

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

YURI CALIL LOURES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO  
PARQUE EÓLICO DO CEARÁ**

VIÇOSA  
2011

YURI CALIL LOURES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO  
PARQUE EÓLICO DO CEARÁ**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. M.Sc. Heverton Augusto Pereira

VIÇOSA  
2011



**YURI CALIL LOURES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO  
PARQUE EÓLICO DO CEARÁ**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 01 de Julho de 2011

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. M.Sc. Heverton Augusto Pereira - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. Dr. Avaliador José Carlos da Costa Campos - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. Dr. Avaliador José Tarcício de Resende - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“Você não é amado porque você é bom, você é bom porque é amado”*

*(Nelson Mandela)*

*Dedico esse trabalho aos meus pais Joaquim e Rosângela*

## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e meus irmãos pelo apoio que recebi não só durante o desenvolvimento desse trabalho, mas durante a vida.

Ao meu orientador Heverton Augusto Pereira, pois além de ter me passado as informações necessárias ao desenvolvimento deste trabalho, teve que agüentar minhas imitações e os vídeos no GESEP.

Ao pessoal do GESEP pela ajuda nos momentos de duvida e pela amizade.

E a todos que de certa forma contribuíram para eu chegar até aqui.

## *Resumo*

Dentre os estados brasileiros, o Ceará é atualmente o detentor do maior potencial eólico instalado. Portanto, é interessante fazer uma análise da qualidade de energia elétrica gerada via energia eólica nesse estado. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo a representação e a análise da matriz eólica do estado do Ceará por meio do ambiente Matlab/Simulink, que é um software de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. O sistema será composto por blocos representando as 17 usinas eólicas existentes atualmente no Ceará. Cada usina será constituída por um conjunto de geradores de indução com potência de 3,0 MW do tipo gaiola de esquilo, que serão acionados pela variação das velocidades dos ventos incidentes sobre os mesmos. O parque eólico será ligado a uma rede de 4808 MVA localizada na cidade de Fortaleza, sendo que o comprimento da linha de cada central eólica ligada à rede será definido pela distância da sua cidade de origem a Fortaleza. O sistema de transmissão será composto ainda por um transformador elevador de tensão. A simulação foca no estudo do afundamento de tensão, que é o fenômeno mais comum que acomete ao sistema elétrico, sendo caracterizado por uma redução curta na magnitude da tensão. Esse aspecto será de grande relevância para o presente trabalho, uma vez que o comprometimento da qualidade da energia pode ocasionar grandes prejuízos ao cliente, parando processos inteiros ou até mesmo fábricas.



## *Abstract*

Among the Brazilian states, Ceará is currently the largest owner of wind power installed. It is therefore interesting to analyze the quality of electrical energy generated by wind power in this state. Thus, this work aims to represent and analyze the wind array of Ceará using the interface of Matlab/simulink, which is a software of modeling, simulation and analyzes of dynamic systems. The system will consist of blocks representing the 17 wind farms currently existing in Ceará. Each plant will comprise a set of induction generators of squirrel cage with power of 3,0 MW, that will be driven by varying the wind speed incident on them. The wind farm will be connected to a three-phase source of 4808MVA located in Fortaleza, being the line length of each wind farm connected to the three-phase source will be defined by the distance of their city of origin to Fortaleza. The transmission system is also composed of a voltage transformer. The simulation focuses on the study of voltage sags, which is the most common phenomenon that affects the electrical system, being characterized by a short reduction in voltage magnitude. This aspect will be of great relevance for this paper, because compromising the quality of energy can cause great harm to the client, stop entire processes or even plants.

# *Sumário*

1	Introdução.....	15
1.1.	Potencial eólico do Ceará .....	18
1.1.1.	Introdução.....	18
1.1.2	Base de Dados .....	19
1.2.	Motivações .....	20
1.3.	Objetivos.....	21
1.4.	Organização do trabalho .....	21
2	Revisão bibliográfica.....	22
2.1.	Aerogeradores.....	22
2.1.1.	Introdução.....	22
2.1.2.	Partida de um aerogerador .....	23
2.2.	Fazendas eólicas .....	24
2.2.1.	Conexão da usina eólica .....	24
2.2.2.	Esquema elétrico de um parque eólico .....	25
2.2.3.	Características da energia elétrica de fonte eólica.....	25
2.2.4.	Qualidade de energia elétrica produzida em um parque eólico.....	26
2.2.5.	Partida de um parque eólico .....	26
2.3.	Afundamento de tensão .....	27
2.3.1.	Causas dos afundamentos de tensão.....	28
2.3.2.	Consequências dos afundamentos de tensão .....	28
2.3.3.	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede básica .....	28
3	Metodologia .....	30
3.1.	Considerações Gerais (Metodologia sem o afundamento de tensão).....	30
3.2.	Dimensionamento dos componentes e parâmetros do sistema.....	31
3.2.1.	Parte de transmissão do sistema .....	32
3.2.1.	Parte de geração do sistema.....	33
3.3.	Considerações Gerais (Metodologia com o afundamento de tensão) .....	35
4	Resultados e Discussões.....	37
5	Conclusões.....	49

Referências Bibliográficas .....	50
----------------------------------	----

## *Lista de Figuras*

Figura 1– Evolução das turbinas eólicas desde 1985 até 2005 ( <i>CRESESB, 2008</i> ) .....	16
Figura 2 – Utilização internacional da energia eólica ( <i>GLOBAL WIND REPORT, 2010</i> ) .....	17
Figura 3 – Mapa dos ventos de parte do território brasileiro ( <i>Feitosa, 2010</i> ).....	18
Figura 4 – Nível de concentração das potências eólicas nas cidades cearenses.....	20
Figura 5 – Estrutura de um aerogerador moderno (Aeromini 2009).....	22
Figura 6- Vista do interior da nacela de um aerogerador utilizando um gerador multipolos ( <i>CRESESB, 2008</i> ) .....	23
Figura 7 - Partida de um aerogerador conectado ao sistema elétrico por meio de um gerador de indução acoplado diretamente a rede ( <i>Custódio, 2009</i> ) .....	24
Figura 8– Gráfico de partida de uma fazenda eólica com 10 aerogeradores de 500kW ( <i>Custódio, 2009</i> ) .....	27
Figura 9 – Tensão nos terminais dos aerogeradores ( <i>ONS, 2010</i> ).....	29
Figura 10 – Mapa eólico do Ceará no ambiente Matlab/simulink 2009a.....	30
Figura 11 – Esquema da central eólica de Praia Formosa.....	32
Figura 12 – Esquema de geração de um gerador do Grupo_Faz_1 de Praia Formosa.....	33
Figura 13 – Potência gerada versus velocidade do vento para o gerador do sistema.....	34
Figura 14 – Esquema da central eólica de Praia Formosa com a presença do bloco de falta ..	35
Figura 15 – Mapa eólico do Ceará no ambiente Matlab/simulink 2009 <sup>a</sup> para a simulação com afundamento de tensão.....	36
Figura 16– Tensão em pu anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa.....	37
Figura 17 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa.....	38
Figura 18 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa.....	38
Figura 19– Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa.....	39

Figura 20 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa.....	40
Figura 21 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa.....	40
Figura 22– Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio .....	41
Figura 23 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio .....	41
Figura 24 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio .....	42
Figura 25 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio .....	42
Figura 26 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio .....	43
Figura 27 – Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru	43
Figura 28 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru .	44
Figura 29 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru	44
Figura 30 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru .....	45
Figura 31 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru .....	45
Figura 32– Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe .....	46
Figura 33 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe	46
Figura 34 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe .....	47
Figura 35– Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe .....	47
Figura 36 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe .....	48

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 – Distribuição da potência eólica nacional entre os estados brasileiros .....	17
Tabela 2 – Usinas eólicas existentes atualmente no estado do Ceará .....	19
Tabela 3 – Parâmetros da fonte trifásica.....	31
Tabela 4- Parâmetros do transformador .....	33

## ***1 Introdução***

Um dos pontos principais abordados na atualidade é a questão energética. O consumo de energia está diretamente relacionado à qualidade de vida de uma sociedade. O aumento da demanda energética mundial devido ao avanço dos moldes de vida nas nações em crescimento resulta na preocupação com alguns aspectos obrigatórios para a política e projeto energético de todas as economias em ascensão. Dentre eles, pode-se mencionar a segurança no fornecimento de energia necessária para o progresso social e econômico de um país. A preocupação com o abastecimento de energia está relacionada ao aumento dos preços de mercado dos combustíveis fósseis e ao possível esgotamento das reservas petrolíferas nas próximas décadas. Questões ambientais também são capazes de diminuir a segurança energética, como momentos longos de estiagem, que comprometem a produtividade da biomassa e geração hidroelétrica. Assim, como forma de minimizar os choques acarretados pelas crises internacionais que comprometem o mercado de combustíveis fósseis, houve a adoção de fontes energéticas renováveis objetivando complementar a matriz energética de um país (Martins, Guarnieri, & Pereira, 2008).

Dentre as fontes de energias renováveis, pode-se destacar a energia mecânica produzida pelos ventos, que vem contribuindo expressivamente para o suprimento das necessidades da população mundial, quanto à produção de eletricidade. A primeira turbina eólica de grande porte para aplicações elétricas foi desenvolvida na Rússia em 1931. O aerogerador Balaclava (assim chamado) era um modelo avançado de 100 kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km, a uma usina termelétrica de 20 MW. No entanto, o grande avanço no desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte ocorreu somente a partir da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), devido à necessidade dos países em economizar combustíveis fósseis. O maior gerador projetado até então pertencia aos Estados Unidos. Tratava-se do aerogerador Smith-Putnam cuja estrutura apresentava 53.3 m de diâmetro, uma torre de 33.5 m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, utilizou-se um gerador síncrono de 1250 kW com rotação constante de 28 rpm, operando em corrente alternada e diretamente conectado à rede elétrica local. Com o término da Segunda Guerra Mundial, os combustíveis fósseis voltaram a ser abundantes em todo o

cenário mundial, e um estudo econômico da época mostrava que os aerogeradores não eram mais competitivos, fazendo com que os projetos em desenvolvimento fossem abandonados. Durante os últimos 15 anos, houve um rápido desenvolvimento nos tamanhos e tecnologias das turbinas eólicas no mundo. A Figura 1 mostra o espantoso desenvolvimento da dimensão e da potência de turbinas eólicas desde 1985. (CRESESB, 2008).

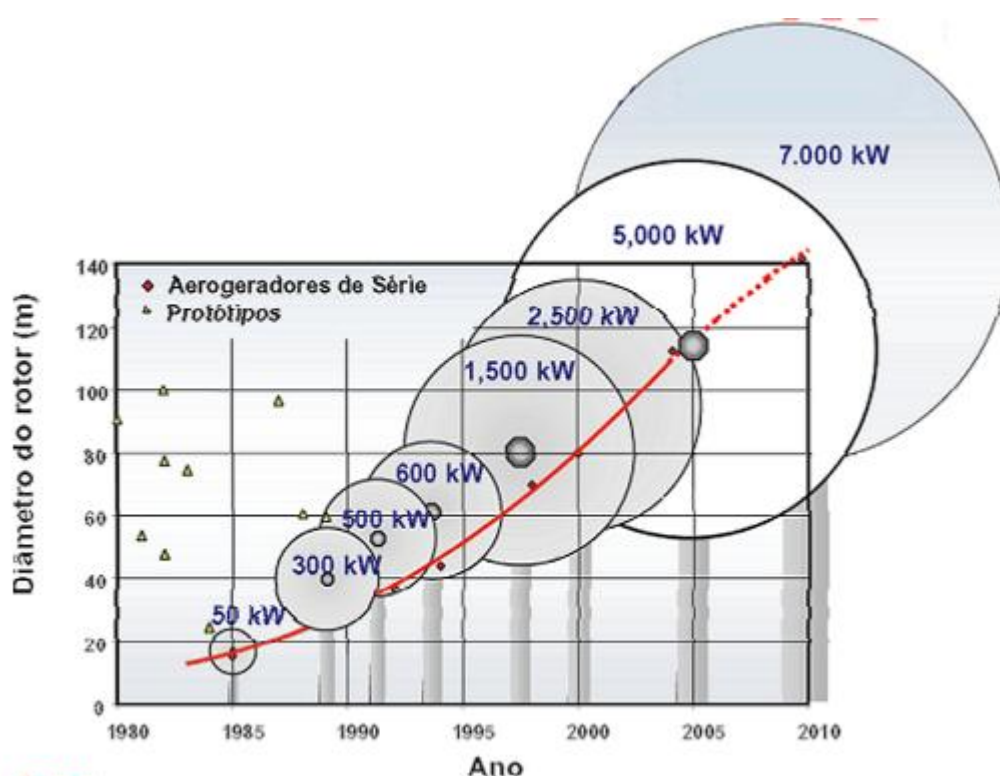


Figura 1– Evolução das turbinas eólicas desde 1985 até 2005 (CRESESB, 2008)

Na última década, a energia eólica vem crescendo globalmente de modo significativo, a uma taxa de crescimento médio anual superior a 25%. Hoje em dia, a capacidade instalada no mundo é de 194.390 MW. Grandes investimentos levarão o mundo a dobrar essa potência em três anos e meio (crescimento anual superior a 20%) de acordo com o GWEC (GLOBAL WIND ENERGY CONCIL). Fazendo uma projeção futura, serão construídas mais de três usinas equivalentes a Itaipu, por ano, nos próximos quatro anos, na forma de geração eólica (MML Energia, 2009). A Figura 2 mostra como a utilização de energia eólica vem crescendo nos últimos anos.



