ma_me_bauru.pdf?sequence=3>.

Acesso em: 18 jun. 2019.

4.1.3.2. Conversores (DC/AC)

Também conhecido como inversor, é um equipamento que transforma a tensão contínua (DC) em alternada (AC). São classificados de diversas formas:

4.1.3.2.1. Classificação de acordo com o número de fases da tensão de entrada

Podem ser monofásicos, trifásicos ou n-fásicos, dependendo do sistema onde o conversor será instalado.

4.1.3.2.2. Classificação de acordo com a direção que a corrente pode tomar

Podem ser unidirecionais, quando a corrente somente tem um caminho a seguir, ou bidirecionais, quando a corrente pode seguir ambos os caminhos.

4.1.3.2.3. Classificação de acordo com a modulação

A modulação pode ser por largura de pulso, que utiliza uma tensão de referência semelhante a tensão CA desejada para gerar um sinal triangular simétrico onde a frequência desta determinará a frequência de chaveamento.

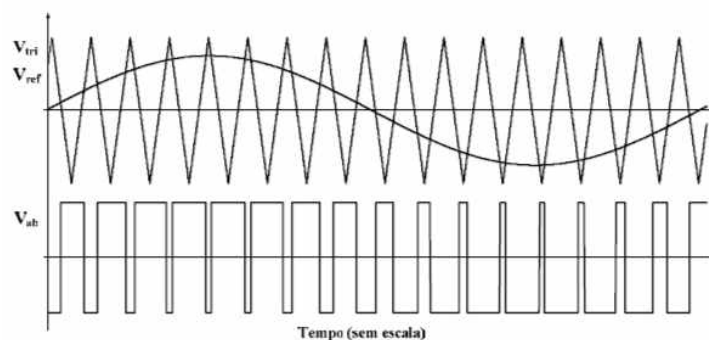
Existe também a opção de realizar uma modulação por limites de corrente, onde se utiliza a forma de onda da corrente como referência, estabelecendo os limites máximos

e mínimos desejados de forma a fazer com que o chaveamento alcance esses limites. Desta forma, o conversor atua como uma fonte de corrente.

4.1.3.2.4. Classificação de acordo com o número de níveis

Dependendo da forma que for realizada a modulação o inversor pode ser classificado em 2 níveis (positivo e negativo), 3 níveis (positivo, negativo e zero) ou multiníveis. Conversores CC-CA de 2 níveis geram uma onda de tensão de saída quadrada que varia do máximo positivo até o máximo negativo, conforme indicado pela figura 28:

Figura 28 - Forma de onda triangular referente a forma de onda senoidal da tensão de referência e forma de onda da tensão de saída do conversor utilizando uma modulação por largura de pulso e 2 níveis



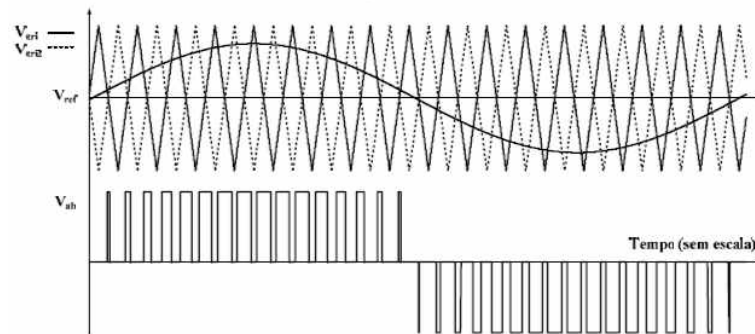
Fonte: PETRY, Clóvis Antônio¹⁹

Já um conversor CC-CA de 3 níveis vai gerar uma onda de tensão de saída quadrada que varia do máximo positivo até zero variando também até o máximo negativo, como se pode observar na figura 29:

¹⁹ Disponível em:

<http://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Eletronica_Potencia/2013_1/Apresentacao_Aula_19.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2019.

