



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO  
DUPLAMENTE ALIMENTADA COMO GERADOR  
EÓLICO**

**Autor: Sérgio Thadeu Tavares da Silva Junior  
Orientador: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da Silva**

**Brasília, DF  
2017**



**SÉRGIO THADEU TAVARES DA SILVA JUNIOR**

**Estudo da máquina de indução duplamente alimentada como gerador eólico**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Dr. Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da Silva

**Brasília, DF  
2017**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Junior, Sérgio Thadeu Tavares da Silva.

Estudo da máquina de indução duplamente alimentada como gerador eólico / Sérgio Thadeu Tavares da Silva Junior.

Brasília: UnB, 2017. 51 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Flávio Henrique  
Justiniano Ribeiro da Silva

1. Gerador. 2. Máquina. 3. Indução

I. Silva, Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da Silva. II. Doutor.

CDU Classificação



## **ESTUDO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA COMO GERADOR EÓLICO**

**Sérgio Thadeu Tavares da Silva Junior**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 14/12/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr.: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da Silva, UnB/FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dr.: Guillermo Alvares Bestard, FT/UnB**  
Membro Convidado

---

**Engenheiro Anderson Araújo de Santana, EBSEH/HUB**  
Membro Externo

Brasília, DF  
2017

Este trabalho é dedicado a Deus

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças para continuar mesmo quando pensei em desistir. Agradeço aos meus pais, Sérgio e Alcimara, a minha irmã Lucymara, aos meus avós, em especial ao meu avô, Antônio Tavares da Silva, que cumpriu sua missão aqui na terra como um pai para mim e próximo à data da minha defesa nos deixou. Estes sempre se dedicaram e me incentivaram para que eu estudasse e alcançasse os meus sonhos. Agradeço a minha namorada, que nos momentos mais difíceis da minha graduação pôde ser um conforto para mim. Agradeço aos meus amigos e a todos os professores que até aqui contribuíram para o meu ensino e em especial ao professor Flávio Henrique, que como orientador e docente, foi excepcional e foi bastante compreensivo e incentivador para mim, principalmente em um momento difícil da minha vida que foi a perda do meu avô. Nele posso ver a dedicação em ensinar e o prazer em sua profissão, o que me motivou bastante para escrever este trabalho.

“O segredo da sabedoria, do poder e do conhecimento é a humildade.”  
(Ernest Hemingway)

## RESUMO

Com a chegada de novas tecnologias voltadas para geração de energia, a corrida para a realização de inovações permitiu que a sociedade tivesse uma melhor qualidade energética disponível, o que implica em um melhor desenvolvimento social e econômico no mundo. Vê-se que os geradores eólicos são implantados cada vez mais em regiões ótimas de ventos. Com isso é possível que haja uma maior preocupação no estudo de estratégias de controle operacional das turbinas. Neste trabalho busca-se avaliar o funcionamento do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA), o qual permite dá ao sistema uma estabilidade de frequência mesmo quando esse é submetido às variações de velocidades inesperadas. Assim, ainda, tendo a presença de distúrbios essa tecnologia permite manter e restaurar o equilíbrio, evitando desta maneira que haja desbalanços nas unidades que dizem respeito à geração e à carga, preservando, desta forma, a estabilidade da frequência, um bom funcionamento e a obtenção de uma boa qualidade de energia.

**Palavras-chave:** Geração de energia. Qualidade energética. Geradores eólicos. GIDA.

## ABSTRACT

With the arrival of New Technologies aimed at Power Generation , a race to Innovation Realization That allowed the company had a Best Power Quality Available , Which implies the Best Economic and Social Development in the World . It is seen that the wind generators are increasingly deployed in regions of great winds. Thus there may be a greater concern in the study of operational control strategies of the turbines .In this work we seek to evaluate the performance of Doubly Fed Induction Generator ( DFIG ) , which allows the system gives a frequency stability even when it is subjected to variations in unexpected speeds. So also with the presence of this technology disorders allows to maintain and restore the balance, thus avoiding that there are imbalances in the units concerning the generation and load, thus preserving, frequency stability , a good operation and obtaining a good quality of energy.

**Keywords:** Power generation. Energy quality. Wind Turbines. DFIG.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Potencial eólico brasileiro.....	14
Figura 2 - Evolução da demanda de energia e da taxa.....	16
Figura 3 - Evolução da estrutura da oferta de energia.....	17
Figura 4 - Espectro das energias renováveis na matriz elétrica.....	18
Figura 5 - Tabela comparativa das gerações de fonte de energia.....	18
Figura 6 - Representação do crescimento da geração eólica.....	19
Figura 7 - Fluxo de potência eólica anual.....	21
Figura 8 - Porção de ar que atravessa o rotor.....	25
Figura 9 - Caminho do fluxo de ar.....	26
Figura 10 - Representação do limite de betz.....	27
Figura 11 - Curva de CP.....	28
Figura 12 - Esquemático de uma turbina .....	29
Figura 13 - Fluxo deslocado do perfil da pá no stol.....	30
Figura 14 - Curva de potência em função da velocidade do vento no stol.....	31
Figura 15 - Fluxo colado ao perfil da pá no controle de passo.....	31
Figura 16 - Curva de potência em função da velocidade do vento no passo.....	32
Figura 17 - Anemômetro.....	33
Figura 18 - Esquemático do GIGE.....	33
Figura 19 - Esquemático do GSRB.....	34
Figura 20 - Esquemático do GIDA.....	35
Figura 21 - Esquemático da Máquina de Indução.....	36
Figura 22 - Esquemático de um GIDA conectado à rede.....	37
Figura 23 - Fluxo das potências no sistema GIDA.....	38
Figura 24 - Potências elétricas do rotor, estator e do eixo.....	39
Figura 25 - Diagrama do sistema GIDA.....	42
Figura 26 - Gráfico de velocidade do vento em função do tempo.....	43
Figura 27 - Gráfico de geração de Potência Ativa em função do tempo.....	43
Figura 28 - Gráfico de geração de potência Reativa em função do tempo.....	44
Figura 29 - Gráfico de variação de ângulo das pás em função do tempo.....	44
Figura 30 - Diagrama do sistema GIGE.....	45
Figura 31 - Gráfico de velocidade do vento em função do tempo.....	45
Figura 32 - Gráfico de geração de Potência Ativa em função do tempo.....	46
Figura 33 - Gráfico de geração de Potência Reativa em função do tempo.....	46
Figura 34 - Gráfico de variação de ângulo das pás em função do tempo.....	46

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 REGIME DE VENTO NACIONAL.....	13
1.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	14
1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO.....	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	22
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>23</b>
2.1 TURBINA EÓLICA.....	24
2.2 CONTROLE DE STOL E DE PASSO.....	30
2.2.1 CONTROLE DE STOL.....	30
2.2.2 CONTROLE DE PASSO.....	31
<b>3 CONFIGURAÇÕES DE GERADORES EÓLICOS.....</b>	<b>32</b>
3.1 GERADOR DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO – GIGE.....	33
3.2 GERADOR SÍNCRONO DE ROTOR BOBINADO – GSRB.....	34
3.3 GERADOR DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO – GIDA.....	34
<b>4 SISTEMA DE CONTROLE DO GIDA .....</b>	<b>36</b>
4.1 MODELO MATEMÁTICO.....	39
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>6 LIMITAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>48</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista o avanço do desenvolvimento sustentável é importante que a preocupação ambiental seja levada em consideração para que futuramente os problemas existentes nessa área sejam minimizados e possivelmente controlados. Tem – se visto, atualmente, que os estudos sobre novas tecnologias no âmbito energético têm surgido e com isso o aproveitamento de novas fontes menos hostis à natureza estão sendo valorizadas. No Brasil, vale ressaltar que a matriz energética é bastante diversificada, porém, as energias: eólica e solar ainda precisam receber mais investimentos para que de fato apresentem maiores efeitos no cenário energético nacional (GORINI,2007).

Dentre as fontes de energia da matriz brasileira, a que mais se destaca é a proveniente das hidroelétricas, em virtude do potencial energético apresentado nas disposições hídricas do país, ressaltando- se que esta forma de obtenção energética é a que apresenta melhor relação custo-benefício. Em seguida tinha-se a energia proveniente das Termelétricas e isto fez surgir o interesse em constituir uma matriz mais diversificada e que gerasse menos impactos negativos ao meio ambiente e menos crise no setor energético. No ano de 2009 se teve o primeiro leilão de energia eólica, tendo no momento o Rio Grande do Norte com a maior produção. O Brasil é um país de extensão continental e possui a 5ª maior população mundial, o que faz com que a demanda por energia seja especialmente relevante, especialmente considerando a relevância política e econômica que o país exerce não só a nível regional – visto pelos blocos de integração econômica e prominência política na América do Sul – mas também a nível mundial, dado que o Brasil têm se firmado como uma das principais economias dias “emergentes” na última década.

À luz dessas constatações acerca da importância econômica do Brasil, o gerenciamento eficiente da matriz energética é de suma relevância para a sustentação das atividades produtivas. O potencial hidrográfico do Brasil figura-se como uma das mais abundantes do mundo, o que constitui em uma vantagem destacada em relação a outros países; ademais, torna natural a escolha pela geração hidroelétrica. Conforme discorrido por Goldemberg e Moreira (2005), o potencial energético do Brasil favorece a adoção de usinas hidroelétricas; e mesmo sobre um prisma exclusivamente econômico, pensando na rentabilidade e na praticidade, a escolha majoritária por geração hidroelétrica se mostra adequada. Ainda segundo Goldemberg e Moreira (2005), a abundância de água ainda não é condição suficiente para uma geração eficiente de energia, de modo que a política energética precisa antes levar em consideração os

custos que essa escolha acarreta - com destaque para a construção das usinas, a alocação da comunidade local, e em especial os impactos ambientais subjacentes.

Mesmo com toda a infraestrutura existente para hidroeletricidade, não se deixa de observar que investimentos têm sido feitos para o uso de energias alternativas, aproveitando outros recursos advindos da natureza e que têm um papel importante para desenvolvimento econômico-social de uma localidade, não deixando de citar que isto contribui para a redução dos gases complicadores do efeito estufa (GORINI, 2007).

Conforme abordado por Cervo e Lessa (2014), a inserção do Brasil nas agendas de negociação multilateral e sua consolidação enquanto *global player* passa muito pela riqueza de seus ecossistemas e, principalmente, no modo como estes são geridos. Analogamente, a negligência dessa gestão fez com que o país perdesse prestígio no cenário internacional: ao priorizar o chamado “pragmatismo ornamental”, o Brasil perdeu sucessivas oportunidades para tomar a liderança em assuntos de governança global, dentre os quais se destaca a questão ambiental. A cúpula do Rio+20, realizada em 2012, não discutiu com contundência assuntos relativos à transição da matriz energética para fontes renováveis, tampouco fez cobranças efetivas aos maiores poluidores, como China e EUA, de modo que o destaque do Brasil em relação a esse aspecto não foi plenamente promovido para uma escala global, fato que, aliado às turbulências políticas recentes do Brasil, fez com que a política externa do país observasse um período de “declínio”.

Ainda em função da relação entre meio ambiente, matriz energética e economia, Vichi e Mansor (2009) discutem a inteligibilidade entre essas três dimensões, enfatizando no caráter intrinsecamente esgotável do uso de combustíveis fósseis, as quais ainda são a principal escolha da matriz energética global, mas que, além de não serem renováveis, são o principal constituinte das emissões de gases do efeito estufa, contribuindo assim decisivamente para o agravamento da poluição ambiental no planeta. O artigo destaca a participação do Brasil nessa agenda mundial, exercendo papel de liderança e apresentando números notáveis: Em 2009, 46% da matriz energética brasileira era composta por fontes renováveis – tais como a força hidroelétrica – enquanto que o número médio para os demais países era de apenas 12%. Aliando aos fatos previamente elucidados em relação à extensão territorial do Brasil, ao tamanho da população do Brasil e à importância geopolítica do Brasil nos últimos anos, observa-se que a discussão acerca de fontes de energia renováveis é de suma importância, tanto para aspectos práticos como acadêmicos, o que reforça a relevância do presente trabalho.

No âmbito das energias alternativas e convencionais, ao se analisar a energia eólica, percebe-se que esta tem apresentado um crescimento não só nacional, mas também mundial,

ainda que apresente altos custos relativos a sua implantação, esta terá uma significativa importância no futuro da matriz energética. Essa discussão será conduzida com cuidado na seção acerca do referencial teórico.

Do aspecto de aplicabilidade em regiões de maior potencial, vê-se que investimentos para esta área têm sido feitos de forma expansiva e isto tem gerado políticas públicas e formas de incentivos que criam mercados propícios para o surgimento de indústrias eólicas com o aprimoramento de tecnologias e até mesmo surgimento de inovações destas, gerando melhores rendimentos e menores custos. No Brasil, não se há uma observação de uma expressiva competitividade da eólica com outras energias, porém, em outros países isto é verificado (GORINI, 2007).

Este artigo trata dos fundamentos teóricos existentes no processo de conversão da energia dos ventos, cinética, em energia mecânica, rotacional no eixo dos aerogeradores, analisando as partes: Potencial dos ventos e controle da frequência de um Gerador de Indução Duplamente Alimentado- GIDA para uso em velocidades variáveis (FERREIRA, 2009).

É sempre importante se considerar a aplicabilidade de materiais confiáveis e de menor custo, não deixando essa de ser eficiente. Para a geração de energia eólica é importante ter noção que as três tecnologias mais comumente empregadas nesta forma de geração são: Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (GSRB), Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (GIGE) e Gerador de Indução Duplamente Alimentada (GIDA) (FERREIRA, 2009).

Por apresentar vantagens no que diz respeito às outras configurações, o GIDA se destaca neste estudo, pois permite o controle de velocidade com o uso de um conversor eletrônico comunicado ao rotor, que tem uma potência nominal menor quando comparada ao gerador como um todo (JARDIM, 2014). Assim, a máquina de indução duplamente alimentada é empregada em geradores eólicos, pois apresenta uma qualidade de proteção melhor quando se trata do controle de seu funcionamento com as variações do vento na localidade.

## 1.1 REGIME DE VENTO NACIONAL

Assim, com o intuito de se fazer uma análise do regime de ventos no Brasil, buscou-se informações e com isso foi constatado que o território nacional apresenta pouca oscilação da velocidade de seus ventos, isto favorece os estudos de quantificação, futuros, quanto ao volume de geração que poderá ser produzido (JARDIM, 2014).

Um aspecto importante que pode ser notado no uso da energia eólica é que mesmo em período de estiagem de chuvas, a velocidade dos ventos costuma ser maior e de forma

harmônica pode atuar com as usinas hidrelétricas, permitindo assim, uma curva de energia elétrica sempre em um patamar suficiente para o abastecimento elétrico nacional (ANEEL, 2008).