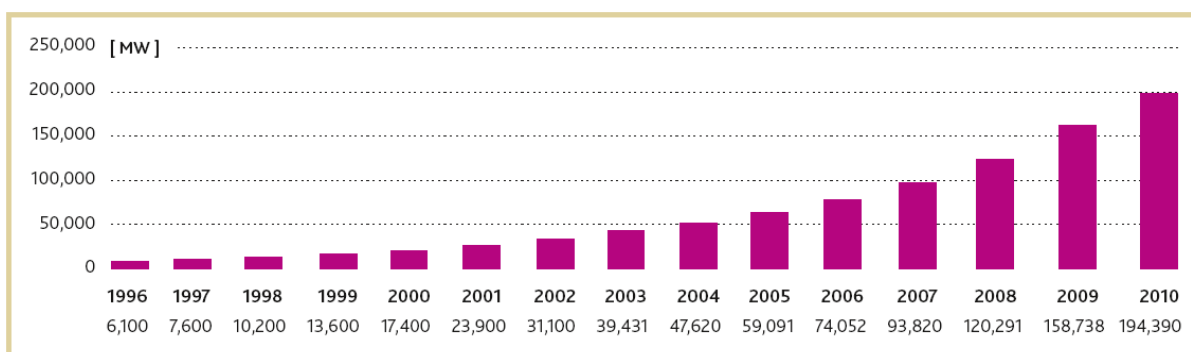


Figura 2 – Utilização internacional da energia eólica (*GLOBAL WIND REPORT, 2010*)

No cenário nacional houve recentemente um aumento considerável na capacidade de geração de energia eólica, onde ocorreu um acréscimo de 77,7 % da produção dessa energia do ano de 2008 para o ano de 2009. Para o diretor-executivo da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), Pedro Perrelli, o desenvolvimento do parque eólico do país só não é maior porque o Brasil tem muita capacidade hidrelétrica instalada e potencial (*Ecodebate, 2010*). O Valor da potência total eólica instalada atualmente no Brasil é de 928.926 KW, sendo essa potência distribuída entre nove estados brasileiros. A Tabela 1 mostra como é distribuída a potência entre os estados.

Tabela 1 – Distribuição da potência eólica nacional entre os estados brasileiros

Estado	Potência Total (kW)
Ceará	518.934
Rio Grande do Sul	158.000
Rio Grande do Norte	102.100
Paraíba	61.800
Rio de Janeiro	28.050
Pernambuco	25.200
Piauí	18.000
Santa Catarina	14.400
Paraná	2.502

Analisando a Tabela 1, percebe-se que o Ceará é o estado brasileiro responsável pela maior parte da produção de energia eólica nacional, correspondendo a 55,86% do produto total.

## 1.1. Potencial eólico do Ceará

### 1.1.1. Introdução

Sob o ponto de vista da renovabilidade dos ventos, os recursos são abundantes e constantes. O Mapeamento Eólico do Ceará (1996) demonstrou, conforme as medições, que os ventos alcançam médias altíssimas com velocidade média de 8,0 a 10,0 m/s no período de ventos mais fortes de julho a dezembro, e velocidade superior a 5,5 m/s na baixa estação de ventos, no período de fevereiro a maio (Raimundo Eduardo Silveira Fontenele). Sendo assim, o potencial eólico do Ceará é um dos maiores do Brasil atual Atlas Eólico do Estado estabeleceu que o potencial viável do Ceará é de mais de 25 mil MW on-shore (em terra), podendo chegar a 35,5 mil MW pelo aproveitamento da plataforma continental (off-shore) (BRASELCO 2011). A Figura 3 ilustra alguns aspectos que tornam o Ceará um estado de ótimo potencial eólico.

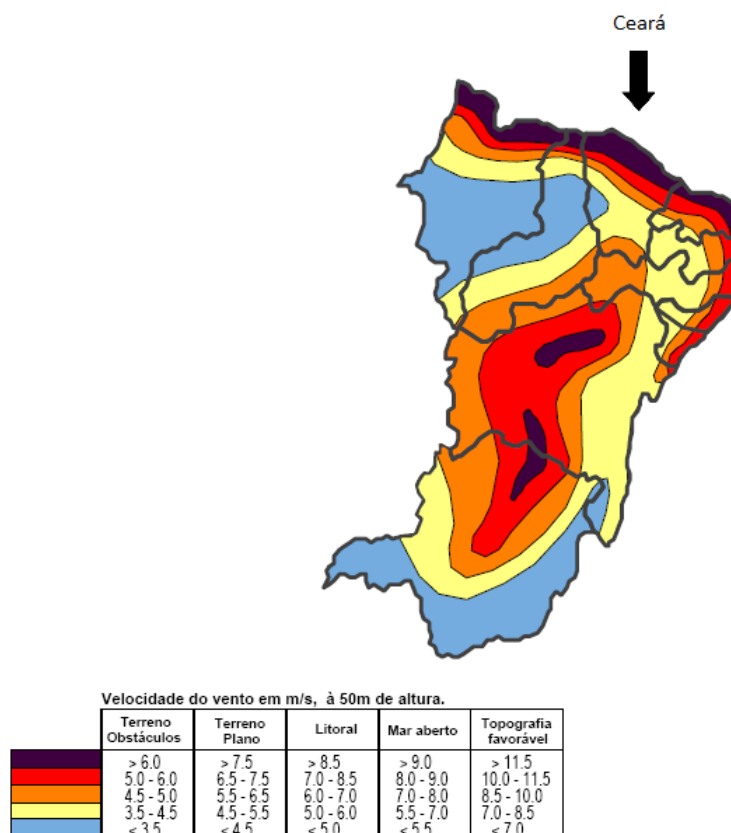


Figura 3 – Mapa dos ventos de parte do território brasileiro (Feitosa, 2010)

### 1.1.2 Base de Dados

Logo seria interessante fazer um levantamento do impacto causado na rede pelas usinas eólicas em funcionamento nesse estado. A Tabela 2 ilustra as dezessete usinas eólicas existentes atualmente no estado do Ceará e suas potências correspondentes.

Tabela 2 – Usinas eólicas existentes atualmente no estado do Ceará

Usina	Município	Potência total (kW)
Bons Ventos	Aracati	50.000
Canoa quebrada	Aracati	57.000
Eólica canoa quebrada	Aracati	10.500
Eólica da prainha	Aquiraz	10.000
Eólica de Taíba	São Gonçalo do Amarante	5.000
Eólica Icaraizinho	Amontada	54.600
Eólica Paracuru	Paracuru	23.400
Eólica praias de parajuru	Beberibe	28.804
Foz do rio choró	Beberibe	25.200
Lagoa do Mato	Aracati	3.230
Mucuripe	Fortaleza	2.400
Parque eólico de Beberibe	Beberibe	25.600
Parque eólico Enacel	Aracati	31.500
Praia do Morgado	Aracaú	28.800
Praia Formosa	Camocim	104.400
Taíba albatroz	São Gonçalo do Amarante	16.500
Volta do rio	Aracaú	42.000
<b>Total</b>		<b>518.934</b>

Percebe-se que as usinas estão espalhadas entre nove cidades cearenses, sendo a cidade de Aracati o local de maior concentração de usinas eólicas do estado. A Figura 4 mostra a concentração de potência eólica em cada uma das cidades cearenses de acordo com o diâmetro dos anéis em vermelho.

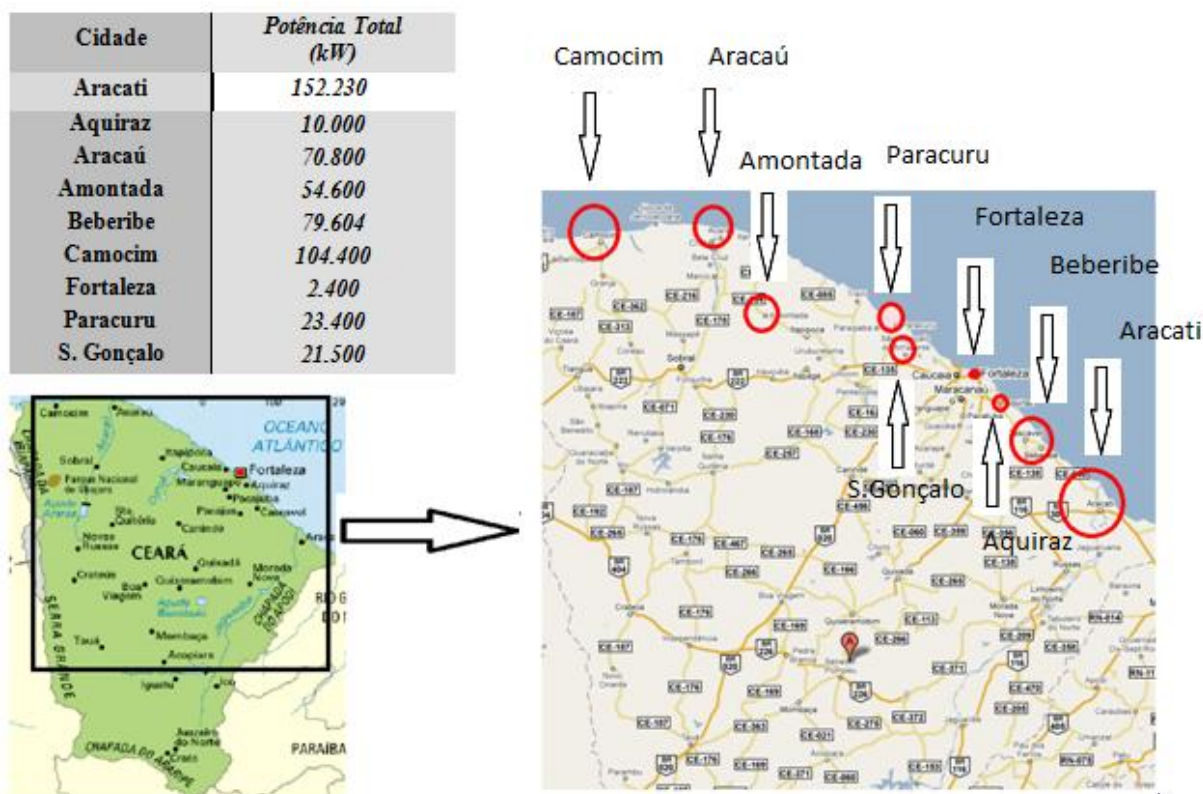


Figura 4 – Nível de concentração das potências eólicas nas cidades cearenses

Fazendo uma análise da Figura 4, observa-se que todas as usinas eólicas do estado situam-se na região norte do Ceará. Isso pode ser justificado pelo exame da Figura 3, onde nota-se que a região norte do Ceará é o local com a maior incidência de ventos do estado.

## 1.2. Motivações

A replicação do mapa eólico do Ceará é de grande importância uma vez há uma grande preocupação nos dias atuais em se buscar formas de produção de energias renováveis, devido ao possível esgotamento das reservas petrolíferas e aumento de preço dos combustíveis fósseis.

Devido ao fato do afundamento de tensão que ocorre devido à faltas no sistema eólico, ser o principal responsável pela queda na qualidade de energia do sistema, a análise do mesmo será de grande relevância para o presente trabalho, uma vez que o comprometimento da qualidade da energia pode ocasionar grandes prejuízos financeiros ao cliente, parando processos inteiros ou até mesmo fábricas. Hoje em dia já existem dispositivos compensadores

baseados em técnicas de eletrônica de potência que possibilitam uma rápida compensação de afundamento.

### **1.3. Objetivos**

Esse trabalho tem como objetivos representar o mapa eólico cearense por meio do ambiente Matlab/simulink 2009a e fazer um estudo da qualidade de energia gerada pelo sistema. O estudo da qualidade de energia será focado no afundamento de tensão, que é um dos fenômenos que mais acometem na qualidade de energia de um sistema.

### **1.4. Organização do trabalho**

A organização deste trabalho será feita da seguinte forma:

No capítulo 2 será apresentado um referencial teórico sobre o assunto abordado. Serão abordadas questões como o funcionamento de aerogeradores, o funcionamento de fazendas eólicas e as causas e conseqüências dos afundamentos de tensão.

No capítulo 3 serão descritas as metodologias utilizadas para se chegar ao objetivo do trabalho. Serão mostrados nesse capítulo os sistemas utilizados para simulação bem como os parâmetros dos equipamentos de maior importância para o sistema.

No capítulo 4 serão apresentados os resultados de maior relevância para o sistema bem como a discussão sobre os mesmos.

Finalmente, no capítulo 5 serão feitas conclusões levando em conta os objetivos propostos pelo trabalho.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1. Aerogeradores

#### 2.1.1. Introdução

Energia eólica é a energia cinética armazenada nas massas de ar em circulação, que é aproveitada através da conversão da energia cinética de translação em energia mecânica, utilizando aerogeradores para a obtenção de eletricidade. Existem vários tipos de técnicas empregadas no projeto de aerogeradores e este trabalho dará ênfase aos geradores eólicos de velocidade variável, de indução e com rotor em gaiola de esquilo (*Valise, 2009*).

Um aerogerador é constituído pelas seguintes partes: Pás; Cubo do rotor; Nacele; Engrenagens; Caixa multiplicadora de rotação; Gerador; Torre. A Figura 5 ilustra a estrutura de um aerogerador moderno.

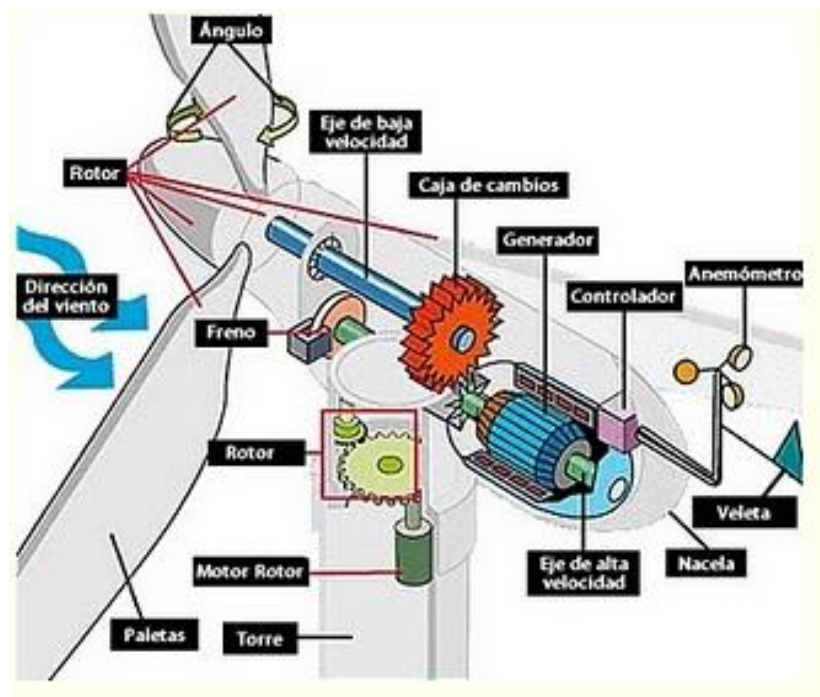


Figura 5 – Estrutura de um aerogerador moderno (Aeromini 2009)

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, transformando parte de sua energia cinética em energia mecânica. Nos aerogeradores que usam controle de velocidade por passo, a pá modificará seu ângulo de ataque através do giro dos rolamentos em sua base. As pás são fixadas por meio de flanges em uma disposição metálica a frente do aerogerador designada cubo, que é construída em aço ou liga de alta resistência. O cubo acomodará os mecanismos e motores para a adaptação do ângulo de ataque de todas as pás e proporcionará rolamentos para fixação das pás nos aerogeradores que utilizam o controle de velocidade por passo. O eixo da turbina terá a função de acoplar o cubo ao gerador, fazendo a transferência da energia mecânica da turbina, sendo constituído por aço ou liga metálica de alta resistência. Já a nacela é a estrutura montada sobre a torre, onde se localizam o gerador, a caixa de engrenagens, todo o sistema de controle, medição do vento e motores para adequar a turbina ao melhor posicionamento em relação ao vento. A Figura 6 ilustra a estrutura interna de uma nacela utilizando um gerador multipolos (CRESESB, 2008).