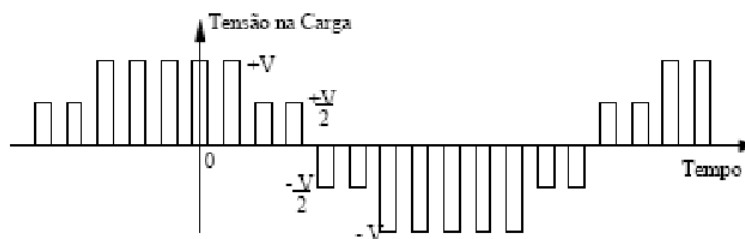
Figura 29 - Forma de onda triangular referente a forma de onda senoidal da tensão de referência e forma de onda da tensão de saída do conversor utilizando uma modulação por largura de pulso e 3 níveis



Fonte: PETRY, Clóvis Antônio¹⁴

Para um conversor multiníveis, temos que a forma de onda da tensão na carga também é quadrada, porém esta não varia apenas do valor máximo positivo até o máximo negativo, mas entre valores intermediários entre os dois. A figura 30 demonstra esse funcionamento:

Figura 30 - Forma de onda da tensão de saída do conversor utilizando uma modulação por largura de pulso e multiníveis



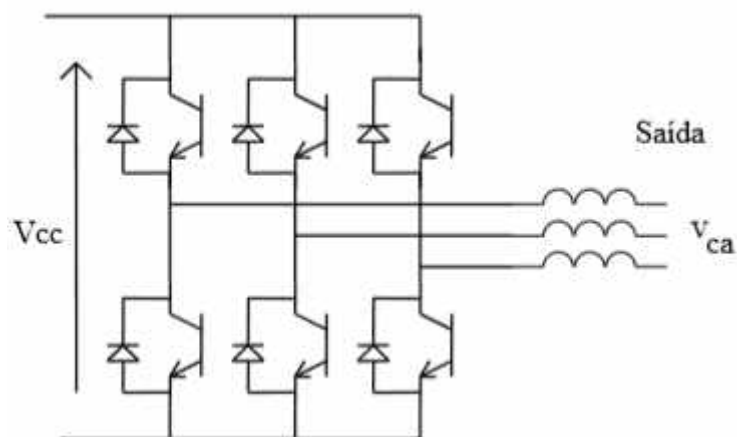
Fonte: PETRY, Clóvis Antônio¹⁴

4.1.3.2.5. Classificação de acordo com o tipo de fonte

4.1.3.2.5.1. Inversores tipo fonte de tensão

Esse tipo de inversor funciona a partir de uma tensão no lado contínuo. Assim que se tem essa tensão e dois elementos interruptores estiverem conduzindo (um da parte superior e outro da parte inferior) ocorrerá o aparecimento de uma tensão alternada no lado AC. Como a natureza dessa tensão alternada é desconhecida recomenda-se utilizar na saída do inversor indutores, a fim de se limitar a corrente do mesmo, conforme indicado pela figura 31:

Figura 31 - Inversor trifásico tipo fonte de tensão



Fonte: POMILIO, J. A.²⁰

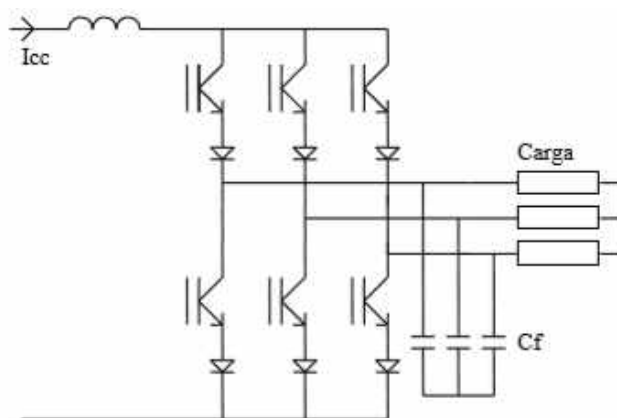
Os diodos colocados em paralelo com os elementos interruptores têm como objetivo permitir a bidirecionalidade da corrente, característica desse tipo de inversor.

