

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE SISTEMAS DINÂMICOS E ENERGÉTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DOS LIMITES MÁXIMOS DE INSERÇÃO DE  
GERAÇÃO EÓLICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO  
CONFORME A VARIAÇÃO DE TENSÃO DE REGIME  
PERMANENTE**

VANESSA VIQUETTI LÖWENBERG

FOZ DO IGUAÇU  
2013



Vanessa Viqueti Löwenberg

**Análise dos limites máximos de inserção de geração eólica em  
redes de distribuição conforme a variação de tensão de regime  
permanente**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Romeu Reginatto

Co-orientador: Eugênio de Bona Castelan Neto

Foz do Iguaçu

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca do Campus de Foz do Iguaçu – Unioeste  
Ficha catalográfica elaborada por Miriam Fenner R. Lucas - CRB-9/268

L917 Löwenberg, Vanessa Viquetti

Análise dos limites máximos de inserção de geração eólica em redes de distribuição conforme a variação de tensão de regime permanente / Vanessa Viquetti Löwenberg.- Foz do Iguaçu, 2013.

105 p. : tab. : graf.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Reginatto.

Co-orientador: Prof. Dr. Eugênio de Bona Castelan Neto.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1. Geração eólica. 2. Geração distribuída. 2. Aerogeradores. 3. Turbinas eólicas. Título.

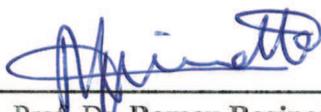
CDU 621.311.24

**Análise dos limites máximos de inserção de geração eólica em  
redes de distribuição conforme a variação de tensão de regime  
permanente**

Vanessa Viquetti Löwenberg

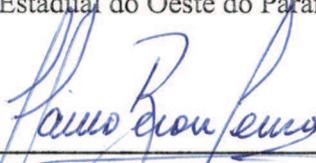
Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 12/04/2013.



---

Prof. Dr. **Romeu Reginatto** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



---

Prof. Dr. **Flávio Antônio Becon Lemos**  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS



---

Prof. Dr. **Roberto Cayetano Lotero**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



# Resumo

Este trabalho se insere no contexto do estudo da conexão de unidades de geração eólica em sistemas de distribuição no sentido de verificar quais os limites máximos de potência que podem ser interligados atendendo a determinados requisitos de conexão. Os limites máximos de potência são caracterizados em termos dos níveis máximos de inserção de geração eólica, relativos à capacidade equivalente vista pelo nó de conexão, e da máxima penetração de geração eólica, relativos à carga instalada no alimentador. Exige-se que a tensão de regime permanente nos nós do alimentador de distribuição atenda a limites máximos pré-estabelecidos de variação para todas as condições operativas possíveis do parque eólico produzindo desde 20% até 100% de sua potência nominal. O estudo foi realizado através de simulação computacional sobre dois alimentadores de distribuição diferentes: um alimentador com 5 nós, conectando o parque eólico em quatro diferentes pontos deste sistema e considerando três níveis diferentes de carregamento; e um alimentador com 32 nós, conectando o parque eólico em dez diferentes pontos deste sistema e considerando também três níveis diferentes de carregamento. Os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica foram analisados em função: (i) das características do nó de conexão (relação  $X/R$  da impedância e tensão equivalentes); (ii) do carregamento do alimentador; (iii) do nó de conexão. Para os dois alimentadores foram considerados os casos da conexão de um e de dois parques eólicos, sendo que em todos os casos foram adotados parques eólicos idênticos. As análises realizadas mostraram grande influência da relação  $X/R$  da impedância equivalente tanto sobre a inserção quanto a penetração de geração eólica. O carregamento do alimentador influenciou de maneira não linear e também em alguns casos de maneira inversa, significando que o aumento do carregamento pode tanto aumentar quanto reduzir a máxima inserção de geração eólica. A influência da tensão equivalente sobre a inserção e penetração de geração eólica não mostrou-se muito evidente nos testes realizados. A topologia do alimentador teve influência, pois em diversos casos os limites máximos de inserção e penetração de geração eólica foram determinados pela tensão em nós do alimentador distintos do nó de conexão do parque. De maneira geral, a conexão de dois parques eólicos mostrou atingir níveis superiores de penetração de geração eólica em comparação a um só parque, podendo ser mais ou menos expressiva conforme a característica dos nós de conexão envolvidos.