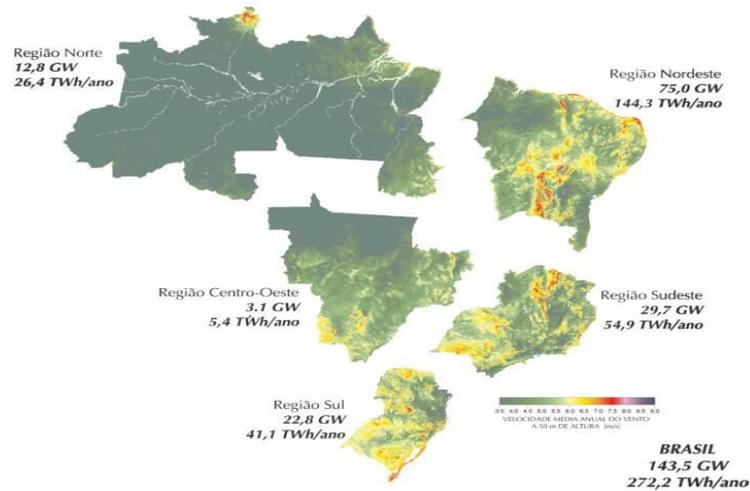


Figura 1 – Potencial eólico brasileiro. Fonte – EPE, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2007.

Ao se analisar o mapa eólico, vê-se que a região de maior potencial se encontra no nordeste com cerca de 144,3 TWh/ano. Em segundo vem a região Sudeste 54,9 TWh/ ano, mas por outro lado a região Centro – Oeste com 5,4 TWh/ano vem em último lugar. Nessa região tem-se implantados diversos parques eólicos. Os diversos investimentos têm proporcionado avanços no setor eólico e incluindo cada vez mais, mesmo que em menor escala, esta energia na matriz energética brasileira.

A geração de energia elétrica através de turbinas eólicas só se dá a partir de uma velocidade de no mínimo 2,5 m/s, tendo em vista que em um valor abaixo deste não se justificaria o aproveitamento da energia dos ventos. Segundo Runcos et al (2000), as turbinas têm sido projetadas para dar partida com ventos dentro de 2,5 a 4,0 m/s e estarem em uma zona de trabalho com ventos entre 12,0 até 25,0 m/s. Neste espectro é importante se considerar o uso de controle de potência, o que depende do modelo da turbina, mas pode ser por Stoll e Controle de Passo. Acima desses valores de velocidades a turbina é desligada, seria uma zona de segurança, também, chamada de cu-out.

## 1.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Um fator importante para a determinação de um planejamento energético futuro de um país é saber a disponibilidade de recursos naturais existentes. O quadro de geração e consumo

estabelecido para longos prazos têm sido instrumentos de competitividade entre os países, pois a garantia da segurança energética dos anos futuros acaba sendo fundamental quando o assunto é avanço econômico e social (GORINI, 2007).

Segundo estudo econométrico de Shafiee e Topal (2009), a urgência em relação à substituição dos combustíveis fósseis é bem maior que o que a comunidade internacional, em média, está pronto a reagir: os estudiosos apontam que os combustíveis fósseis estarão completamente esgotados no ano de 2112; mais preocupante ainda é o fato de o petróleo e o gás natural terem uma “validade” ainda menor, de modo que, a partir do ano de 2042, apenas o carvão estará disponível em larga escala. Como é bem sabido, o carvão é significativamente mais poluente que o petróleo ou o gás natural, o que enfatiza mais uma vez a importância da transição para fontes renováveis. Conforme discutido, os números favoráveis que o Brasil apresenta nesse quesito fazem dele uma referência mundial, e também fornecendo subsídios para a relevância acadêmica e prática deste trabalho.

Além disso, é válido ter-se a associação desses parâmetros com o avanço tecnológico, pois os processos de geração e distribuição de energia são dinâmicos, podendo assim atuar como fator de mutabilidade do cenário econômico, tendo em vista, fontes que em um determinado período são caras para serem implantadas ou até mesmo poluentes, e em um próximo instante, estas podem se tornar competitivas, ao ponto de inverterem a lógica do momento atual, sendo assim, mais rentáveis e mais exploradas (BUENO, 2013).

No mundo, os países mais industrializados, desde os primórdios da revolução industrial, utilizaram o carvão como fonte principal de geração, pois nesses locais vê-se maior concentração desta matéria prima, mesmo sendo poluidor. O Brasil apresenta características diferentes desses, tem uma disponibilidade maior de recursos naturais e se coloca em posição de destaque neste aspecto. Para compreender a matriz energética nacional é importante entender o processo de demanda de energia e a taxa de crescimento econômico.

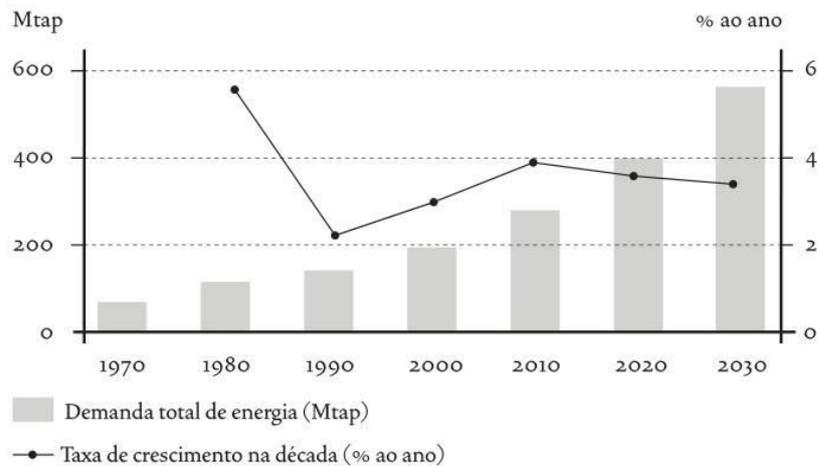


Figura 2 – Evolução da demanda de energia e da taxa de crescimento econômico do Brasil de 1970 a 2030. Fonte: EPE, 2007.

De acordo com o gráfico da Empresa de Pesquisa Energética – EPE tem-se apontado um crescimento significativo nos próximos anos de demanda energética ao passo que a taxa de crescimento de oferta interna de energia diminui. Isto se dá graças a maior eficiência energética tanto da demanda quanto da oferta (GORINI, 2007). Esta linha de raciocínio leva-se a ter o entendimento de que a matriz brasileira, também, foi modificada e antes o petróleo e a lenha correspondiam a 78% do consumo, já em 2000 se era possível observar que três fontes correspondiam a 74% de um consumo já superior ao anterior com a inserção da energia hidráulica e também das energias renováveis e para 2030 verificou-se que a matriz estaria mais dividida e as fontes alternativas estariam ocupando um lugar de destaque junto ao petróleo, carvão mineral e seus derivados.

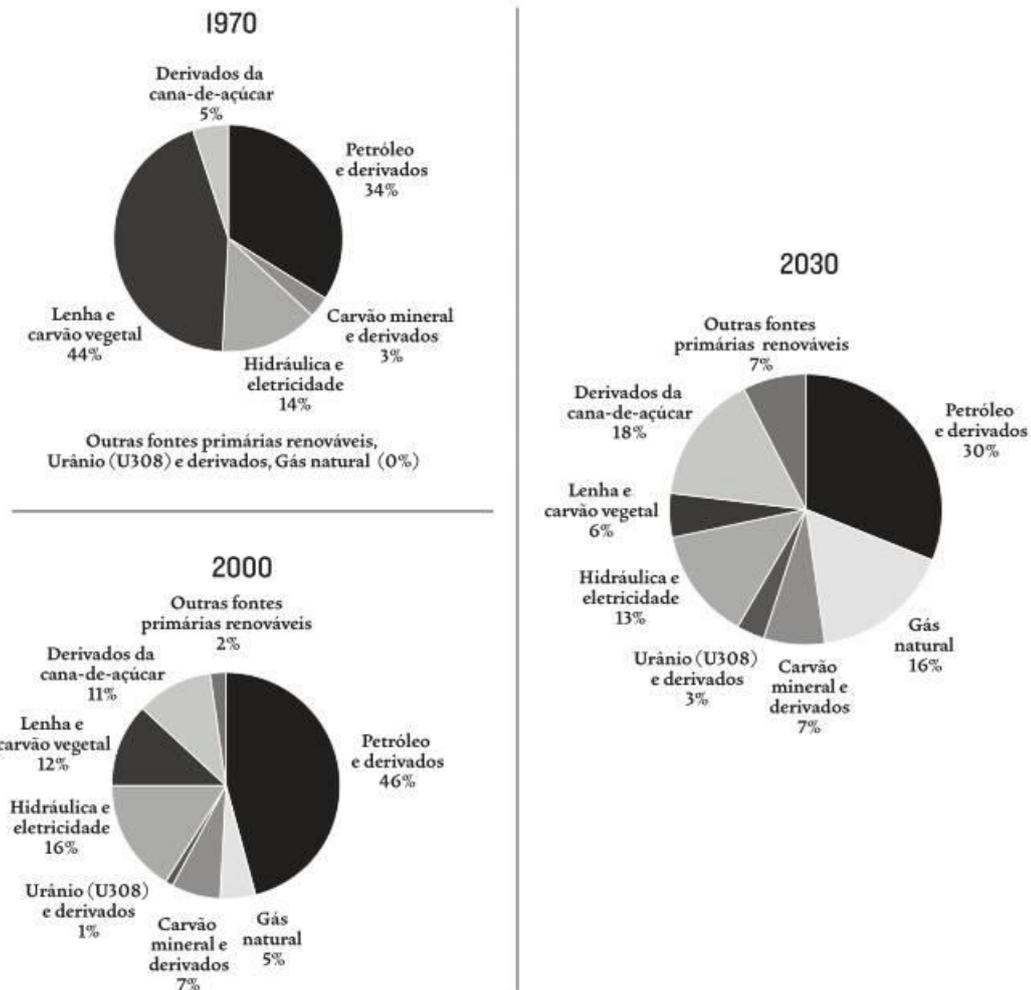


Figura 3 – Evolução da estrutura da oferta de energia de 1970 a 2030. Fonte: EPE, 2007.

Com isso vê-se que a matriz elétrica se tornou mais dinâmica e foi possível de se analisar o quanto de crescimento se teve nacionalmente quando comparado a nível mundial. Segundo a EPE, nos anos de 2013 e 2014, o Brasil esteve à frente no tocante a participação de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, mesmo tendo apresentado neste período de anos uma baixa na utilização da hidráulica. Internamente, pode-se analisar que a energia renovável nesses mesmos anos apresentou uma queda em seu uso, sendo antes de 78,3% e passando a ser de 74,6%, isso sendo proveniente da queda no regime hidrológico e consequente aumento do uso da geração termoeletrica, uma energia não- renovável como pode ser verificado nos gráficos abaixo.

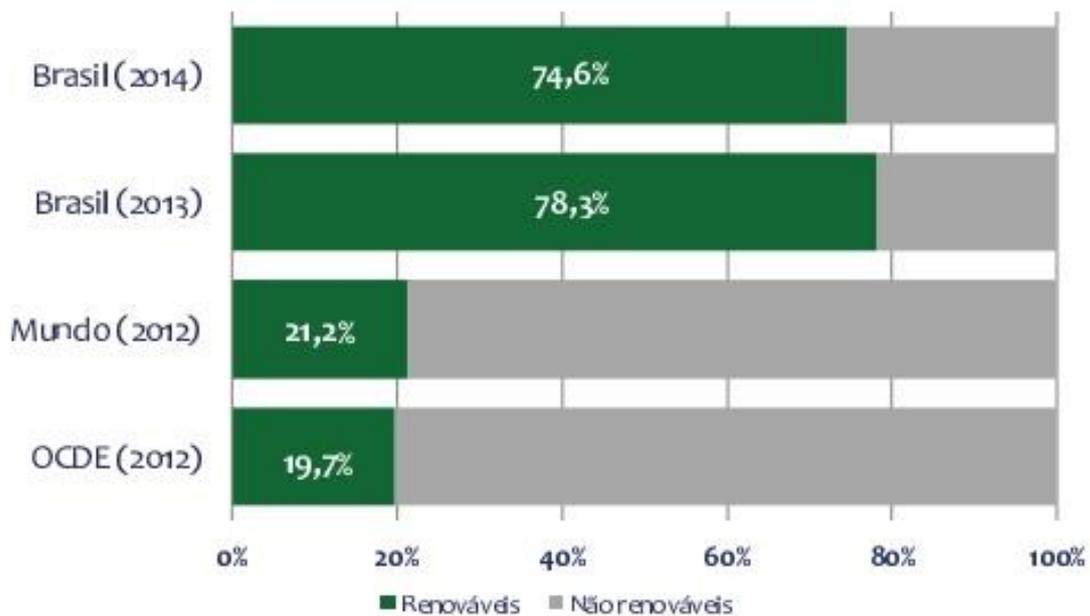


Figura 4 - Espectro das energias renováveis na matriz elétrica. Fonte: EPE, 2015.

No espectro renovável vê-se que a energia eólica foi a que mais recebeu investimentos financeiros, legais e governamentais para que evoluísse e isso é visto com clareza dos anos de 2007 a 2014, a evolução chegou no último ano, fornecendo cerca de 12.210 Gwh, tendo assim um crescimento exponencial quando comparado ao ano de 2013, ficando atrás de outras fontes tais como: Biomassa, Nuclear, Derivados do petróleo e carvão vapor.

Fonte	2014	2013
Hidrelétrica	373.439	390.992
Gás Natural	81.075	69.003
Biomassa <sup>1</sup>	44.733	39.679
Derivados do Petróleo <sup>2</sup>	31.668	22.090
Nuclear	15.378	15.450
Carvão Vapor	18.385	14.801
Eólica	12.210	6.578
Outras <sup>3</sup>	13.590	12.241
<b>Geração Total</b>	<b>590.479</b>	<b>570.835</b>

Figura 5 – Tabela comparativa das gerações de fontes de energia em GWh em 2014 e 2015.

Fonte: EPE, 2015.

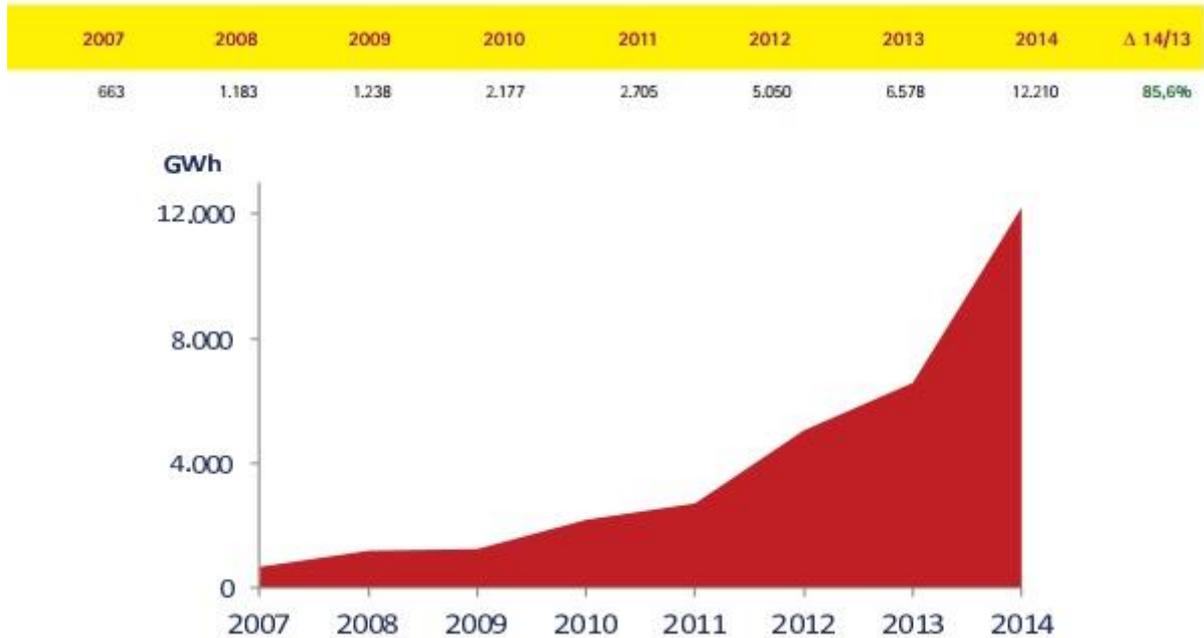


Figura 6 – Representação do crescimento da geração de energia eólica de 2007 a 2014. Fonte: EPE, 2015.