²⁰ Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap5.pdf> >. Acesso em: 01 jul. 2019.

4.1.3.2.5.2. Inversores tipo fonte de corrente

Esse tipo de inversor funciona com uma fonte de corrente no lado CC (tendo assim uma indutância nesse lado para garantir o funcionamento como fonte de corrente). Dessa forma, o controle vai atuar de forma a manter essa corrente constante. Ao contrário do inversor tipo fonte de tensão, se utiliza na saída capacitores, para que ocorra uma acomodação dos valores das correntes tanto continua quanto alternada. A montagem desse tipo de inversor pode ser observada na figura 32:

Figura 32 - Inversor trifásico tipo fonte de corrente



Fonte: POMILIO, J. A.¹⁵

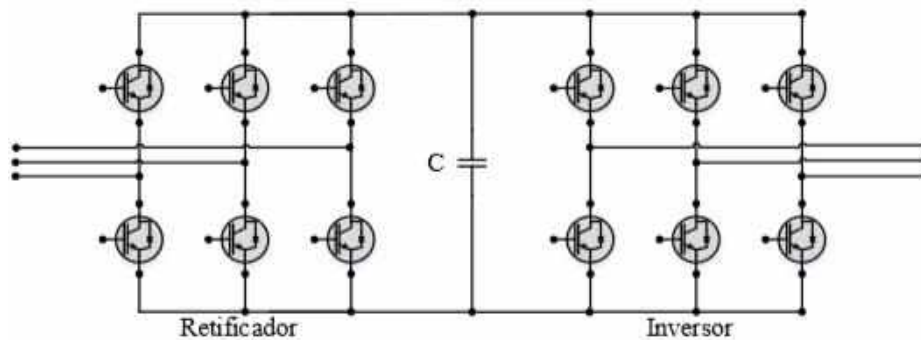
Os diodos colocados em série com os elementos interruptores têm como objetivo permitir a passagem da corrente em um único sentido, característica desse tipo de inversor.

4.1.3.3. Conversor Back-to-back

É um conversor estático bidirecional que regula os níveis de frequência e tensão a serem disponibilizados na rede. Consiste em um retificador ligado através de um

barramento CC a um inversor, como demonstrado na figura 33. Essa ligação é geralmente muito curta, uma vez que esse modelo de conversores é muito utilizado em sistemas onde a geração se dá em uma frequência e tensão diferentes da rede, necessitando assim que haja a adequação desses parâmetros antes de ser feita a ligação.

Figura 33 - Conversor Back-to-back



Fonte: ROCHA, Marco Aurélio¹³

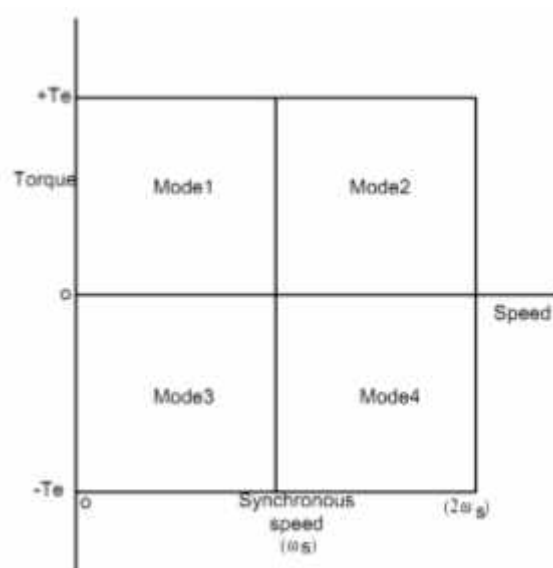
Esse tipo de montagem permite um maior controle das potências ativa e reativa, permitindo assim um alto fator de potência e bom rendimento para a rede.

