

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 755

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA SUPORTABILIDADE FRENTE A  
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE SISTEMAS EÓLICOS COM GERADOR  
SÍNCRONO A IMÃS PERMANENTES**

**Frederico Ferreira Viana Matos**

DATA DA DEFESA: 21/09/2012

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA SUPORTABILIDADE  
FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE SISTEMAS  
EÓLICOS COM GERADOR SÍNCRONO A IMÃS PERMANENTES**

**Frederico Ferreira Viana Matos**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Selênio Rocha Silva**

**Belo Horizonte - MG**

**Setembro de 2012**

M425d

Matos, Frederico Ferreira.

Uma discussão sobre suportabilidade frente a afundamentos de tensão de sistemas eólicos com gerador síncrono a ímas permanentes [manuscrito] / Frederico Ferreira Matos. – 2012.

xx, 51 f., enc.: il.

Orientador: Selênio Rocha Silva.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 49-51.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Energia eólica - Teses. 3. Energia - Fontes alternativas - Teses. 4. Ímas permanentes - Teses. I. Silva, Selênio Rocha. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



**"Uma Contribuição ao Estudo da Suportabilidade Frente a  
Afundamentos de Tensão de Sistemas Eólicos com Gerador  
Síncrono a Imãs Permanentes"**

**Frederico Ferreira Matos**

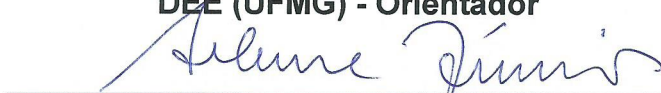
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 21 de setembro de 2012.

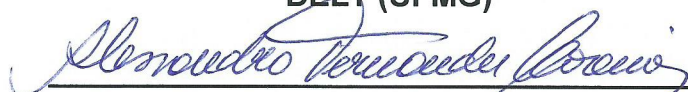
Por:



**Prof. Dr. Selênio Rocha Silva  
DEE (UFMG) - Orientador**



**Prof. Dr. Seleme Isaac Seleme Júnior  
DELT (UFMG)**



**Prof. Dr. Alessandro Fernandes Moreira  
DEE (UFMG)**



*Dedico este trabalho a todas as muitas  
pessoas que me apoiaram.*

*E a todos os que acreditam, como eu,  
que podemos melhorar este mundo  
com pequenas ou grandes atitudes,  
ainda que tardemos ou nunca vejamos  
tal melhora.*



*“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo  
que nos é dado.”*

J.R.R. Tolkien





---

# Agradecimentos

---

Gostaria de expressar minha gratidão às várias pessoas cujo apoio tornaram este trabalho possível. À minha noiva, Juliana, pelo incentivo, dedicação e paciência, que especialmente nos momentos mais difíceis me deram forças para continuar. Por compartilhar do meu desejo pela educação e pelo conhecimento. Aos meus pais, Roseli e Mauro, por acreditarem na educação e me proporcionarem os meios para alcançá-la sempre que lhes foi possível. Aos meus avós, Valdelice e Adalberto, à minha madrinha Ana Paula e ao Maurício pelo incentivo. À minha avó Aparecida, sempre no meu coração e nas minhas lembranças, pelo amor e carinho.

Ao professor Selênio, pela paciência, amizade, compreensão e pelo aprendizado incalculável que me proporcionou, compartilhando seu conhecimento e experiência. Ao Clodualdo, por tudo que me ensinou, pela amizade e pelo apoio. Aos amigos da UFMG que estiveram mais próximos: Víctor, Guilherme, Tameirão, João Lucas e Tomás, por toda a ajuda sem a qual este trabalho teria sido infinitamente mais difícil. À Camila e ao Marcelo, pelo excelente trabalho realizado na bancada de ensaios, previamente aos estudos aqui descritos.

A todos os colegas e funcionários da ICSA, no Brasil e na Argentina, pelo apoio a mim e a este trabalho. A todos os professores, colegas e funcionários do CPH que contribuíram para minha formação. E a todos os que me ajudaram e não foram citados.



---

---

# Sumário

---

<b>Resumo</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xx</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O Mercado da Energia Eólica . . . . .	1
1.1.1 No Mundo . . . . .	1
1.1.2 No Brasil . . . . .	3
1.2 Topologias de Geração . . . . .	6
1.3 Suportabilidade a Afundamentos de Tensão . . . . .	8
1.4 Objetivos do Trabalho . . . . .	9
1.5 Estrutura do Texto . . . . .	10
<b>2 Bancada de Ensaios em Escala Reduzida</b>	<b>11</b>
2.1 Descrição da Bancada . . . . .	11
2.2 Estrutura de Controle . . . . .	14
2.3 Equipamentos para Geração de Afundamentos . . . . .	16
2.3.1 Afundamentos Equilibrados . . . . .	16

2.3.2	Afundamentos Desequilibrados . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Ensaio de Suportabilidade a Afundamentos Momentâneos de Tensão</b>	<b>21</b>
3.1	Ensaio . . . . .	23
3.1.1	Ensaio com Afundamentos Equilibrados . . . . .	24
3.1.2	Ensaio com Afundamentos Desequilibrados . . . . .	28
3.2	Conclusões . . . . .	32
3.2.1	Dimensionamento do Chopper . . . . .	32
3.2.2	Afundamentos Desequilibrados . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Projeto de uma Estratégia para Operação em Afundamentos Desequilibrados</b>	<b>37</b>
4.1	Descrição do Controlador . . . . .	38
4.2	Análise dos Resultados . . . . .	40
4.3	Conclusões . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Conclusões e Propostas de Continuidade</b>	<b>45</b>
5.1	Conclusões . . . . .	45
5.2	Propostas de Continuidade . . . . .	46
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>48</b>

---

# Resumo

---

A inserção crescente das fontes alternativas de energia nas redes elétricas em todo o mundo, destacando-se a energia eólica, tornou necessário o surgimento de legislações específicas quanto ao funcionamento destes equipamentos durante faltas. As turbinas eólicas que antes se desligavam para se protegerem nestes momentos, agora devem suportar os afundamentos e em muitos casos auxiliar a rede através do provimento de potência reativa.

A topologia de aerogerador que emprega uma máquina síncrona à ímãs permanentes e um conversor de potência plena conectado à rede é atualmente a que mais cresce no mundo. Neste trabalho foi estudado o comportamento de um sistema com esta topologia frente a afundamentos de tensão.

Uma bancada de ensaios em escala reduzida foi construída com o intuito de representar um sistema de  $2MW$ , permitindo a realização de testes em ambiente laboratorial de forma segura e controlada. Equipamentos geradores de afundamentos de tensão foram utilizados para simular faltas na rede elétrica.

Após os resultados iniciais, uma estratégia de controle que garante suportabilidade a afundamentos de tensão foi estudada e implementada. A execução de ensaios com esta estratégia confirmou sua funcionalidade e o atendimento aos procedimentos de rede brasileiros.





---

# Abstract

---

The growing insertion of alternative power supplies on electrical grids over the world, especially wind energy, made necessary the creation of specific legislation to deal with the operation of these equipments under grid faults. The wind turbines, which were usually disconnected from the grid for protection, now have to sustain operation during the faults and in many countries must aid the grid through reactive power injection.

The wind turbine topology of permanent magnet synchronous machine and full power converter connected to the grid is currently the most used in the world. This work studies the behavior of such system when submitted to voltage sags.

A reduced scale test bench was constructed in order to represent a  $2MW$  system, and allow making tests in a laboratory environment, in a more safe and controlled way. Voltage sag generators were applied to simulate faults on the electrical grid.

After the initial results an improvement of the control strategy was studied and implemented. The execution of new tests confirmed the functionality of this strategy and the compliance to the Brazilian grid code.



---

# Lista de Tabelas

---

2.1	Especificações Gerais do Conversor de Frequência da Bancada de Ensaio em Relação ao Sistema Real. . . . .	12
3.1	Especificação dos fundamentos de tensão de acordo com a norma IEC 61400-21 [9]. . . . .	23



---

# Lista de Figuras

---

1.1	Distribuição da capacidade cumulativa instalada em energia eólica por país ao final do ano de 2011 [6]. . . . .	2
1.2	Distribuição da capacidade em energia eólica instalada em 2011 por país [6]. . . . .	2
1.3	Capacidade eólica instalada cumulativa global desde 1996 [6]. .	3
1.4	Capacidade eólica instalada global a cada ano desde 1996 [6]. .	3
1.5	Capacidade eólica instalada cumulativa no Brasil desde 2005 [6]. . . . .	4
1.6	Distribuição da capacidade cumulativa instalada em energia eólica no Brasil por estado até o final de 2010 e a previsão até 2013 [5]. . . . .	5
1.7	Turbina eólica de velocidade variável com conversor de potência parcial [1]. . . . .	6
1.8	Turbina eólica de velocidade variável com conversor de potência plena [1]. . . . .	7
1.9	Curva de suportabilidade frente a afundamentos de tensão definida nos procedimentos de rede brasileiros [14]. . . . .	9
2.1	Diagrama representativo da bancada de ensaios em escala reduzida. . . . .	13

2.2	Fotos da bancada de ensaios em escala reduzida. . . . .	13
2.3	Diagrama de controle da bancada de ensaios em escala reduzida.	14
2.4	Diagrama do gerador de afundamentos de tensão conforme recomendado pela norma IEC61400-21 [9]. . . . .	16
2.5	Foto do gerador de afundamentos de tensão conforme reco- mendado pela norma IEC61400-21 [9]. . . . .	18
2.6	Tolerâncias nas características do afundamento gerado para testes, conforme norma IEC61400-21 [9]. . . . .	18
2.7	Painel frontal do equipamento “Industrial Power Corruptor”. .	19
3.1	Fluxo de potência no aerogerador em condições normais de operação. . . . .	21
3.2	Fluxo de potência no aerogerador durante um afundamento de tensão com acionamento do chopper. . . . .	22
3.3	Tensões da rede durante um afundamento equilibrado para 28% da tensão nominal com 20% de potência de geração. . . .	24
3.4	Correntes de saída durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	25
3.5	Correntes no gerador durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	26
3.6	Tensão no barramento CC durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	26
3.7	Correntes de saída do conversor durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . .	27
3.8	Tensão no barramento CC durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	27
3.9	Detalhe das correntes de saída do conversor durante o transi- tório de início no afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	28

3.10	Correntes $I_d$ e $I_q$ do conversor no instante inicial do afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	28
3.11	Tensões da rede durante um afundamento desequilibrado, fase-fase, para 50% da tensão nominal com 20% de potência de geração. . . . .	29
3.12	Correntes de saída durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	29
3.13	Corrente $I_d$ no momento da queda no afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	30
3.14	Correntes no gerador durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	30
3.15	Tensão no barramento CC durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração. . . . .	31
3.16	Correntes de saída durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	31
3.17	Tensão no barramento CC durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	32
3.18	Corrente $I_d$ nos momentos de queda e recuperação do afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	32
3.19	Limites de atuação do chopper durante um afundamento tensão, de acordo com os limites de corrente do conversor. . . . .	33
4.1	Diagrama de Bode do controlador ressonante com $\omega = 120Hz$ . . . . .	38
4.2	Diagrama em blocos do controlador PI com a inclusão da parcela ressonante. . . . .	39
4.3	Diagrama de Bode do controlador PI com a inclusão da parcela ressonante. . . . .	39



4.4	Tensões da rede durante um afundamento fase-fase para 50% da tensão nominal com 100% de potência de geração. . . . .	40
4.5	Correntes de saída durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	40
4.6	Correntes $I_d$ e $I_q$ durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	41
4.7	Tensões da rede durante um afundamento fase-fase para 20% da tensão nominal com 100% de potência de geração. . . . .	42
4.8	Correntes de saída durante o afundamento para 20% da tensão nominal com 100% da potência de geração. . . . .	42
4.9	Detalhe das correntes na rede durante o início do afundamento de tensão para 20%, com 100% da potência nominal. . . . .	42
4.10	Detalhe das correntes na rede durante a recuperação do afundamento de tensão para 20%, com 100% da potência nominal. . . . .	43
4.11	Potência ativa fornecida pelo sistema durante um afundamento de tensão para 20%, com 100% da potência nominal. . . . .	44

---

# Introdução

---

## 1.1 O Mercado da Energia Eólica

### 1.1.1 No Mundo

O mercado da energia eólica vem experimentando um grande crescimento anual desde a última década. Iniciou-se na Europa, onde a indústria se tornou fortemente consolidada já na década de 90, e foi rapidamente absorvido também pelo mercado dos Estados Unidos em meados da primeira década deste século. Nestes locais, até alguns anos atrás, a grande demanda energética e a boa posição econômica alavancaram o desenvolvimento da tecnologia de conversão eólica. Entretanto, a crise do crédito nos EUA e a recente crise europeia que ainda permanece frearam a produção nestas zonas e os mercados emergentes, sobretudo o chinês, começaram a ganhar muita força nos últimos três anos.

As Figuras 1.1 e 1.2 apresentam a distribuição da capacidade cumulativa instalada e das novas instalações em 2011, respectivamente, entre os principais países e o restante do mundo.