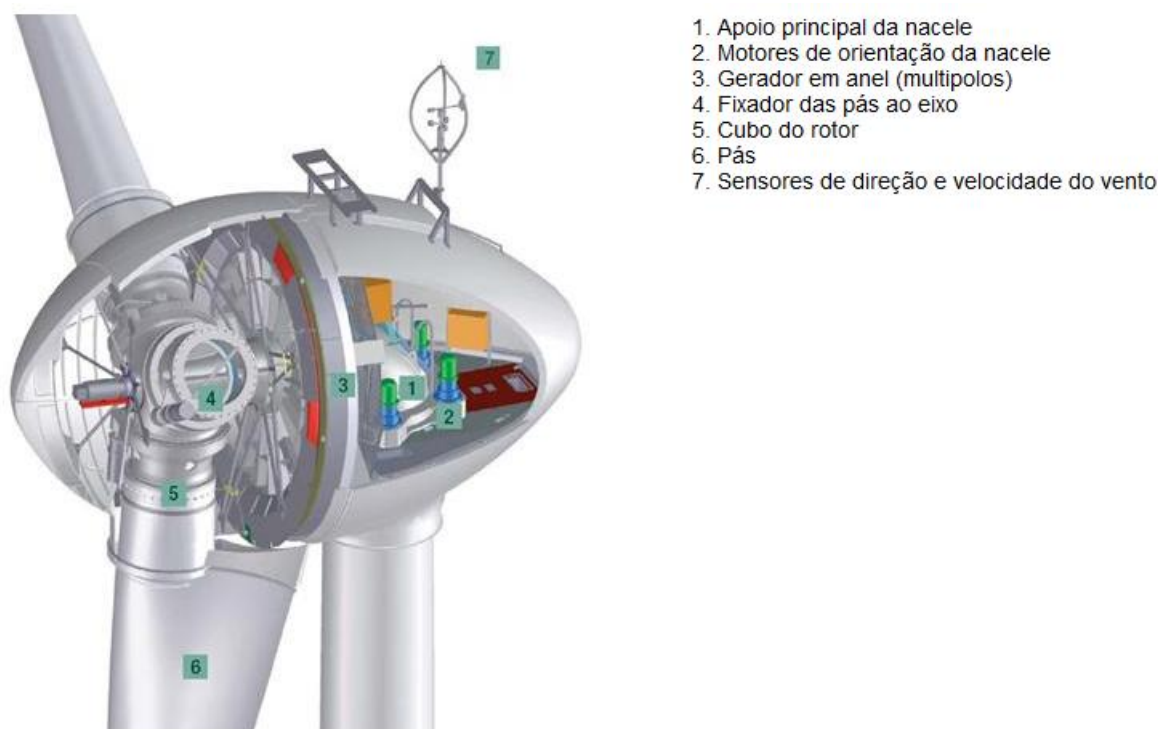


Figura 6- Vista do interior da nacela de um aerogerador utilizando um gerador multipolos (CRESESB, 2008)

### 2.1.2. Partida de um aerogerador

A Figura 7 mostra a partida de um aerogerador conectado ao sistema elétrico por meio de um gerador de indução acoplado diretamente a rede.  $I_p/I_n$  é a relação entre a corrente de

partida e a corrente nominal do aerogerador e  $V_p/V_n$  é a relação entre as tensões de partida e nominal.

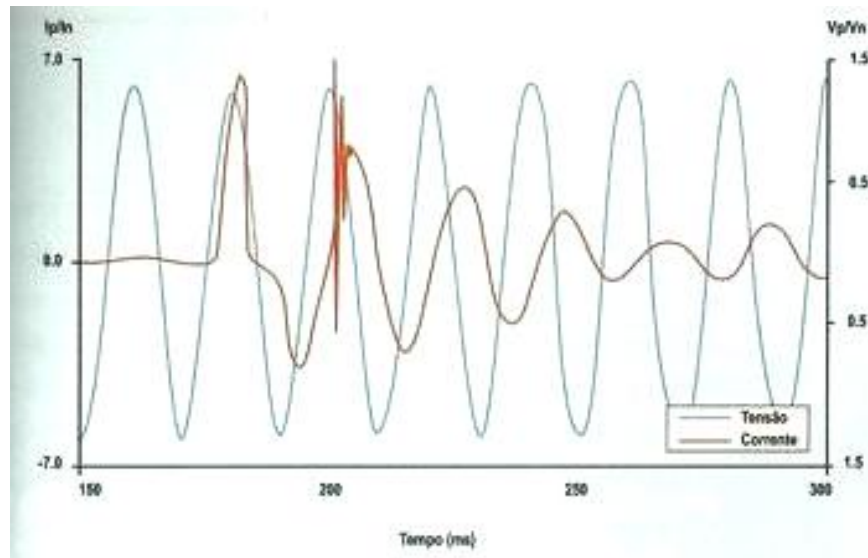


Figura 7 - Partida de um aerogerador conectado ao sistema elétrico por meio de um gerador de indução acoplado diretamente a rede (Custódio, 2009)

A corrente transitória alcança aproximadamente sete vezes o valor de regime. Observa-se ainda uma grande oscilação de corrente, de alta frequência, que deforma ainda mais a forma de onda no terceiro período da onda de tensão, produzida pela energização dos capacitores de compensação do aerogerador.

## 2.2. Fazendas eólicas

### 2.2.1. Conexão da usina eólica

Um dos principais parâmetros no projeto de um parque eólico é a análise da conexão da usina eólica no sistema elétrico. Pelo fato da construção de grandes extensões de linhas de transmissões e subestações encarecerem o projeto, há a necessidade de se conhecer o ponto de conexão na região antes de viabilizá-lo. Devem-se avaliar as opções de conexões a rede, as consequências técnicas e econômicas destas escolhas e as possíveis limitações elétricas. Como todos os tipos de produção de energia elétrica, para que seja feito um projeto de geração de energia eólica devem-se conhecer profundamente as características do sistema



elétrico ao qual a usina será interconectada. Parâmetros da rede elétrica como tensão, frequência impedâncias e capacidade devem ser conhecidos para que o gerador e seus sistemas de controle e proteção sejam corretamente dimensionados. As conexões as redes são feitas de acordo com a disponibilidade da região. A rede elétrica será classificada de acordo com seu nível de tensão (*Custódio, 2009*).

A definição de um local para implantação de uma fazenda eólica requer um processo longo para avaliação de todos os condicionantes que determinam qual o melhor ponto. Devem ser considerados, além do potencial eólico promissor, espaço disponível para instalação da fazenda eólica, preço da terra, distância em relação à rede onde a energia pode ser injetada, acessibilidade, condições para a montagem das turbinas de solo e de infra-estrutura na região, custos de manutenção, remuneração pela energia produzida, etc (*OCÁCIA, 2002*).

### **2.2.2. Esquema elétrico de um parque eólico**

O parque eólico é formado por um conjunto de aerogeradores ligados em paralelo, constituindo assim uma usina de produção de energia elétrica. Há necessidade de instalação de um transformador elevador na saída de cada aerogerador, já que a tensão para geração de energia elétrica nos aerogeradores situa-se entre 380V e 690V. Geralmente, haverá na usina um barramento de uma subestação dedicada ao parque eólico onde tais transformadores de saída serão ligados. Essa subestação interliga os aerogeradores do parque e os conecta com um transformador que tem a função de elevar a tensão até o nível de transmissão (132 kV a 750 kV), para conexão do sistema elétrico (*Custódio, 2009*).

### **2.2.3. Características da energia elétrica de fonte eólica**

A potência elétrica gerada numa fazenda eólica varia em função da velocidade do vento que, por sua vez, não é constante. Essas variações na potência injetada no sistema podem trazer dificuldades nos controles de tensão e frequência e, desta forma, na operação do sistema elétrico interligado. Numa situação normal de funcionamento a potência gerada num parque eólico pode variar de 10 a 15% da capacidade instalada num espaço de 15 minutos. Isto pode causar no sistema uma diferença entre a produção e o consumo. Durante ou depois de uma situação em que se registem condições extremas para a produção de energia eólica, esta diferença pode ser ainda maior. Assim, tem que se ter em conta a gama de frequência a que a rede deve operar quando se faz o estudo das condições para a interligação de um

parque eólico. Redes pequenas são mais susceptíveis a desvios de frequência que podem por a rede em risco, no caso de uma diferença entre a produção e consumo, do que redes grandes onde a produção intermitente de energia de um parque eólico é compensada por outros grupos geradores (*Barros, 2011*).

#### **2.2.4. Qualidade de energia elétrica produzida em um parque eólico**

Qualidade de energia elétrica (QEE) perfeita significa que a tensão é senoidal, tendo amplitude e frequência constante. No Brasil, os padrões de qualidade são definidos pelos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do sistema elétrico –ONS. No que se refere aos níveis de tensão em regime permanente, os limites de variação aceitos são de 5% em relação a tensão nominal para as tensões situadas entre 13,8 KV e 440 KV. A variação de frequência admitida em condições normais de operação, em regime permanente, situa-se entre 59,9 Hz e 60,1Hz (*Barros, 2011*).

No caso da energia eólica, o efeito na rede elétrica da injeção de potência produzida por aerogeradores é mais severo devido à característica variável da energia eólica; causada pela variação da velocidade do vento. Essa característica pode causar variações de tensão, especialmente em redes fracas.

A determinação da qualidade de energia gerada por aerogeradores, para a determinação da compatibilidade destes com o sistema elétrico, deve considerar a operação normal e em condições especiais. Operação normal é a continua operação do aerogerador permanentemente conectado a rede. As condições especiais são principalmente operações de chaveamento, ocorrendo durante curtos períodos de tempo. Tais operações de chaveamento são distorções que afetam a qualidade de energia.

#### **2.2.5. Partida de um parque eólico**

Na partida de uma fazenda eólica os transitórios dos aerogeradores individuais podem se somar. No entanto, dificilmente haverá coincidência nestas partidas, devido a pequenas diferenças nas velocidades do vento em cada aerogerador. A Figura 8 mostra os registros, durante a partida, das potências ativa (P), reativa (Q) e tensão (V) no ponto de conexão de

uma fazenda eólica composta por dez aerogeradores de 500kW ligados diretamente a rede por geradores de indução (Custódio, 2009).

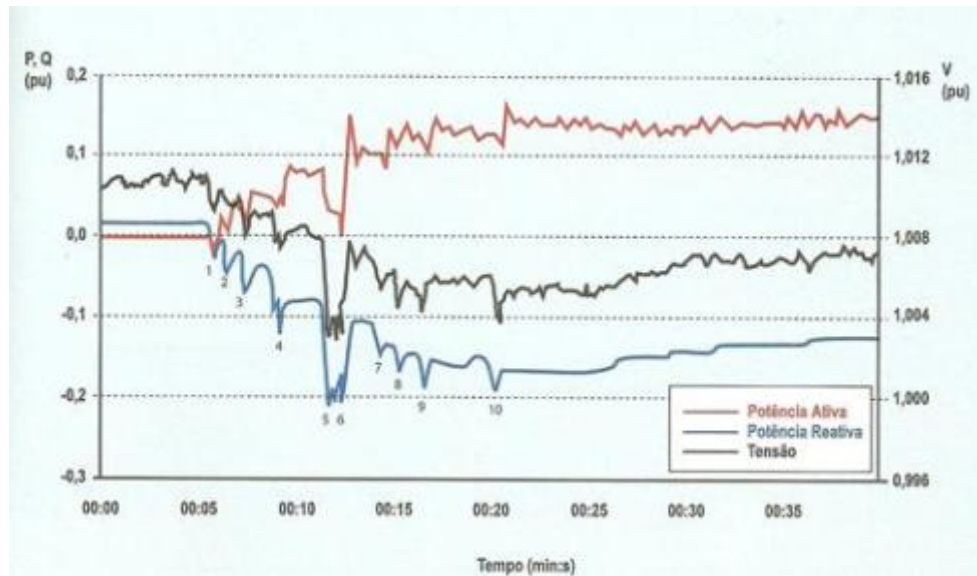


Figura 8– Gráfico de partida de uma fazenda eólica com 10 aerogeradores de 500kW (Custódio, 2009)

Percebe-se ainda uma degradação da tensão (distorção em relação ao valor desejado em p.u.) causada pela absorção de energia reativa, feita pelos geradores de indução. Entretanto, esta degradação está dentro dos padrões (0,95 pu a 1,05 pu). Numa rede fraca (com baixa impedância em relação ao sistema à qual se encontra ligada em paralelo), com baixa potência de curto circuito, esta degradação pode ser mais acentuada e, talvez, insuportável do ponto de vista da estabilidade de tensão e da qualidade de energia. Uma alternativa seria a ampliação da capacidade dos capacitores de compensação que, desta forma, supririam a energia reativa aos geradores, evitando a degradação da tensão da rede (Custódio, 2009).

### 2.3. Afundamento de tensão

Afundamentos de tensão e interrupções momentâneas é uma curta redução na magnitude da tensão constituindo provavelmente os problemas de qualidade de energia mais importantes afetando o funcionamento de indústrias e grandes clientes comerciais. Esses eventos são geralmente associados a uma falha em algum lugar no sistema de alimentação

elétrica. A análise do afundamento de tensão exige alguns conhecimentos de suas características e da probabilidade de sua ocorrência (*Lamoree, Mueller, Vinett, Jones, & Samotyj, 1994*).