Em relação à expansão de oferta, a eletricidade, de acordo com o cenário futuro é estimada que terá um consumo de aproximadamente 1.080 TWh, considerando que se tenha uma expansão média de 4% ao ano. Essa projeção envolve a eficiência energética que é referente ao avanço que se terá quando analisado os possíveis melhores hábitos no uso, além de que a substituição de equipamentos elétricos por outros econômicos e avançados tecnologicamente irá interferir nesse plano energético para o futuro. Com esse aspecto em questão vale ressaltar que essa conservação de energia ainda seria correspondente a aproximadamente 5% da demanda de 2030 (GORINI, 2007).

Gorini (2007) relata que os investimentos voltados para a energia elétrica envolvem, basicamente, três segmentos principais: geração, transmissão e distribuição, inclusive quando se trata de instalações gerais. À geração é destinado o dever de implantar novas usinas. Goldemberg e Moreira (2005) também apontam que a fonte de geração de eletricidade no Brasil passou por mudanças relativamente acentuadas nos anos recentes, especialmente com a introdução de tecnologias de biomassa e energia nuclear, fazendo com que a matriz nacional apresentasse uma transição de um cenário fortemente atrelado à geração hidroelétrica em favor da diversificação para outras fontes renováveis, enquanto que a dependência a combustíveis fósseis vem diminuindo consistentemente.

Para a transmissão tem-se que compreender que o propósito de construção de novas interligações entre os subsistemas leva em consideração que isto será um reforço de toda malha energética que terá um aumento de carga e dos fluxos de energia. Já a distribuição é voltada para a análise da instalação de equipamentos e crescimento da rede média e baixas tensões, conforme crescimento do consumo final (GORINI, 2007).

### 1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO

O mapa representado na figura 2 retrata aonde se tem um melhor potencial para geração de energia eólica com a inclusão, em cada região, de suas velocidades médias anuais. Vê-se que o litoral brasileiro é bastante propício para este tipo de geração. Nesse, tem-se as cores mais frias representando locais com menores velocidades e cores quentes, aonde, mostram regiões com mais possibilidades de serem exploradas e obterem melhores resultados em sua geração, porém, é importante ter em vista que ao decorrer dos anos isto será diferente, pois o potencial energético da região pode se esgotar e acabar obrigando a se ter novos estudos para a aplicabilidade de aerogeradores nas regiões de menores velocidades. No entanto, para que isso seja possível é importante que haja o estudo dos mecanismos de controles (SANTOS, 2006).

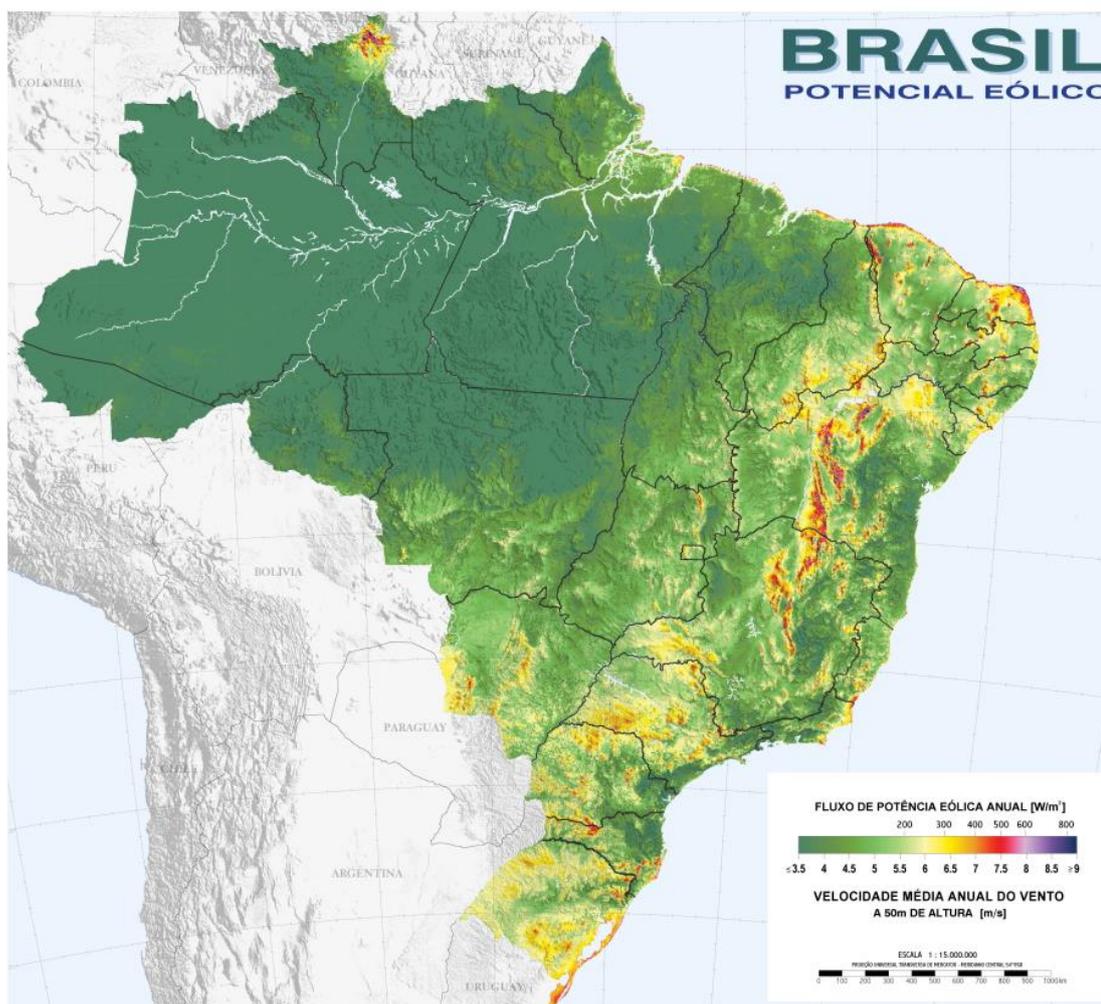


Figura 7 – Fluxo de potência eólica anual [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] e Velocidade média anual do vento [ $\text{m}/\text{s}$ ] para alturas de 50m. Fonte: Atlas, 2001.

No princípio, o uso de turbinas eólicas proporcionou uma alta exploração das formas possíveis de obtenção da energia proveniente dos ventos, aonde se podem verificar experiências com aerogeradores de eixo horizontal, vertical, com uma pá, duas pás, três pás, com gerador de indução, síncrono etc. Após análises de qual configuração usar, chegou-se a definição de que geradores com eixo de rotação horizontal, três pás, gerador de indução e uma estrutura não flexível eram os que obtinham melhores resultados em geração (CBEE, 2000).

Neste gráfico é possível verificar que o Sul do país possui uma densidade de ventos com velocidades que variam de 6 a 7  $\text{m}/\text{s}$ . Esta situação explica a existência de parques eólicos nesta região. Assim como no sul, verifica-se que o nordeste do país, em seu litoral, também é bastante favorável para implantação de parques eólicos.

Com a expansão e integração do uso de energia eólica, vê-se que as turbinas utilizadas em larga escala e em nível mundial são equipadas com um GIDA, pois este faz com que seja possível o aerogerador operar em diferentes velocidades de ventos. Isto permite que se tenha um melhor aproveitamento da energia fornecida, além de que a fadiga mecânica sofre redução, assim como o ruído emitido em baixas rotações (BURTON, 2001).

O GIDA tem suas vantagens em relação aos outros geradores, pois este permite trabalhar com a eletrônica de potência de forma reduzida quando comparada a toda potência do sistema, isso se traduz em cerca de um quarto do total e isso reflete em menores perdas, dimensionamento e gastos (AKHMATOV, 2007). Ao analisar que os problemas ambientais também foram minimizados, o que adiantou o processo de obtenção de energia, situação não verificada, quando se tem a implantação de uma forma de geração, tal como, por exemplo: as hidrelétricas, nucleares e térmicas.

O problema, ambiental, inicial, quando se teve o uso desse tipo de energia foi o ataque das pás nos pássaros que por ali passavam em suas rotas de navegação e isto pode ser sanado quando com a implantação de geradores de grande porte e com controle de velocidade, pode-se trabalhar em baixas rotações e conseqüentemente em baixas velocidades angulares de rotor (ATLAS, 2001).

À luz dos aspectos explanados nessa seção introdutória, percorrendo a motivação puramente de engenharia bem como a relevância do tema abordado para aspectos econômicos, políticos e ambientais no Brasil e no mundo, busca-se neste trabalho estudar o funcionamento dos GIDA's e sua aplicabilidade nos geradores de energia eólica, não deixando de avaliar os aspectos mecânicos e energéticos que envolvem o sistema de implantação e funcionamento de uma turbina.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No primeiro capítulo se tem a apresentação do cenário nacional energético, levando em consideração aspectos para curtos, médios e longos prazos, aonde, ainda se teve a apresentação da matriz energética brasileira e do potencial eólico nacional. Foi apresentada uma breve comparação do cenário brasileiro com a média mundial, discutindo-se os diferenciais que o país possui, sua liderança na agenda de governança ambiental global, e a relevância das fontes de energia renováveis, com ênfase no peso que a participação da energia eólica possui nesse contexto.

No segundo capítulo tem-se o embasamento teórico do trabalho, em que se pode observar as referências que foram estudadas para a apresentação de equações e informações que regem a obtenção de energia a partir dos ventos e como se dá o aproveitamento máximo dessa geração.

No terceiro capítulo é apresentado as diferentes configurações de geradores utilizados na eólica, mas em especial tem-se o estudo do Gerador de Indução Duplamente Alimentado – GIDA, o qual é o principal foco do nosso estudo.

No capítulo quatro é estudado o sistema de controle do GIDA, assim como, as equações que regem seu funcionamento em regime síncrono.

O capítulo cinco relata as conclusões do trabalho, após simulação conduzida no software MATLAB, em que se busca observar como se dá a mudança do contexto da energia eólica, a partir da aplicação do GIDA e seus sistemas de controle para velocidades de ventos variáveis. As implicações e relevâncias dos resultados são discutidos à luz da motivação apresentada no capítulo 1, focado principalmente na superioridade do modelo GIDA em relação às abordagens alternativas observadas na geração de energia eólica.

Por fim, o último capítulo aborda as principais limitações desse estudo, bem como prospectos de estudos e experimentos computacionais futuros, visando a ampliação do escopo do presente trabalho.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

O presente trabalho realizou um estudo das equações que regem a energia dos ventos e também do controle de velocidade feito pelo GIDA. Nesta seção se terá explicitado o processo de geração da energia elétrica a partir dos ventos, sendo apresentada a energia eólica convertida em elétrica.

### **2.1 RELEVÂNCIA DA ENERGIA EÓLICA**

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica, no ano de 2017, o Brasil possui uma capacidade operacional de 11,38GW e por projeção no ano de 2020 irá alcançar o patamar de 17,45 GW instalados em território brasileiro. O montante de energia gerada por todas as fontes até outubro de 2017 foi de 60,47 GW, sendo a eólica responsável por cerca de 5,82 GW se mostrando, ainda, uma fonte com geração superior às PCH'S. Neste mesmo mês a energia eólica representou 8% da matriz energética brasileira. Além disto, a

utilização desta fonte nos últimos doze meses evita a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente a que se teria com o uso de 13 milhões de automóveis (ABEE,2017).

O deslocamento de massas de ar que ao incidirem em um aerogerador possibilitam o movimento rotacional das pás, o que permite que o gerador elétrico entre em ação e converta a energia mecânica em elétrica. O potencial energético encontrado nas massas de ar, podendo ser extraído com máxima eficiência, coloca esta forma de obtenção de energia em competitividade com as demais fontes de energia.

Em baixas altitudes de regiões tropicais, o ar quente tende a subir e ao se encontrar com massas de ar frio acabam gerando um deslocamento que é o vento. De acordo com Centro de Referência Eólico, a energia eólica pode ser considerada uma fonte proveniente do sol.

## 2.2 TURBINA EÓLICA

Para se entender melhor o funcionamento do GIDA e sua aplicabilidade é importante saber com se dá a obtenção da energia encontrada nos ventos. Essa é a energia cinética dos deslocamentos de massas de ar, aonde a turbina capta essa energia que passa na área em que o rotor se encontra e a partir disto se tem a transformação dessa energia inicial em energia mecânica rotacional (LIMA, 2014). Sendo, portanto, a energia cinética,  $W_c$ , proveniente de uma porção de ar  $\Delta l_{ar}$ , o qual se desloca em uma velocidade constante,  $V_1$ , em um período de tempo  $\Delta t$ . A porção de ar ao atravessar a secção transversal do rotor da turbina, acaba deslocando uma massa, chamada de  $\Delta m_{ar}$ , que tem o seu valor dado, a partir da massa específica do ar,  $\rho_{ar}$ , e de  $\Delta V_{ar}$ , que é a massa de ar deslocada (FERREIRA, 2009).

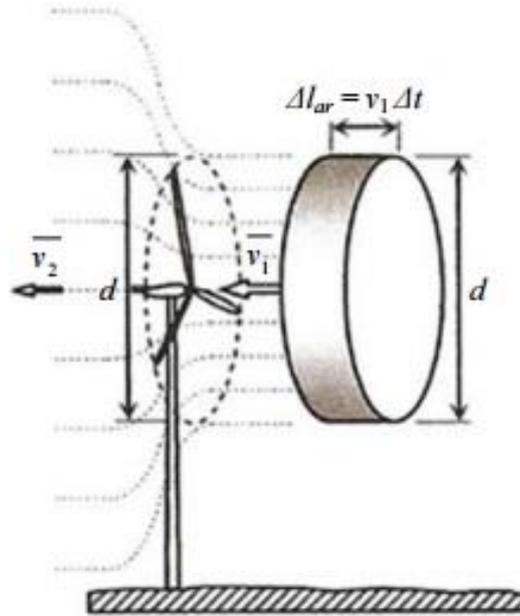


Figura 8 – Porção de ar que atravessa o rotor. Fonte: Ferreira, 2009.

Segundo Lima (2014) tendo que

$$W_c = \frac{mV_1^2}{2} \quad (1)$$

e sabendo – se que a Potência é obtida a partir da derivada em relação ao tempo temos:

$$P = \frac{dW_c}{dt} = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right) * V_1^2}{2} \quad (2)$$

Logo, chega-se a conclusão de que, a partir do momento em que se quer ter o fluxo de massa de ar,  $\Delta m_{ar}$ , a equação a ser gerada é a seguinte:

$$\Delta m_{ar} = \frac{dm}{dt} = \rho_{ar} * V_1 * A \quad (3)$$

Tendo como:

$P_{disp}$  = Potência Disponível no vento [W];

$W_c$  = Energia Cinética [J];

$t$  = Tempo [s];

$V_1$  = Velocidade do vento [m/s];

$\rho_{ar}$  = Massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$A$  = Área de secção transversal;

Para se entender melhor como se dá o estudo do fluxo de ar que atravessa a área varrida pelo rotor é importante entendermos a figura abaixo, aonde se tem um ducto de ar imaginário, em que se tem  $V_1$ , a velocidade de entrada do ar, e o cilindro, caminho do fluxo de ar (LIMA, 2014).