**Palavras-chave:** aerogeradores, geração distribuída, geração eólica, turbinas eólicas, inserção e penetração de geração eólica.

# Abstract

This work considers the connection of wind power units to the distribution system, aiming at verifying the maximum power limits that can be connected complying with given connection requirements. The maximum power limits have been characterized in terms of maximum integration levels, to the equivalent capacity in the connection node, and in terms of maximum penetration levels, to the full load power feeder. The steady-state voltage in the distribution system nodes has to comply with a priori given maximum variation limits for all possible wind farm working conditions, supplying from 20 to 100% of its nominal power. The research has been developed in two different distribution feeders: a 5-nodes distribution feeder, connecting the wind farm at four different points and considering three different load levels; a 32-nodes distribution feeder, connecting the wind farm to ten different nodes of the system and also considering three different load levels. The maximum integration and penetration levels of wind power have been evaluated in terms of (i) the connection node characteristics (equivalent  $X/R$  ratio impedance and voltage); (ii) the feeder load; (iii) the connection node. The connection of either one or two wind farms has been considered for both feeders, assuming wind farms with equal characteristics. The analysis showed strong influence of the impedance  $X/R$  ratio on the maximum wind energy integration and penetration levels. The feeder load influences these levels in a non-linear manner and in some cases also an in inverse way, i.e. the load increasing can either increase or decrease the maximum integration level. The equivalent voltage influence on the maximum wind power integration and penetration was not evident in the performed tests. The feeder structure did influence the levels since, in many cases, the maximum integration and penetration levels of wind power have not been determined by the voltage in the connection node but by the voltage in other feeder's node. In general, the connection of two wind farms showed higher wind energy penetration levels compared to only one wind farm, being more or less expressive according to the connecting node characteristics.

**Keywords:** wind energy, distributed generation, wind farm, wind turbine, wind energy integration and penetration.

Dedico este trabalho ao meu esposo e à minha filha.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus que me concedeu inteligência e capacidade para absorver e transmitir informações.

Agradeço também ao meu esposo, Peter Löwenberg Neto, que me apoia e incentiva todos os dias, com quem compartilho o bem mais precioso, nossa filha.

Aos meus pais, Lindaura Viquetti e Paulo César Viquetti, por me concederem a vida e por minha criação, por terem formado meus valores e pela constante orientação na vida.

Às minhas irmãs, Eliane Viquetti Gil Cardoso e Luciana Viquetti, pelo amor que sempre tiveram por mim estando pertinho ou longe, mas sempre dentro do meu coração.

Ao meu cunhado, Mauro Müller Gil Cardoso, que sempre me instigou na busca por respostas.

Aos meus sobrinhos, Heloísa, Gabriel e Lucas pelo simples fato de existirem e tornar minha vida mais feliz.

Ao meu orientador, professor Dr. Romeu Reginatto, pela proposta da dissertação, pelas orientações e tempo dedicado a sempre fazer o melhor trabalho possível.

Aos meus colegas do PGESDE, em especial Larissa Andréia Wagner Machado por estar ao lado me ajudando sempre que necessário.

Aos professores do curso do mestrado, aos colaboradores e servidores da Unioeste que tornam possível existência do PGESDE.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro nestes dois anos de trabalho.



“O único lugar onde sucesso vem  
antes do trabalho é no dicionário.”

*Albert Einstein*



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xx</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos da dissertação . . . . .	4
1.1.1 Objetivo geral . . . . .	4
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	4
1.2 Estrutura da dissertação . . . . .	4
<b>2 Tecnologia e topologia de sistemas de geração eólica</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução . . . . .	7
2.2 Evolução das turbinas eólicas . . . . .	7
2.3 Topologias dos sistemas de geração eólica . . . . .	9
2.3.1 Sistemas de geração eólica de velocidade fixa com gerador de indução de rotor gaiola de esquilo . . . . .	9
2.3.2 Sistemas de geração eólica de velocidade variável com gerador de indução de dupla alimentação . . . . .	10
2.3.3 Sistemas de geração eólica de velocidade variável com conversor estático de potência plena . . . . .	12
2.4 Características operativas das turbinas eólicas . . . . .	13
2.5 Parques eólicos . . . . .	16
2.5.1 Orientação do Rotor . . . . .	17