Em 2011, o setor eólico experimentou um crescimento 6% superior ao de 2010, através da instalação de 40,5GW no mundo. Os EUA tiveram uma recuperação significativa, o Canadá obteve um recorde e a Europa se manteve na trilha de seus objetivos para 2020. Na Alemanha foram instalados mais de 2GW, aproximadamente um quinto do total europeu, afirmando seu

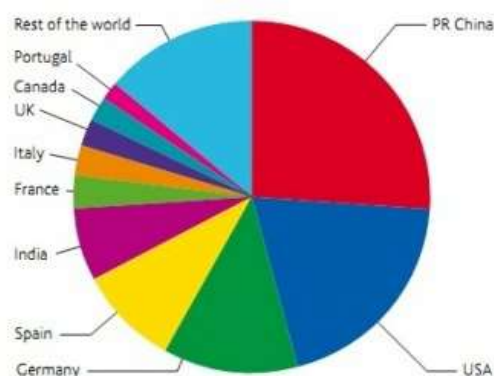


Figura 1.1: Distribuição da capacidade cumulativa instalada em energia eólica por país ao final do ano de 2011 [6].

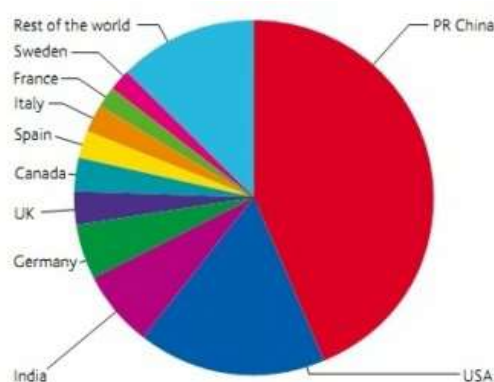


Figura 1.2: Distribuição da capacidade em energia eólica instalada em 2011 por país [6].

compromisso com a decisão de eliminação da geração nuclear no país.

Entretanto, os principais responsáveis pela manutenção do bom crescimento do setor foram os asiáticos, China e Índia. O primeiro país experimentou um momento de enorme crescimento, e sozinho foi responsável por cerca de 43% do mercado global. Juntamente com a Índia, representaram quase metade das novas instalações em 2011.

Nas Américas Central e do Sul, México e Brasil possuem um futuro muito promissor, e continuam atraindo investimentos. Enquanto na África do Sul inicia-se um movimento para entrar neste mercado.

As Figuras 1.3 e 1.4 demonstram o crescimento do mercado eólico de 1996 até 2011, através da capacidade global acumulada e da capacidade instalada anualmente, respectivamente.

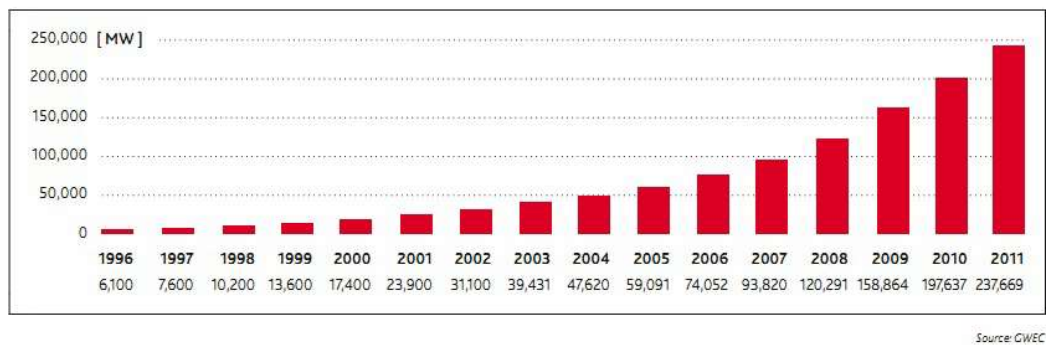


Figura 1.3: Capacidade eólica instalada cumulativa global desde 1996 [6].

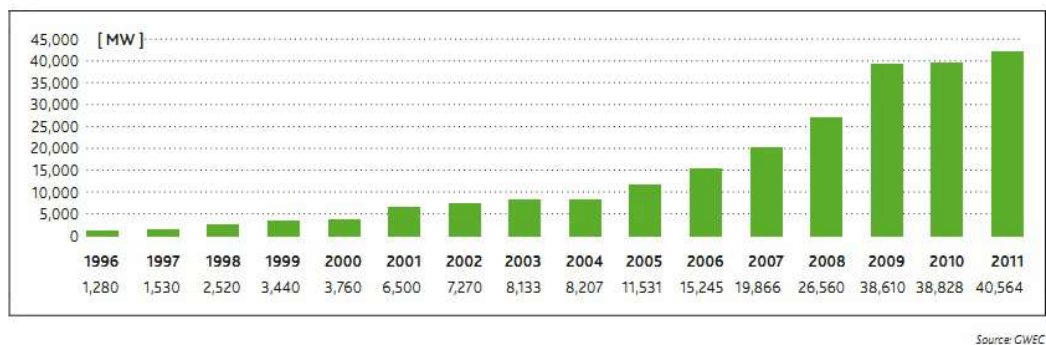


Figura 1.4: Capacidade eólica instalada global a cada ano desde 1996 [6].

A capacidade mundial instalada ao final de 2011 chegou a  $238GW$ , representando um crescimento de 20% na capacidade cumulativa global, inferior à média dos últimos 10 anos, mas respeitável para qualquer indústria em vista do difícil clima econômico em que o mundo se encontra [6].

### 1.1.2 No Brasil

O Brasil possui um potencial para geração eólica em torno de  $350GW$ , além de uma forte complementaridade entre os períodos de seca no Rio São Francisco e ventos na região Nordeste. Estes fatores, aliados ao crescimento

econômico e conseqüentemente na demanda de energia, e às questões ambientais que tornam a exploração dos recursos hidráulicos cada vez mais desafiadores, levaram o governo a buscar uma maior diversificação em sua matriz energética.

O início do desenvolvimento do setor eólico no país se deu a partir do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), iniciado em 2002. Dos 3300MW distribuídos entre as fontes de geração contempladas, 1423MW foram voltados à eólica, e tinham previsão de entrada em operação até o fim do ano de 2008.

O desenvolvimento de alguns projetos, contudo, foi comprometido pelos vários obstáculos encontrados, como a reduzida capacidade da indústria instalada no Brasil, problemas de conexão às redes, custo e burocracia na obtenção ou renovação das licenças ambientais, entre outros. Assim, o programa teve seus prazos prorrogados até o fim de 2011, finalizando com um saldo de 1325,6MW operacionais e conectados à rede. Houve uma grande quantidade de instalações nos últimos dois anos, indicando um forte estabelecimento da indústria no país e conseqüentemente um resultado bastante positivo.

A Figura 1.5 apresenta o crescimento do mercado eólico nacional de 2005 até 2011, através da capacidade instalada acumulada no país.

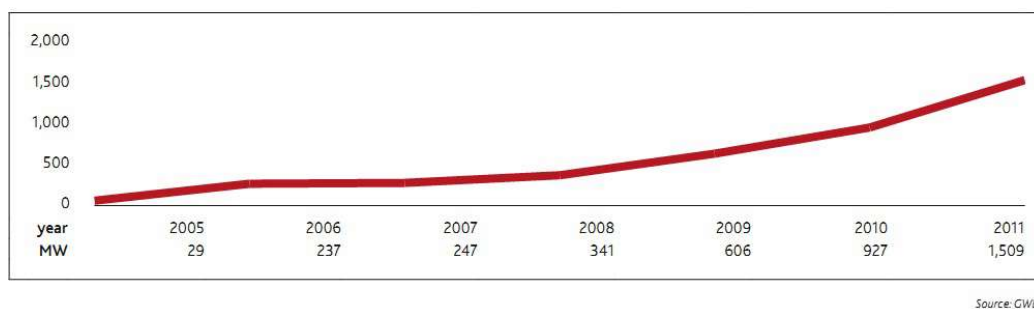


Figura 1.5: Capacidade eólica instalada cumulativa no Brasil desde 2005 [6].

O Brasil instalou 583MW em 2011, fechando o ano com uma capacidade acumulada de 1509MW o que representou um crescimento 56% superior a 2010 e um aumento de 63% na capacidade total instalada. Atualmente conta com mais de 7000MW previstos para serem instalados até o ano de 2016. Os leilões de energia realizados desde 2009 voltados especificamente para o setor

eólico e as novas políticas de financiamento introduzidas pelo Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) atraíram investidores importantes para o país, além dos investimentos privados e estatais nacionais, tornando este mercado mais competitivo e qualificado, e gerando mais recursos e empregos [6].

A Figura 1.6 apresenta a distribuição entre os estados da capacidade cumulativa instalada no Brasil até o ano de 2010 e a previsão de instalação até 2013.

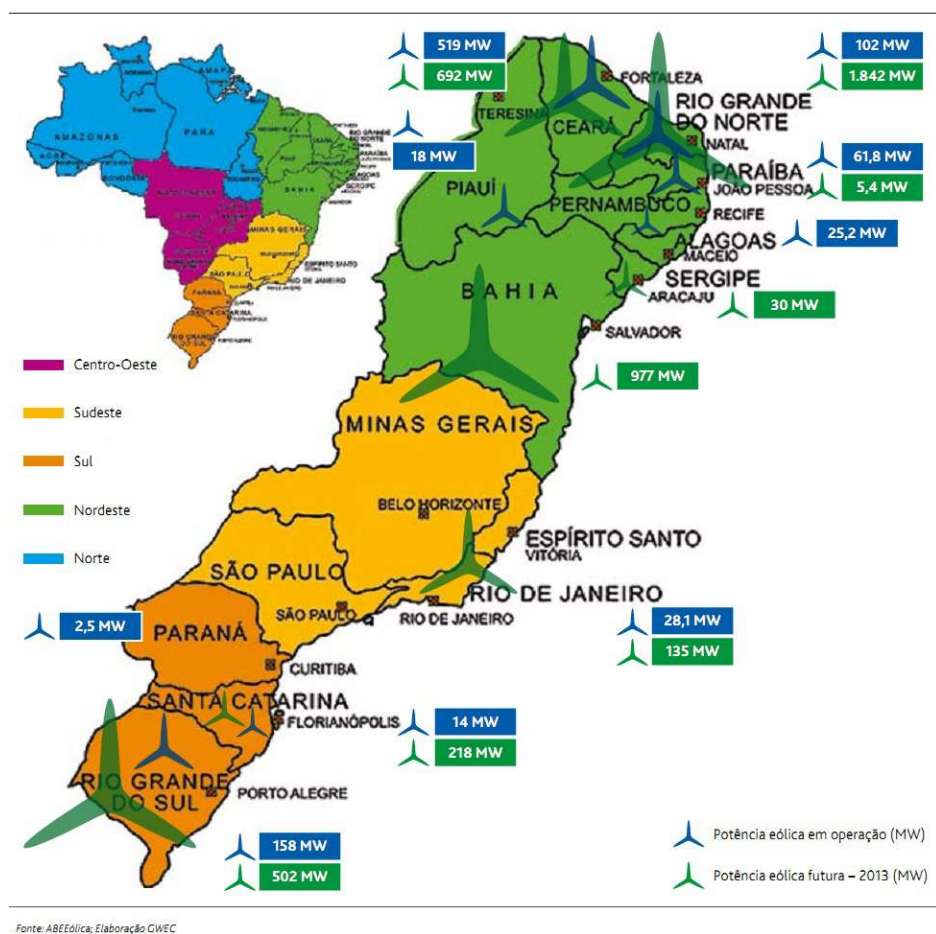


Figura 1.6: Distribuição da capacidade cumulativa instalada em energia eólica no Brasil por estado até o final de 2010 e a previsão até 2013 [5].

Observa-se que a região nordeste apresenta um grande potencial eólico, seguido pela região sul. Os estados que possuem maior previsão de potência instalada para 2013 são Rio Grande do Norte, Ceará e Bahia. Na Região

Sul, Rio Grande do Sul e Santa Catarina atraem projetos significativos. A região Sudeste concentra uma grande parte do consumo energético nacional, mas infelizmente não conta com ventos atrativos e apenas alguns projetos no Rio de Janeiro podem ser observados. Esta distribuição levanta uma grande preocupação em relação à capacidade das redes elétricas, principalmente no nordeste, onde a distância entre os grandes centros consumidores é muito grande em relação aos empreendimentos geradores [5].

## 1.2 Topologias de Geração

As duas estratégias mais utilizadas atualmente para a geração eólica utilizam conversores de frequência para obter controle completo das potências ativa e reativa na mais ampla faixa de velocidades possível. Este conversor, dependendo da topologia de gerador, pode ser de potência plena ou parcial em relação à potência do gerador.

A máquina mais adotada para utilização do conversor de potência parcial é o gerador de indução com rotor bobinado, que emprega o conversor de frequência conectado ao rotor, com aproximadamente 30% de sua potência. Esta topologia é apresentada na Figura 1.7.

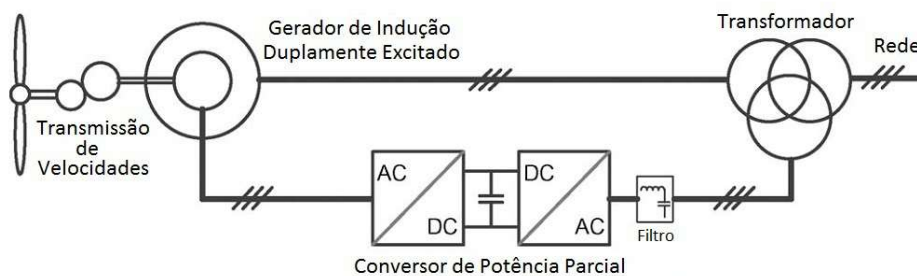


Figura 1.7: Turbina eólica de velocidade variável com conversor de potência parcial [1].