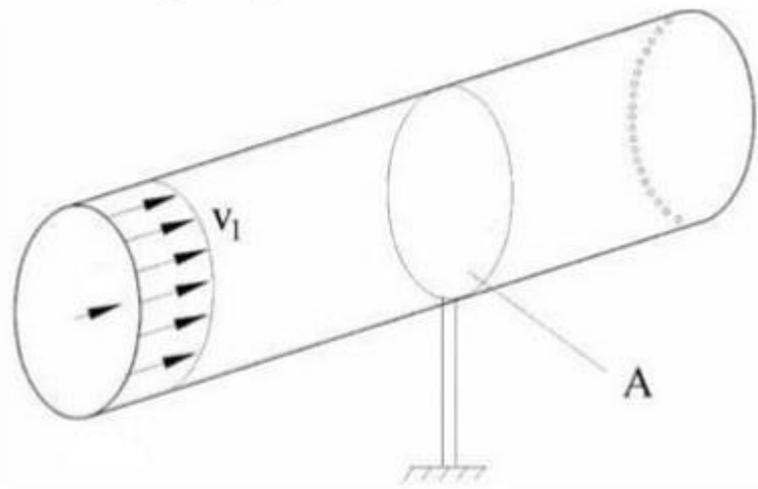


Figura 9 – Caminho percorrido pelo fluxo de ar na área varrida pelo rotor da turbina. Fonte: LIMA, 2014.

Assim, a potência que pode ser obtida dos ventos ( $P_{disp}$ ) é dada pela seguinte maneira:

$$P_{disp} = \frac{dWc}{dt} = \frac{1}{2} * \rho_{ar} * \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 * V_1^3 \quad (4)$$

Com isso é possível deduzir que a potência elétrica gerada é dada em Watts e uma função diretamente proporcional ao cubo de  $V_1$ . Porém, essa não pode ser totalmente convertida em energia mecânica, pois na verdade ocorrem perdas nesse processo e é importante ressaltarmos que a velocidade de saída  $V_2$  deve ser não nula ( FERREIRA, 2009). Assim, vê-se que o rendimento verdadeiro do sistema não ideal é normalmente designado pelo coeficiente de potência  $C_p$  e é dado pela expressão abaixo:

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{disp}}$$

(5)

Em geral, os valores dessa relação se aproximam de 0,593, na prática este seria um limite inalcançável, pois é teórico e conhecido com limite de Betz (FERREIRA, 2009).

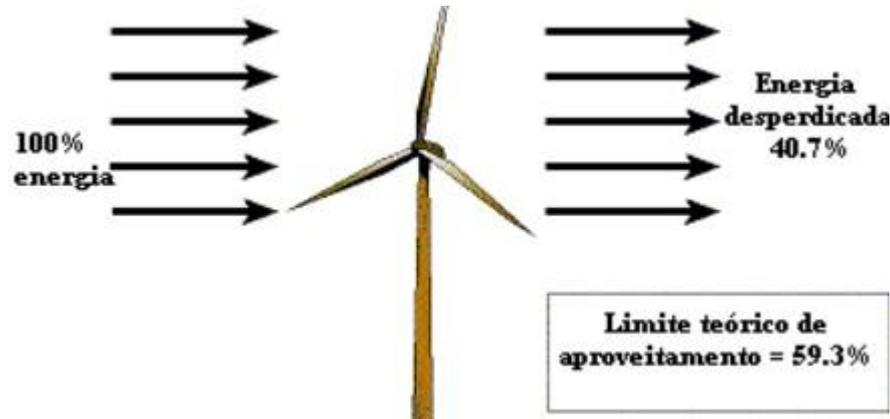


Figura 10 – Representação do Limite de Betz. Fonte: Aerogeradores.org, 2011.

O limite supracitado relaciona a quantidade de energia que se é oferecida com a que realmente é utilizada, assim, segundo a teoria, os melhores  $C_p$ 's estão na faixa de 0,35 a 0,45, mesmo tendo, um projeto de turbina perfeito (FERREIRA, 2009). O  $C_p$  é dependente de dois parâmetros que são: o ângulo de passo das pás da turbina ( $\beta$ ) e também a razão de velocidade de ponta ( $\lambda$ ).

$$\lambda = \frac{\omega r \cdot R}{v}$$

(6)

em que:

$$\omega r = \text{Velocidade de Rotação da turbina} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right];$$

$$R = \text{Raio das pás da turbina} [m];$$

$$v = \text{Velocidade do vento} \left[ \frac{m}{s} \right];$$

Segundo Jardim (2014), O comportamento do  $C_p$  em função dos parâmetros acima citados pode ser verificado no gráfico abaixo, em que se conclui, dessa forma, que a obtenção ótima da potência do vento é obtida quando ocorrem ajustes nos valores de  $\lambda$  e  $\beta$ .

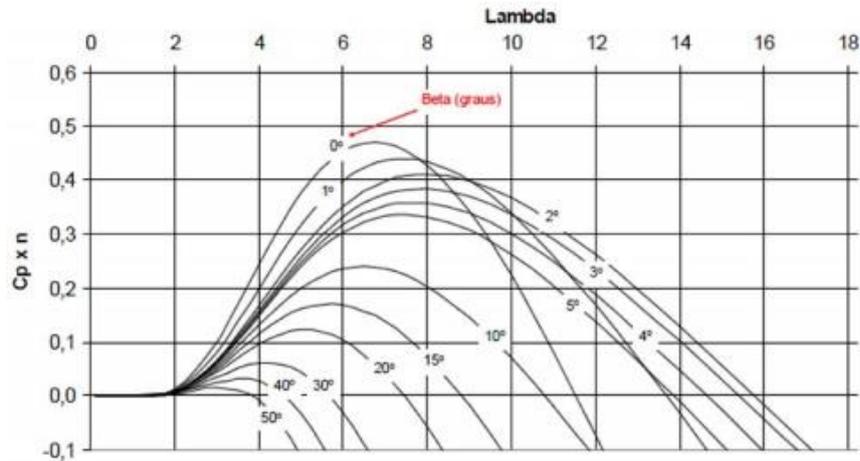


Figura 11 – Curvas de  $C_p$  em função dos parâmetros. Fonte: JARDIM, 2014.

Vale ressaltar, ainda, que para o cálculo prático deve se levar em consideração a eficiência do aerogerador,  $\eta$ , considerando as perdas nas transmissões mecânicas e as perdas do gerador. Portanto, a equação da potência elétrica mais adequada seria:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} * \rho * a * \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 * V^3 * C_p * \eta \quad (7)$$

Neste ponto é válido ressaltar que no momento em que a velocidade dos ventos assume valores superiores ao nominal da turbina é importante que existam formas para que isto seja controlado e o dever de fazer a regulação ocorre por meio da realização de controles ativos ou passivos conforme a necessidade de variação de passo do rotor, respectivamente (FERREIRA, 2009).

Segundo Santos et al (2006), os mecanismos de controle podem atuar de formas diferentes, como quanto a orientação do rotor, controle de velocidade e controle de carga. Em geral, os sistemas de conversão de energia eólica em mecânica rotacional, basicamente consistem na existência de uma turbina eólica, um gerador elétrico, um conversor eletrônico de potência e o sistema de controle correspondente (FILHO, 2014). Este conjunto surge com intuito de resolver um dos maiores problemas dessa forma de conversão que é a obtenção de máxima transferência de energia a partir do vento, de acordo com a sua variação de velocidade, a partir do controle do rotor da turbina.

Na figura abaixo é possível ver a constituição básica de um aerogerador.

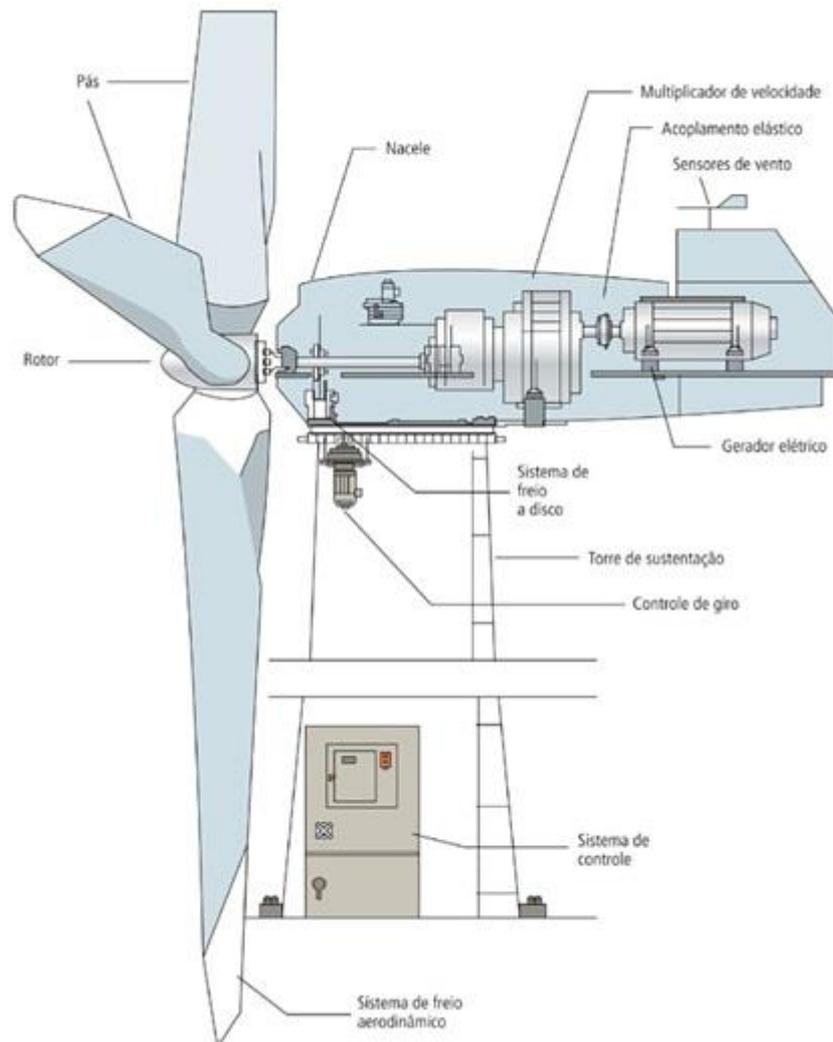


Figura 12 – Esquemático de uma turbina eólica moderna. Fonte: CBEE/UFPE, 2000.

Segundo, P&D CEEE, os Principais componentes de uma turbina são estes:

**Rotor:** Tem o papel de recolher a energia proveniente dos ventos e transformá-la em energia mecânica, que posteriormente será revertida em energia elétrica.

**Nacelle:** É responsável por abrigar os mecanismos do gerador, por vezes, inclui multiplicador de velocidade, freios para segurança do aerogerador, mancais e sistemas de controles.

**Multiplicador de velocidade:** É utilizada para transformar velocidades subsíncronas ou mesmo abaixo do esperado em velocidade rotacionais ótimas para trabalho dos geradores.

**Pás:** O vento ataca as pás, o que gera uma força de sustentação, que faz atuar o rotor.

**Eixo de baixa velocidade:** Conectado à caixa de engrenagem

**Eixo de alta velocidade:** Aciona o gerador

**Anemômetro:** Verifica a velocidade dos ventos e informa ao controlador as variações.

**Controlador:** Permite acionar a turbina, bem como desligá-la, após monitorar todas as partes da turbina.

**Passo:** Este possibilita o controle da velocidade dos ventos, pois limita, por segurança, a geração de potência, bem como velocidades superiores à nominal da turbina.

**Mecanismo de orientação direcional:** Permite que o rotor esteja sempre utilizando o maior aproveitamento do vento quando este mudar sua direção.

## 2.3 CONTROLE DE STOL E DE PASSO

### 2.3.1 Controle de Stol

É um controle passivo que reage de acordo com as velocidades do vento. Para as velocidades maiores que a nominal, o fluxo em torno do perfil da pá é descolado da superfície desta, formando neste momento uma turbulência, o que diminui a força de sustentação e aumenta a força de arrasto, controlando desta maneira, a potência de saída (MAURI, 2011).

Segundo Santos et al (2006) o controle é passivo, tendo em vista, que o ângulo de passo, praticamente, se mantém o mesmo, já o ângulo de ataque tem de ser incrementado de forma direta ao aumento da velocidade do ventos, para que no momento, em que essa for maior que a nominal seja possível de se ter o chamado efeito stol. Verifica-se nesse instante que quando ocorre isso a potência do rotor diminui e para tanto existem métodos que minimizam este efeito, tal como: realizar uma torção longitudinal nas pás (CRESESB, 2015). Caso não existisse essa correção, o efeito de menor sustentação e maior arrasto ocorreria em todas as posições radiais das pás, gerando assim, uma significativa redução de potência. Esta forma de controle se destaca pelo fato de ser simples quanto à atuação do sistema, porém para que seja aplicada às pás o efeito em estudo é necessário cálculos aerodinâmicos precisos (CRESESB, 2015).



Figura 13 – Fluxo descolado do perfil da pá no stol. Fonte: cresesb.cepel.br, 2015.

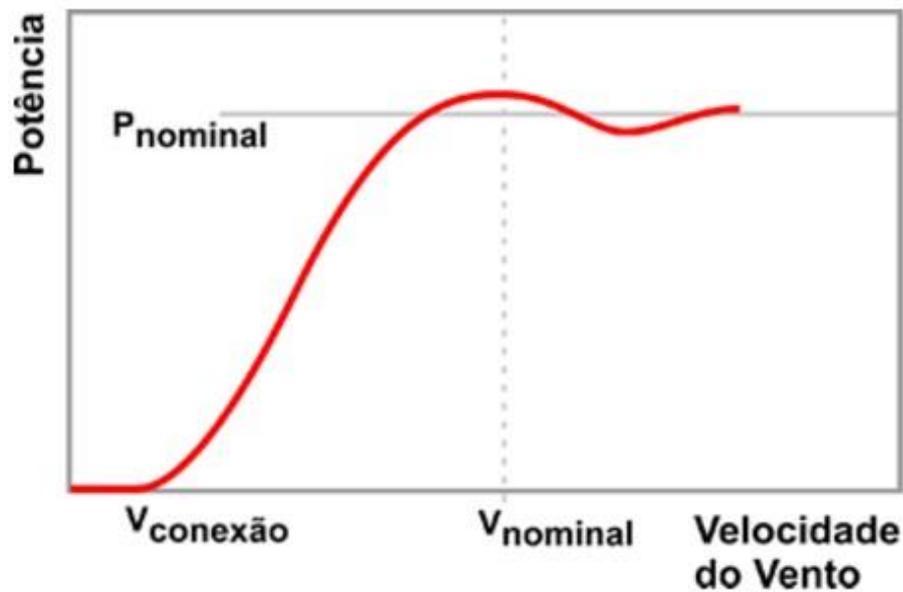


Figura 14 – Curva de potência em função da velocidade do vento no controle Stoll. Fonte: cresesb.cepel.br, 2015.