2.5.2	Número de pás . . . . .	19
2.5.3	Material das pás . . . . .	19
2.5.4	Torres . . . . .	19
2.6	Conclusão . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Geração distribuída e conexão de sistemas de geração eólica</b>	<b>23</b>
3.1	Introdução . . . . .	23
3.2	Geração distribuída . . . . .	23
3.3	Conexão de sistemas de geração eólica . . . . .	25
3.3.1	Requisitos técnicos para conexão de sistemas de geração eólica ao sistema elétrico de potência . . . . .	25
3.3.2	Conexão de sistemas de geração eólica em redes de distribuição . . . . .	27
3.4	Estudo dos limites de inserção de geração eólica . . . . .	27
3.4.1	Metodologia de análise . . . . .	30
3.5	Conclusão . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Análise da inserção de geração eólica em um alimentador de distribuição com 5 nós</b>	<b>37</b>
4.1	Introdução . . . . .	37
4.2	Alimentador de distribuição de 5 nós . . . . .	37
4.3	Caso da conexão de um parque eólico . . . . .	40
4.3.1	Parque eólico . . . . .	40
4.3.2	Análise da influência na tensão de regime permanente . . . . .	41
4.3.3	Níveis máximos de inserção de geração eólica . . . . .	45
4.3.4	Níveis máximos de penetração de geração eólica . . . . .	50
4.3.5	Comparação dos resultados com o modelo máquina barra-infinita . . . . .	53
4.4	Caso da conexão de dois parques eólicos . . . . .	55
4.4.1	Parques eólicos . . . . .	56
4.4.2	Análise da influência na tensão de regime permanente . . . . .	57

4.4.3	Comparação dos resultados para os casos de um e dois parques eólicos conectados ao alimentador . . . . .	63
4.5	Conclusão . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Análise da inserção de geração eólica em um alimentador de distribuição com 32 nós</b>	<b>67</b>
5.1	Introdução . . . . .	67
5.2	Alimentador de distribuição de 32 nós . . . . .	67
5.3	Caso da conexão de um parque eólico . . . . .	71
5.3.1	Parque eólico . . . . .	71
5.3.2	Análise da influência na tensão de regime permanente . . . . .	72
5.3.3	Níveis máximos de inserção de geração eólica . . . . .	76
5.3.4	Níveis máximos de penetração de geração eólica . . . . .	78
5.3.5	Comparação dos resultados com o modelo máquina barra infinita . . . . .	82
5.4	Caso da conexão de dois parques eólicos . . . . .	85
5.4.1	Parques eólicos . . . . .	85
5.4.2	Análise da influência na tensão de regime permanente . . . . .	86
5.4.3	Comparação dos resultados para os casos de um e dois parques eólicos conectados ao alimentador . . . . .	89
5.5	Conclusão . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>93</b>
6.1	Conclusões específicas . . . . .	94
6.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	96
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Parâmetros do sistema 5 nós</b>	<b>101</b>
<b>B</b>	<b>Parâmetros do sistema 32 nós</b>	<b>103</b>
B.1	Dados das linhas . . . . .	103

B.2	Dados das cargas . . . . .	103
B.3	Dados dos transformadores . . . . .	103
B.4	Elementos shunt . . . . .	104

# Lista de Figuras

1.1	Evolução da capacidade instalada no Brasil (MW). Fonte: ABEEólica (2013).	2
2.1	Evolução e tamanho relativo das turbinas eólicas. Fonte: ChemViews (2012)	8
2.2	Configuração típica de uma turbina eólica de velocidade fixa com gerador de indução de rotor gaiola de esquilo.	10
2.3	Configuração típica de uma turbina eólica de velocidade variável com gerador de indução de rotor bobinado.	11
2.4	Configuração típica de uma turbina eólica de velocidade variável com gerador síncrono ou de indução.	12
2.5	Curva de $C_p$ por $\lambda$ . Fonte: Ackermann (2005)	14
2.6	Curva de potência de uma turbina eólica de 2MW. Fonte: Ackermann (2005)	16
2.7	Sistema de geração eólica com turbina de eixo horizontal	17
2.8	Diagrama de interligação entre um parque eólico e o sistema elétrico de potência utilizando um transformador por turbina eólica. Fonte: Zanchettin (2012)	18
2.9	Turbinas eólicas	18
2.10	Turbulência e altura da torre. Fonte: Gipe (2009)	20
2.11	Impacto do número de turbinas eólicas na potência gerada no ponto de conexão comum. Fonte: Ackermann (2005)	21
3.1	Principais componentes de sistemas de energia. Fonte: Kersting (2006)	23
3.2	Modelo máquina barra-infinita.	29
3.3	Máxima inserção de geração eólica para DFIG com regulação de potência reativa em $Q = 0$ .	29
3.4	Diagrama unifilar sistema com um alimentador.	31
3.5	Integração de geração eólica no alimentador. Fonte: Ullah (2005)	31
3.6	Curva $P - V$ do parque conectado ao nó B5 do sistema 5 nós (carga média).	34