### **2.3.1.Causas dos afundamentos de tensão**

Os afundamentos de tensão são normalmente causados por condições de falha. A partida do motor também pode resultar em subtensões, no entanto as magnitudes de tensão não são tão baixas. Falhas, resultando em quedas de tensão podem ocorrer dentro de uma planta ou em uma concessionária. A condição de afundamento de tensão persistirá até que sua causa seja eliminada por um dispositivo de proteção. No sistema da concessionária, a falha pode ser eliminada por um fusível ou disjuntor de uma subestação (*McGranaghan, Mueller, & Samotyj, 1993*).

### **2.3.2.Consequências dos afundamentos de tensão**

A curta interrupção na tensão da rede pode afetar significativamente a máquina de indução. Através da realização de simulações numéricas, Zlomek e Drápela afirmam que afundamentos de tensão causam picos de torque, picos de corrente, e perdas mecânicas que diminuem a velocidade do gerador. Os picos de corrente podem acionar o sistema de proteção da máquina e os picos de torque podem danificar seu sistema mecânico (*M. Zlomek, 2008*).

Segundo Guasch, Sainz, Córcoles e Pedra, de acordo com medições em diferentes níveis de tensão, a saturação do transformador pode ocorrer a partir do momento em que a tensão volta ao normal transcorrido o afundamento de tensão. Esta saturação é causada pela súbita variação de tensão após o afundamento e envolve uma alta energização das correntes (*Pedra, Sainz, Corcoles, & Guasch, 2005*).

### **2.3.3.Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede básica**

Caso haja afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão da central de geração eólica na rede básica, a central deve continuar operando se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada na Figura 9 (*ONS, 2010*):

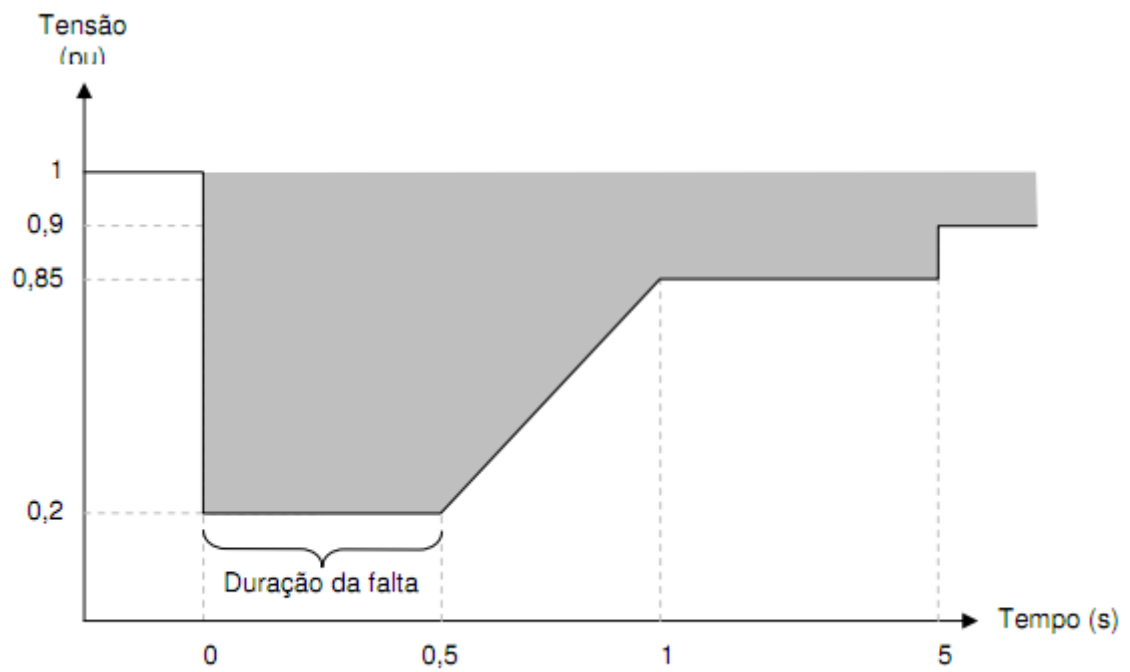


Figura 9 – Tensão nos terminais dos aerogeradores (ONS, 2010)

### 3 Metodologia

#### 3.1. Considerações Gerais (Metodologia sem o afundamento de tensão)

Para a realização deste trabalho, partiu-se de um modelo já existente no ambiente matlab/simulink 2009a, denominado Wind Farm (IG). No entanto, o modelo inicial apresentava algumas características que fugiam ao escopo deste experimento. Houve então a retirada de componentes dispensáveis ao experimento, e o incremento de outros componentes necessários à prática. A Figura 10 mostra a estrutura geral do experimento:

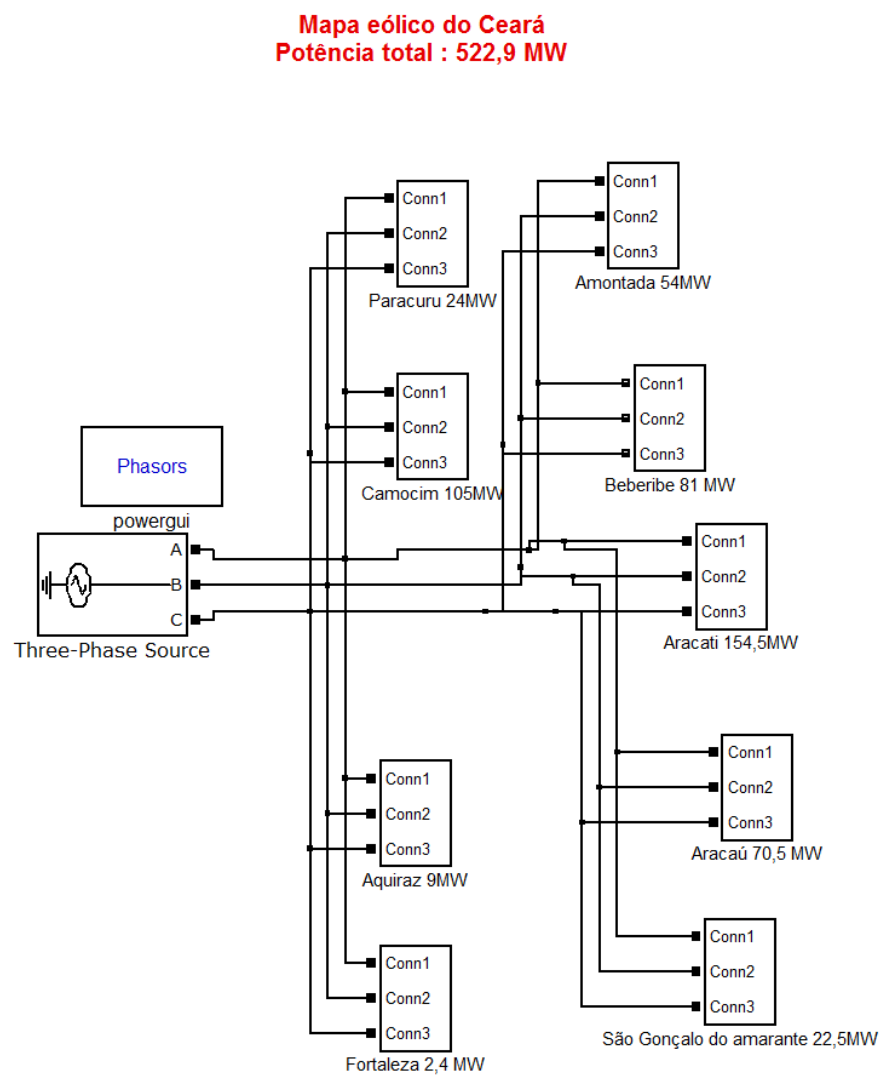


Figura 10 – Mapa eólico do Ceará no ambiente Matlab/simulink 2009a

Por se tratar de um sistema elétrico de potência fasorial, nota-se pela Figura 10 que houve a necessidade de utilização do bloco powergui phasors para a simulação. Para efeito de análise de regime transitório e permanente, foi considerado um tempo de simulação de 100 segundos para o sistema. A frequência do sistema foi considerada como sendo de 60Hz e a fonte trifásica foi considerada como estando localizada na cidade de Fortaleza.

### 3.2. Dimensionamento dos componentes e parâmetros do sistema

A fonte trifásica utilizada para suprir a potência gerada pelo sistema foi parametrizada conforme mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros da fonte trifásica

Parâmetro	Valor
Tensão rms(fase-fase)	120 KV
Relação X/R	10
Frequência	60Hz
Potência	4808MVA

Os parâmetros foram escolhidos de forma a permitir que a variação de tensão em uma determinada central eólica ligada à rede pudesse interferir nas tensões e potências das demais centrais.

Como forma de ilustrar o funcionamento interno de cada usina e tomando a central eólica de praia formosa como exemplo, é necessário explorar o subsystem Camocim mostrado na Figura 10. Explorando o subsystem de Camocim, tem-se o seguinte esquema mostrado na Figura 11:

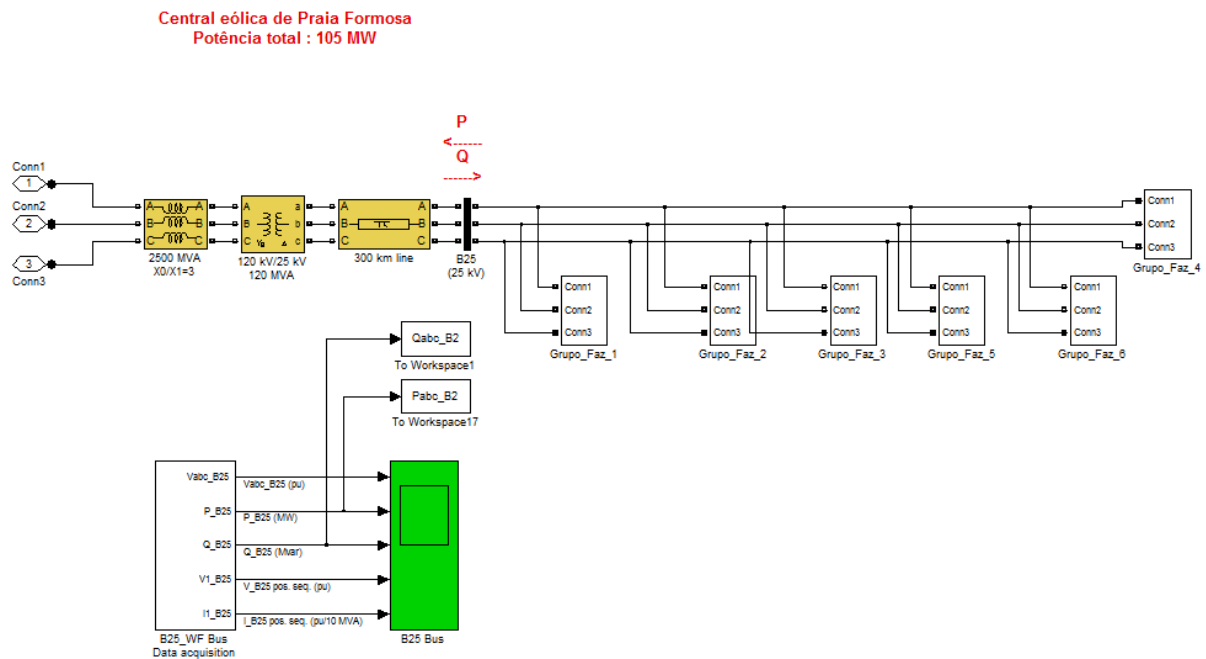


Figura 11 – Esquema da central eólica de Praia Formosa

A Figura 11 ilustra a parte de geração e a parte de transmissão da energia gerada pela central eólica de Praia Formosa. Sendo que a parte de geração se encontra do lado direito ao barramento de 25KV e a parte de transmissão do lado esquerdo ao barramento de 25KV. A parte de transmissão é composta por uma linha de 300 km (distância de Camocim à Fortaleza), um transformador elevador de tensão de 120MVA e uma indutância mútua. Para este trabalho não houve um dimensionamento da indutância mútua.

### 3.2.1. Parte de transmissão do sistema

Em se tratando do transformador de 120MVA, adotou-se uma reatância de 4% e uma relação X/R igual a 10. Esse valor foi adotado por se tratar de um trafo de grandes proporções para o sistema. Para o cálculo da reatância foi utilizada a Equação 1:

$$X = X\% \cdot \frac{S_b}{V_{rmsb}^2} \quad (1)$$

Em seguida fez-se o dimensionamento da linha de transmissão. Para a linha de transmissão não se fez qualquer tipo de cálculo para a definição de seus parâmetros, uma vez que para tal iniciativa seria necessário fazer-se um estudo dos transitórios eletromagnéticos





Voltando à Figura 12 é possível verificar uma entrada In1 no gerador. Essa entrada é exatamente o degrau de vento (2m/s a 9m/s) aplicado que faz a turbina do aerogerador se movimentar. Sendo assim, tal entrada teve função de acionamento do gerador, sendo que os degraus de vento são aplicados em tempos distintos para cada um dos geradores da usina no intuito de promover os acionamentos em tempos distintos.

À medida que os geradores são acionados ocorre uma injeção de reativo no sistema, devido á quantidade de corrente que o gerador necessita para sua magnetização. Para corrigir esse problema de excesso de reativo, inseriu-se no sistema um conjunto formado por um banco de capacitores e uma chave trifásica ( Breaker 1 como ilustrado na Figura 12. Assim, a medida que os geradores forem acionados, ocorrerá de maneira progressiva a inserção dos bancos de capacitores no sistema para corrigir o fator de potência.