### 2.3.2 Controle de passo

É um sistema ativo que necessita de um sinal vindo do sistema de controle. Quando o gerador é colocado em situações críticas, como aumento da velocidade de ventos, a potência nominal do gerador é ultrapassada, neste momento as pás giram em torno do seu eixo longitudinal e isso acarreta na diminuição do ângulo de passo das pás, ocasionando a redução do ângulo de ataque dessas. Assim, essa redução permite que as forças aerodinâmicas atuantes sejam diminuídas, e com isso a retirada de potência dos ventos, também, sofra redução (CRESESB, 2015). Para todas as velocidades acima da ótima para operação, o ângulo a ser escolhido é aquele que permite a geração, constante, da potência nominal. Esse ângulo permite que o fluxo de ar seja colado a superfície da pá, o que produz sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.

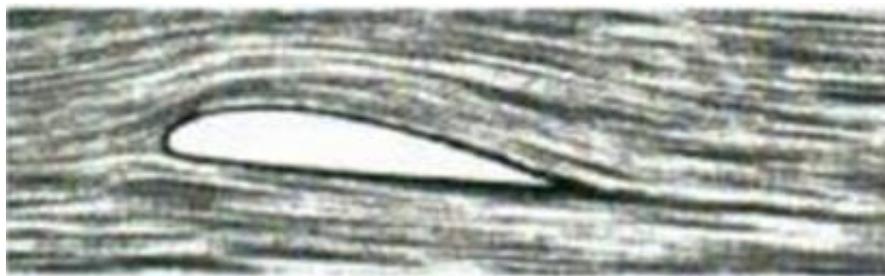


Figura 15 – Fluxo Colado ao perfil da pá no controle de passo. Fonte: cresesb.cepel.br, 2015.

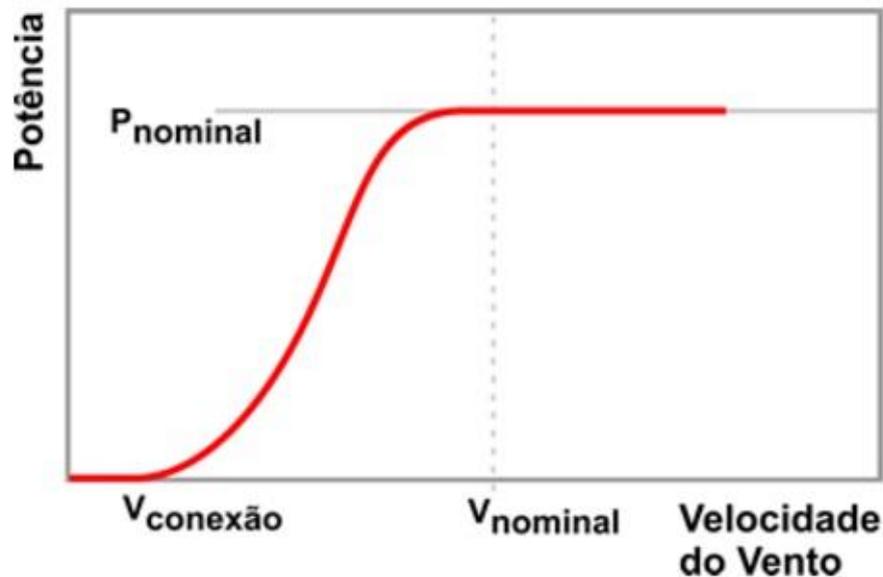


Figura 16 – Curva de Potência em função da velocidade do vento no controle de passo. Fonte: cresesb.cepel.br, 2015.

Neste gráfico acima é possível verificar que após os ventos atingirem a velocidade nominal a potência a ser obtida permanece constante, ou seja, o movimento das pás é necessário a todo momento para que a potência seja mantida desta maneira.

### 3. CONFIGURAÇÕES DE GERADORES EÓLICOS

A geração de eletricidade em larga escala, com intuito de fornecer aos sistemas integrados de energia elétrica, seja como forma complementar ou essencial, pôde ao longo dos anos de estudos, de como se obter a energia dos ventos, permitir que se tivessem alguns outros tipos de máquinas para geração eólica, onde cada uma apresenta benefícios e malefícios. De forma geral, essas configurações possuem métodos de segurança que permitem que a turbina seja protegida, quando esta for submetida às situações críticas, como, altas velocidades de vento (JARDIM, 2014).

Para que possa ser feita a medição da velocidade de vento é necessária a utilização de um anemômetro, que indica velocidade média em um determinado momento. Pois a partir da quantidade de espaço que a massa de ar percorre durante um intervalo de tempo é possível saber-se a velocidade.



Figura 17 – Anemômetro. Fonte: meteorologia.pucp.edu.pe.

### 3.1 GERADOR DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO - GIGE

Este é um tipo de gerador usado em turbinas eólicas que são ligadas diretamente à rede elétrica. Suas vantagens envolvem o baixo custo e a consistência no uso desse tipo de máquina (JARDIM, 2014). O esquema do sistema eólico que utiliza o sistema GIGE se encontra na figura abaixo.

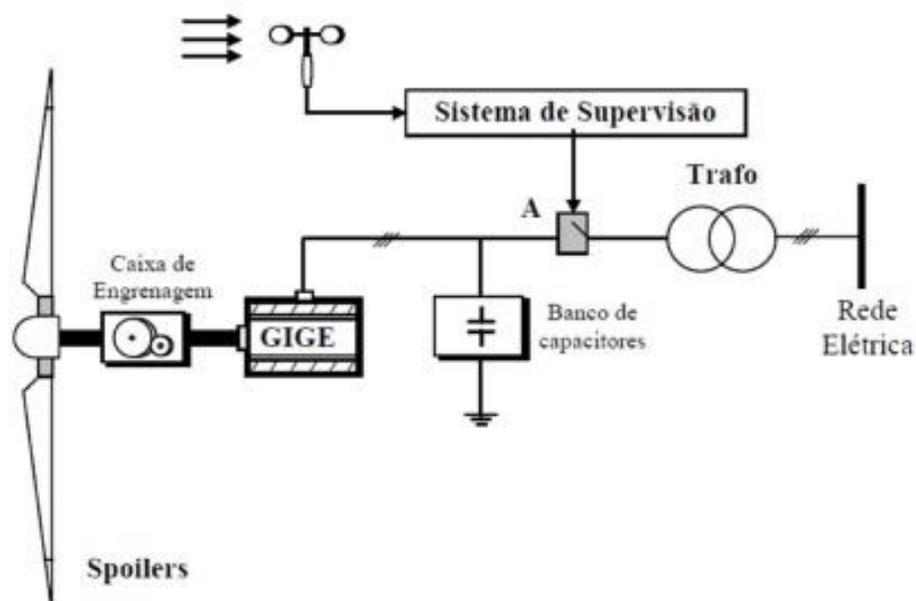


Figura 18 – esquemático do GIGE. Fonte: JARDIM, 2014.

A desvantagem de operar com esse sistema é que a velocidade deve ser constante, apesar de que ele gerador de indução permite ter a possibilidade de funcionamento com duas velocidades. Uma para aumentar o aproveitamento de vento, o que reduz a eficiência da geração

de energia e outra velocidade que pode ser obtida por meio da ligação do gerador à rede com um inversor, o que melhora a obtenção de energia, pois se consegue controlar a velocidade (JARDIM, 2014).

### 3.2 GERADOR SÍNCRONO DE ROTOR BOBINADO – GRSB

As vantagens que são apresentadas neste modelo é que a capacidade de se ter uma elevada potência nominal, com o fato de que esse não faz uso de caixa de engrenagens, que multiplica a velocidade dos ventos que chega à área varrida pelo rotor.

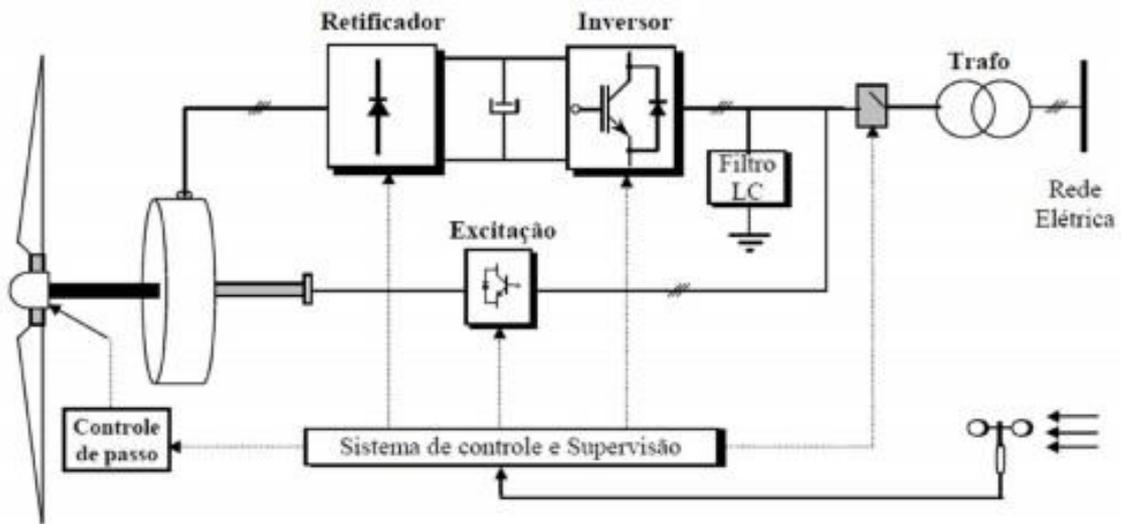


Figura 19 – Esquemático do GSRB. Fonte: JARDIM, 2014.

O GSRB é conectado a rede, por meio de um conversor back-to-back, o qual permite o controle da sua velocidade. A excitação de enrolamento de campo é fornecida com um retificador, também, ligado à rede. Geram desvantagens quando se tem a necessidade de um conversor adicional para o funcionamento do gerador, além do alto custo de implantação deste modelo. A quantidade elevada de pólos também é um infortúnio, pois exige da máquina um diâmetro grande, tornando-a pesada e isso dificulta a colocação desse no topo da torre, que o recebe (JARDIM, 2014).

### 3.3 GERADOR DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO - GIDA

O GIDA é um tipo de gerador que tem seu funcionamento permitindo a operação com velocidade variável por meio da inserção de um conversor de potência em seu rotor. Desta forma, o GIDA é uma máquina de indução de dupla alimentação – MIDA (JARDIM, 2014). A

configuração básica desse modelo é a existência de um gerador de indução rotor bobinado, tendo a sua alimentação feita por anéis deslizantes, aonde, o estator se conecta diretamente à rede elétrica com o uso de um transformador, ressalta-se que o rotor é alimentado com um conversor AC/DC/AC, que é construído por duas pontes conversoras trifásicas (RAMOS, 2014).

Para se ter maior compreensão do assunto parte-se do princípio de que o GIDA é uma Máquina de Indução de Dupla Alimentação – MIDA e de que pelo fato da potência elétrica que passa pelo rotor ser menor que a que está presente no estator, o conversor a ser utilizado é mais barato quando este é colocado em comparação com o que tem a ligação direta ao estator da máquina (JARDIM, 2014).

O GIDA tem suas desvantagens ao se analisar que este tem o conversor de potência conectado ao rotor e esse fato faz com que se tenha a necessidade de se utilizar anéis e escovas coletoras para se acessar o rotor, porém isso acaba por diminuir a vida útil da máquina, além do aumento da quantidade de manutenções periódicas.

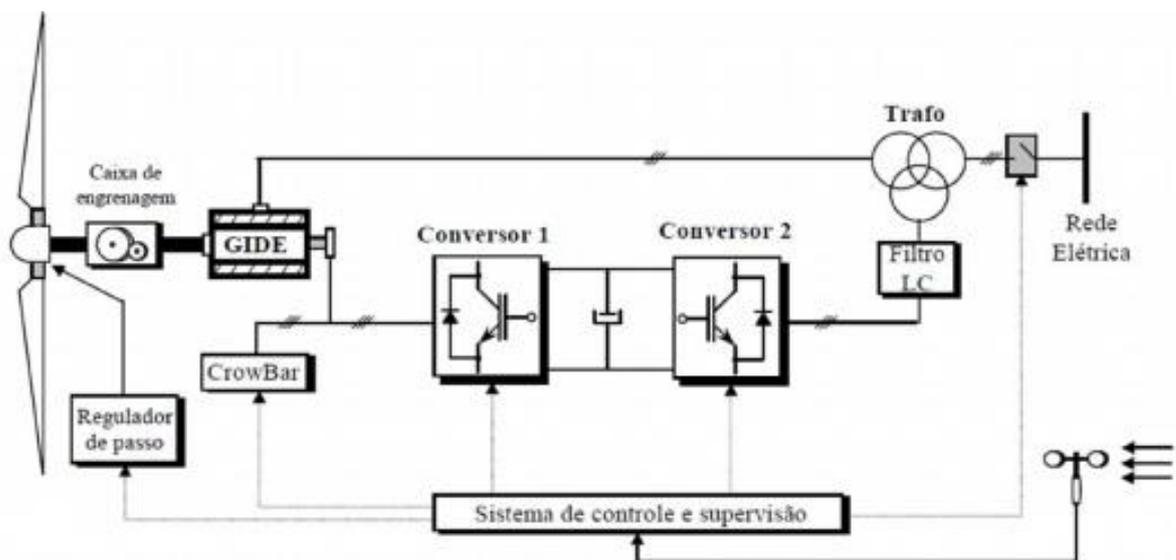


Figura 20 – Esquemático do GIDA. Fonte: JARDIM, 2014.

Com essas desvantagens verificadas, surgiram estudos que tratam de como se pode obter um GIDA, mas sem que ponha em risco a credibilidade de seu funcionamento. Assim, chegaram as Máquinas de Indução Duplamente alimentadas Sem Escovas, mais conhecidas como Brushless Doubly Fed Machine - BDFM, em que tem sua diferença notada no rotor, este é constituído de seis conjuntos, chamados de ninhos, com iguais espaços entre si ao longo do rotor. E cada ninho é formado por três loops concêntricos, gerando ao todo um total de 18 circuitos no rotor da máquina (JARDIM, 2014).

Este tipo de uso de rotor BDFM, permite que seja possível a realização do controle da frequência das correntes, da mesma forma que ocorre no GIDA, porém sem uso de anéis e escovas, que como supracitado, acabam por ajudar no desgaste da máquina. Além disso, na BDFM se tem a utilização de conversores para potências menores. Isso possibilita a essa configuração um espectro de aplicações maior quando comparada às MIDAS (JARDIM, 2014).