O estator se conecta diretamente à rede enquanto o conversor controla a potência fornecida ao rotor. Sua potência define a faixa de velocidades do gerador, tipicamente em torno de  $\pm 30\%$  da velocidade síncrona. Este conversor permite ainda a realização de compensação de potência reativa. Trata-se de uma estrutura muito interessante do ponto de vista econômico,



contudo a necessidade de um sistema de transmissão de velocidades (caixa de multiplicação) e as estratégias de proteção frente a distúrbios na rede representam desvantagens importantes [1].

A configuração de aerogerador que emprega conversão em potência plena é mostrada na Figura 1.8.

O gerador pode ser assíncrono, síncrono com enrolamento de campo ou síncrono à ímãs permanentes, e a conexão do estator é realizada através do conversor de potência plena.

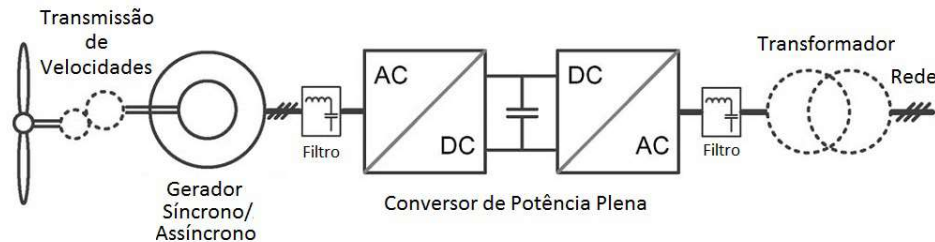


Figura 1.8: Turbina eólica de velocidade variável com conversor de potência plena [1].

Algumas estruturas eliminam a necessidade de um sistema de transmissão através do uso de grandes máquinas com vários pólos. A tensão de geração pode ser na faixa das baixas ou médias tensões, e é possível que no futuro estejam em níveis tais que o transformador de saída não seja necessário.

Neste trabalho será abordada a arquitetura de aerogerador com gerador síncrono a ímãs permanentes e utilização de conversor pleno. Trata-se de uma tecnologia em utilização crescente atualmente nos sistemas eólicos, por se tratar de uma estrutura simples e confiável, além de garantir excelente controlabilidade das variáveis elétricas na rede (potências ativa e reativa, fator de potência, harmônicos de baixa ordem) e robustez frente a distúrbios na rede [1].

## 1.3 Suportabilidade a Afundamentos de Tensão

Uma das primeiras formulações de requisitos relacionados a suportabilidade frente a afundamentos de tensão para aerogeradores foi estabelecida na Alemanha, em 2003, pela companhia E.On. Anteriormente, os requisitos para turbinas eólicas concentravam-se na proteção da própria turbina, entretanto, devido à inserção crescente da geração eólica nas matrizes européias, tornou-se evidente a necessidade de códigos especificamente voltados para esta tecnologia e não seria mais aceitável a desconexão das unidades geradoras frente a quaisquer distúrbios, tendo em vista que o impacto da desconexão torna-se extremamente prejudicial ao sistema como um todo [10].

Com a evolução da tecnologia dos equipamentos, os requerimentos aos aerogeradores passaram não somente a manterem-se conectados, como também auxiliar a rede elétrica durante a falta e seu reestabelecimento, através da entrega ou consumo de potência ativa e reativa [4].

No caso do Brasil, o item 8.13 do submódulo 3.6 dos procedimentos de rede do Operador Nacional de Sistema (ONS) define o seguinte requisito [14]:

*“8.13 Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede básica (fault ride-through).*

*8.13.1 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 1.”*

A figura ao qual se refere o texto é apresentada na Figura 1.9.

A curva da Figura 1.9, portanto, define os limites em que o aerogerador deve permanecer conectado, sem contudo definir as condições em que deve operar em circunstâncias de afundamento de tensão, como o consumo ou entrega de potência ativa e reativa à rede.

Com o intuito de atender aos mais rigorosos requisitos de rede, encontram-se na literatura soluções de controle de corrente de sequência positiva e negativa desacoplados [19, 20, 2], ou controle no referencial estacionário utili-

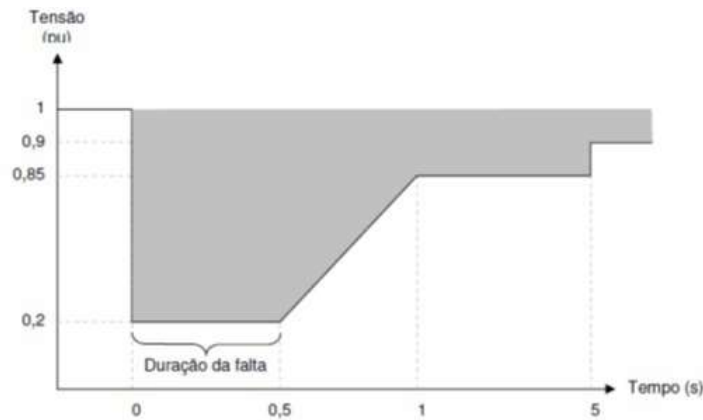


Figura 1.9: Curva de suportabilidade frente a afundamentos de tensão definida nos procedimentos de rede brasileiros [14].

zando controladores ressonantes [19, 2], por exemplo. Entretanto, a primeira apresenta um considerável grau de complexidade de implementação computacional, uma vez que introduz mais controladores, transformações, filtros e termos de desacoplamento ao controle; enquanto a segunda aumenta a complexidade na geração das referências, além de introduzir transformações de referencial entre as malhas externas e as malhas internas de controle.

## 1.4 Objetivos do Trabalho

O presente trabalho apresenta o estudo frente a afundamentos de tensão de um sistema de conversão eólico que emprega a tecnologia de gerador síncrono a ímãs permanentes conectado à rede através de um conversor de potência plena. O objetivo foi analisar a resposta desse sistema frente aos afundamentos, utilizando métodos clássicos de controle, de forma a esclarecer as principais causas de desconexão e de que maneira contorná-las. O código de rede brasileiro foi utilizado como base para o estudo.

Para a realização de testes experimentais utilizou-se uma bancada de ensaios em escala reduzida, que representa um aerogerador de  $2MW$ , e equipamentos geradores de afundamentos de tensão. Foram aplicadas várias sub-tensões, registrando-se as variáveis de interesse e com níveis de proteções do conversor sobredimensionados, para permitir uma melhor análise dos resul-

tados. Tal análise explicitou os problemas que levariam um sistema real à desconexão, e a inserção de um controlador ressonante juntamente aos tradicionais proporcional e integral nas malhas de controle de corrente mostrou-se eficiente para solucionar este problema.

Este trabalho justifica-se pela sua contribuição frente ao estado da arte neste assunto com a implementação da topologia de controle em si, que além de eficiente mostra-se simples, eliminando a necessidade de transformações de referencial adicionais ou de malhas de controle em sequência positiva e negativa separadamente, e sobretudo ao possibilitar a realização de trabalhos futuros cuja importância é fundamental para o desenvolvimento da tecnologia em nosso país principalmente, e no mundo.

## 1.5 Estrutura do Texto

O Capítulo 2 apresenta a bancada experimental construída pela ICSA do Brasil nas dependências do Laboratório de Conversão e Controle de Energia da Universidade Federal de Minas Gerais (LCCE-UFMG) para representar em escala reduzida um aerogerador de  $2MW$  de potência e os equipamentos utilizados para a realização de ensaios de afundamentos de tensão. O Capítulo 3 descreve os ensaios realizados e apresenta os resultados obtidos juntamente com uma discussão dos fenômenos observados. No Capítulo 4 encontra-se a descrição do controlador ressonante, ferramenta utilizada e implementada para a resolução de problemas decorrentes dos distúrbios, bem como os resultados obtidos e uma análise dos mesmos. Finalmente, o Capítulo 5 abrange as conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, destacando temas de continuidade para o desenvolvimento da tecnologia, com base nos obstáculos enfrentados e resultados obtidos.

# Bancada de Ensaio em Escala Reduzida

---

A bancada de ensaios em escala reduzida foi montada pela empresa ICSA do Brasil (fabricante de conversores para o mercado eólico) nas dependências do Laboratório de Conversão e Controle de Energia da Universidade Federal de Minas Gerais (LCCE-UFMG) e representa um sistema de conversão eólico que utiliza ímãs permanentes e conversor pleno de  $2MW$ , sendo os resultados aplicáveis também a outras ordens de potência na faixa dos  $MW$ . O intuito desta bancada é possibilitar a realização de ensaios em ambiente laboratorial, de forma controlada e segura, contando com as facilidades de se trabalhar com potência reduzida, e com total capacidade de aplicação dos resultados ao sistema em escala real.

## 2.1 Descrição da Bancada

O sistema é composto de um inversor comercial que aciona uma máquina de indução de 8 pólos,  $50cv$ , acoplada através de um sistema de transmissão ao gerador síncrono a ímãs permanentes. O motor de indução produz o conjugado necessário para o gerador, simulando o comportamento dinâmico de uma turbina eólica.

A máquina síncrona à ímãs permanentes, de  $34kW$  e  $150rpm$ , é refrigerada a água, e portanto utilizou-se um sistema composto por uma torre

de resfriamento, uma bomba hidráulica monofásica e um filtro para efetuar a circulação do líquido sem impurezas pela mesma. O gerador se conecta à rede através de um conversor a IGBT's pleno, bidirecional, de  $42kVA$ , propositalmente sobredimensionado para permitir a avaliação de efeitos que desligariam um sistema em escala real. No barramento CC, uma chave conecta uma resistência (chopper de descarga) em paralelo à capacitância CC, para dissipar energia e reduzir a tensão em caso de falhas que geram sobretensões ou quando o sistema é desligado. O conversor emprega o hardware de controle CEF100, fabricado pela ICSA do Brasil, e apresenta em sua saída um filtro LCL [13] para atenuação dos harmônicos de chaveamento. Um circuito de pré-carga evita transições abruptas de tensão no barramento CC no instante de fechamento do contator principal. O sistema é conectado a um computador, que é utilizado para operação da bancada de ensaios.

A Tabela 2.1 apresenta os valores das principais especificações da bancada de ensaios em escala reduzida em relação aos valores do sistema real. Buscou-se manter as relações entre variáveis, como os limites de atuação do chopper em função da tensão nominal do barramento CC.

Tabela 2.1: Especificações Gerais do Conversor de Frequência da Bancada de Ensaio em Relação ao Sistema Real.

	Banco de Ensaio	Sistema Real
Tensão Nominal de Rede ( $V_{grid}$ )	380V	690V
Potência Nominal de Saída	25kW	2MW
Tensão do Barramento CC ( $V_{dc}$ )	1.66 $V_{grid}$	
Limitação de Corrente de Saída	1.13pu	
Acionamento do Chopper	1.026 $V_{dc}$	
Desligamento do Chopper	1.009 $V_{dc}$	
Velocidade Nominal da Máquina	150rpm	15rpm
Tensão Nominal da Máquina	380V	690V

As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram o diagrama unifilar de ligação da bancada e as fotos do sistema montado, respectivamente.

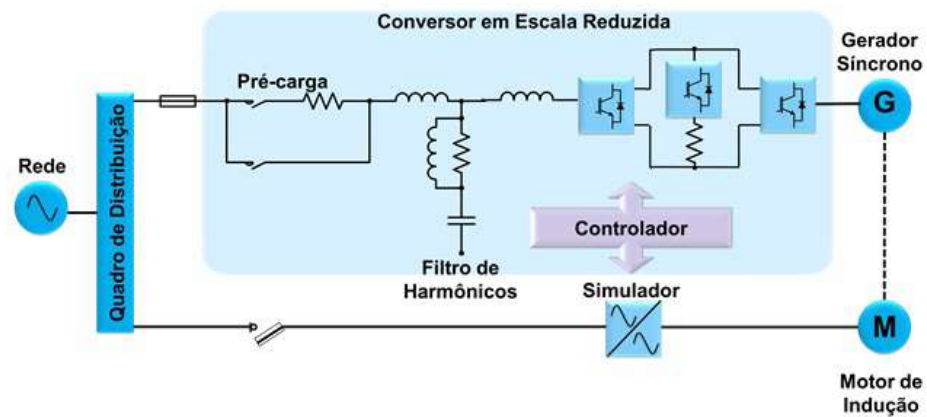


Figura 2.1: Diagrama representativo da bancada de ensaios em escala reduzida.



Figura 2.2: Fotos da bancada de ensaios em escala reduzida.

## 2.2 Estrutura de Controle

A conversor estático presente na parte geradora da bancada possui um controlador eletrônico baseado em um processador digital, cuja lógica é flexível e permite alterações para testes de novas estratégias de controle. Este controlador executa toda a lógica de comando através de entradas e saídas digitais, verificando a existência de falhas, disparando os respectivos alarmes quando necessário, executando as sequências de arranque, parada ou emergência, acionando o inversor do simulador de turbina, entre outras funções. Possui entradas e saídas de fibras ópticas que recebem os sinais de erro e transmitem os sinais dos pulsos PWM dos IGBT's dos conversores do lado da rede e do lado gerador, e do chopper de descarga, que atua quando a tensão do barramento capacitivo se eleva acima de um valor limite. Entradas analógicas completam sua interface com o sistema, permitindo as medições das correntes trifásicas em ambos os lados, as tensões entre fases, a tensão do barramento CC, a corrente do chopper, e as temperaturas do gerador síncrono e dos módulos de potência.

A estrutura básica de controle dos conversores da bancada é mostrada na Figura 2.3.