4.1	Alimentador de distribuição de 5 nós estudado . . . . .	38
4.2	Tensão por relação $X/R$ da impedância equivalente de cada nó para diferentes carregamentos: $\square$ - carga pesada, * - carga média e $\circ$ - carga leve. . . . .	39
4.3	Parque eólico conectado ao nó B5 do alimentador de distribuição de 5 nós. . . . .	41
4.4	Curvas $P - V$ do parque eólico para carga pesada. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4, linha traço ponto - tensões no nó B5 . . . . .	42
4.5	Curvas $P - V$ do parque eólico para carga média. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4, linha traço ponto - tensões no nó B5. . . . .	43
4.6	Curvas $P - V$ do parque eólico para carga leve. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4, linha traço ponto - tensões no nó B5. . . . .	44
4.7	Inserção máxima de geração eólica por nó: $\square$ - carga pesada, * - carga média e $\circ$ - carga leve. . . . .	46
4.8	Inserção máxima de geração eólica em função de $X/R$ para o parque eólico conectado ao nó: $\diamond$ - B2; $\square$ - B3; + - B4; $\times$ - B5. . . . .	47
4.9	Inserção máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó: $\diamond$ - B2; $\square$ - B3; + - B4; $\times$ - B5. . . . .	48
4.10	Curvas $P - V$ no nó B4 com conexão do parque eólico em diferentes nós para as cargas: leve - linha pontilhada; média - linha contínua; pesada - linha tracejada. . . . .	49
4.11	Penetração máxima de geração eólica por nó: $\square$ - carga pesada, * - carga média e $\circ$ - carga leve . . . . .	50
4.12	Penetração máxima de geração eólica em função de $X/R$ para o parque eólico conectado ao nó: $\diamond$ - B2; $\square$ - B3; + - B4; $\times$ - B5. . . . .	52
4.13	Penetração máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó: $\diamond$ - B2; $\square$ - B3; + - B4; $\times$ - B5. . . . .	53
4.14	Inserção máxima de geração eólica por nó: $\square$ para os limites de tensão em todos os nós do alimentador e $\times$ para os limites de tensão vistos do próprio nó de conexão. . . . .	54
4.15	Alimentador com dois parques eólicos conectados aos nós B3 e B5 . . . . .	56