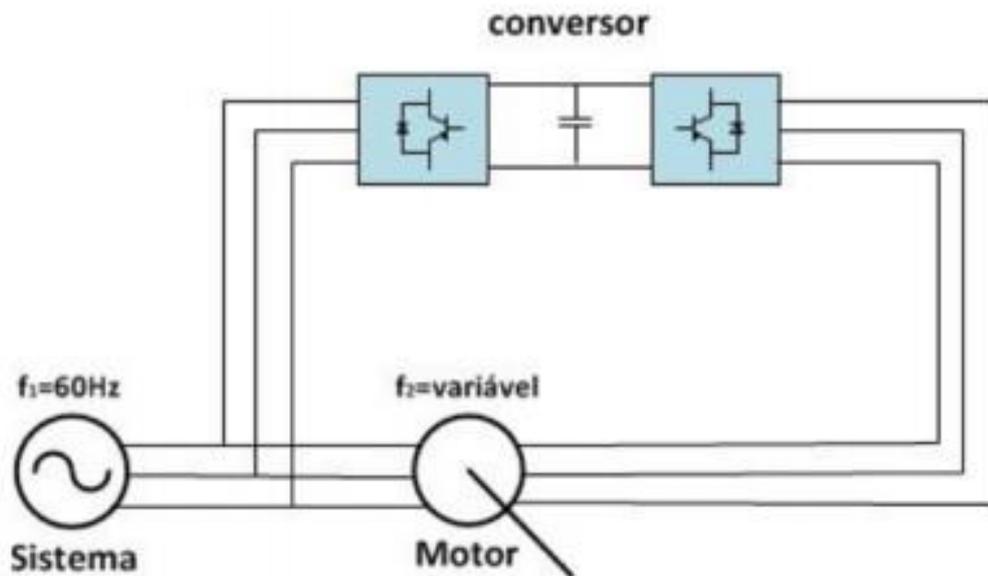


Figura 21 – Esquemático da Máquina de Indução Duplamente Alimentada Sem Escovas.

Fonte: JARDIM, 2014.

#### 4. SISTEMA DE CONTROLE DO GIDA

De acordo com Ferreira (2009), o GIDA é uma máquina assíncrona trifásica com rotor bobinado, que tem seu enrolamento rotórico operando em frequências variáveis até 10 Hz, sendo que este se encontra conectado à rede elétrica, que tem sua frequência de operação fixada para que isto ocorra é necessária a utilização de um conversor de frequência AC/DC/AC. O estator se encontra diretamente ligado à rede.

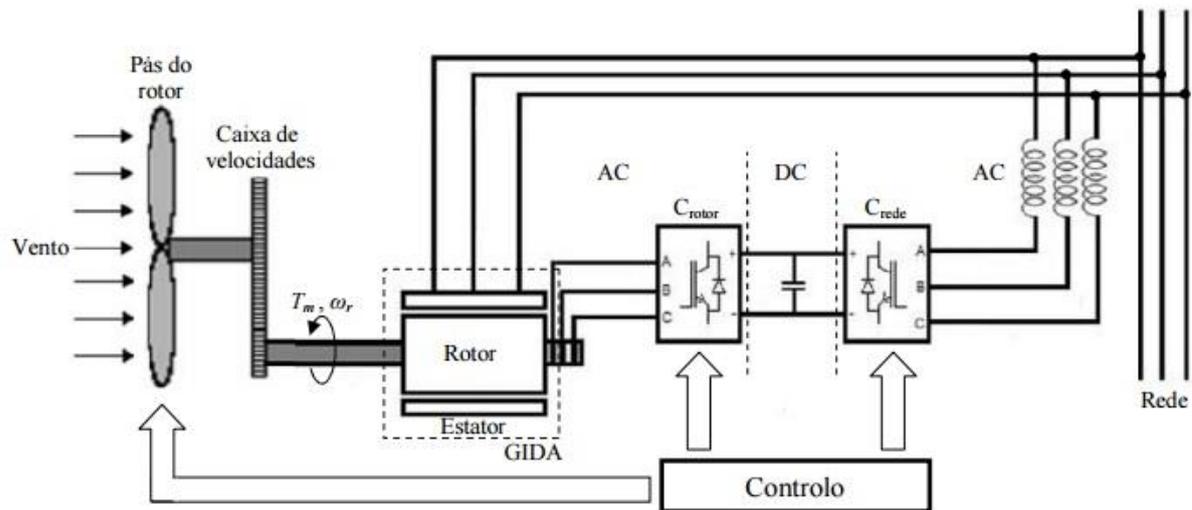


Figura 22 – Esquemático de um GIDA conectado à rede. Fonte: FERREIRA, 2009.

O gerador de indução acima tem duas formas de alimentação que podem ser consideradas como: sub-síncrono ou super-síncrono. O conversor de frequência é composto por dois outros conhecidos como back-to-back e estes são têm seus controles dados na tensão e são unidos por uma ligação DC ( FERREIRA, 2009).

O Transistor Bipolar de Porta isolada, conhecido como Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT é utilizado nos conversores como dispositivos comutáveis e que permitem o trânsito de energia nos dois sentidos.

Para que haja uma segurança e também um melhor aproveitamento da energia mecânica rotacional proveniente do rotor, o controle de conversor do lado do rotor,  $C_{rotor}$ , tem por natureza a atribuição de converter as variações de potência, causadas pela dinâmica da velocidade dos ventos, em energia cinética no rotor e em energia elétrica que é lançada à rede por meio de bobinas de alisamento (FERREIRA, 2009).

Já o controle do conversor do lado da rede tem por finalidade regular a tensão na ligação DC, além de que este trabalha para que também não haja uma energia reativa, o que causaria uma não otimização do fator de potência e um dos intuitos é melhorar esse quesito, causando assim, uma proteção às variações de tensão a que esta rede está sujeita a sofrer (FERREIRA, 2009).

No momento em que o gerador está abaixo da velocidade nominal, conhecida como funcionamento sub-síncrono, o rotor incorpora energia da rede e o estator devolve energia para a rede, em que a potência elétrica associada ao rotor,  $P_r$ , é retirada do barramento e acaba diminuindo a tensão c.c.. De forma antagônica, se a velocidade de trabalho do gerador for superior a nominal, tem-se o regime super-síncrono, em que o rotor gera energia e assim a rede

recebe energia dos circuitos rotórico e estatórico. Nesta situação a potência  $P_r$  é repassada ao capacitor do barramento c.c. e sua tensão aumentará. O conversor da rede é usado para gerar ou absorver potência, com o intuito de manter a tensão c.c. constante (RAMOS, 2014).

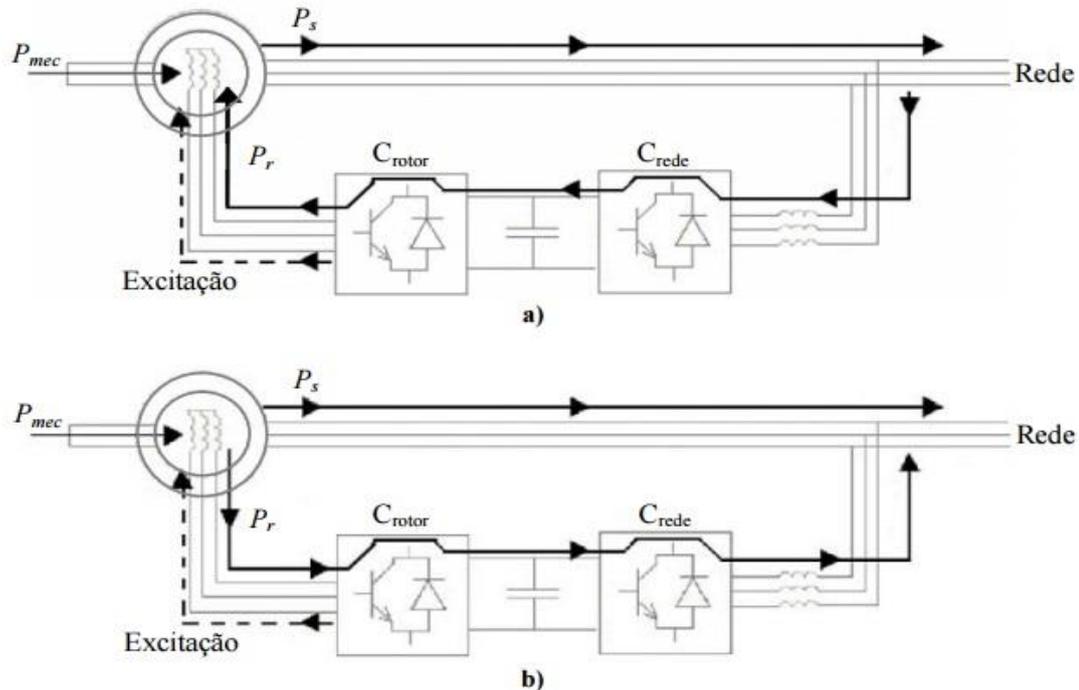


Figura 23- Fluxo das potências no sistema GIDA a) sub-síncrono b) super-síncrono. FERREIRA, 2009.

Portanto, no modo subsíncrono, a velocidade do rotor é inferior à velocidade síncrona da máquina, o que reflete um escorregamento positivo, onde no caso a potência ativa tem fluxo da rede para o rotor. No modo supersíncrono, a velocidade do rotor está acima da velocidade síncrona e o escorregamento é negativo, neste caso a potência ativa tem fluxo para a rede tanto do estator quanto pelo rotor. Os conversores de potência são necessários para o controle da qualidade de energia fornecida pelo gerador para a rede, quanto para a recebida desta.

Com isso vê-se que o GIDA é flexível quanto ao seu uso, pois além de trabalhar em velocidades subsíncronas e supersíncronas, este pode ser aplicado à velocidade síncrona esperada. Esta é uma vantagem que colocou esta tecnologia em grande escala de uso. Empresas como: Alston, Siemens, Gamesa e Vestas são propagadoras desta inovação.

Alguns benefícios podem ser determinantes para a escolha deste gerador: Melhor estabilização da rede em decorrência de distúrbios de tensão, menor emissão de ruídos, fator bem visto até mesmo pelas legislações ambientais e o aumento da capacidade de fornecimento

de potência ativa em decorrência da faixa de trabalho maior de velocidade quando comparado a outros de operação em velocidades fixas.

Por outro lado, existem desvantagens: O sistema de controle do GIDA é complexo, afundamentos momentâneos de tensão podem afetar o seu funcionamento em razão de se ter o estator do gerador conectado diretamente à rede e além disto a necessidade de anéis coletores com escovas exige manutenção periódica para que isto não venha danificar o sistema.

#### 4.1 MODELO MATEMÁTICO

A MIDA pode ser estudada a partir de seus três terminais, dois elétricos, Estator e Rotor e um mecânico, o Eixo. Para o estator tem-se a associação das potências elétricas totais,  $P_s$ , potência ativa do estator e  $Q_s$ , potência reativa do estator. Para o rotor se tem as potências elétricas a seguir, a saber são:  $P_r$ , potência ativa do rotor e  $Q_r$ , potência reativa do rotor. Ao terminal mecânico tem-se a representação da potência mecânica (BIM, 2012).

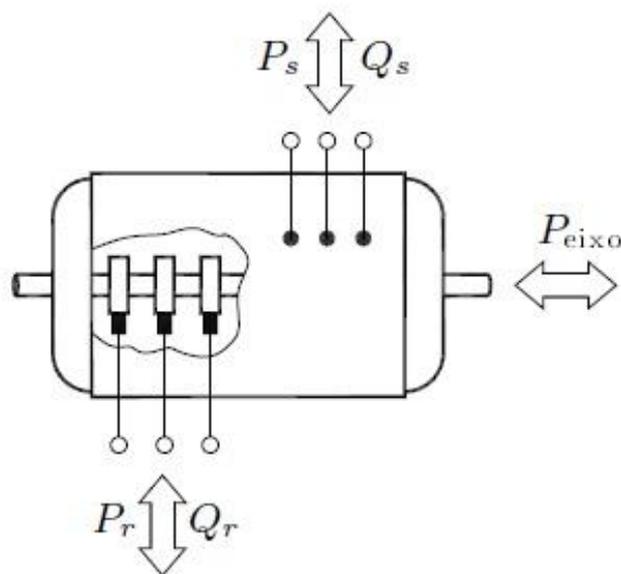


Figura 24 – Potências Elétricas do Rotor, Estator e do Eixo. Fonte: BIM, 2012.

A máquina de rotor bobinado por permitir a acessibilidade pelas vias de seus terminais, acaba dando a possibilidade dessa funcionar nas velocidades: Síncrona, Sub-síncrona e super-síncrona. O GIDA então, deve, em velocidades síncronas, trabalhar em corrente contínua – DC,

porém, nas outras velocidades relatadas a corrente deve ser alternada com frequência e magnitudes ajustadas, de acordo com o que é almejado (BIM, 2012).

Para se entender melhor as MIDAS, no caso deste trabalho como gerador, o modelo matemático é importante pois define algebricamente como se dá o processo. A análise foi realizada considerando a velocidade síncrona (BIM, 2012).

- Componentes do vetor tensão de estator:

$$v_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_1 \psi_{sq} \quad (8)$$

$$v_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_1 \psi_{sd} \quad (9)$$

- Componentes do vetor tensão de rotor:

$$v'_{rd} = r'_r i'_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - s\omega_1 \psi_{sq} \quad (10)$$

$$v'_{rq} = r'_r i'_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} - s\omega_1 \psi_{sd} \quad (11)$$

As expressões do fluxo magnético do rotor e do estator são dadas a seguir pelas Eq.(12) e Eq.(13).

- Componentes do vetor-fluxo magnético do estator

$$\psi_{sd} = (L_{ls} + L_m)i_{sd} + L_m i'_{rd} = L_{ls}i_{sd} + L_m(i_{sd} + i'_{rd}) \quad (12)$$

$$\psi_{sq} = (L_{ls} + L_m)i_{sq} + L_m i'_{rq} = L_{ls}i_{sq} + L_m(i_{sq} + i'_{rq}) \quad (13)$$

- Componentes do vetor- Fluxo magnético de rotor:

$$\psi_{rd} = L_m i_{sd} + (L'_{lr} + L_m) i'_{sd} = L_{lr} i'_{rd} + L_m (i_{sd} + i'_{rd}) \quad (14)$$

$$\psi_{rq} = L_m i_{sq} + (L'_{lr} + L_m) i'_{sq} = L_{lr} i'_{sq} + L_m (i_{sq} + i'_{rq}) \quad (15)$$

Aonde, temos que  $L_m (i_{sd} + i'_{rd}) = \psi_{gd}$  e também que  $L_m (i_{sq} + i'_{rq}) = \psi_{gq}$ . Os  $\psi_{gd}$  e  $\psi_{gq}$  são componentes de eixo direto e de quadratura do fluxo magnético de entreferro (BIM, 2012).

- A equação de equilíbrio de torque é dada por

$$J_t \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_{eixo} \quad (16)$$

Em que  $J_t$  é a equação de equilíbrio de torque.

A relação entre o torque mecânico e eletromecânico é

$$T_m = -T_{em} \quad (17)$$

A relação que cada um desses torques têm com a potência é a seguinte:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (18)$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} \quad (19)$$

Relação entre potência mecânica e a eletromecânica é

$$P_m = -P_{em} \quad (20)$$

Parte da potência mecânica é absorvida por atrito, chamadas de perdas rotacionais e o restante por definição é a potência no eixo (BIM, 2012).

$$P_m = P_{eixo} - Prot$$

(21)

Sabendo-se que a perdas rotacionais são sempre positivas e isso independe do modo de operação da máquina de indução tem-se que  $Prot \ll Peixo$  (BIM, 2012).

Logo, conclui-se que o funcionamento da máquina se dará no modo motor quando  $P_m < 0$ ,  $Peixo < 0$ . Já no modo gerador será quando  $P_m > 0$ ,  $Peixo > 0$ .