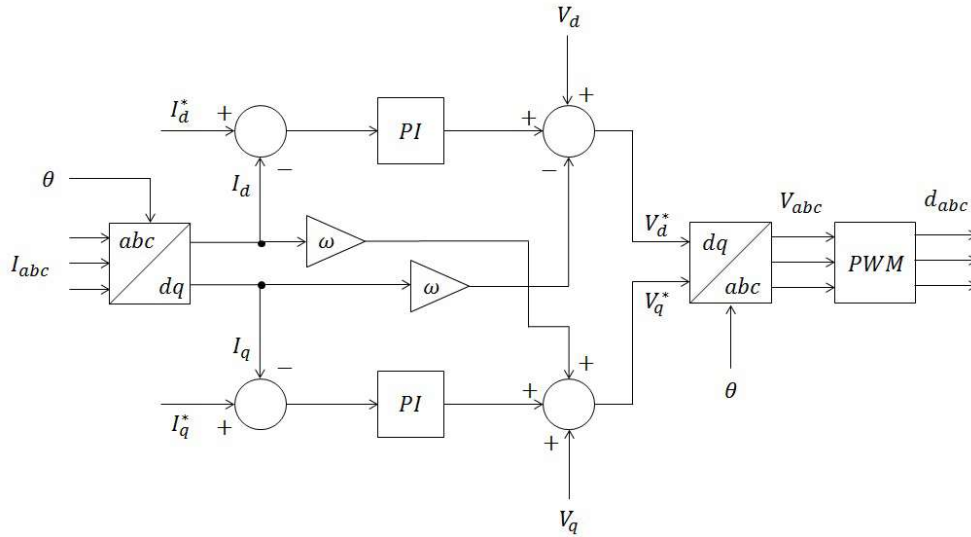


Figura 2.3: Diagrama de controle da bancada de ensaios em escala reduzida.

No lado do gerador, o controle é realizado no referencial síncrono [11,



15, 16] orientado pelo fluxo do rotor, através de uma estratégia "sensorless" implementada pela ICSA do Brasil. Na orientação utilizada, a corrente de eixo direto é responsável pela produção de conjugado eletromagnético enquanto a corrente de eixo de quadratura é utilizada para atuar no campo do rotor, evitando sobretensões ocasionadas por sobrevelocidades, e portanto sua referência é definida pelo algoritmo de enfraquecimento de campo utilizado [12]. Esta orientação não é comumente utilizada na literatura, onde habitualmente utiliza-se o eixo de quadratura relacionado ao conjugado e o eixo direto ao fluxo, entretanto, esta variação conceitual em nada influi no sistema funcionalmente. Na bancada de ensaios em escala reduzida, utilizou-se as malhas internas de corrente  $I_d$  e  $I_q$  habituais. A referência de  $I_q$  foi mantida constantemente em zero enquanto a referência de  $I_d$  era calculada a partir da referência de conjugado demandada de acordo com a velocidade da máquina, obtida através do "sensorless". A curva de conjugado em função da velocidade é um parâmetro que depende de aspectos construtivos da turbina, sobretudo das pás e do gerador em si, e para os ensaios utilizou-se uma curva escalonada a partir da curva original do conversor em escala real fabricado pela ICSA.

O controle do lado da rede é orientado pela tensão da rede, sendo o algoritmo DDSRF-PLL (do inglês "Double Decoupled Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop") utilizado para a sincronização [17, 19]. Este PLL permite orientar o controle com excelente precisão desacoplando as sequências positiva e negativa da tensão da rede. Esta é uma vantagem muito atrativa, especialmente durante afundamentos desequilibrados, quando as tensões e correntes adquirem componentes de sequência negativa, muito prejudiciais ao correto funcionamento dos controladores. Na orientação utilizada, a tensão  $V_d$  adquire um valor constante (pressupondo que as tensões estejam corretamente equilibradas) e igual à amplitude das tensões de fase enquanto a tensão  $V_q$  tem seu valor mantido em zero. Desta forma, a corrente  $I_d$  representa apenas potência ativa e a corrente  $I_q$  apenas potência reativa. Externamente à malha de  $I_d$  um laço de controle da tensão do barramento CC mantém seu valor constante, garantindo o fluxo de potência ao entregar à rede a energia drenada da máquina para o barramento a menos das perdas. A referência de  $I_q$  foi mantida em zero durante os ensaios.

Os ganhos das malhas de corrente foram sintonizados inicialmente de acordo com o método ótimo por módulo [7], e uma sintonia fina foi realizada

na bancada através da resposta ao degrau. O método de modulação descontinua (DPWM0) é utilizado devido à redução significativa de perdas por chaveamento que proporciona ao conversor [8].

O motor de indução que atua como simulador de turbina foi controlado em velocidade constante durante este trabalho, ajustável pelo operador da bancada, uma vez que os ensaios realizados têm curta duração e a inércia das massas girantes numa turbina real é muito grande, resultando em variações lentas de velocidade. Além disso, a topologia de geração com conversor pleno apresenta um isolamento praticamente completo entre os lados gerador e rede, e os distúrbios ocorridos de um lado surtem pouca influência no outro, conforme será demonstrado posteriormente.

## 2.3 Equipamentos para Geração de Afundamentos

### 2.3.1 Afundamentos Equilibrados

Para realização dos testes de afundamentos de tensão equilibrados na bancada foi utilizado um dispositivo recomendado pela norma IEC61400-21 [9] denominado gerador de afundamento de tensão, cujo diagrama esquemático é mostrado na 2.4.

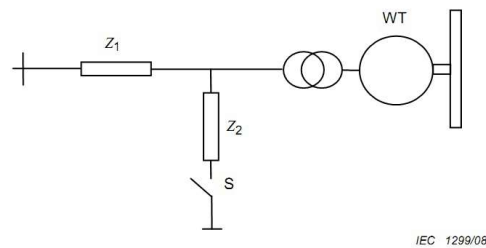


Figura 2.4: Diagrama do gerador de afundamentos de tensão conforme recomendado pela norma IEC61400-21 [9].

Um reator trifásico de impedância  $Z_1$  é conectado em série enquanto outro de impedância  $Z_2$  é conectado em paralelo com o equipamento a ser ensaiado ( $WT$ ). A chave  $S$  pode conectar o ramo à terra ou as fases entre si.

Neste trabalho a última opção foi adotada. Quando  $S$  é fechada, o circuito se comporta como um divisor de tensão, e seu valor residual de tensão é definido pela relação entre as impedâncias, ou seja,

$$AMT(\%) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \times 100\% \quad (2.1)$$

O gerador de afundamentos equilibrados foi projetado e montado pela equipe ICSA/LCCE-UFMG e possui dois indutores de  $1,2mH$  e um indutor de  $0,3mH$ . Cada qual apresenta uma conexão central para que se utilize metade de sua indutância, e podem ser conectados das seguintes formas para obter-se diferentes tensões residuais:

- 89%:  $Z_1 = 0,3mH$  e  $Z_2 = 1,2 + 1,2 = 2,4mH$ ;
- 72%:  $Z_1 = 0,6mH$  e  $Z_2 = 1,2 + 0,3 = 1,5mH$ ;
- 50%:  $Z_1 = 1,2mH$  e  $Z_2 = 1,2mH$ ;
- 28%:  $Z_1 = 1,2 + 0,3 = 1,5mH$  e  $Z_2 = 0,6mH$ ;

Uma foto do gerador de afundamentos de tensão é apresentada na Figura 2.5, onde destacam-se o contator de operação na parte superior e os reatores na parte inferior.

Outras combinações de reatâncias foram testadas para obtenção de diferentes valores de amplitude de afundamento, entretanto a soma das indutâncias  $Z_1$  e  $Z_2$  não pode ser muito baixa, pois implica em circulação de correntes muito elevadas no sistema, provocando atuação das proteções do circuito de alimentação da bancada. Adicionalmente, problemas de saturação dos indutores devido às altas correntes contínuas e transitórias impediram a execução de afundamentos para tensões inferiores a 28%.

Quando o sistema de conversão está em operação, as magnitudes dos afundamentos podem ser diferentes daquelas calculadas através de (2.1). A norma IEC 61400-21 [9] estabelece os limites de desvio para os parâmetros do afundamento gerado, conforme demonstra a Figura 2.6. Infelizmente não foi possível atender ao afundamento mais severo ( $0,20pu \pm 0,05pu$ ), sendo analisado o de  $0,28pu$  desta forma.



Figura 2.5: Foto do gerador de afundamentos de tensão conforme recomendado pela norma IEC61400-21 [9].

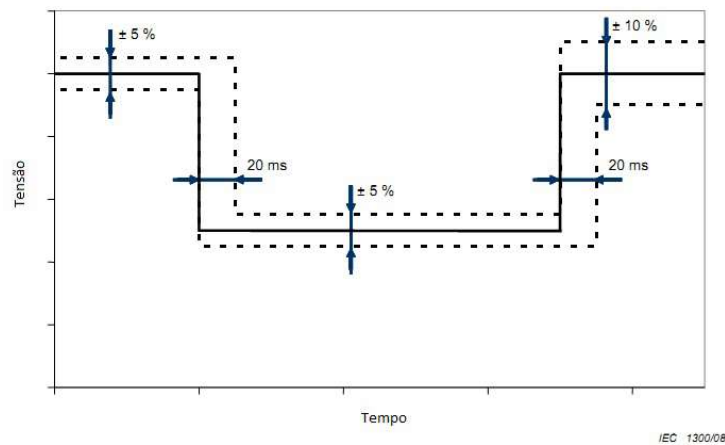


Figura 2.6: Tolerâncias nas características do afundamento gerado para testes, conforme norma IEC61400-21 [9].

### 2.3.2 Afundamentos Desequilibrados

[illegible]

Figura 2.7: Painel frontal do equipamento “Industrial Power Corruptor”.



# Ensaio de Suportabilidade a Afundamentos Momentâneos de Tensão

Conforme mencionado na seção 2.2, o conversor do lado do gerador é responsável pelo controle de conjugado da máquina, extraindo potência no sentido do barramento CC. A injeção de energia no mesmo provocaria o aumento de sua tensão não fosse pela atuação do controle do lado da rede, que para manter este valor regulado entrega energia do barramento para a rede elétrica. Assim, em condições normais de operação o fluxo de potência no aerogerador se dá no sentido demonstrado na Figura 3.1.

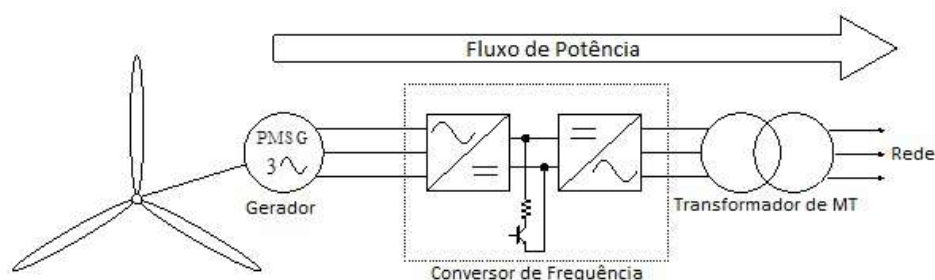


Figura 3.1: Fluxo de potência no aerogerador em condições normais de operação.

A potência ativa trifásica eficaz entregue à rede, uma vez que o fator de potência seja unitário, é definida através das tensões e correntes de fase de

acordo com a expressão

$$P_{rms} = 3V_{rms}I_{rms} \quad (3.1)$$

Devido à estratégia adotada para o controle, o conjugado eletromagnético produzido pelo conversor do lado do gerador depende exclusivamente da velocidade da máquina. Entretanto, durante um afundamento momentâneo de tensão, para que o conversor da rede continue aportando a mesma potência, é necessário que as correntes deste sejam maiores, de forma a compensar a queda da tensão. Em uma circunstância de afundamento para 20% do valor nominal, por exemplo, as correntes teriam que aumentar para 500% para que fosse possível manter a potência nominal do conversor durante a falha. O projeto de um equipamento com tal capacidade de sobrecarga é inviável economicamente.

A limitação da capacidade de condução de corrente dos conversores provoca uma limitação na capacidade de entrega de potência à rede durante um distúrbio na tensão. Uma vez que o conversor do lado gerador continua produzindo o mesmo conjugado independente do distúrbio, durante momentos de vento com alto conteúdo energético surge um desbalanço de energia no barramento CC, provocando um aumento de tensão no mesmo. Para que não atinja valores proibitivos, aciona-se o chopper de descarga, que conecta uma resistência paralela ao barramento CC para dissipar sua energia adicional. Assim, o fluxo de potência durante a falta toma o sentido apresentado na Figura 3.2.

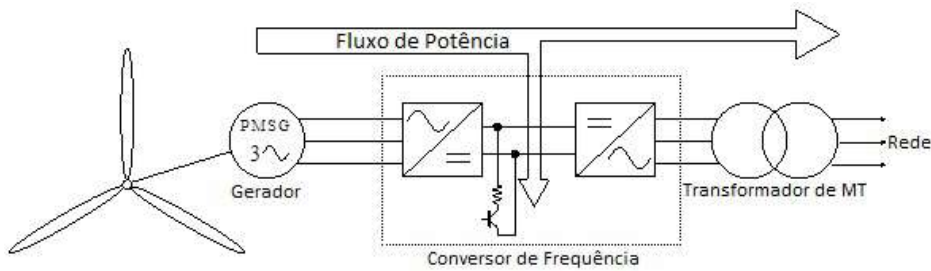


Figura 3.2: Fluxo de potência no aerogerador durante um afundamento de tensão com acionamento do chopper.

O controle do lado da rede é responsável por limitar a máxima corrente fornecida à rede, enquanto o chopper dissipa o excedente de potência entregue pelo gerador ao barramento CC. Assim, durante o afundamento, o conversor



deve ser capaz de suportar os transitórios de queda e recuperação de tensão sem ativar proteções que desconectem o aerogerador e manter a corrente de regime permanente limitada em um valor permissível. Além disso, o resistor do chopper deve ser projetado de forma a dissipar a energia excedente nos piores casos. Na bancada de ensaios, o chopper é capaz de dissipar a potência nominal do sistema por até um segundo, situação mais rigorosa do que o caso mais severo previsto pelo código de rede brasileiro [14].