4.16	Curvas $P - V$ dos parques combinados conectados ao alimentador de 5 nós em carga pesada. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4 e linha traço ponto: tensões no nó B5 para cada caso. . . . .	57
4.17	Curvas $P - V$ para a conexão dos parques eólicos nos nós B2 e B3 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5. . . . .	60
4.18	Curvas $P - V$ para a conexão dos parques eólicos nos nós B2 e B4 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5 . . . . .	60
4.19	Curvas $P - V$ para a conexão dos parques eólicos nos nós B2 e B5 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5. . . . .	61
4.20	Curvas $P - V$ para a conexão dos parques eólicos nos nós B3 e B4 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5. . . . .	62
4.21	Curvas $P - V$ para a conexão dos parques eólicos nos nós B3 e B5 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5. . . . .	62
4.22	Curvas $P - V$ para a conexão dos parques eólicos nos nós B4 e B5 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5. . . . .	63
4.23	Comparativo da potência limite injetada para: $\times$ - somente um parque conectado ao alimentador e $\circ$ - dois parques conectados ao alimentador. . . . .	64
4.24	Penetração de geração eólica nos casos combinados: $\times$ - nó de conexão 1, $\square$ - nó de conexão 2 e $\circ$ - conexão dos dois parques. . . . .	64
5.1	Alimentador de distribuição de 32 nós estudado . . . . .	68
5.2	Tensão equivalente por $X/R$ em cada nó: $\square$ - carga pesada, $*$ - carga média e $\circ$ - carga leve. . . . .	70
5.3	Parque eólico conectado ao nó 807 do alimentador de distribuição de 32 nós. . . . .	72
5.4	Curvas $P - V$ dos parques conectados aos nós 911, 910, 909, 906 e 902. . . . .	73
5.5	Curvas $P - V$ dos parques conectados aos nós 807, 805, 804, 803 e 602. . . . .	74
5.6	Inserção máxima de geração eólica por nó: $\square$ - carga pesada, $*$ - carga média e $\circ$ - carga leve. . . . .	77
5.7	Inserção máxima de geração eólica em função de $X/R$ para o parque eólico conectado aos diferentes nós do sistema considerando o limite de tensão de regime permanente precário para o parque eólico conectado ao nó: $\triangleright$ - B911; $+$ - B910; $*$ - B909; $*$ - B906; $\square$ - B902; $\diamond$ - B807; $\nabla$ - B805; $\circ$ - B804; $\triangle$ - B803; $\times$ - B602. . . . .	78

5.8	Inserção máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó: ▷- B911; + - B910; ★- B909; * - B906; □ - B902; ◇ - B807; ▽ - B805; ○ - B804; △ - B803; ×- B602. . . . .	79
5.9	Penetração máxima de geração eólica por nó: □ - carga pesada, * - carga média e ○ - carga leve. . . . .	80
5.10	Penetração máxima de geração eólica em função de $X/R$ para o parque eólico conectado ao nó: ▷- B911; + - B910; ★- B909; * - B906; □ - B902; ◇ - B807; ▽ - B805; ○ - B804; △ - B803; ×- B602. . . . .	82
5.11	Penetração máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó: ▷- B911; + - B910; ★- B909; * - B906; □ - B902; ◇ - B807; ▽ - B805; ○ - B804; △ - B803; ×- B602. . . . .	83
5.12	Inserção máxima de geração eólica por nó: □ para os limites de tensão em todos os nós do alimentador e × para os limites de tensão vistos do próprio nó de conexão. . . . .	84
5.13	Alimentador com dois parques eólicos conectados aos nós 807 e 906 . . . . .	86
5.14	Curvas $P - V$ dos parques combinados conectados ao alimentador de 32 nós em carga pesada . . . . .	87
5.15	Comparativo da potência limite de inserção para: × - um único parque conectado ao alimentador e ○ - dois parques . . . . .	89
5.16	Penetração de geração eólica nos casos combinados: × - Nó de conexão 1, □ - Nó de conexão 2 e ○ - conexão dos dois parques. . . . .	90

# Lista de Tabelas

1.1	Capacidade instalada no Brasil por fontes. Fonte: ABEEólica (2013) . . . . .	1
2.1	Classe de turbinas. Fonte: Gipe (2009) . . . . .	8
3.1	Faixa de variação de tensão de regime permanente para tensão nominal nos nós do alimentador superior a 1 kV e inferior a 69 kV. . . . .	33
4.1	Tensão equivalente, capacidade equivalente e relação $X/R$ em cada nó e cada carregamento do alimentador de 5 nós. . . . .	39
4.2	Potência limite para a conexão de um parque eólico aos diferentes nós do alimentador. . . . .	45
4.3	Casos de combinação de conexão de dois parques eólicos nos diferentes nós do alimentador. . . . .	56
4.4	Limites de potência para os casos combinados dos parques eólicos do alimentador 5 nós. . . . .	58
4.5	Subcasos da conexão dos parques combinados no sistema de 5 nós. . . . .	59
5.1	Tensão equivalente, capacidade equivalente e relação $X/R$ da impedância equivalente em cada nó estudado e cada carregamento . . . . .	70
5.2	Potência limite para a conexão de um parque eólico aos diferentes nós do alimentador 32 nós. . . . .	75
5.3	Casos de combinação de conexão de parques eólicos no alimentador de distribuição de 32 nós . . . . .	85
5.4	Limites de potência para os casos combinados dos parques eólicos conectados ao alimentador de 32 nós . . . . .	88
A.1	Parâmetros dos nós do sistema 5 nós . . . . .	101
A.2	Carregamentos do alimentador de 5 nós. . . . .	101