O gerador utilizado para esse experimento é um gerador de indução , do tipo gaiola de esquilo e que gera uma potência ativa de 3MW. Sua potência nominal é atingida para uma velocidade do vento de 9m/s como mostra a Figura 13:

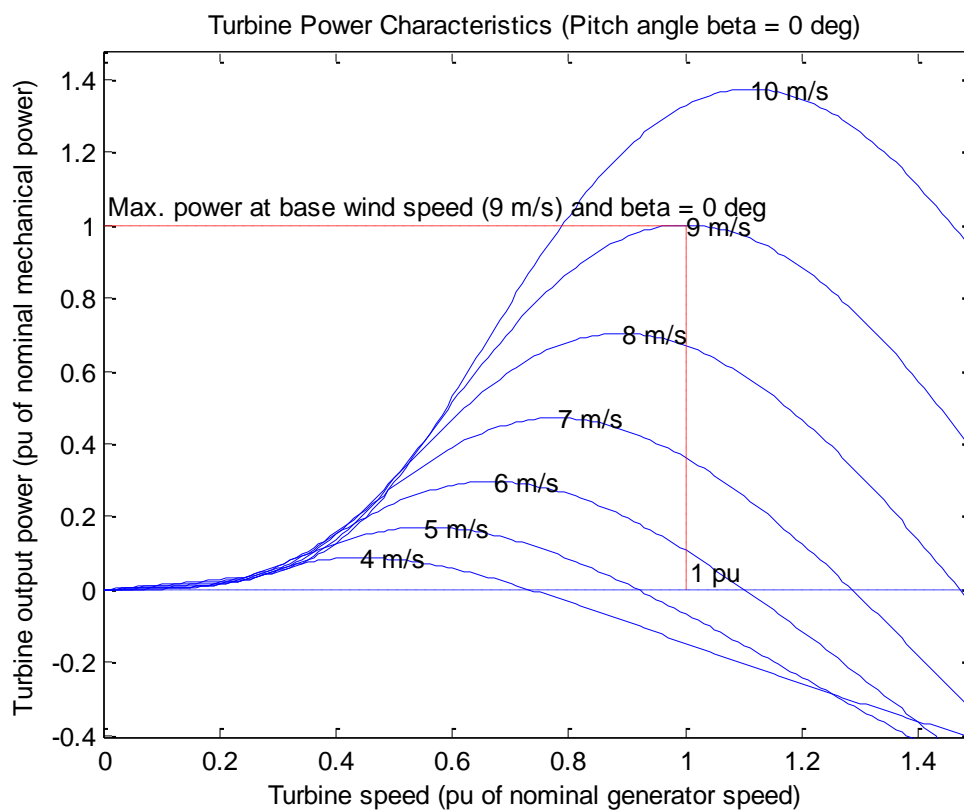


Figura 13 – Potência gerada versus velocidade do vento para o gerador do sistema

A tensão de 575 V gerada foi escolhida por situar-se entre 380V e 690V, que é o intervalo estabelecido para a produção de tensão pelos aerogeradores.

É importante destacar que apesar do desenvolvimento desse trabalho estar focado no estudo da geração do parque eólico do Ceará, houve a necessidade de se fazer a parametrização de determinados equipamentos do sistema de transmissão devido ao fato do mesmo influenciar o sistema de geração.

### 3.3.Considerações Gerais (Metodologia com o afundamento de tensão)

Como forma de simular o afundamento de tensão, aplicou-se uma falta trifásica na central eólica de Praia Formosa. A central eólica de Praia Formosa foi escolhida pelo fato de ser a central eólica com maior potência gerada e estar mais distante da rede do sistema. A Figura 14 ilustra a falta aplicada na central eólica:

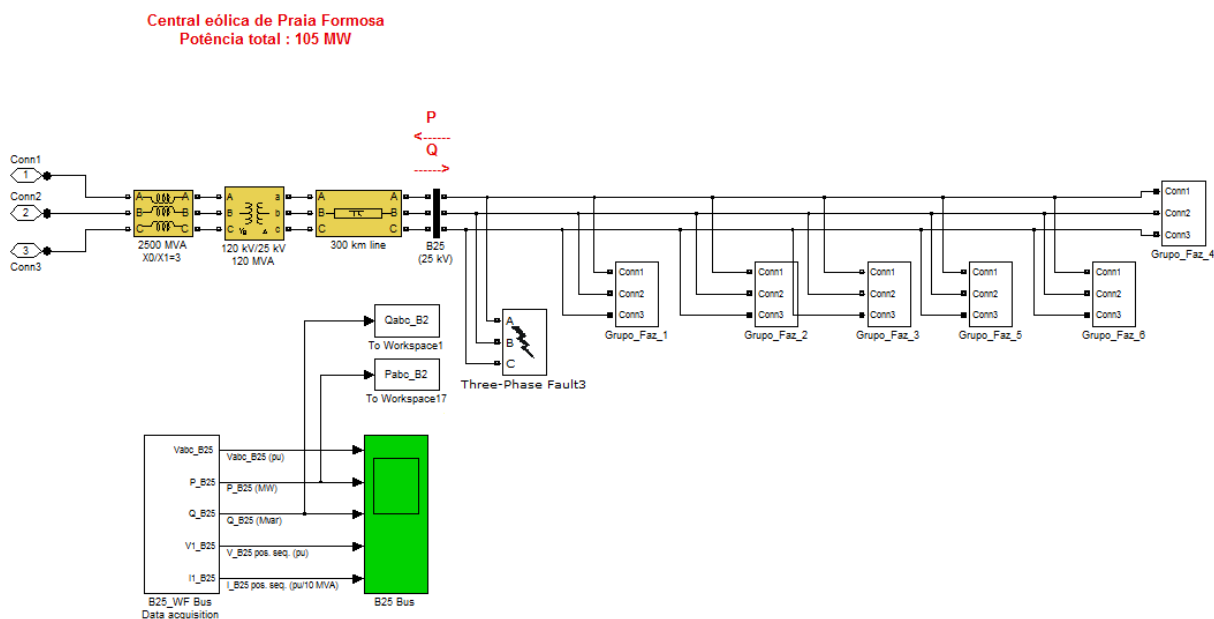


Figura 14 – Esquema da central eólica de Praia Formosa com a presença do bloco de falta

O afundamento de tensão foi escolhido como sendo de 0,5s e a resistência da falta foi escolhida como sendo de 0,5 ohms.

Seria importante destacar que para simular o sistema com a presença dos afundamentos, não foi possível ligar todas as cidades à rede. Isso ocorreu pelo fato da simulação demandar um tempo absurdo (48 horas) para chegar a pouco mais da metade da simulação. Com isso, o sistema simulado ficou como mostrado a seguir na Figura 15:

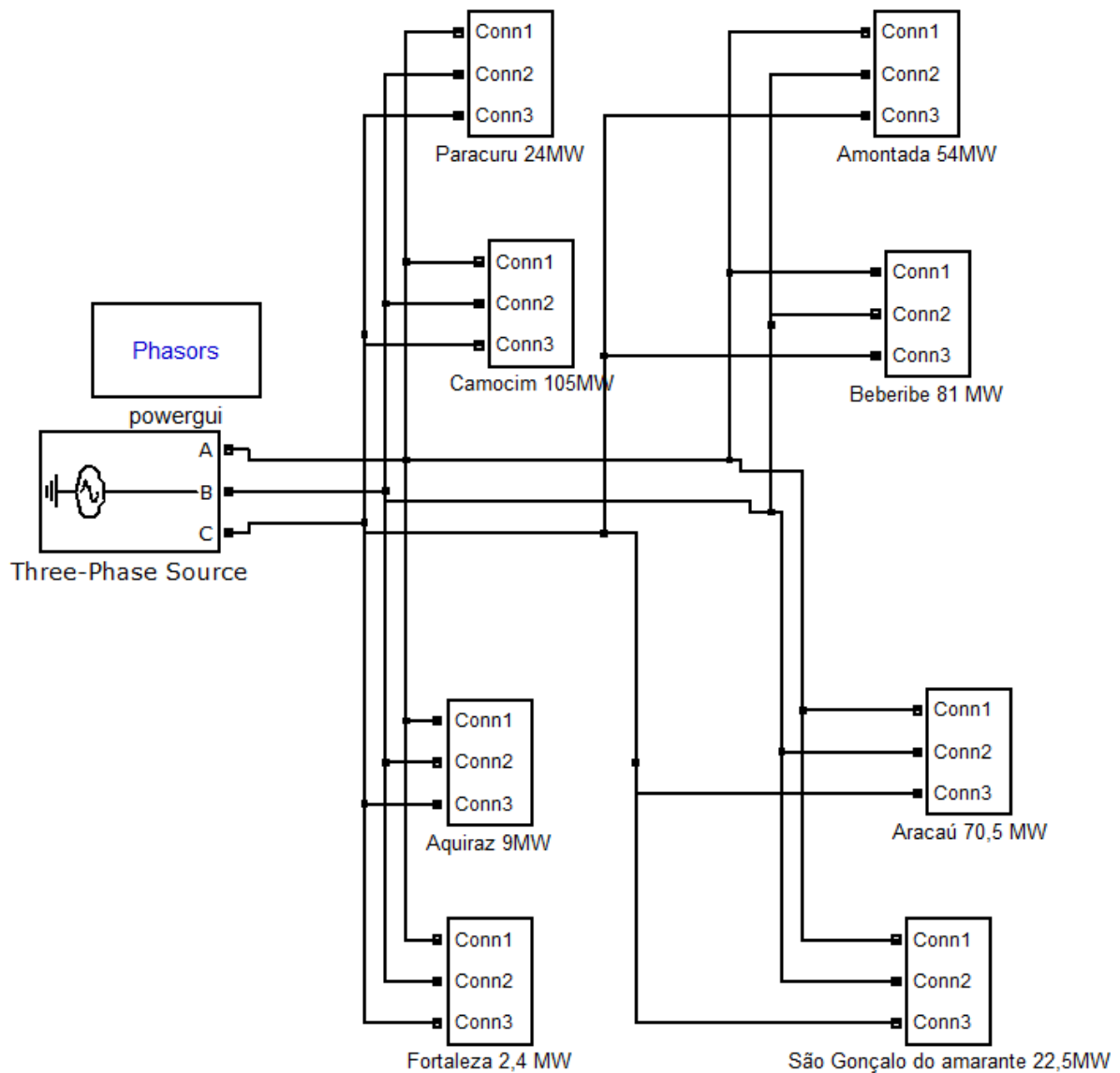


Figura 15 – Mapa eólico do Ceará no ambiente Matlab/simulink 2009<sup>a</sup> para a simulação com afundamento de tensão

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados primeiramente os resultados referentes ao acionamento das centrais eólicas cearenses. Em seguida, serão ilustrados os resultados posteriores à aplicação de uma falta trifásica em Praia Formosa, para as centrais eólicas de maior relevância para o projeto. À medida que os resultados forem ilustrados, serão feitas as análises dos mesmos.

Sendo assim, as Figuras 16, 17 e 18 a seguir ilustram respectivamente a tensão em pu, a potência ativa e a potência reativa para a central eólica de Praia Formosa anteriormente à ocorrência do afundamento de tensão:

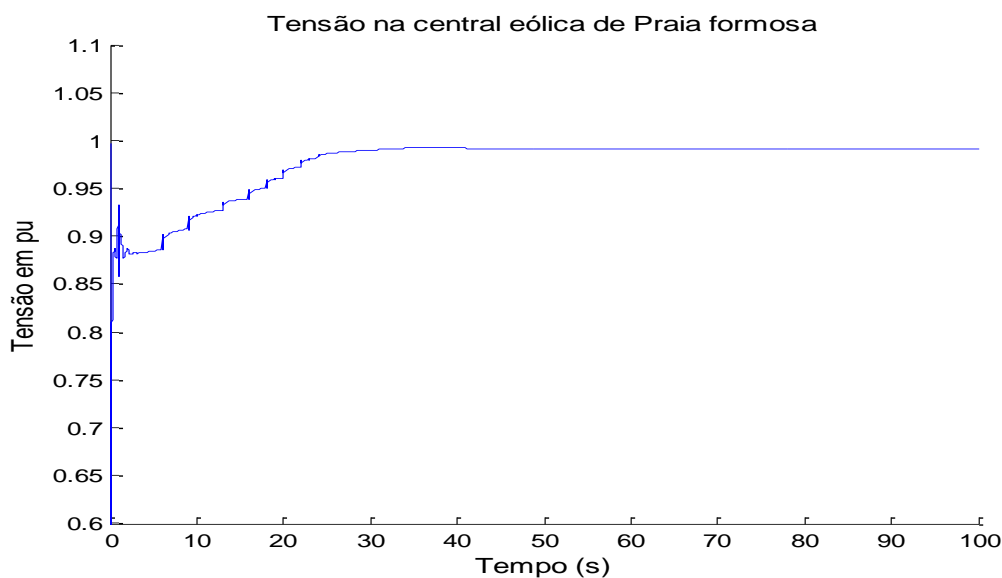


Figura 16– Tensão em pu anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa

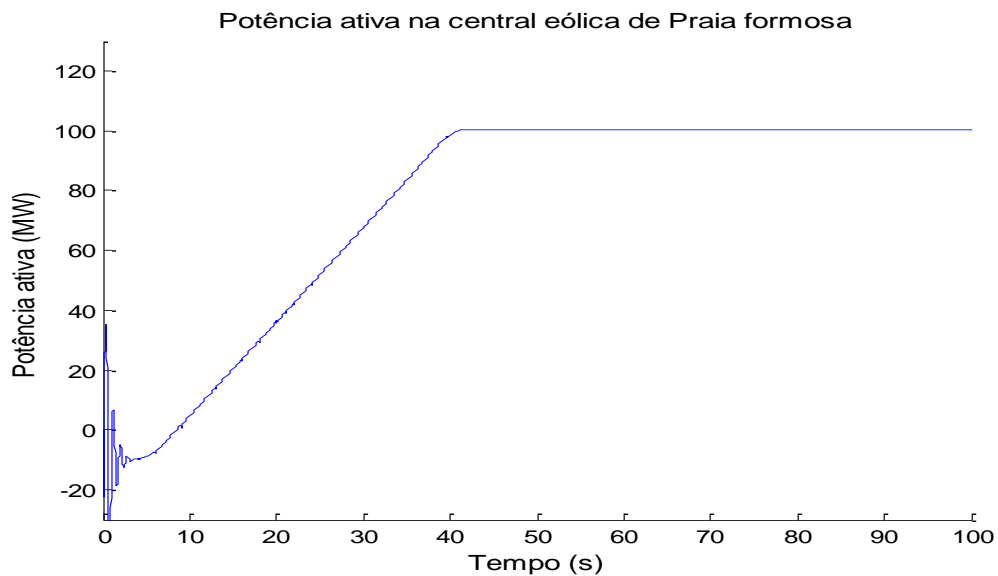


Figura 17 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa

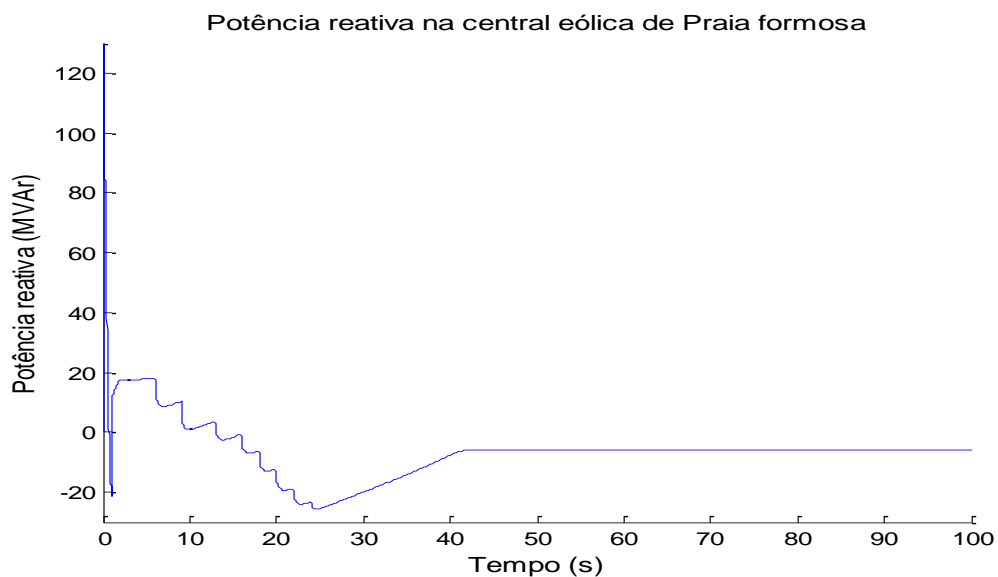


Figura 18 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa

Pela análise da Figura 16 percebe-se que a central eólica entra em regime permanente cerca de 50 segundos após o início do funcionamento. Essa demora em entrar em regime permanente ocorre pelo fato dos acionamentos dos geradores ocorrerem em tempos distintos, assim como as inserções dos bancos de capacitores no sistema. Em seguida, percebe-se pela Figura 17 que a potência ativa de Praia Formosa aumenta no decorrer da simulação e atinge um valor próximo de 105 MW em regime permanente, o que mostra que o sistema está gerando a potência correta. Por último e não menos importante, observa-se pela Figura 18 um

alto pico de potência reativa logo no início do acionamento da central eólica. Esse aumento brusco de reativo é justificável pela alta magnetização que ocorre pela injeção de corrente nos geradores durante o acionamento dos mesmos. Nota-se que no decorrer da simulação ocorreu a diminuição da potência reativa produzida em função das inserções de bancos de capacitores no sistema. A partir da aplicação da falta trifásica, obteve-se os seguintes resultados mostrados nas Figuras 19, 20 e 21 para a central eólica de Praia Formosa:

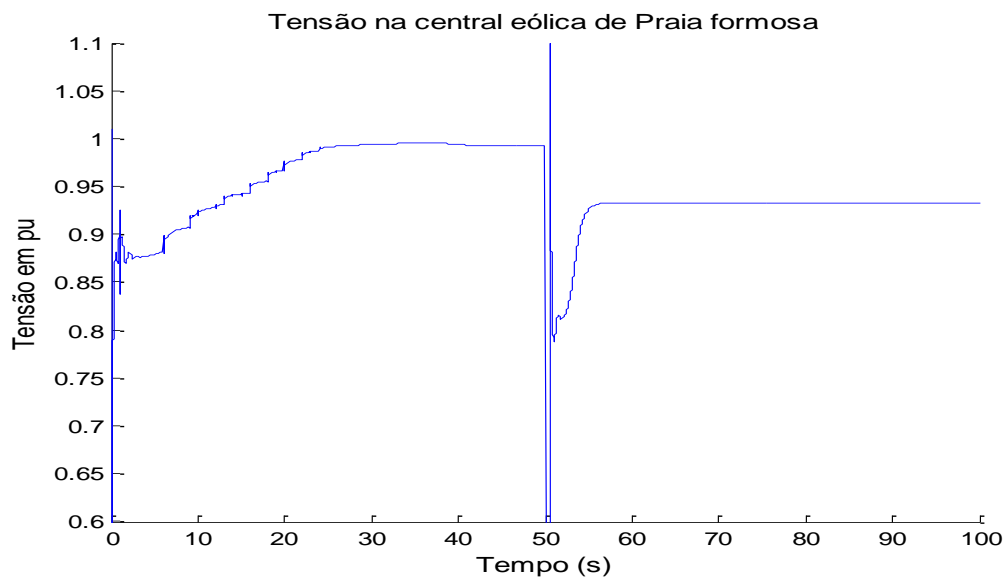


Figura 19– Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa

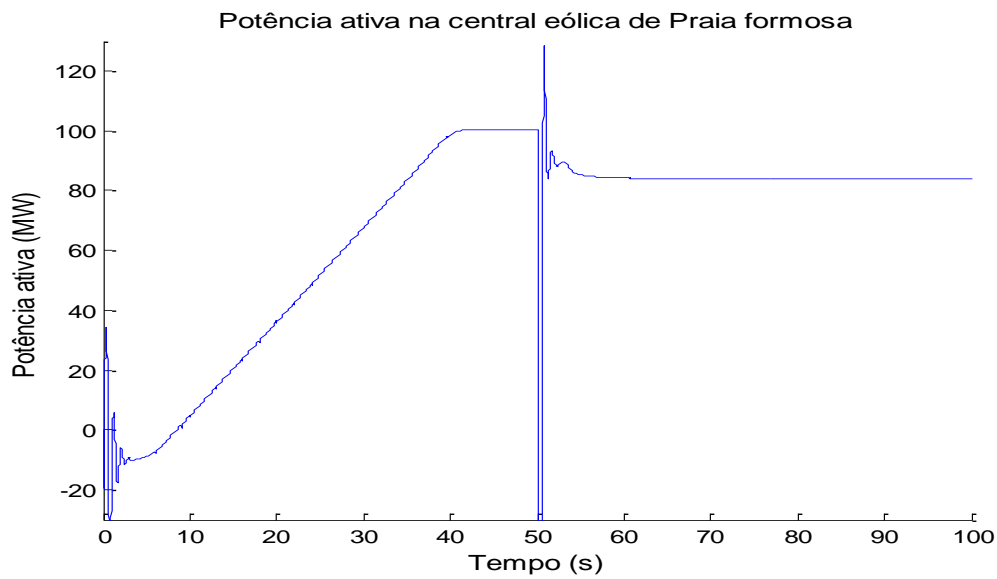


Figura 20 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa

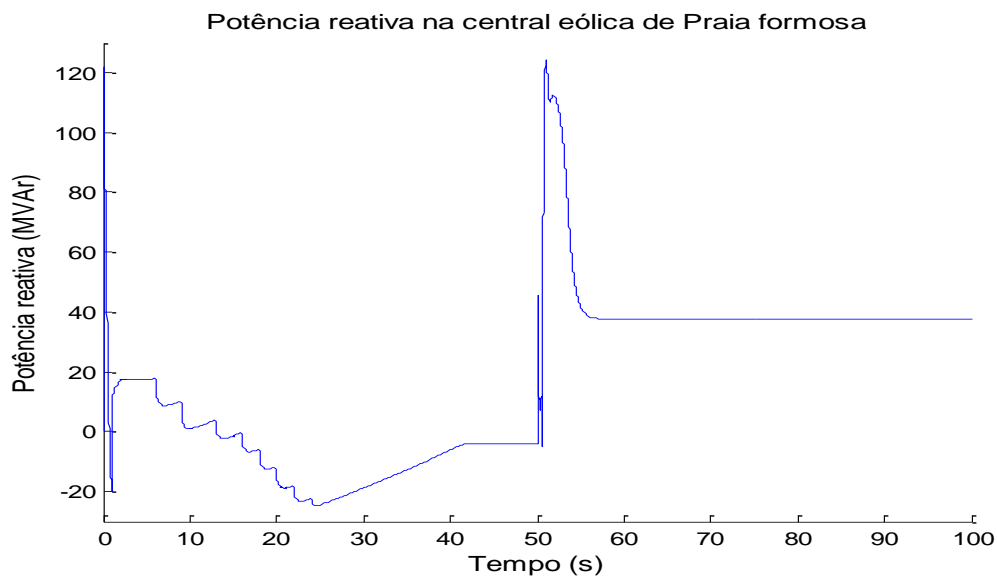


Figura 21 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa

Analisando a Figura 19, nota-se que após o afundamento de tensão, não houve o total reestabelecimento de tensão na central de Praia Formosa. Isso fez com que houvesse uma diminuição da potência reativa produzida pela usina como está ilustrado na Figura 20. O pico de reativo logo após os 50 segundos na Figura 21 mostra exatamente o aumento de reativo decorrente ao afundamento de tensão. Nota-se que após a ocorrência da falha, há um aumento considerável de reativo produzido pelo sistema.