### 3.1 Ensaios

De acordo com a norma IEC 61400-21 [9], a turbina eólica deve ser submetida aos afundamentos definidos na tabela 3.1 para averiguar sua suportabilidade. Os ensaios devem ser realizados com a turbina operando entre  $0,1P_n$  e  $0,3P_n$ , e acima de  $0,9P_n$ .

Tabela 3.1: Especificação dos afundamentos de tensão de acordo com a norma IEC 61400-21 [9].

Caso	Magnitude da tensão residual fase-fase (p.u.)	Magnitude da tensão de sequência positiva (p.u.)	Duração (s)
Trifásicos simétricos	$0,90 \pm 0,05$	$0,90 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
	$0,50 \pm 0,05$	$0,50 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
	$0,20 \pm 0,05$	$0,20 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$
Bifásicos	$0,90 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
	$0,50 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
	$0,20 \pm 0,05$	$0,60 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$

Devido à flexibilidade na execução de ensaios na bancada, foram realizados vários testes além dos apresentados na Tabela 3.1. Inicialmente, realizaram-se afundamentos leves, para 90% de tensão, com potência ativa nula e controle de potência reativa apenas, cujo propósito era avaliar a resposta da malha de sincronização do conversor com a tensão da rede. O método DDSRF-PLL desempenhou seu papel com excelente resposta, garantindo uma rápida detecção da tensão residual, e garantindo o correto sincronismo durante a falta [17, 19].

Devido à quantidade de dados obtidos durante os ensaios, não é possível apresentá-los integralmente, e portanto os mais importantes serão mostrados e comentados. Entretanto, o comportamento geral do conversor frente a distúrbios com tensões residuais ou potências de geração distintas das aqui apresentadas não varia significativamente e os mesmos comentários e observações se aplicam.

### 3.1.1 Ensaios com Afundamentos Equilibrados

Os afundamentos equilibrados são os mais severos distúrbios em relação à limitação de energia, já que as três fases têm suas tensões reduzidas, ao contrário dos desequilibrados de mesma profundidade, onde uma ou duas tensões são menos afetadas. Nestas faltas, portanto, o desbalanço de energia entre o lado do gerador e da rede é maior, exigindo que o chopper dissipe uma potência maior. Em contrapartida, é menos exigente do ponto de vista de sincronização e controle, por manter a simetria original do circuito, uma vez que não surgem tensões de sequência negativa.

Os ensaios foram realizados para as quatro configurações descritas na Seção 2.3, ou seja, para tensões residuais de 89%, 72%, 50% e 28%. Cada um foi efetuado para potências de geração de 20%, 50%, 80% e 100% do valor nominal. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram as tensões e correntes na rede durante um distúrbio para 28% de tensão residual e 20% de potência.

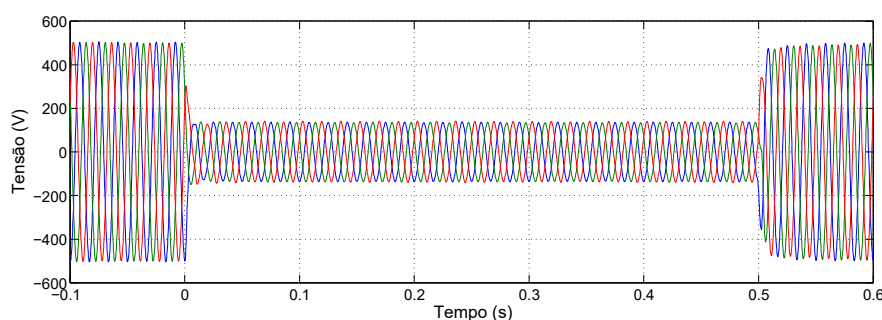


Figura 3.3: Tensões da rede durante um afundamento equilibrado para 28% da tensão nominal com 20% de potência de geração.

Na Figura 3.4 pode ser observado o aumento da corrente do conversor do lado da rede para garantir a continuidade do fluxo de potência durante a

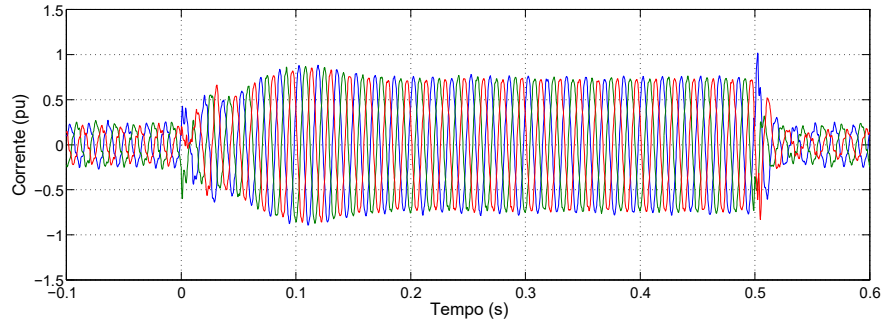


Figura 3.4: Correntes de saída durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

falta. De acordo com a equação 3.1, para manter os 20% de potência seria necessária uma corrente de

$$\begin{aligned} P_{pu} &= V_{pu} I_{pu} \\ I_{pu} &= \frac{P_{pu}}{V_{pu}} = \frac{0,2}{0,28} = 0,71 pu \end{aligned} \quad (3.2)$$

No caso deste afundamento, seu valor não atinge o limite de saturação, uma vez que a potência entregue pelo gerador não alcança a nominal, representando uma situação de ventos leves. A Figura 3.5 apresenta as correntes do lado do gerador, onde se observa que o distúrbio não surte efeito algum, já que as mesmas não apresentam nenhum transitório ou modificação de valor. Este isolamento existente entre a máquina e a rede, devido à presença do conversor pleno, é uma característica muito vantajosa desta topologia de geração, comparada ao gerador de indução com rotor bobinado por exemplo, cuja máquina tendo o estator diretamente conectado à rede, sofre diretamente os efeitos dos distúrbios.

A tensão do barramento CC é mostrada na Figura 3.6. Observa-se a existência de um transitório nos momentos de queda e recuperação da tensão da rede, e o retorno ao valor de referência após estes instantes, devido à ação do controle através da adequação das correntes de saída do conversor.

Para um afundamento de mesma profundidade, mas com o sistema em geração nominal, as correntes pouco podem se elevar devido às restrições físicas do equipamento. Assim, numa circunstância como esta, o chopper

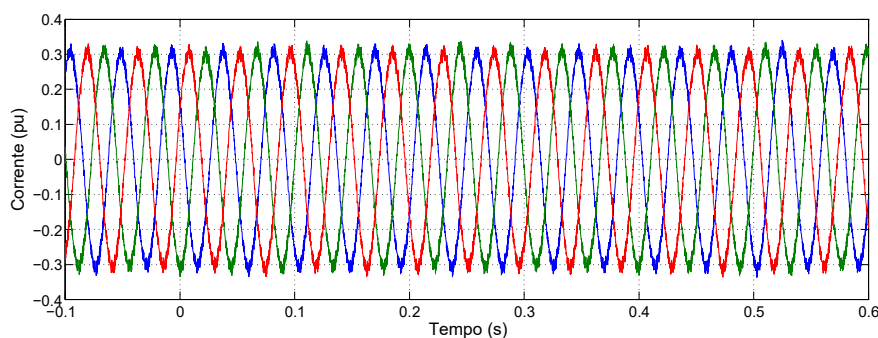


Figura 3.5: Correntes no gerador durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

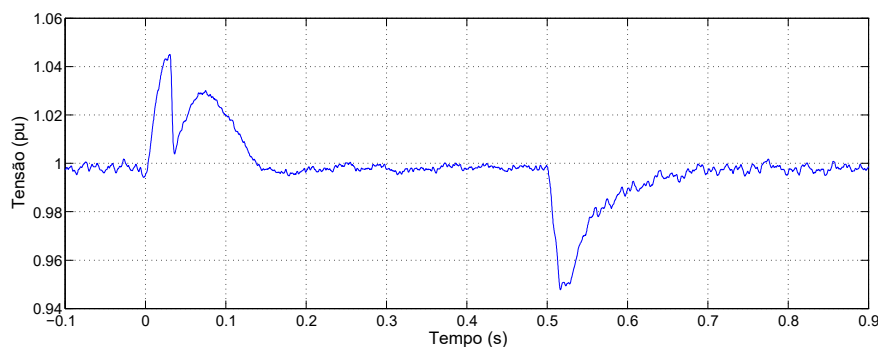


Figura 3.6: Tensão no barramento CC durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

deve dissipar o adicional de energia que o conversor do lado da rede não pode extrair do barramento.

A Figura 3.7 ilustra as correntes na rede durante um afundamento para 28% com o sistema gerando 100% de sua potência nominal. Observa-se que não há um aumento significativo em seu valor, que se mantém limitado devido à ação do controle com a saturação na referência.

A Figura 3.8 ilustra a tensão no barramento CC durante o distúrbio, onde é possível notar a atuação do chopper quando a tensão aumenta e atinge o valor limite superior de  $1,044pu$ , neste instante seu valor cai rapidamente até o limite inferior de  $1,02pu$ , quando o chopper é desligado e a tensão volta a subir. Este ciclo é repetido durante toda a duração do afundamento, e só

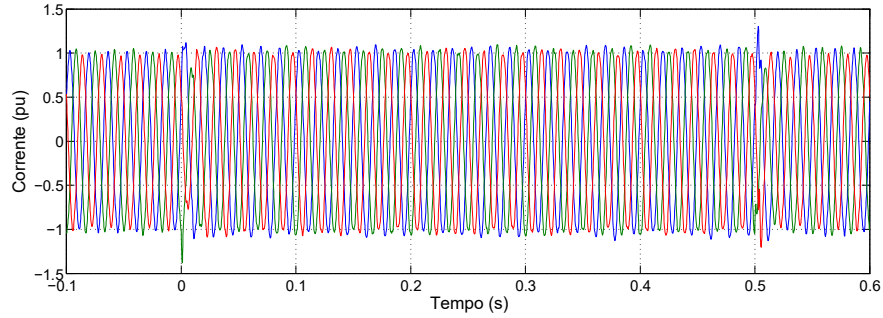


Figura 3.7: Correntes de saída do conversor durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

é normalizado após a recuperação. Os valores dos limites de acionamento e desligamento do chopper são determinados pelas limitações físicas dos módulos de potência do conversor, principalmente a tensão dos capacitores do barramento e a máxima tensão CC de operação dos IGBT's.

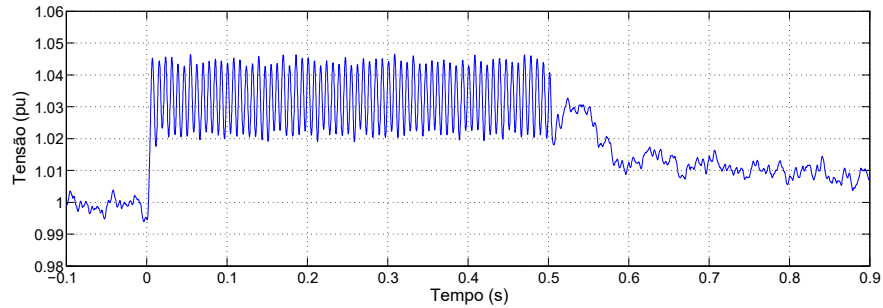


Figura 3.8: Tensão no barramento CC durante o afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

Na Figura 3.9 observam-se as correntes transitórias no momento da queda da tensão, destacando um pico transitório que chega a  $1,376pu$  de magnitude. Este pico tem uma duração muito curta, e as proteções por sobrecorrente do conversor devem ser temporizadas de tal forma que não provoquem a desconexão da turbina devido a este transitório. A Figura 3.10 ilustra as correntes no referencial síncrono e seus valores de referência no controle, explicitando a saturação da referência de corrente  $I_d$ , o que garante um valor controlado dentro dos limites das proteções de sobrecorrente durante o afundamento.

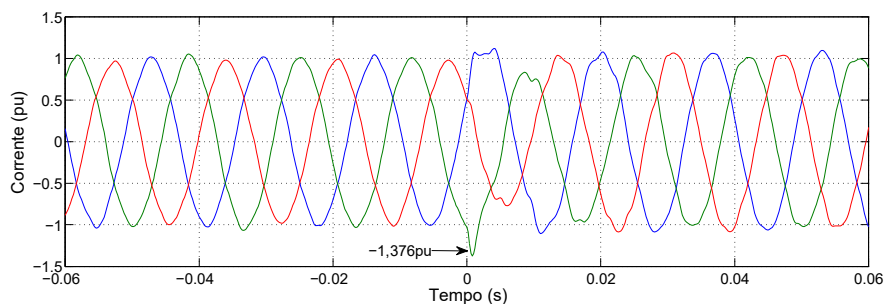


Figura 3.9: Detalhe das correntes de saída do conversor durante o transitório de início no afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

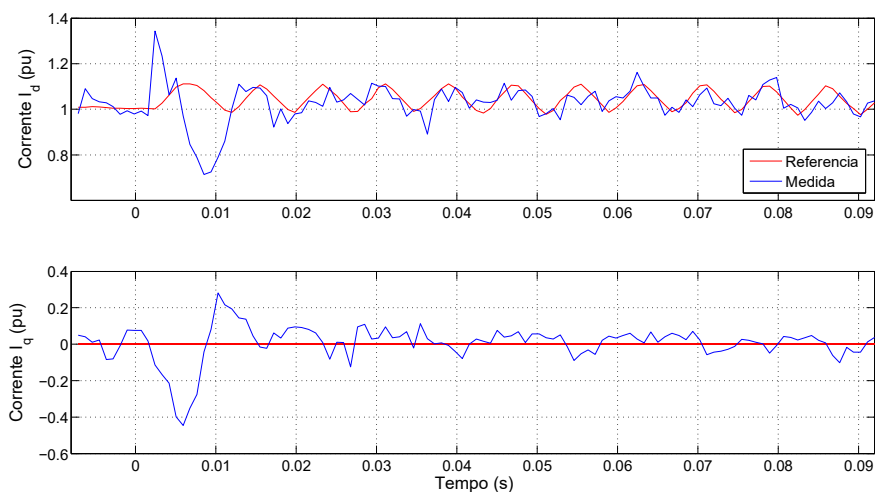


Figura 3.10: Correntes  $I_d$  e  $I_q$  do conversor no instante inicial do afundamento para 28% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

### 3.1.2 Ensaio com Afundamentos Desequilibrados

Os afundamentos desequilibrados, como mencionado anteriormente, representam um cenário menos severo do que os equilibrados do ponto de vista energético. Entretanto, devido à assimetria da falta, o surgimento de sequência negativa na tensão pode refletir também na corrente, dependendo da banda de passagem do controle.