Em um sistema eólico se utiliza o gerador de indução duplamente alimentado juntamente com conversor back-to-back realizando a ligação do rotor com a rede.

4.2. Modo de operação do GIDA

A máquina de indução duplamente alimentado possui quatro modos de operação, com se pode observar na figura 34: dois deles como motor e dois como gerador.

Figura 34 - Modos de operação da máquina de indução duplamente alimentada



Fonte: Luiz Guterres Vicenzi²¹

Os modos denominados 1 e 2 pela figura 34 ocorrem quando a máquina está atuando como motor, ou seja, produzindo um torque mecânico devido a entrada de energia elétrica. O motor pode operar no modo sub-síncrono (abaixo da velocidade síncrona) ou supersíncrono (acima da velocidade síncrona), porém, nenhum desses modos é objetivo de estudo desse trabalho.

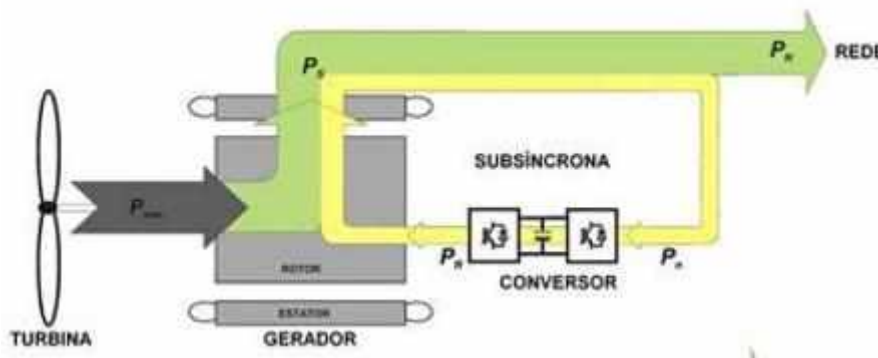
Os modos 3 e 4 referem-se a máquina trabalhando como gerador, por isso o torque é negativo, uma vez que ele necessita desse conjugado de entrada para produzir energia elétrica. Novamente, o gerador pode trabalhar no modo sub-síncrono ou supersíncrono. Isso ocorre devido aos conversores, que alteram o escorregamento da máquina a fim de modificar a velocidade do rotor a medida que a velocidade do vento varia.

²¹ Disponível em: < <http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/624/1/TCC%20André%20Vicenzi.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

4.2.1. Modo de operação sub-síncrono

Ocorre quando a velocidade do rotor é menor que a velocidade síncrona, resultando assim em um escorregamento positivo. Desta forma, o rotor consome potência ativa da rede, de forma que o RSC opera como um inversor enquanto o GSC opera com um retificador. Assim, a potência ativa total injetada na rede pelo sistema eólico é igual a potência fornecida pelo estator menos a potência requerida pelo rotor. A figura 35 ilustra o fluxo de potência que ocorre para esse modo de funcionamento:

Figura 35 - Fluxo de potência em um gerador de indução duplamente alimentado trabalhando no modo sub-síncrono