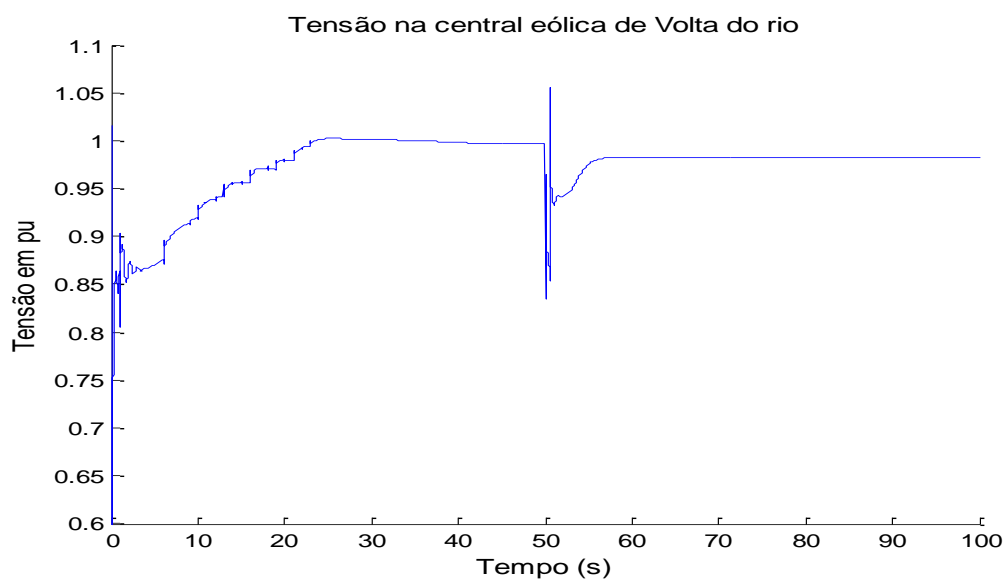


Figura 22– Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio

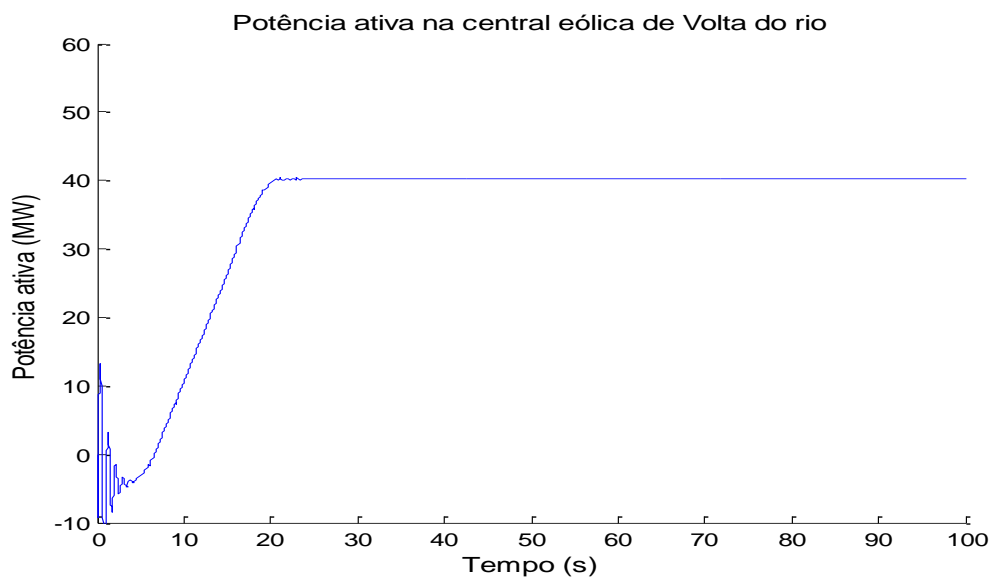


Figura 23 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio

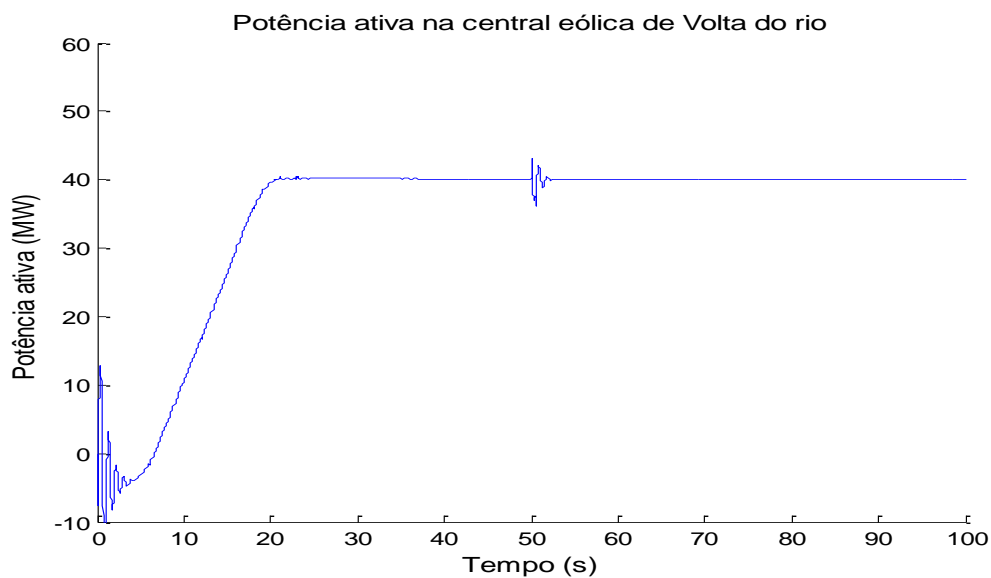


Figura 24 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio

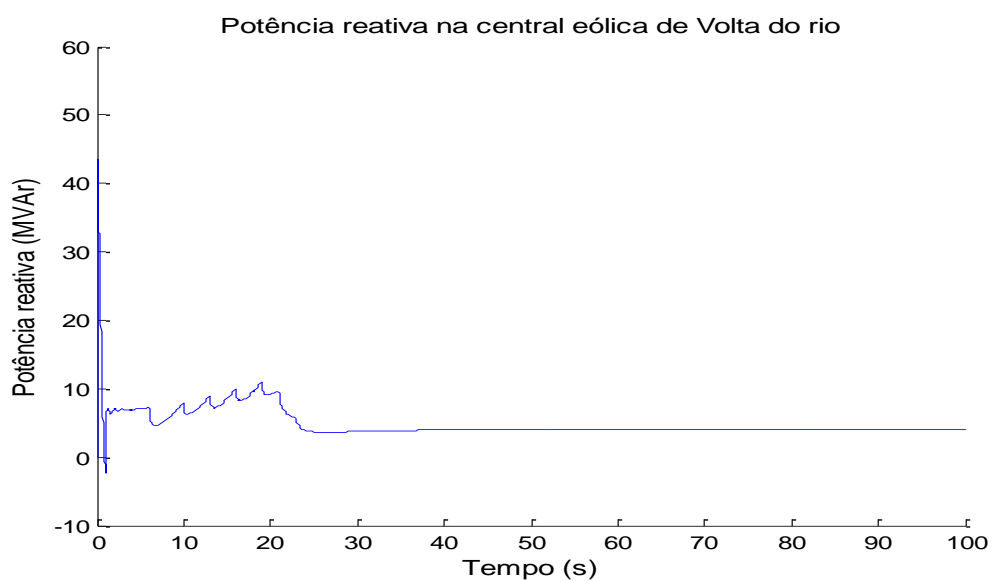


Figura 25 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio

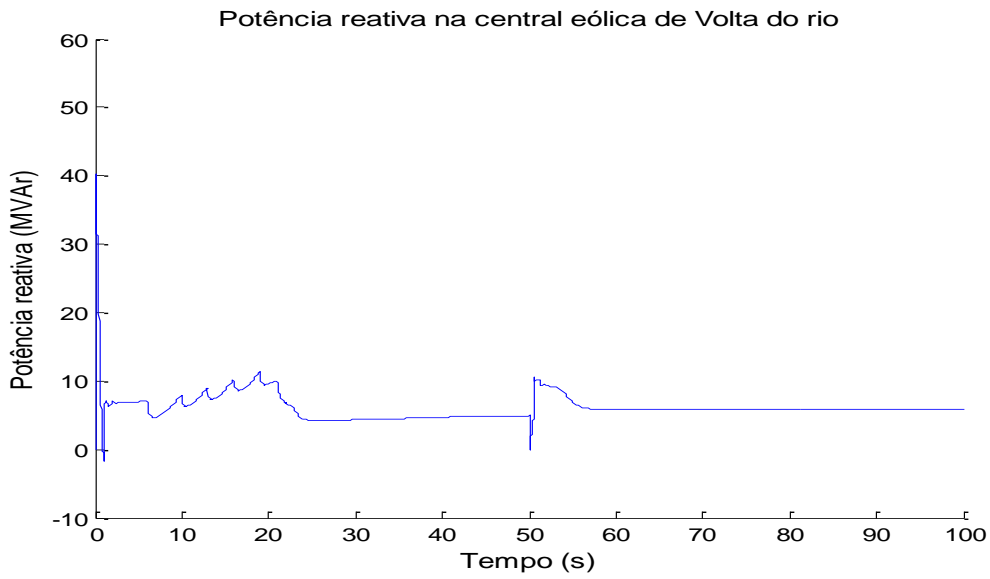


Figura 26 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Volta do rio

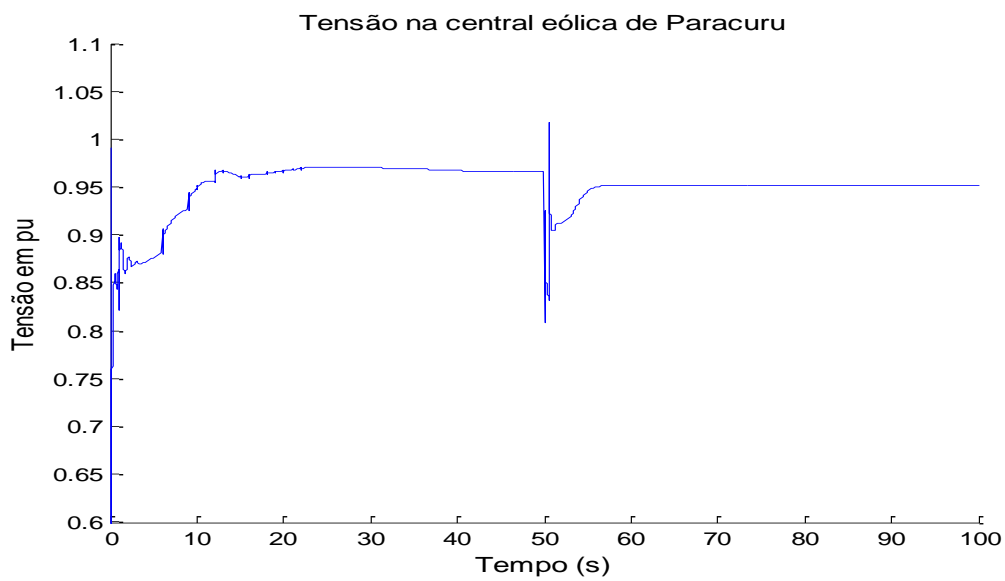


Figura 27 – Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru

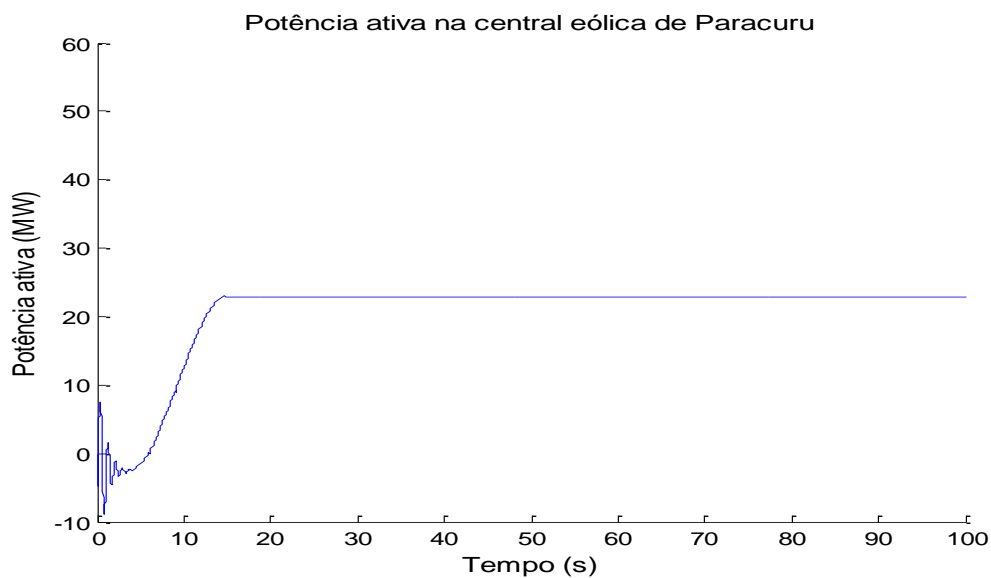


Figura 28 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru

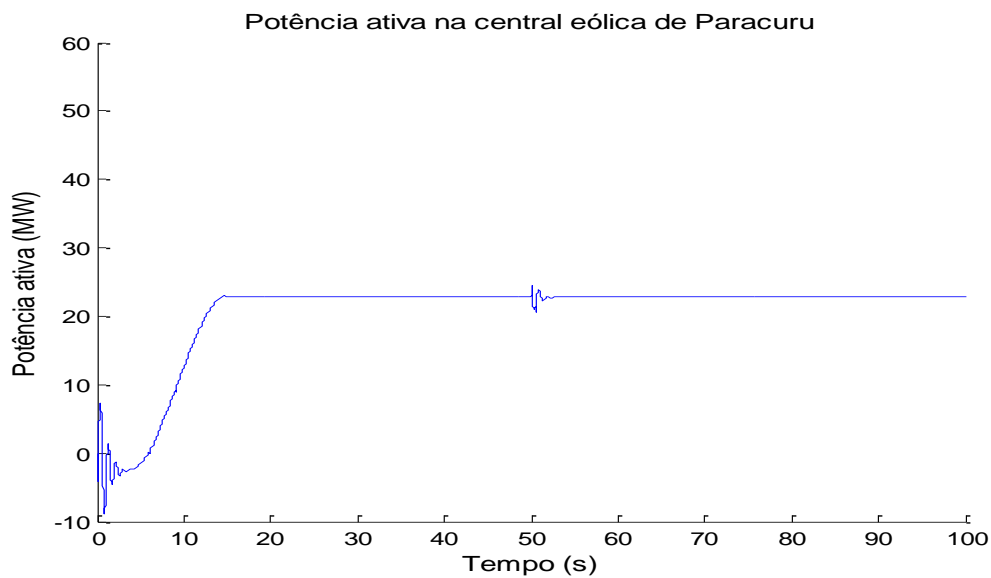


Figura 29 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru

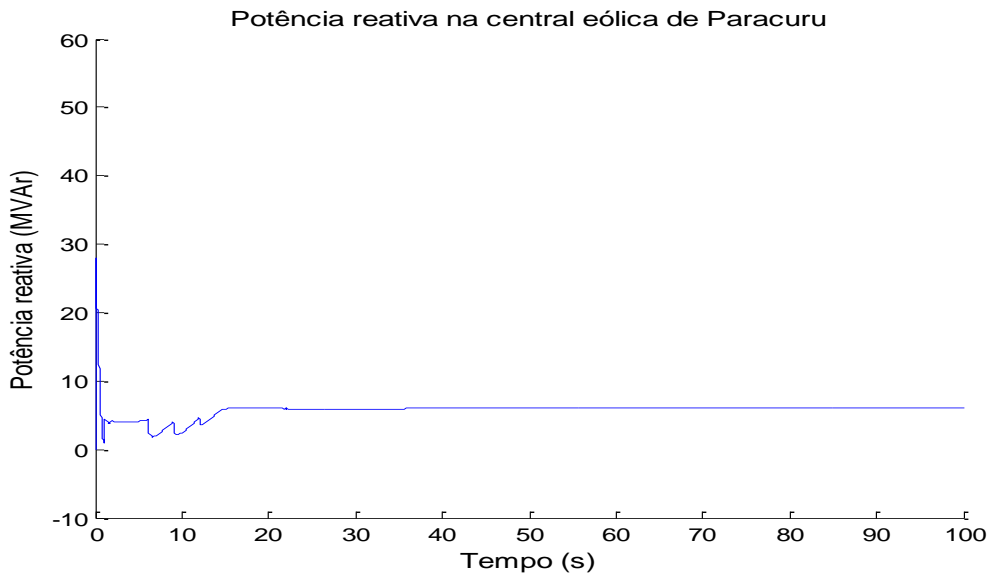


Figura 30 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru

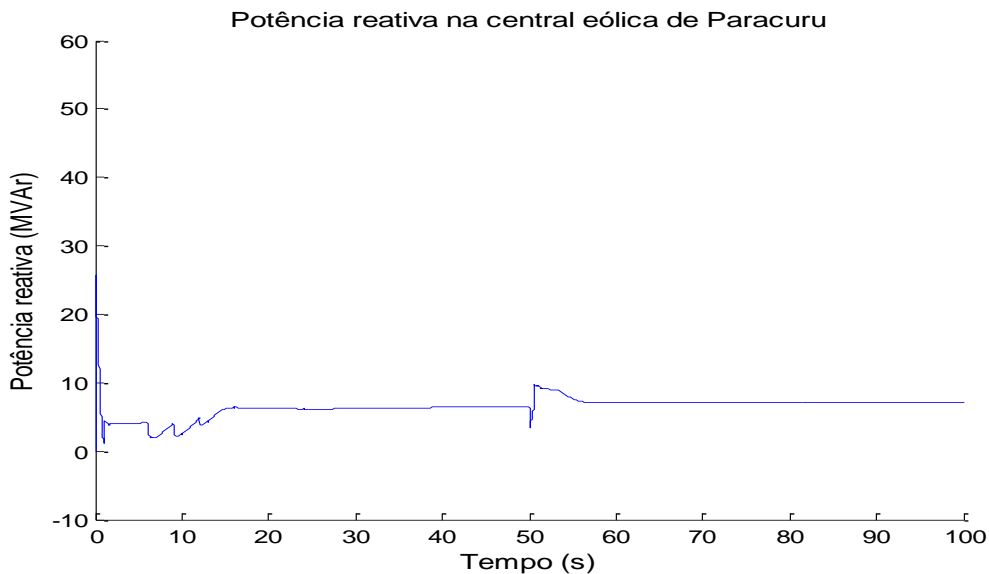


Figura 31 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Paracuru

Pela observação das Figuras 22 a 31 constata-se que tanto a central eólica de Volta do rio quanto a central eólica de Paracuru foram influenciadas pelo afundamento de tensão na central eólica de Praia Formosa. Esse acontecimento já era esperado, uma vez que ambas as centrais estão ligadas em uma mesma rede que a central de Praia Formosa. No entanto, era de esperar que a central de Volta do rio apresentasse uma maior perturbação em função do afundamento de tensão, já que esta se encontra a uma distância maior da rede. Porém, não é

isso que se constata, já que em ambos os casos ocorreram mudanças praticamente iguais nas tensões, potências ativas e potências reativas após as falhas.