Para avaliar a resposta da bancada frente a este tipo de distúrbio foram

realizados ensaios com o equipamento "Power Corruptor" aplicando afundamentos fase-neutro e fase-fase para 90%, 70%, 50% e 20% de tensão residual, para a máquina operando nas potências de 20%, 50%, 80% e 100% do valor nominal. As Figuras 3.11 e 3.12 apresentam, respectivamente, as tensões e correntes na rede durante um afundamento fase-fase para 50% da tensão nominal com geração de 20% da potência nominal do sistema. Os resultados apresentados nesta seção são referentes a afundamentos fase-fase, uma vez que o comportamento do conversor é similar a um evento fase-neutro, porém mais severo.

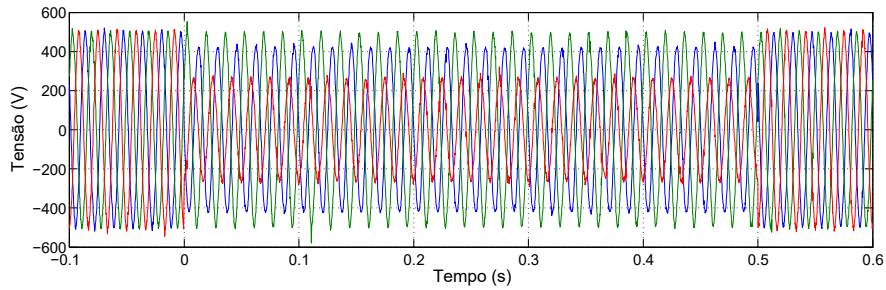


Figura 3.11: Tensões da rede durante um afundamento desequilibrado, fase-fase, para 50% da tensão nominal com 20% de potência de geração.

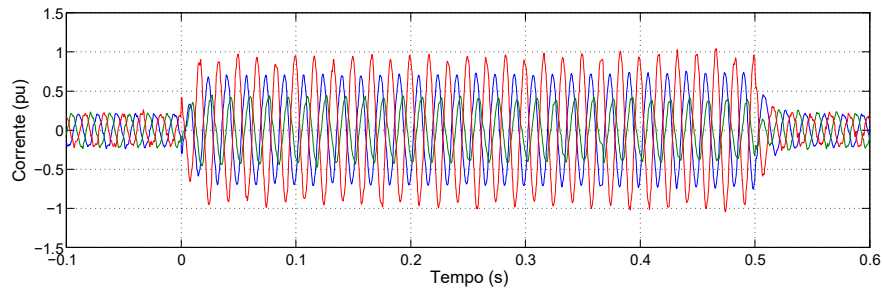


Figura 3.12: Correntes de saída durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

A Figura 3.12 evidencia um desequilíbrio muito significativo na corrente durante o distúrbio, que pode ser calculado como

$$\frac{I_{pico_{maior}} - I_{pico_{menor}}}{I_{pico_{med}}} = \frac{0,92 - 0,43}{0,68} = 72\% \quad (3.3)$$

Este efeito é decorrente da estrutura do controlador e da orientação utilizadas, ou seja, como as malhas de corrente são orientadas através da sequência positiva da tensão e o controlador PI não possui banda de passagem suficiente para mitigar a sequência negativa das correntes, elas se tornam desequilibradas. A Figura 3.13 explicita o surgimento de uma oscilação de  $120Hz$  de frequência na corrente  $I_d$ , decorrente da presença de sequência negativa, e que também surge no eixo de quadratura. O controlador é capaz de regular o valor médio das correntes, mas não pode mitigar seu valor oscilante.

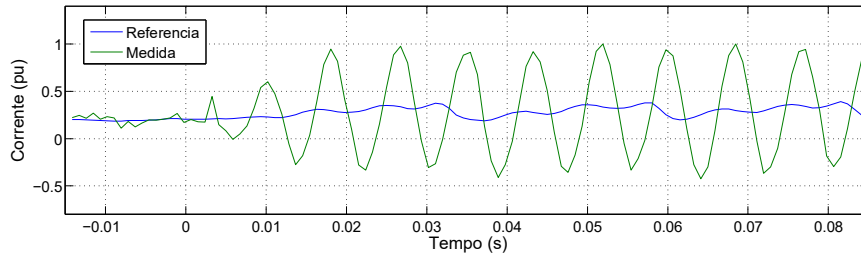


Figura 3.13: Corrente  $I_d$  no momento da queda no afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

A Figura 3.14 mostra as correntes do lado gerador, que assim como no caso equilibrado não sofrem nenhum efeito do distúrbio na rede.

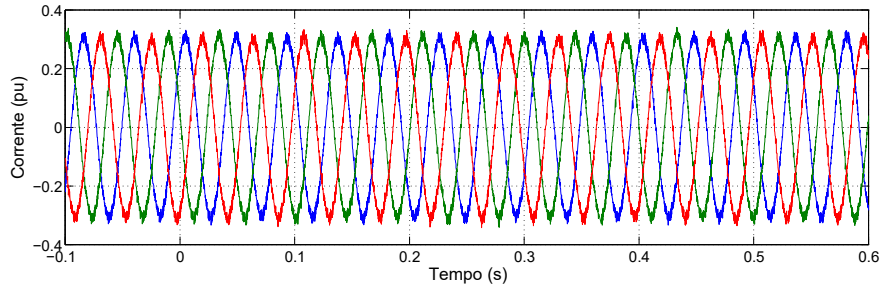


Figura 3.14: Correntes no gerador durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

A tensão no barramento CC é apresentada na Figura 3.15. Observa-se que o chopper atua para manter a tensão CC dentro dos valores limites durante o afundamento.



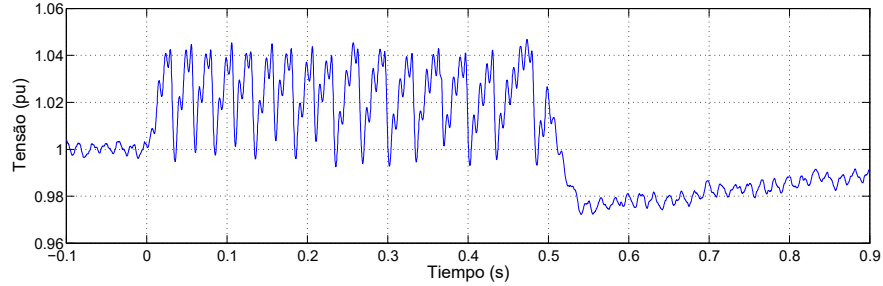


Figura 3.15: Tensão no barramento CC durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 20% da potência de geração.

A Figura 3.16 mostra as correntes na rede durante um afundamento de tensão para 50% do valor nominal enquanto o sistema gera 100% da potência nominal. Observa-se novamente o desequilíbrio e sobretudo o valor atingido por uma das fases, que alcançou 150% do valor nominal de pico do sistema. Neste caso, a bancada não desligou por ter suas proteções sobredimensionadas em relação às do sistema real. Um conversor em escala real teria se desligado devido à ação de proteção por sobrecorrente, ou seria danificado pela circulação de corrente tão alta.

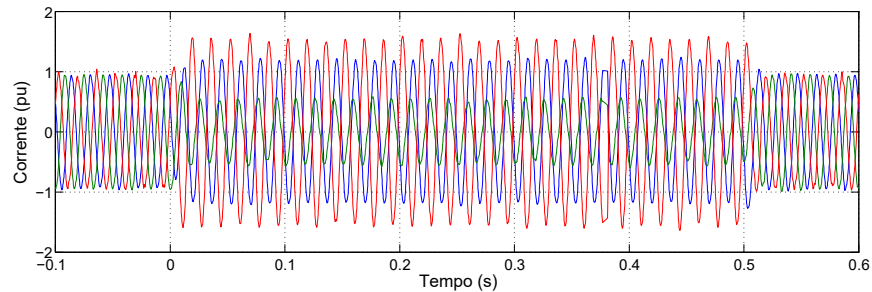


Figura 3.16: Correntes de saída durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

Na Figura 3.17 é ilustrada a tensão do barramento CC, e destaca-se a atuação do chopper para dissipar o excedente de energia que deixa de ser entregue pelo lado da rede.

A Figura 3.18 apresenta as correntes de eixo direto do lado da rede nos instantes de queda e recuperação da falta, onde se observa o controle do valor médio e a oscilação de segunda ordem que o controlador é incapaz de eliminar

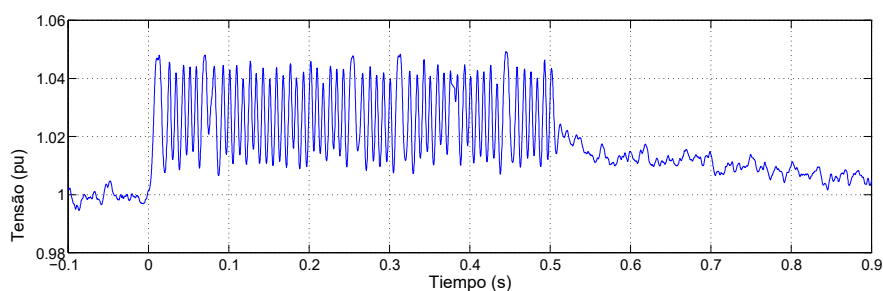


Figura 3.17: Tensão no barramento CC durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

durante o afundamento.

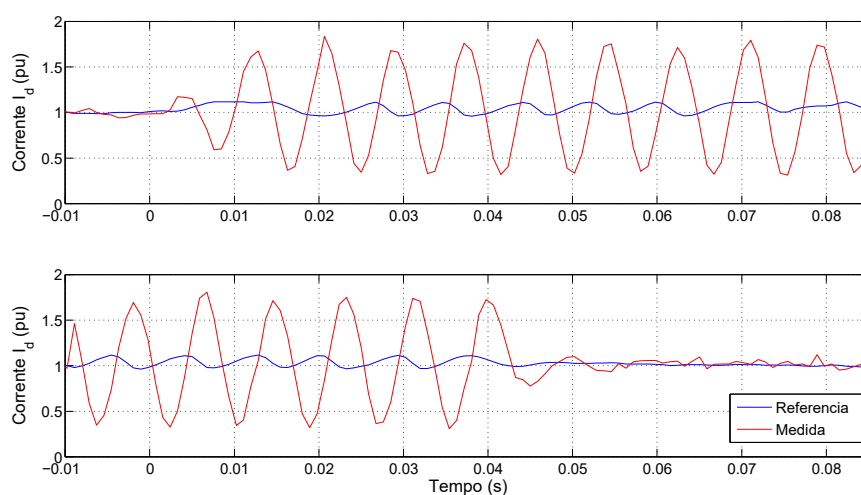


Figura 3.18: Corrente  $I_d$  nos momentos de queda e recuperação do afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

## 3.2 Conclusões

### 3.2.1 Dimensionamento do Chopper

Os resultados obtidos durante a aplicação dos afundamentos equilibrados evidenciaram a robustez do controle e da sincronização frente a distúrbios

simétricos. O emprego de uma resistência de chopper corretamente dimensionada torna possível alcançar suportabilidade a este tipo de evento sem necessidade de alterações na topologia de controle. O dimensionamento do chopper deve ser realizado conforme a energia dissipada pelo mesmo durante os afundamentos permitidos por cada código de rede, e varia de acordo com o país onde se instala o aerogerador. Seu dimensionamento também deve considerar a capacidade de sobrecarga dos módulos de potência do lado da rede. A Figura 3.19 apresenta as regiões de atuação do chopper de acordo com a profundidade do afundamento, a potência de geração e a capacidade de condução de corrente dos módulos lado rede. As regiões coloridas no gráfico representam situações em que o chopper deveria ser acionado para dissipar a energia adicional que não pode ser entregue à rede, de acordo com a potência de geração e a tensão remanescente do afundamento. A legenda indica a capacidade do conversor de condução de corrente. Observa-se que o mesmo deve ser projetado para suportar pelo menos  $1,1pu$  de corrente permanente, para que o chopper não seja acionado para potências inferiores a  $1pu$  quando a rede experimenta uma subtensão de  $0,9pu$  (que de acordo com o código brasileiro pode durar por tempo indeterminado). Quanto maior for a corrente máxima do conversor, menor é a região de atuação do chopper.