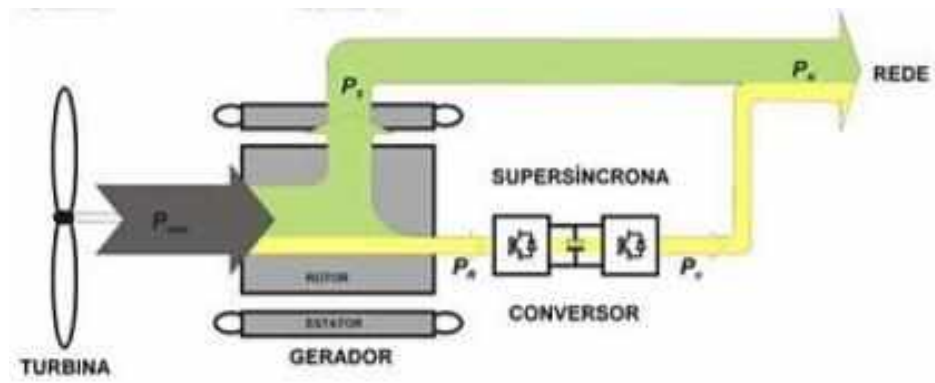


Fonte: Luiz Guterres Vicenzi¹⁶

4.2.2. Modo de operação supersíncrono

Ocorre quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona, resultando assim em um escorregamento negativo. Desta forma, o rotor fornece potência ativa da rede, de forma que o RSC opera como um retificador enquanto o GSC opera com um inversor. Assim, a potência ativa total injetada na rede pelo sistema eólico é igual a potência fornecida pelo estator mais a potência fornecida pelo rotor. A figura 36 ilustra o fluxo de potência que ocorre para esse modo de funcionamento:

Figura 36 - Fluxo de potência em um gerador de indução duplamente alimentado trabalhando no modo supersíncrono



Fonte: Luiz Guterres Vicenzi¹⁶

5. Conclusão

Vimos que tanto o Brasil quanto o mundo têm um grande potencial eólico, que é apenas aproveitado por alguns países do mundo (o Brasil não é um deles). Também se percebe que existe uma tendência desse número aumentar, uma vez que se tem preocupado cada vez mais com o meio ambiente e buscado formas sustentáveis de se gerar energia, ou no caso do nosso país, de complementar a matriz energética atual, uma vez que apenas usinas hidroelétricas não estão conseguindo suprir a demanda atual da sociedade (e a tendência é desse cenário piorar com o tempo).

Analisando os sistemas eólicos atuais, percebe-se que há diversas formas de se montar uma usina eólica. Pode-se escolher entre diversos tipos de turbinas, motores, ligação do motor com a rede, se o sistema será ligado à rede ou se será isolado, entre outras características. Porém, o sistema mais usado atualmente no Brasil e no mundo é composto por turbinas de eixo horizontal ligada ao gerador de indução duplamente alimentado por uma caixa de engrenagens. Já o gerador, está ligado à rede através de um conversor *back-to-back*. Uma vez que, como foi explicado anteriormente, esse é o sistema mais eficiente no momento. Com os constantes estudos e desenvolvimento de novas tecnologias esse sistema tende a se tornar obsoleto e novas formas de se gerar energia através dos ventos vão surgir.

Como possíveis trabalhos futuros sugere-se a realização de simulações computacionais de forma a confirmar as conclusões obtidas nesse trabalho. Para tais simulações pode-se utilizar a plataforma do *Simulink* presente no *software MATLAB*.

6. Referências

- [1] *ENERGIA EÓLICA*. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_3.PDF>. Acesso em 03 de março de 2019.
- [2] VICENZI, André Luís Guterres. *Simulações de um gerador de indução duplamente alimentado frente a afundamentos de tensão*. 2013. 115f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pampa, Bagé – RS, 2013.
- [3] VOLTOLINI, Hélio. *Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos*. 2007. 157f. Dissertação de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2007.
- [4] JUNIOR, Samuel Souza da Silva. *Avaliação da resposta dinâmica de diferentes tecnologias de aerogeradores*. 2015. 101f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2015.
- [5] ROCHA, Marco Aurélio. *Modelagem e controle de gerador de indução duplamente alimentado par estudo de sistema de geração eólica*. 2018. 157f. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru – SP, 2018.
- [6] BARBI, Ivo; NOVAES, Yales Rômulo de; SOUZA, Fabiana Pöttker de; BORGONOVO, Deivis. *Retificadores PWM trifásicos unidirecionais com alto fator de potência*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2002.
- [7] BORGONOVO, Deivis. *Análise modelagem e controle de retificadores PWM trifásicos*. 2005. 274f. Dissertação de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2005.
- [8] SOARES, Leonardo T. F.; PIMENTA, Caio M.; JUNIOR, Seleme I. S.; SILVA, Selênio R. *Modelagem e controle de um conversor back-to-back para aplicação em*

geração de energia eólica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG.