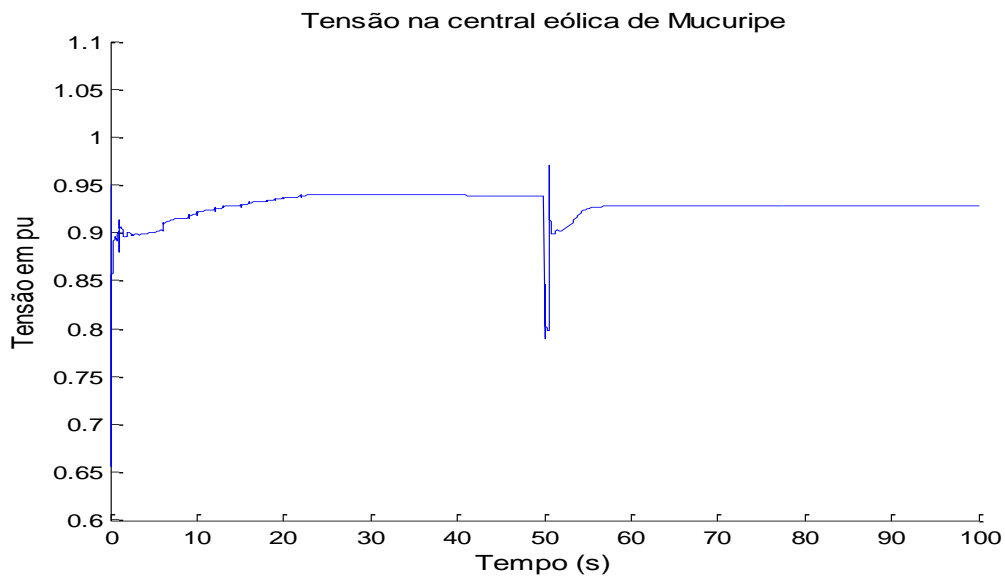


Figura 32– Tensão em pu posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe

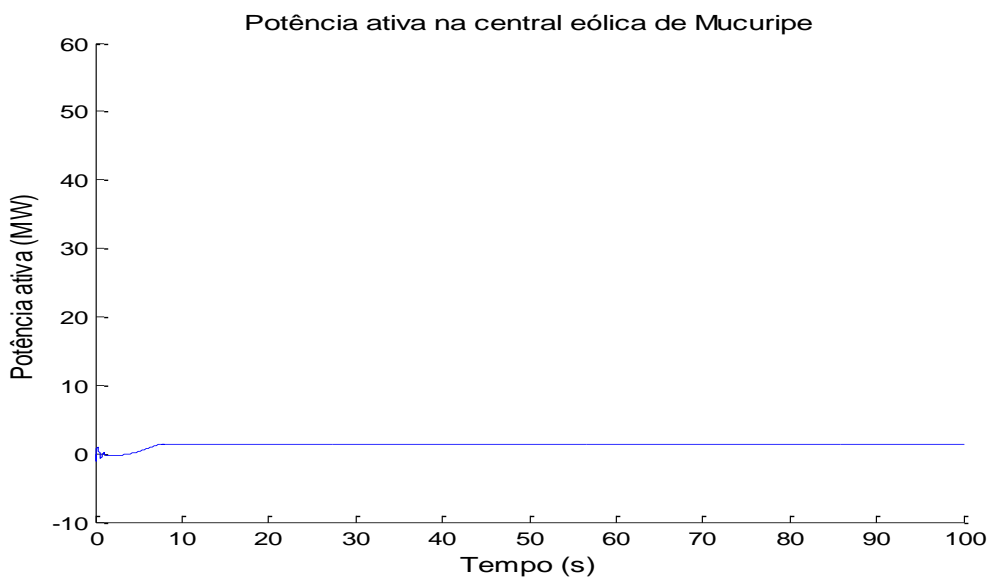


Figura 33 – Potência ativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe

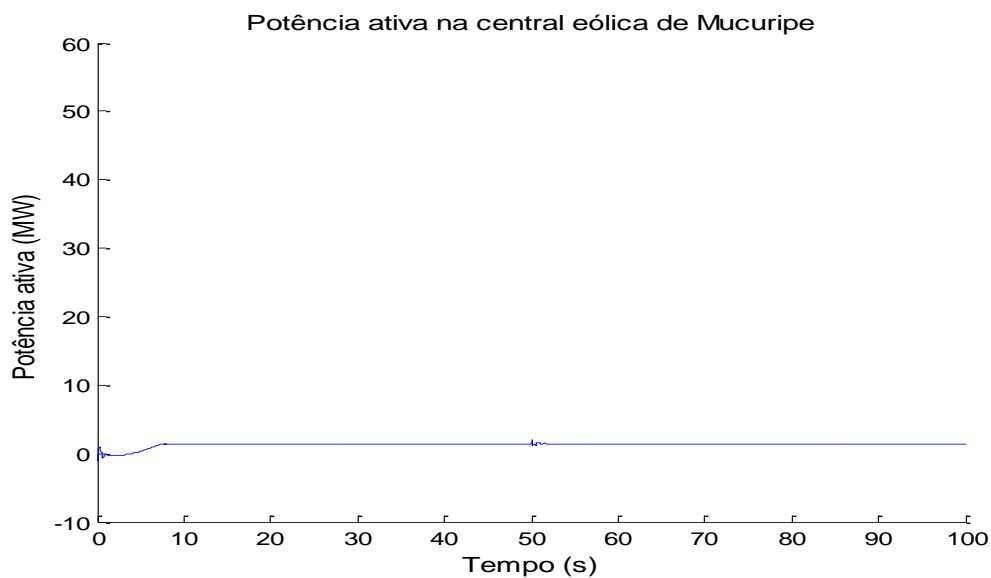


Figura 34 – Potência ativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe

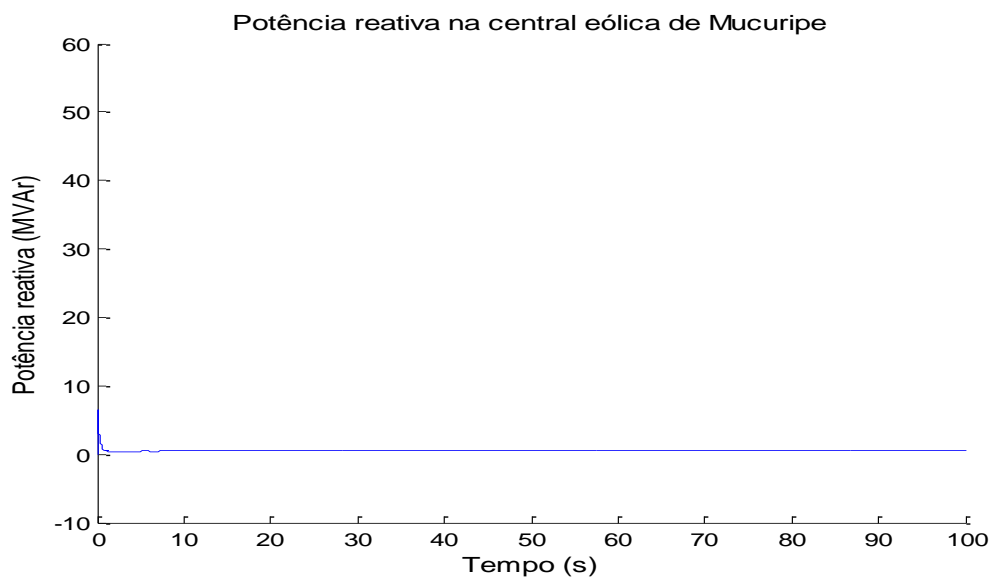


Figura 35 – Potência reativa anterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe

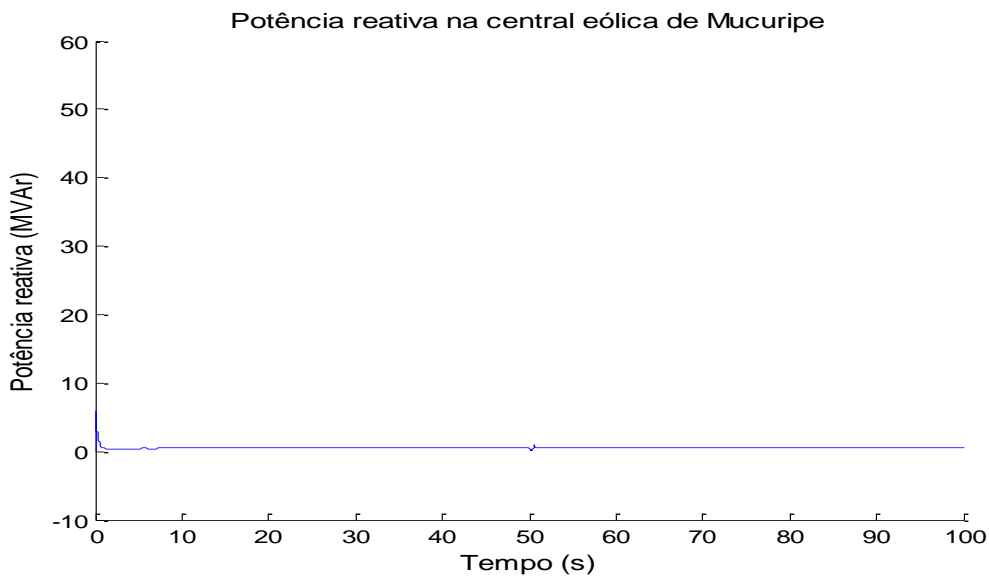


Figura 36 – Potência reativa posterior ao afundamento de tensão na central eólica de Mucuripe

Fazendo um comparativo entre os resultados obtidos para as centrais de Paracuru e Volta do rio que estão a uma certa distância da rede e a central eólica de Mucuripe que se encontra na rede, percebe-se que a influência da falta em Praia Formosa foi ligeiramente inferior na central eólica de Mucuripe. Esse acontecimento vem de acordo com o desejado, já que pela teoria, as centrais eólicas mais distantes da rede devem sofrer uma maior perturbação que as centrais próximas a mesma.

É importante destacar que houve uma grande dificuldade computacional para obtenção dos resultados devido ao tempo demandado para as simulações.



## **5 Conclusões**

Foi possível representar o mapa eólico cearense por meio do ambiente Matlab/Simulink 2009a para as considerações que foram feitas. No entanto, esse sistema precisa ser melhorado, já que todos os seus componentes não foram corretamente dimensionados. Assim, para funcionamento pleno do sistema, há a necessidade de se ter um conhecimento bem aprofundado sobre cada componente, além de grande disponibilidade de tempo.

Quanto ao afundamento de tensão percebe-se que não foi possível realizá-lo com todo o sistema ligado à rede. O que mostra que para o estudo da qualidade de energia do parque, houve uma maior dificuldade que para o acionamento da matriz eólica cearense. Observa-se também que os resultados foram muito parecidos para todas as usinas que sofreram influência dos afundamentos, o que mostra que provavelmente a rede trifásica do sistema deve ser melhor dimensionada.

Para trabalhos futuros, com os conhecimentos aqui adquiridos, é interessante verificar, por exemplo, se existem outros métodos mais eficientes ou até mesmo softwares mais específicos para a representação e estudo de matrizes de grande porte como o parque eólico cearense.

## Referências Bibliográficas

### CASOS

- [01] Aeromini. *ENERGIAS RENOVÁVEIS*. 27 de Novembro de 2009. <http://www.aero-mini.blogspot.com/> (acesso em 15 de Maio de 2011).
- [02] Barros, N. J. (2011). Análise do impacto da integração de energias renováveis em redes de distribuição. *Faculdade de engenharia da universidade do Porto* .
- [03] BRASELCO. *BRASELCO*. 2011. [http://www.braselco.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=138%3Adisputa-entre-ceara-e-rio-grande-do-norte&catid=4%3Anoticias&Itemid=4&lang=en](http://www.braselco.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=138%3Adisputa-entre-ceara-e-rio-grande-do-norte&catid=4%3Anoticias&Itemid=4&lang=en) (acesso em 04 de Julho de 2011).
- [04] Custódio, R. d. (2009). *Energia eólica para produção de energia elétrica*. Eletrobrás.
- [05] CRESESB, C. /. (Maio de 2008). *Energia Eólica - Principios e Tecnologias*.
- [06] Feitosa, E. A. (2010). *Energia Eólica no Brasil: Situação Atual e Perspectivas*. *Centro Brasileiro de Energia Eólica* .
- [07] GLOBAL WIND REPORT. (2010). *GWEC GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL* , 14-16.
- [08] HC. *Ecodebate Cidadania e Meio Ambiente*. 30 de Dezembro de 2010. <http://www.ecodebate.com.br/2010/12/30/cresce-geracao-de-energia-eolica-no-brasil/> (acesso em 05 de Maio de 2011).
- [09] Lamoree, J., Mueller, D., Vinett, P., Jones, W., & Samotyj, M. (1994). Voltage sag analysis case studies. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* , 1083 - 1089.
- [10] M. Zlomek, J. D. (16 de Maio de 2008). Experimental assessment of voltage sags effects on induction machine operation. *IEEE* , pp. 1-4.
- [11] Martins, F., Guarnieri, R., & Pereira, E. (2008). O aproveitamento da energia eólica. *Revista brasileira de ensino de física* .
- [12] McGranaghan, M. F., Mueller, D. R., & Samotyj, M. J. (1993). Voltage Sags in Industrial Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* , 397 - 403.
- [13] OCÁCIA, G. C. *Energia Eólica – Estado da Arte e Algumas Projeções*. *Revista do Centro de Tecnologia da Ulbra. Rio Grande do Sul: ULBRA*, vol. 3, nº2, 2002
- [14] ONS. (2010). *Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão*.
- [15] Pedra, J., Sainz, L., Corcoles, F., & Guasch, L. (4 de Abril de 2005). Symmetrical and unsymmetrical voltage sag effects on three-phase transformers. *IEEE* , pp. 1683 - 1691.
- [16] Raimundo Eduardo Silveira Fontenele, S. D. *A Energia eólica do Ceará e o mecanismo de desenvolvimento limpo do protocolo de quioto*.
- [17] Valise, C. d. (2009). *Avaliação de desempenho de geradores eólicos a velocidade constante conectados em rede de distribuição de energia elétrica*. São Carlos.