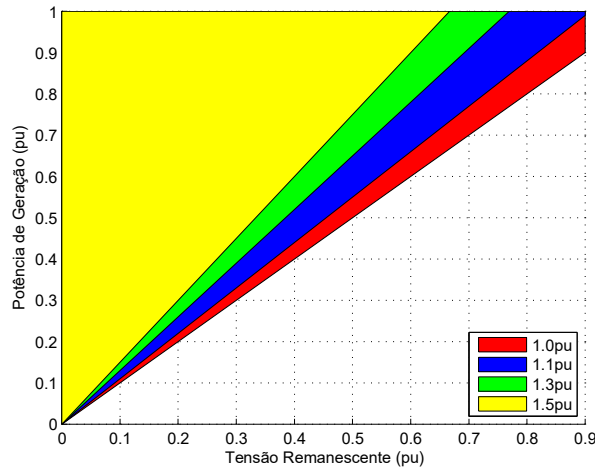


Figura 3.19: Limites de atuação do chopper durante um afundamento tensão, de acordo com os limites de corrente do conversor.

É possível tornar mais eficiente a resposta do sistema frente a distúrbios na rede através de modificações do lado do gerador. O desbalanço de energia

durante os afundamentos de tensão, que resulta na necessidade de dissipação através do chopper, pode ser reduzido significativamente caso a energia drenada da máquina seja diminuída durante a falta. Através de uma redução de conjugado do gerador, pode-se reduzir consideravelmente a energia dissipada no resistor do chopper, o que implica em menor custo e volume na resistência e possivelmente no módulo de potência do mesmo. Esta medida, entretanto, exige envolvimento dos fabricantes de aerogeradores, pois a queda no conjugado eletromagnético produzido pelo conversor é muito mais rápida do que a atuação do controle do ângulo de passo das pás, gerando uma diferença em relação ao conjugado mecânico que produz uma aceleração da máquina que deve ser avaliada de acordo com suas características construtivas, como inércia, características de sobrevelocidade (enfraquecimento de fluxo) e esforços mecânicos. Portanto, este trabalho concentrou-se no comportamento do sistema exclusivamente do lado da rede.

Modificações nas variáveis controladas em cada lado, rede e gerador, podem ser avaliados e possivelmente trazer benefícios ao sistema quanto à suportabilidade frente a distúrbios na rede. O principal exemplo seria a utilização do controle de tensão do barramento CC através do conversor do lado gerador e controle de potência ativa pelo conversor do lado da rede com curva em função da velocidade da máquina, medida que permitiria a redução automática do conjugado durante as falhas, reduzindo drasticamente a potência do chopper. Entretanto, assim como já mencionado, a taxa de variação de conjugado da máquina e os esforços mecânicos envolvidos deveriam ser cuidadosamente avaliados.

### **3.2.2 Afundamentos Desequilibrados**

Os ensaios de afundamentos desequilibrados revelaram a necessidade de implementação de uma estratégia de controle capaz de mitigar ou controlar os efeitos provocados pela presença da sequência negativa nas correntes de saída do equipamento. O desequilíbrio descontrolado nas mesmas ativaria as proteções do conversor desconectando a turbina da rede e portanto não se alcançaria desta forma a suportabilidade requerida ao sistema pelo código de rede.

Assim, optou-se pela implementação de uma estratégia de controle do

---

lado da rede que permite o atendimento aos requisitos de rede brasileiros com baixo grau de complexidade computacional e de implementação. Esta estratégia será descrita no Capítulo 4, onde serão apresentados também os resultados de sua implementação.



# Projeto de uma Estratégia para Operação em Afundamentos Desequilibrados

---

Durante um afundamento desequilibrado, conforme apresentado no capítulo anterior, o controlador PI não foi capaz de mitigar as oscilações decorrentes da presença da sequência negativa nas correntes. Isto acontece pois o PI apresenta um alto ganho para frequência nula, diminuindo conforme aumenta a frequência, ou seja, trata-se de um controlador aplicável a variáveis cuja frequência é nula em regime permanente, apresentando excelente capacidade de rejeição de distúrbios.

Neste capítulo descreve-se uma estratégia para mitigar a sequência negativa presente nas correntes do sistema em operação frente a afundamentos de tensão. Trata-se de um controlador ressonante, que será apresentado através de sua equação e resposta em frequência, e foi implementado juntamente ao tradicional PI de forma a garantir suportabilidade ao sistema a afundamentos de tensão.

## 4.1 Descrição do Controlador

O controlador ressonante apresenta um ganho elevado em uma determinada frequência, diferente de zero [18]. Sua principal aplicação é no controle de corrente no referencial estacionário,  $I_\alpha$  e  $I_\beta$ , obtidas através da transformação de Clarke [3].

A função de transferência do controlador ressonante é dada por

$$G_{res}(s) = \frac{K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (4.1)$$

onde  $K_r$  é o ganho do controlador ressonante,  $\omega$  é a frequência de sintonia e  $\omega_c$  é a frequência de corte em torno da frequência de sintonia [18].

A frequência  $\omega$  é a frequência de interesse, aquela que deseja-se controlar no sinal. A seletividade do controlador é definida por  $\omega_c$ , e deve levar em conta o máximo desvio de frequência permitido ao sistema. O ganho  $K_r$  deve ser escolhido conforme a resposta em frequência desejada para o sistema em malha fechada.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de Bode do controlador ressonante ajustado para a frequência de  $120Hz$  com valores de  $\omega_c$  de  $1Hz$ ,  $5Hz$  e  $20Hz$ .

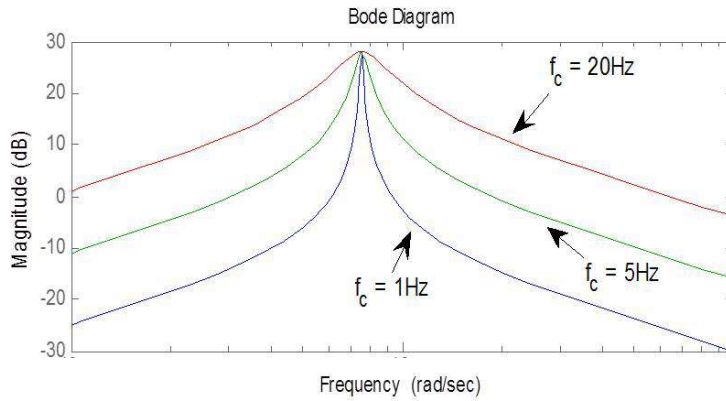


Figura 4.1: Diagrama de Bode do controlador ressonante com  $\omega = 120Hz$ .

Um controlador proporcional-integral-ressonante (PIR) foi obtido através do acréscimo da parcela ressonante paralelamente às partes proporcional e integral, conforme a Figura 4.2.



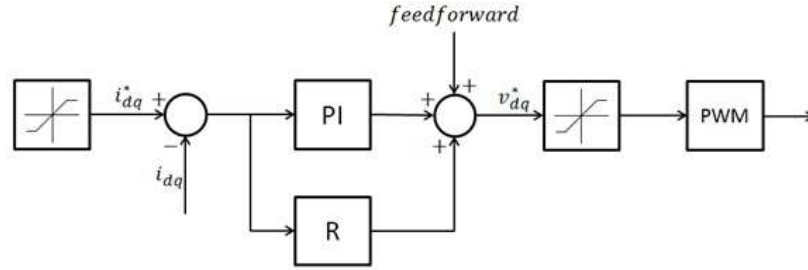


Figura 4.2: Diagrama em blocos do controlador PI com a inclusão da parcela ressonante.

A equação do controlador PIR torna-se

$$G_{PIR}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (4.2)$$

e sua resposta em frequência é ilustrada na Figura 4.3.

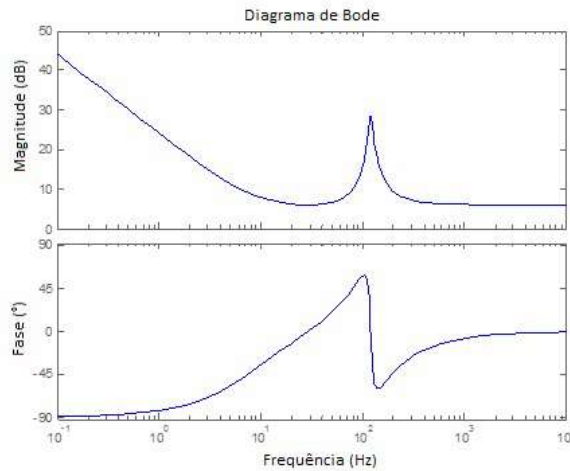


Figura 4.3: Diagrama de Bode do controlador PI com a inclusão da parcela ressonante.

Vários valores de ganho da parcela ressonante foram testados na bancada de ensaios submetida a afundamentos de tensão. Observou-se que um valor equivalente à metade do ganho integral foi suficiente para mitigar a oscilação de  $120Hz$  durante os eventos de subtensão desequilibrada, sem comprometer o desempenho do sistema em condições normais ou introduzir oscilações

indesejáveis na resposta às perturbações e ao degrau do sistema de controle. Da mesma forma, alguns valores de frequência de corte,  $\omega_c$ , foram testados, e o valor de  $1Hz$  apresentou um resultado satisfatório.

## 4.2 Análise dos Resultados

Uma vez implementado o controlador em questão, realizou-se um afundamento para 50% da tensão nominal da rede, enquanto o sistema gerava 100% da potência nominal. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as tensões e correntes de fase na rede durante o afundamento. A Figura 4.6 detalha as correntes  $I_d$  e  $I_q$  e suas respectivas referências no momento inicial do afundamento.

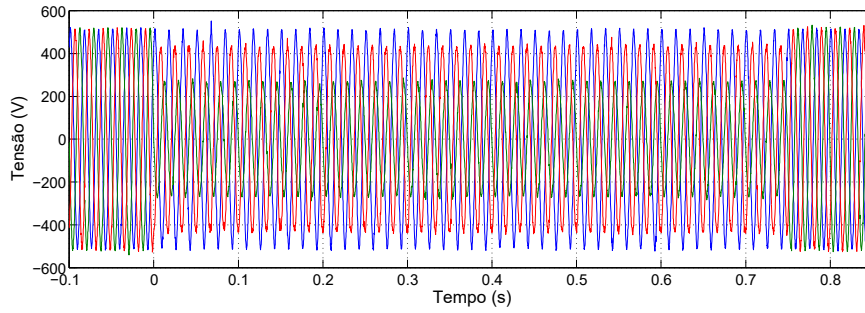


Figura 4.4: Tensões da rede durante um afundamento fase-fase para 50% da tensão nominal com 100% de potência de geração.

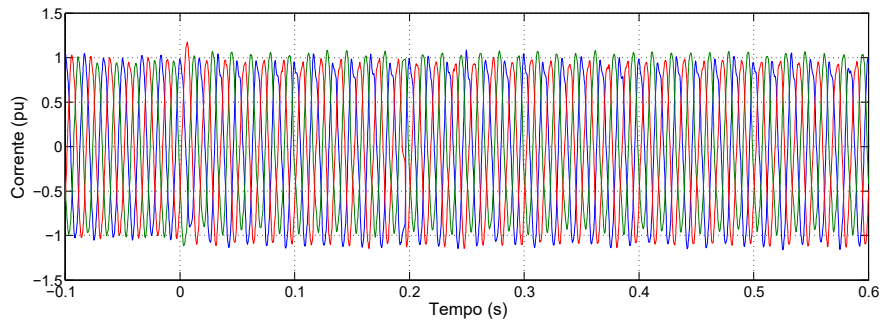


Figura 4.5: Correntes de saída durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

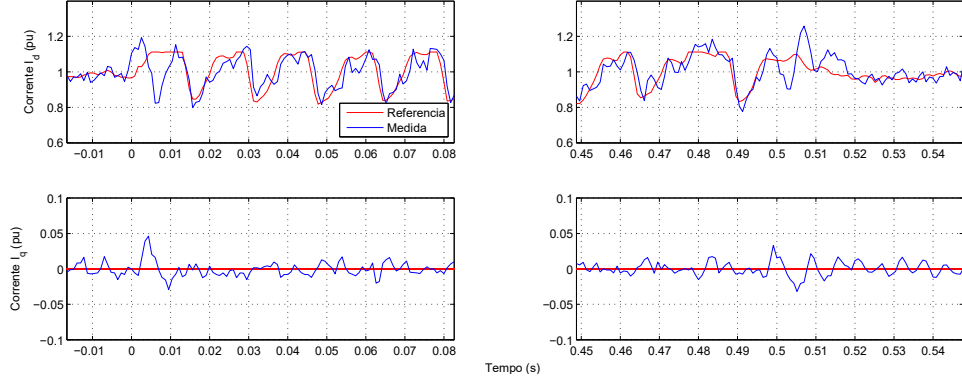


Figura 4.6: Correntes  $I_d$  e  $I_q$  durante o afundamento para 50% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

Os resultados obtidos demonstram que as correntes permaneceram equilibradas e não aumentaram para valores proibitivos durante o afundamento. As oscilações presentes nas correntes  $I_d$  e  $I_q$ , oriundas da sequência negativa, foram mitigadas. A oscilação presente na corrente de eixo direto se deve à resposta do controlador de tensão do barramento CC às oscilações decorrentes da atuação do chopper, e não representa um problema, pois o valor da corrente permanece controlado e dentro dos limites permissíveis.

A implementação do controlador ressonante permitiu a realização dos ensaios de afundamento desequilibrado para 20% da tensão nominal, condição mais severa prevista pelo código de rede brasileiro. Anteriormente, este afundamento acionava as proteções de sobrecorrente da bancada, mesmo sobredimensionadas em relação ao sistema real. O resultado destes afundamentos é apresentado nas Figuras 4.7 e 4.8 onde observa-se a excelente resposta do conversor frente ao distúrbio.