[9] GUIMARÃES, Angela Cristina de Souza Leitão. *Estratégias de controle de sistemas de geração eólica com máquinas de indução*. 2003. 111f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2003.

[10] PEREIRA, Marcello Monticelli. *Um estudo do aerogerador de velocidade variável e sua aplicação para fornecimento de potência elétrica constante*. 2004. 98f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG, 2004.

[11] GUARABIRA, Gabriela Rangel; AGUIAR, Luiz Bizerra de. *Aspectos básicos sobre a máquina assíncrona no uso da geração de energia eolioelétrica*. Fortaleza, 2018.

[12] NETO, Antonio Samuel. *Análise e controle de centrais eólicas a velocidade variável utilizando ATPDraw*. 2005. 139f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2005.

[13] ROSA, Diogo Martins; BOLSON, Marco Antonio; MORAES, Luiz André Motta de. *Comportamento dos geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas de 1,5 MW*. 2013. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2013.

[14] SILVA, Leonardo Adolpho Rodrigues da. *Controle do gerador de indução duplamente excitado para redução do flicker proveniente de oscilações de potência da fonte primária*. 2005. 147f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2005.

[15] JARDIM, Andrei Silva. *Utilização de máquina de indução duplamente alimentada sem escovas (BDFM) como gerador eólico*. 2014. 62f. Trabalho de

Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2014.

[16] SILVA, Selênio Rocha. *Tecnologia em aerogeradores*. 2013. 58f. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2013.

[17] COELHO, Alexandre. *Simulação, projeto e teste de um gerador a relutância chaveado trifásico 6 x 4*. 2011. 152f. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2011.

[18] ZOU, Yu. *Induction Generator in Wind Power Systems, Induction Motors - Applications, Control and Fault Diagnostics*, Raul Igmarr Gregor Recalde, IntechOpen, DOI: 10.5772/60958. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/induction-motors-applications-control-and-fault-diagnostics/induction-generator-in-wind-power-systems>.

[19] REIS, Joana Magda Vaz da Silva. *Comportamento dos geradores eólicos síncronos com conversores diante de curtos-circuitos no sistema*. 2013. 168f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2013.

[20] JUNIOR, Edisio Alves de Aguiar. *Análise básica de operação do gerador de dupla alimentação para aproveitamento eólico*. 2007. 98f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2007.

[21] SALLES, Maurício B. C.; HAMEYER, Kay; CARDOSO, José R.; GRILO, Ahda P.; RAHMANN Claudia. *Crowbar System in Doubly Fed Induction Wind Generators*. 2010. DOI: 10.3390/en3040738.

[22] MÜLLER, S.; DEICKE, M.; W. Rik. *Doubly fed induction generator systems for wind turbines*. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002.

[23] PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. *Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 3, Maio de 1996.

[24] SCHULZ, S.; DOEBBELIN, R.; LINDEMANN, A. *Investigation of coupling of EMC disturbances in doubly fed induction generators. PIERS Proceedings*, Moscou, Rússia, 2009.

[25] KAMMOUN, Soulaymen; SALLEM, Souhir; KAMMOUN, Mohamed Ben Ali. *Behaviour assessment of DFIG based wind turbine generator while coupling to the grid using a new and practical connection technique. 6th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2015.

[26] EZZAT, Marwa; BENBOUZID, Mohamed; MUYEEN, Sm; HARNEFORS, Lennart. *Low-voltage ride-through techniques for DFIG-based wind turbines: state-of-the-art review and future trends. IEEE IECON 2013*.