As perdas por efeito Joule também independem do modo de funcionamento do motor e são dadas da seguinte forma, no estator por:  $P_{j_s} = 3r_s(I_s)^2$  e no rotor por:  $P_{j_r} = 3r_r(I_r)^2$  (BIM, 2012).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

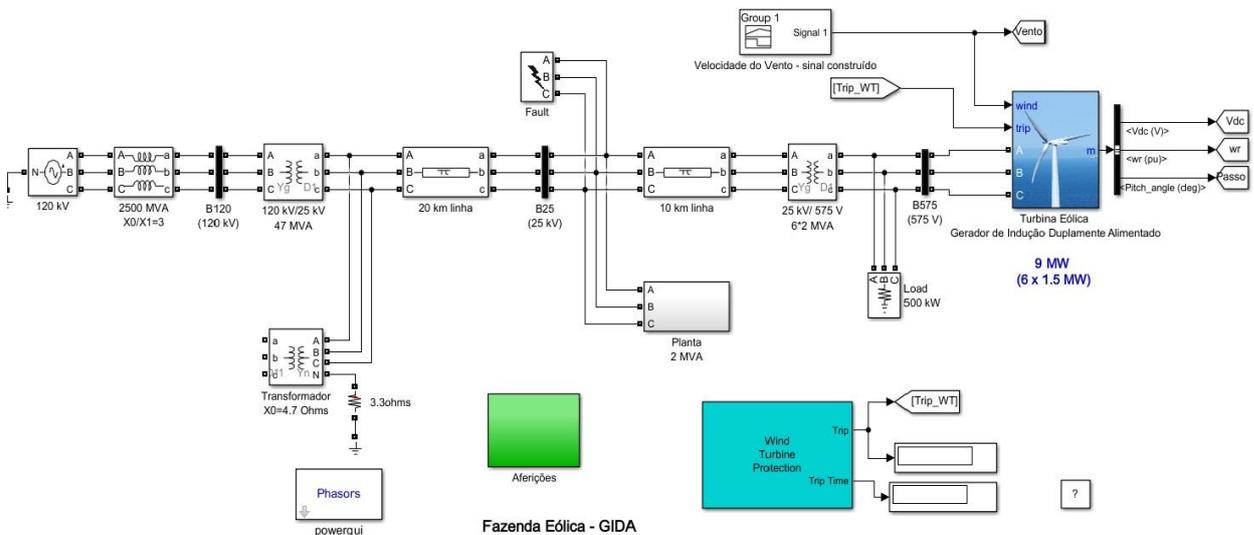


Figura 25 – Diagrama do sistema GIDA. Fonte: autoria própria.

O Matlab/simulink trás em sua biblioteca um modelo de fazenda eólica, um bloco denominado Wind Turbine Doubly Fed Induction Generator (Phasor Type) a qual nos fornece a possibilidade de se estudar o monitoramento da velocidade dos Ventos, o Ângulo de passo, Velocidade do gerador, a Tensão no barramento B575V, Tensão no barramento B25V, Tensão no barramento B120V, Tensão no barramento Vdc e as Potências ativa e reativa no gerador a partir da geração de 9MW de potência. No caso se usam seis aerogeradores de indução duplamente alimentados, onde cada um possui 1,5 MW. A partir deste ponto se tem a conexão desses com um sistema de 25 kV, ao passar por um transformador de 12 MVA, onde se tem a

tensão elevada. Após 30 Km de linha de transmissão, eleva-se novamente a tensão para 120 kV. Para que este sistema de potência fosse alimentado, se usou um transformador de 47 MVA.

Verifica-se ainda que o transformador logo após as turbinas (25kV/575V) tem a configuração de conexão em estrela- triângulo. Os geradores fornecem uma tensão de 575 V, que alimenta uma carga resistiva de 500 kW, a qual está integrada ao sistema. Para se alimentar a planta de 2 MVA tem-se que utilizar um abaixador de tensão de linha de 25 KV para 2,3 KV, com potência de 2,5 MVA.

Na simulação em questão a velocidade inicial imposta foi de 2,5 m/s com término a 39 m/s. Aonde a simulação durou 35s. Em aproximadamente  $t = 13s$  teve-se o alcance da geração máxima de potência que o parque eólico pode fornecer (9 MW). Vale ressaltar ainda que a partir de  $t=5s$ , verifica-se que o gráfico de geração de potência ativa começa a ter um crescimento que acompanha o aumento da velocidade, que ao se aproximar de 35m/s acaba tendo estabilizada a potência nominal de geração. A potência reativa (Q) como esperado no início foi gerada em razão da utilização da energia proveniente da rede para se dar movimento ao rotor e logo em seguida a potência ativa (P) compensou este desbalanço de energia.

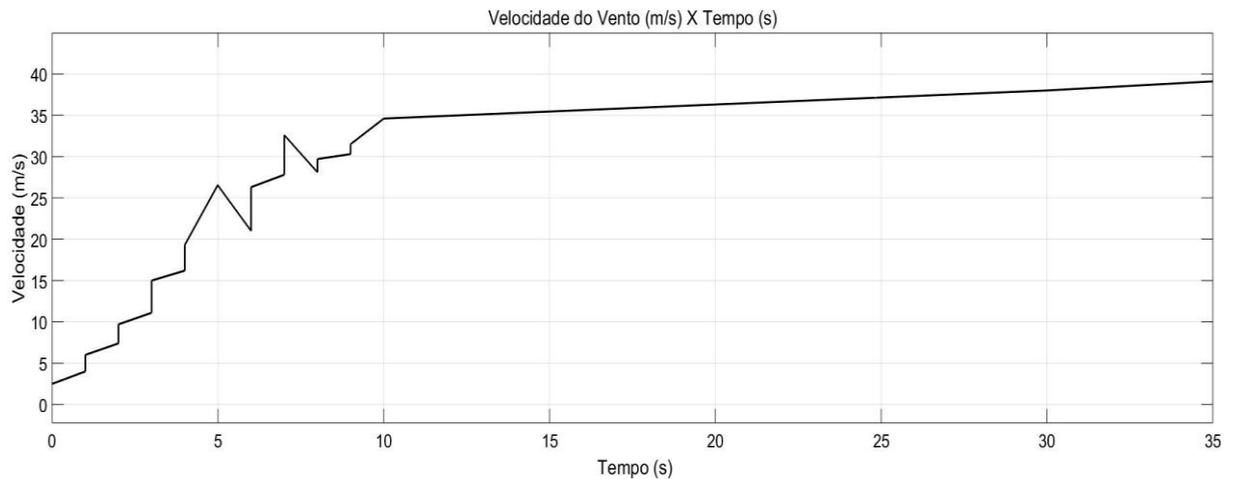


Figura 26 – Gráfico de velocidade do vento em função do tempo. Fonte: autoria própria.

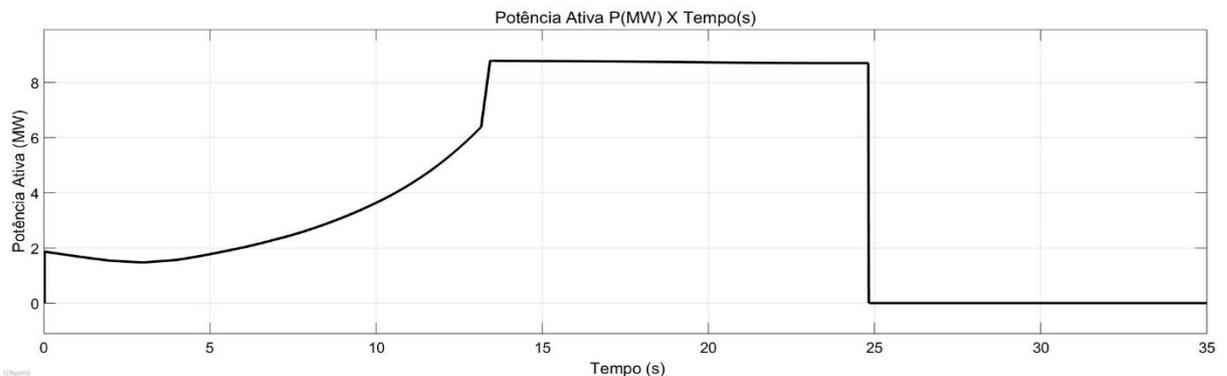


Figura 27 – Gráfico de geração de Potência Ativa em função do tempo. Fonte: autoria própria.

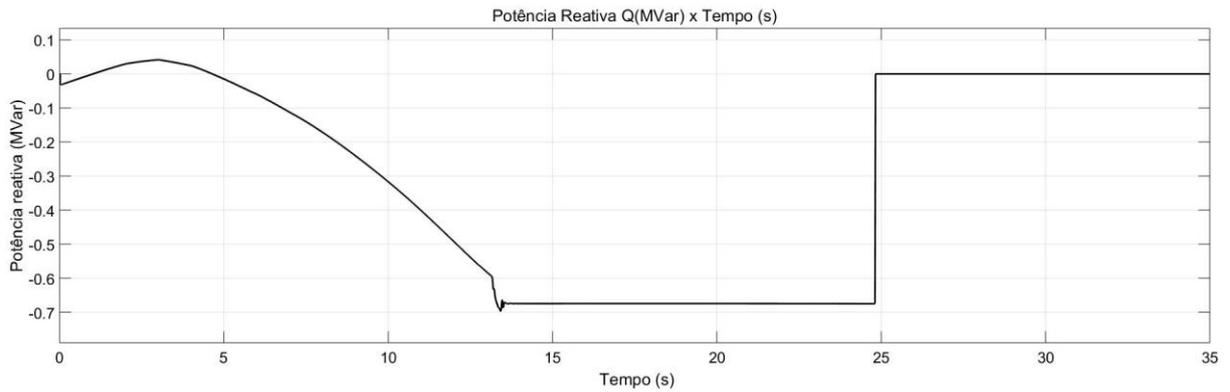


Figura 28 – Gráfico de geração de potência Reativa em função do tempo. Fonte: autoria própria.

É possível verificar que no instante  $t=24.81s$  foi imposta uma proteção para o sistema, o que evidencia um possível desligamento das turbinas para que sejam evitados acidentes ou danos maiores ao maquinário.

A velocidade de entrada nas pás é controlada pelo sistema ativo de passo que para os valores testados, precisa trabalhar a todo o momento para que seja mantida a velocidade nominal dos ventos equilibrada com a geração máxima das turbinas. No gráfico de controle de passo é possível verificar que se começa a se efetuar este tipo de controle a partir do momento em que se alcança a geração máxima, pois mesmo com o aumento de velocidade das pás girando em uma determinada angulação acabam protegendo o sistema e mantendo a geração máxima do parque, as turbinas em análise possuem uma possibilidade de giro de até  $45^\circ$  e no gráfico podemos perceber que para a obtenção do resultado esperado o ângulo variou a partir de aproximadamente  $t=13s$  de  $0^\circ$  até  $36^\circ$ , como pode ser verificado na figura abaixo.

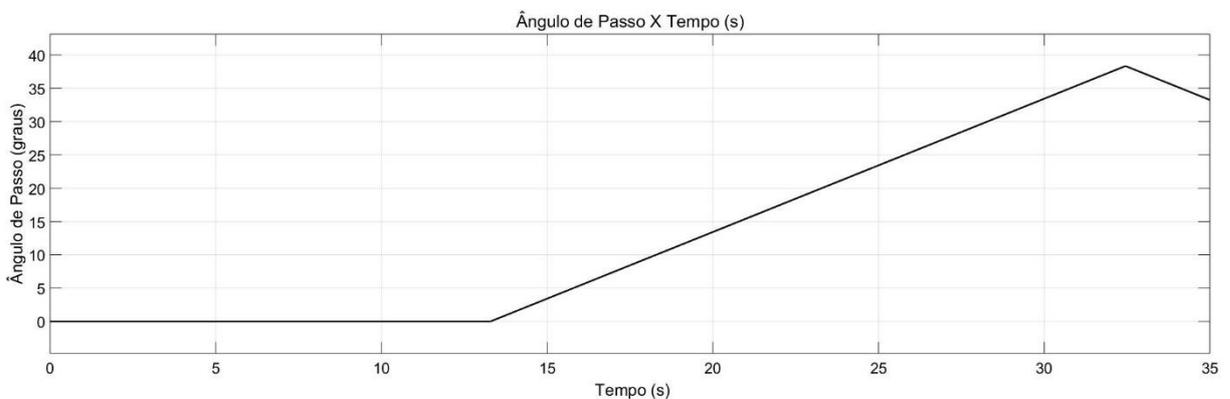


Figura 29 – Gráfico de variação de ângulo das pás em função do tempo. Fonte: autoria própria.

Nesta observação analisou-se que a turbina trabalhou tanto em modo sub-síncrono, principalmente nos instantes iniciais, precisando utilizar na potência rotórica energia proveniente da rede, para que se tivesse iniciado a geração. E em seguida trabalhando em uma velocidade super-síncrona, aonde se viu a atuação do controle de velocidade feito através da mudança de ângulo.

Agora analisando um sistema para Gerador de Indução gaiola de Esquilo, tem-se o seguinte.

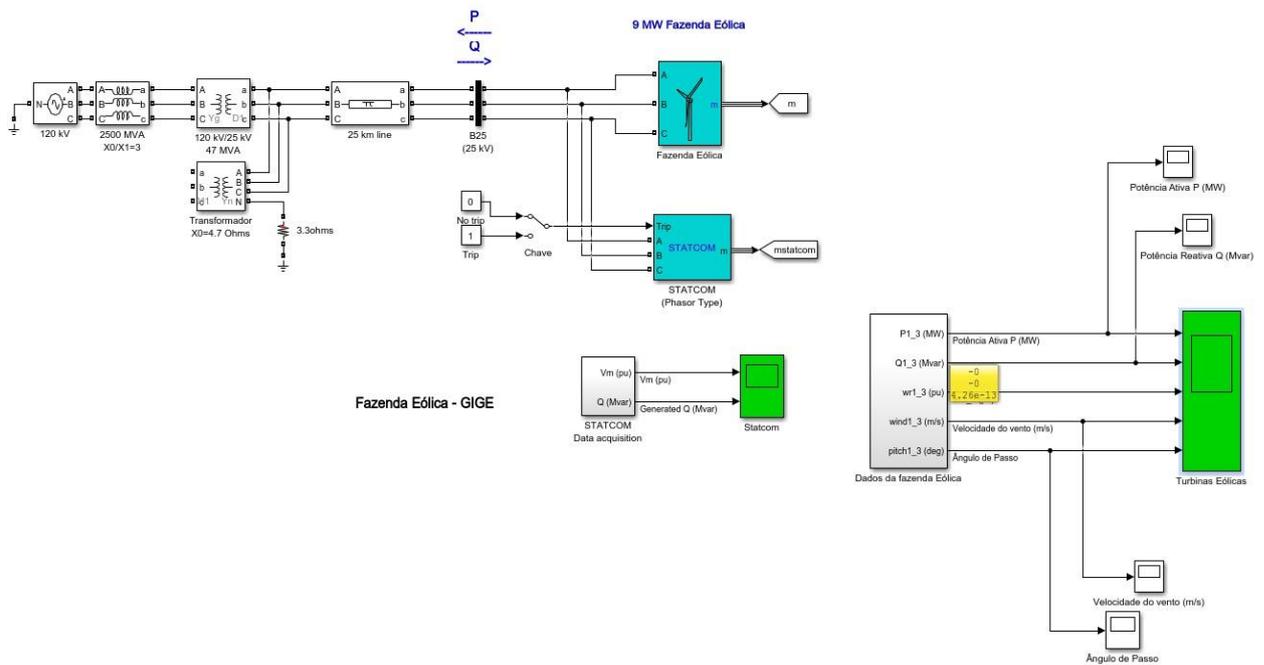


Figura 30 – Diagrama do sistema GIGE. Fonte: autoria própria.