As Figuras 4.9 e 4.10 detalham as correntes no início do afundamento e na recuperação da tensão, respectivamente, durante o afundamento para 20%.

Observa-se um pico no transitório de corrente que chega a  $1,254pu$  durante o início do afundamento, mas que em menos de um ciclo retorna ao valor de saturação. As proteções do conversor devem ser ajustadas de forma que este pico transitório não ocasione em desconexão da turbina, ou seja, deve haver um limite de proteção cujo valor de corrente seja alto (superior a

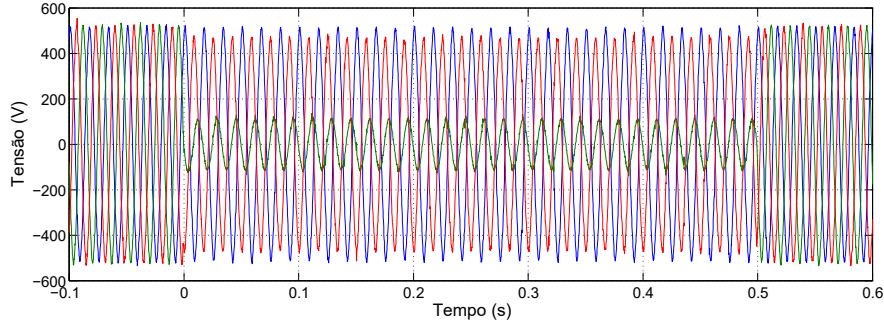


Figura 4.7: Tensões da rede durante um afundamento fase-fase para 20% da tensão nominal com 100% de potência de geração.

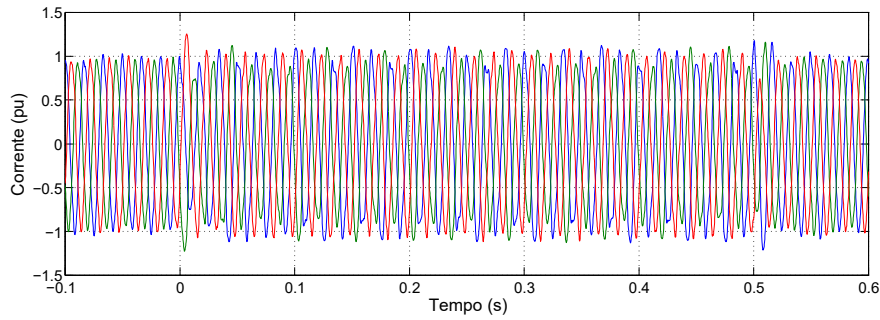


Figura 4.8: Correntes de saída durante o afundamento para 20% da tensão nominal com 100% da potência de geração.

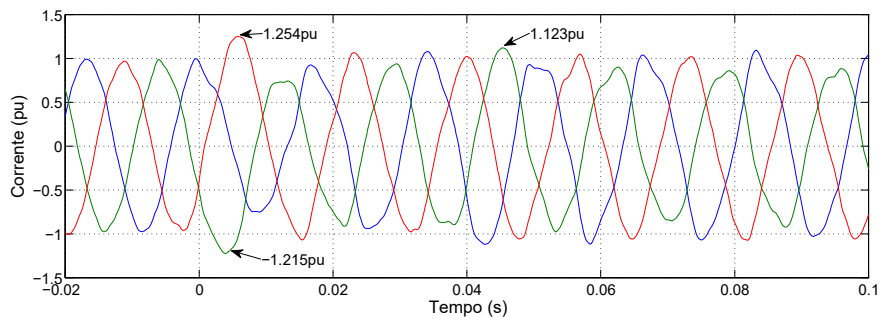


Figura 4.9: Detalhe das correntes na rede durante o início do afundamento de tensão para 20%, com 100% da potência nominal.

1,254pu) e cujo tempo seja curto (não superior a 1 ciclo, por exemplo), além do limite de corrente convencional de sobrecarga do equipamento. Estes va-

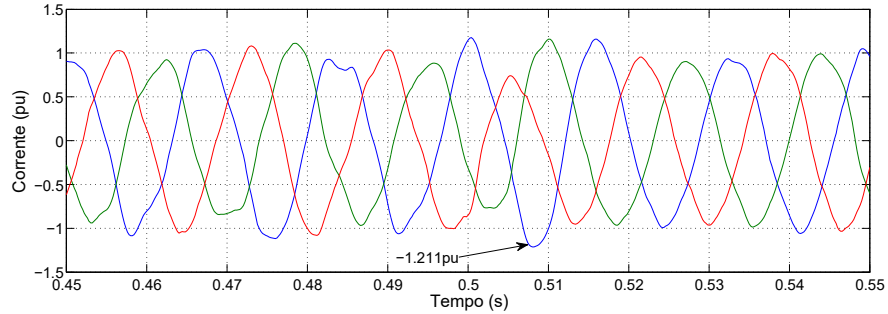


Figura 4.10: Detalhe das correntes na rede durante a recuperação do afundamento de tensão para 20%, com 100% da potência nominal.

lores devem ser condizentes com a capacidade dos módulos de potência de conduzirem tais correntes sem serem danificados.

## 4.3 Conclusões

O acréscimo do controlador ressonante à estrutura de controle de corrente permitiu ao conversor suportar os afundamentos de tensão previstos pelo código de rede brasileiro [14]. As correntes se mantiveram equilibradas, uma vez que o controlador mitiga a oscilação de  $120Hz$  nos eixos direto e de quadratura, possibilitando a limitação de seus valores a um nível que não danifique os componentes do sistema.

Foram realizados novamente todos os afundamentos de tensão descritos no capítulo 3, equilibrados e desequilibrados, comprovando que a adição da parcela ressonante não compromete o funcionamento do sistema frente a outras condições transitórias ou de regime permanente.

A Figura 4.11 ilustra a potência ativa instantânea que o sistema fornece à rede durante um afundamento de tensão para 20% do valor nominal, quando gerava 100% da potência nominal. Observa-se uma oscilação de  $120Hz$  durante a falta, entre  $0,2pu$  e  $1,2pu$ .

A oscilação de potência observada na Figura 4.11 surge devido ao fato de as correntes permanecerem equilibradas enquanto as tensões estão desequilibradas. Apesar desta oscilação ser indesejável, não se torna um impedimento

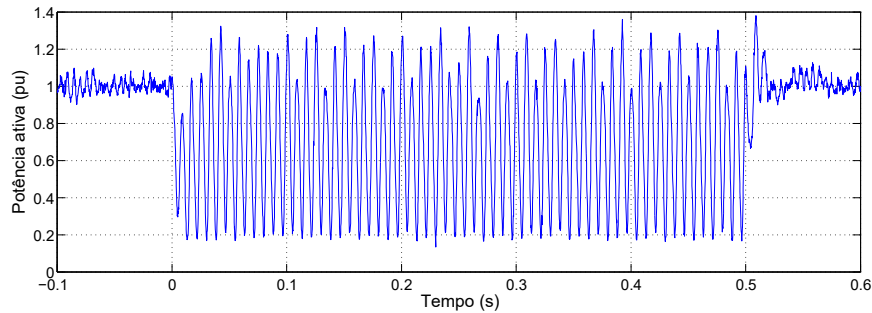


Figura 4.11: Potência ativa fornecida pelo sistema durante um afundamento de tensão para 20%, com 100% da potência nominal.

ao atendimento dos códigos de rede brasileiros, uma vez que os mesmos não definem parâmetros de fornecimento de potência ativa ou reativa durante a falta. Como outros códigos de rede no mundo exigem maior controlabilidade das potências durante o afundamento, é importante que a estratégia de controle com a parcela ressonante seja aprimorada futuramente, para que seja capaz de manter em valores regulados e não-oscilantes as potências ativa e reativa.

# Conclusões e Propostas de Continuidade

---

## 5.1 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma bancada experimental construída para representar um sistema de conversão eólica aplicado em aerogeradores de potências na faixa dos *MW*. O sistema foi construído por uma empresa fabricante de conversores para turbinas eólicas e portanto seus resultados são bastante fiéis aos de um equipamento real, e o trabalho permitiu um estreitamento de laços entre a indústria do setor e a academia.

A primeira etapa do projeto realizado em conjunto entre a ICSA e o LCCE/UFGM constituiu-se na realização dos ensaios de afundamento de tensão em um sistema com controle tradicional, permitindo avaliar os impactos dos distúrbios no controle do conversor de frequência e identificar os pontos mais críticos e as necessidades de modificações com intuito de se obter a suportabilidade desejada.

Os resultados obtidos revelaram a capacidade de suportabilidade do equipamento frente a um afundamento trifásico simétrico, quando a utilização de uma resistência de chopper corretamente dimensionada e controladores bem sintonizados são suficientes para manter as correntes de saída e a tensão do barramento CC limitadas a valores que não disparam alarmes que provocariam a desconexão da turbina. A PLL e os controladores de corrente rapida-

mente se ajustam aos valores resultantes da falha, limitando as correntes se necessário, e sem perder o sincronismo com a rede.

Os ensaios de afundamentos desequilibrados, por outro lado, revelaram os problemas trazidos pela presença da sequência negativa nas tensões e correntes, destacando-se a incapacidade de limitação destas pelos controladores aplicados tradicionalmente. Neste contexto uma estratégia de controle utilizando um controlador ressonante foi utilizado como uma alternativa simples porém eficaz para manter as correntes de saída do conversor dentro dos limites de atuação das proteções. Os resultados experimentais demonstram que a implementação deste controlador permitiu ao equipamento atender os requisitos de rede brasileiros, de forma que o aerogerador não seja desconectado durante os afundamentos de tensão requeridos.

## 5.2 Propostas de Continuidade

A construção da bancada de ensaios e a execução dos testes relacionados a afundamentos de tensão abriram um amplo leque de possibilidades de temas a serem abordados no futuro.

Apesar do atendimento ao código de rede brasileiro ser permitido através da utilização do controlador ressonante, códigos de rede mais rigorosos e bem consolidados como os europeus, sobretudo da Alemanha, definem características de entrega ou consumo de potência ativa e reativa durante e imediatamente após o distúrbio. Esta é uma tendência muito possivelmente seguida na América do Sul, uma vez que a energia eólica se torne mais presente nas redes elétricas dos países desta região. Assim, é importante que a solução proposta neste trabalho continue sendo aprimorada, sobretudo no tratamento das potências durante um afundamento, através da geração de referências adequadas para garantir a entrega ou consumo de potências reguladas e não oscilantes durante o evento.

A comparação com outras estratégias de controle de corrente de sequência negativa também se torna importante para alcançar uma solução que represente o melhor equilíbrio entre desempenho e complexidade computacional. O controle desacoplado das correntes de sequência positiva e negativa no referencial síncrono e o controle em referencial estacionário com a utili-



---

zação de controladores ressonantes são exemplos de estratégias mencionadas na literatura empregadas com sucesso.

Modificações do lado do gerador, ou alterações nas variáveis controladas nos lados rede e gerador, conforme discutido no Capítulo 3, permitirão reduzir a energia dissipada no chopper, e consequentemente seu custo e tamanho.



---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] Frede Blaabjerg, Marco Liserre, and Ke Ma. Power electronics converters for wind turbine systems. *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 48, No. 2, 2012.
- [2] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Adrian V. Timbus. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 53, No. 5, 2006.
- [3] W.C. Duesterhoeft, Max W. Schulz, and Edith Clarke. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 70:1248–1255, 1951.
- [4] I. Erlich and U. Bachmann. Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in germany. *Unknown Journal*, 2005.
- [5] Ramón Fiestas. Análise do marco regulatório para a geração eólica no brasil. Technical report, Global Wind Energy Council and Associação Brasileira de Energia Eólica, 2011.
- [6] Lauha Fried, Shruti Shukla, and Steve Sawyer. Global wind report: annual market update 2011. Technical report, Global Wind Energy Council, GWEC, 2012.
- [7] Friedrich Froehr and Fritz Orttenburger. *Tecnicas de controle eletronico*. SIEMENS, 1st Edition, Nobel, 1990.

- [8] Ahmet M. Hava, Russel J. Kerkman, and Thomas A. Lipo. Simple analytical and graphical methods for carrier-based pwm-vsi drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, 1999.
- [9] IEC61400-21. *Wind turbine: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines*, second edition, 2008.
- [10] G. Joós. Wind turbine generator low voltage ride through requirements and solutions. *Unknown Journal*, 2008.
- [11] Pál K. Kovács. *Transient Phenomena in Electrical Machines*. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1984.
- [12] R. Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press, 2010.
- [13] Marco Liserre, Frede Blaabjerg, and Steffan Hansen. Design and control of an lcl-filter-based three-phase active rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, 2005.
- [14] ONS. *Procedimentos de Rede, Submódulo 3.6: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão*, 2010.
- [15] R.H. Park. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48:716–727, 1929.
- [16] R.H. Park. Two-reaction theory of synchronous machines-ii. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 52:716–727, 1933.
- [17] Pedro Rodríguez, Josep Pou, Joan Bergas, J. Ignacio Candela, Rolando P. Burgos, and Dushan Boroyevich. Decoupled double synchronous reference frame pll for power converters control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 22, No. 2, 2007.
- [18] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P.C. Loh. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 153, No. 5, 2006.
- [19] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley and Sons, 2011.

- 
- [20] Adrian V. Timbus, Pedro Rodriguez, Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Frede Blaabjerg. Control strategies for distributed power generation systems operating on faulty grid. *IEEE ISIE 2006*, 2006.