Em comparação com um GIGE, por exemplo, percebe-se que os resultados são diferentes, principalmente quando se trata de potência ativa e reativa no sistema. O sistema foi simulado para a mesma a velocidade utilizada no sistema anterior.

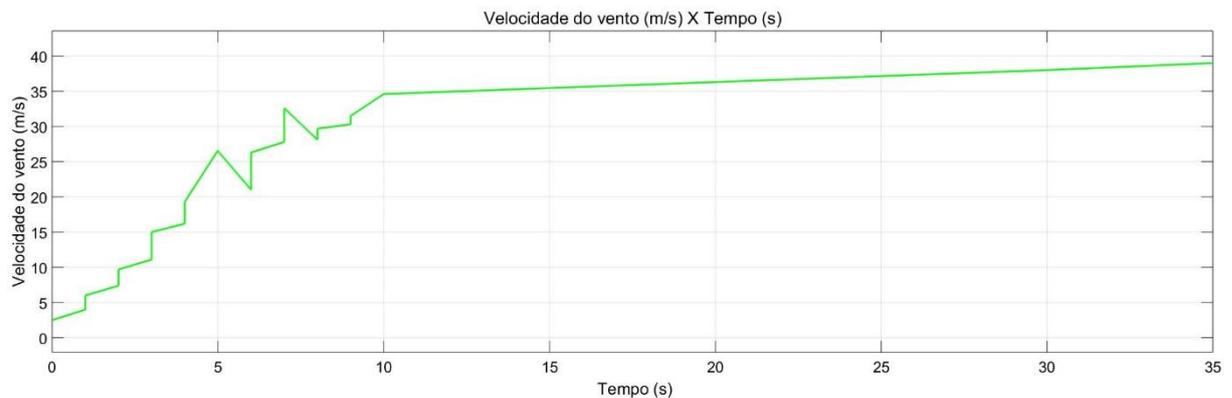


Figura 31 - Gráfico de velocidade do vento em função do tempo. Fonte: autoria própria.

As potências: ativa e reativa no sistema são fatores importantes de serem analisados e decidem qual a melhor turbina a ser utilizada.

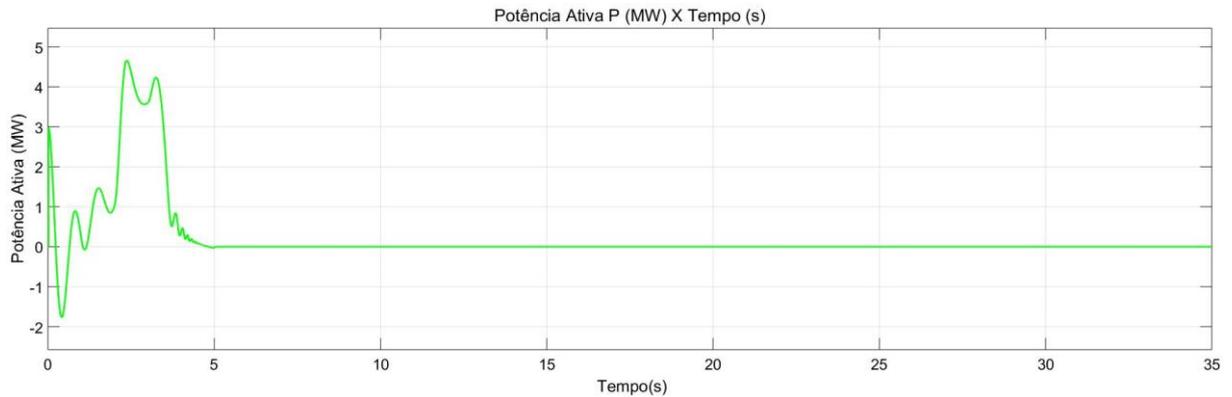


Figura 32 – Gráfico de geração de Potência Ativa em função do tempo. Fonte: autoria própria.

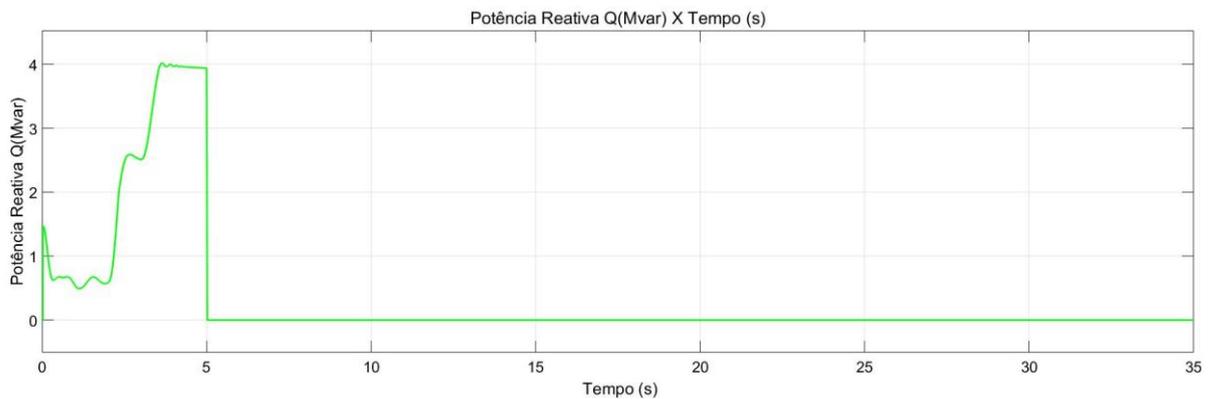


Figura 33 – Gráfico de geração de Potência Reativa em função do tempo. Fonte: autoria própria.

Nos gráficos, vê-se que nestas condições, o GIGE apresenta uma potência reativa muito alta e a partir de, aproximadamente  $t = 4$  s, esta chega a ser superior à potência ativa, o que de fato não é ideal, quando analisamos geração de energia. No instante  $t = 5$  s existe um controle de segurança que leva a produção e o consumo de energia a zero, isto de fato evidencia o desligamento das turbinas.

Quanto ao controle ativo de passo feito se tem o seguinte gráfico.

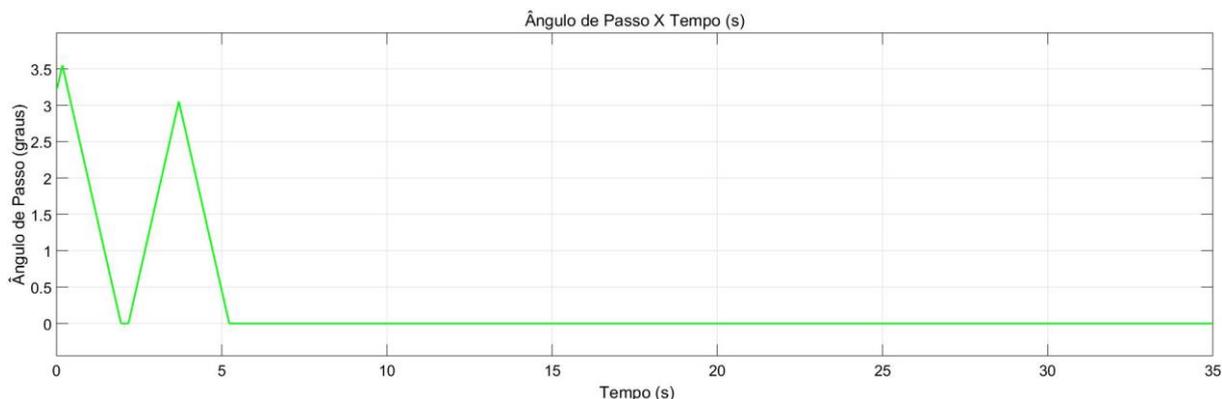


Figura 34 – Gráfico de variação de ângulo das pás em função do tempo. Fonte: autoria própria.

As turbinas neste momento analisadas, para o GIGE, também possuem uma angulação máxima de  $45^\circ$  e como visto no gráfico as pás já iniciaram com um determinado ângulo de ataque, aproximadamente de  $3,5^\circ$ , mas que logo em seguida foi reduzido e após  $t = 5s$  o sistema foi desligado. O resultado foi satisfatório no que refere a observância dos aspectos mencionados teoricamente em que incluem o trabalho do GIDA em baixas rotações, fornecendo um grande torque de partida e ainda permitindo a geração em velocidades variáveis, com uma melhor qualidade quando comparado ao GIGE.

Neste estudo ao se analisar alguns tipos de geradores, chegou-se à conclusão que o melhor modelo a ser utilizado para controle de velocidades é o GIDA, que por sua vez fornece um sistema que permite o controle primário e secundário da frequência, por meio do de conversores de potência (HILIBIG, 2006). Pode-se entender como, também, ocorre a contribuição desse tipo de gerador na adequação da frequência de um sistema elétrico. Além disso, viu-se como se tem a inserção da produção de energia eólica na matriz energética brasileira ao longo dos anos e o princípio de funcionamento e as formas de controle para velocidades.

Neste estudo foi possível se ter um gerador que tem uma função diferenciada dos demais e isto faz com que este modelo esteja presente na maioria dos parques eólicos instalados no mundo. A estrutura mais vista é a que possui conversores de potência, os quais permitem a controle da potência ativa e reativa do gerador, com o controle das correntes dos conversores.

Por este motivo o modelo GIDA acaba sendo estudado. Geralmente, utiliza-se em turbinas que operam em velocidades fixas, os Geradores de Indução Gaiola de Esquilo -GIGE, tendo ligado diretamente à rede, o estator, o que exige do sistema uma adequação da velocidade

com a dada pelo campo do estator, além do GIDA que opera com velocidades variáveis (HILBIG, 2006).

Essa possibilidade de variação apresentada no GIDA permite que se tenha uma redução da fadiga dos componentes de material, além da redução das oscilações de tensão, que por fim, permite a obtenção o melhor aproveitamento da energia do vento mesmo estando em baixas rotações (HILBIG, 2006). Vale ressaltar, que existem outros tipos de geradores que são utilizados em turbinas eólicas, mas que não possuem uma expressividade em suas aplicações.

O GIDA por ter sua geração de energia em acordo com a velocidade rotacional do rotor, a qual deve ser de 10 a 25rpm (AKHMATOV, 2003), ele acaba por inserir os controles de ângulos de ataque em suas pás, possibilitando um melhor rendimento da máquina (HILBIG, 2006).

Portanto, neste trabalho em que se avalia o estudo do GIDA vê-se que este tipo de máquina é a mais propícia a ser utilizada, quando se observam regiões que têm maiores instabilidades nas velocidades do vento, sendo isso, determinante para a escolha de qual gerador utilizar. O uso deste tem sido ampliado e tem ganho cada vez mais espaço no mercado eólico.

## **6.LIMITAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS**

As atividades previstas para serem realizadas e que envolvem programas computacionais, nos colocam à frente de problemas que podem ter diversas abordagens e dentro disso tentou-se focar ao máximo na observação de geração de potência ativa e reativa dos sistemas GIDA e GIGE e a eficiência do primeiro em relação ao segundo, mas por vezes isto se tornou um estudo bastante empírico e foi baseado em resultados provenientes de tentativas realizadas no Matlab/simulink. Isto pode apresentar uma limitação quanto ao estudo completo dos sistemas deste trabalho incluindo nisto a parte responsável pelo controle eletrônico realizado para a se ter a melhor qualidade de energia, o que de fato é bastante complexo e envolve uma parte considerável do conhecimento eletrônico.

As análises que envolvem os impactos dos geradores eólicos na estabilidade da frequência da rede ficaram limitadas, sendo o estudo restringido apenas ao intuito de se gerar mais potência ativa e evitar a reativa e de como o GIDA tem ganho cada vez mais espaço no mercado eólico, em razão de se ter uma flexibilidade de funcionamento para velocidades variáveis.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Dados Mensais**. São Paulo, 2017.

AMARANTE, O.; ZACK, M.; SA, A. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. 2008. Disponível em:< <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf> >. Acesso em 15 de Jun. 2016.

AKHMATOV, V. **Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power**. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 2003.

BUENO, J. **A Matriz Energética Brasileira: Situação Atual e Perspectivas**. 2013.

BIN, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 2ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

BURTON, T., et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.

CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica / UFPE. **Tecnologias de Aproveitamento – Turbinas eólicas**, 2000. Disponível em:<[www.eolica.com.br](http://www.eolica.com.br). (adaptado)> Acesso em: 10 de Jun. 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA EÓLICO, Salvo Brito. **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. P.15.2011.

CRESESB – **Tipos de Aerogeradores Para Geração de Energia Elétrica**, 2015. Disponível em:<[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&catid=3#cap\\_\\_4](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=3#cap__4)>. Acesso em: 10 Jun. 2016.

EQUIPE DE P&D CEEE. **Análise das Principais Tecnologias Utilizadas em Geração Eólica**. UFSM. Santa Maria, p. 66. 2006.

EPE – Empresa Prodrutora de Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**, 2007. Disponível em:< [http://www.epe.gov.br/PNE/20080111\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf)>. Acesso em: 15 de Jun. 2016.

EPE – Empresa Prodrutora de Energia. **Balanço Energético Nacional**, 2015. Disponível em:< <https://ben.epe.gov.br/default.aspx?anoColeta=2015>>. Acesso em: 15 de Jun. 2016.

FERREIRA, J. **Controlo de geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas**. Lisboa, 2009.

FILHO, A.; CARDOSO, J. **Energia eólica: Tipos de geradores e conversores usados atualmente**. 2014.

GORINI, R.; GUERREIRO, A.; TOLMASQUIM, M.. **Matriz Energética Brasileira: Uma perspectiva**. São Paulo, 2007.

HILBIG, T. **Aplicação de aerogeradores do tipo indução**. 2006.

JARDIM, A. **Utilização de Máquina de Indução Duplamente Alimentada sem Escovas (BDFM) como Gerador Eólico**. Rio de Janeiro, 2014.

LIMA, R. **Estudo Experimental e Numérico do Comportamento de Uma Turbina Eólica em Escala Reduzida**. Brasília, 2014.

LIMITE de betz. Disponível em: <[aerogeradores.org/limitedebetz](http://aerogeradores.org/limitedebetz)>. Acesso em: 7 de Jun. 2016.

MAURI, F. **Estudo de Geradores Eólicos de Velocidade Fixa Conectados à Rede Elétrica**. Viçosa, 2011.

EQUIPOS para viento. Disponível em:< <http://meteorologia.pucp.edu.pe/estacion/bevientoe.html> >. Acesso em: 10 de Jun. 2016.

RAMOS, E. et al. **Comportamento do Gerador Eólico Duplamente Alimentado Submetido Distúrbios na Rede Elétrica e à Variação da Velocidade do Vento**. Revista brasileira de Energia, Vol. 20, N°1, 1° sem. pp 129-157, 2014.

RUNCOS, F.; CARLSON, R.; KUO- PENG, P.; VOLTOLINI, H.; BATISTELA, N.J.  
**Geração de Energia Eólica, Tecnologias Atuais e Futuras.** WEG Máquinas, 2000.

SANTOS, Alison Alves et. al. **Projeto de Geração de Energia Eólica.** Santos, 2006.