B.1	Dados das linhas do sistema 32 nós . . . . .	104
B.2	Dados das cargas do sistema 32 nós . . . . .	105
B.3	Dados dos transformadores do sistema 32 nós . . . . .	105
B.4	Dados dos elementos shunt do sistema 32 nós . . . . .	105

# Lista de Símbolos

- $A$  Área varrida pelas pelo rotor que intercepta o vento
- $C_p$  Coeficiente de potência
- $I_{sc3\phi}$  Corrente de curto circuito trifásica
- $\omega$  Frequência de rotação do rotor
- $k$  Penetração de geração eólica
- $k_{max}$  Penetração máxima de geração eólica
- $P_{turbina}$  Potência da turbina
- $P_{vento}$  Potência disponível no vento
- $P_s$  Potência entregue pelo estator
- $P_r$  Potência fornecida pelo rotor ao conversor
- $P_{ins}$  Potência instalada
- $P_{lim}$  Potência limite
- $P_{lim_{ad}}$  Potência limite que atende ao critério de tensão em regime permanente adequado
- $P_{lim_{pr}}$  Potência limite que atende ao critério de tensão em regime permanente precário
- $P_n$  Potência nominal
- $P_{n_{max}}$  Potência nominal máxima
- $P_g$  Potência total gerada (pelo estator mais o conversor) e entregue à rede
- $P_{gap_{ar}}$  Potência no gap de ar do gerador
- $R$  Raio do rotor aerodinâmico
- $S_{eq}$  Capacidade equivalente
- $v$  Velocidade do vento
- $V_{th}$  Tensão equivalente
- $V_{\infty}$  Tensão na barra infinita
- $V_{max}$  Limite máximo de tensão
- $V_{min}$  Limite mínimo de tensão
- $\beta$  Ângulo de passo das pás
- $\lambda$  Razão de velocidade na ponta da pá
- $\rho_{ar}$  Densidade do ar
- $\rho_s$  Inserção de geração eólica
- $\rho$  Inserção de geração eólica relativa à capacidade equivalente
- $\rho_{max}$  Inserção máxima de geração eólica relativa à capacidade equivalente



# Capítulo 1

## Introdução

A energia eólica é hoje uma das fontes renováveis que está em maior desenvolvimento, devido ao grande potencial eólico disponível e seu impacto ambiental muito baixo quando comparada a outras formas de produção de energia. Este desenvolvimento tem ocorrido na direção de grandes parques eólicos ligados ao sistema de transmissão, em função da evolução tecnológica, da eficiência e da maior rapidez no atendimento da demanda de energia.

A matriz energética brasileira é apresentada na tabela 1.1 ilustrando a participação das diferentes fontes disponíveis até março de 2013.

Tabela 1.1: Capacidade instalada no Brasil por fontes. Fonte: ABEEólica (2013)

<i>Tipo de geração</i>	<i>Capacidade instalada (GW)</i>	<i>Participação na matriz energética</i>
Hidrelétrica	84,318	69%
Termelétrica Nuclear	2,007	2%
Outras termelétricas	32,738	27%
Eólica	2,500	2%
Fotovoltaica	0,008	0%

Apesar da matriz elétrica do Brasil ser predominantemente de fonte hidrelétrica, a geração eólica tem tomado espaço significativo. A figura 1.1 ilustra a evolução da capacidade instalada da fonte eólica e a previsão de crescimento em função das contratações já realizadas em leilões regulados e no mercado livre (ABEEólica, 2013). Observa-se que o mercado brasileiro tem investido de maneira bastante efetiva na construção de novos parques eólicos, sobretudo a partir do ano de 2009, aumentando a participação deste tipo de geração na matriz energética do país e apresentando uma tendência de grande crescimento nos próximos anos. No ano de 2012, o Brasil figurou entre os dez países de maior capacidade instalada de geradores eólicos naquele ano (GWEC, 2013).

A energia eólica se tornou uma das tecnologias que tem se mostrado bastante competitiva dentre todas as tecnologias em energias renováveis (Slootweg and Kling, 2003), não só no

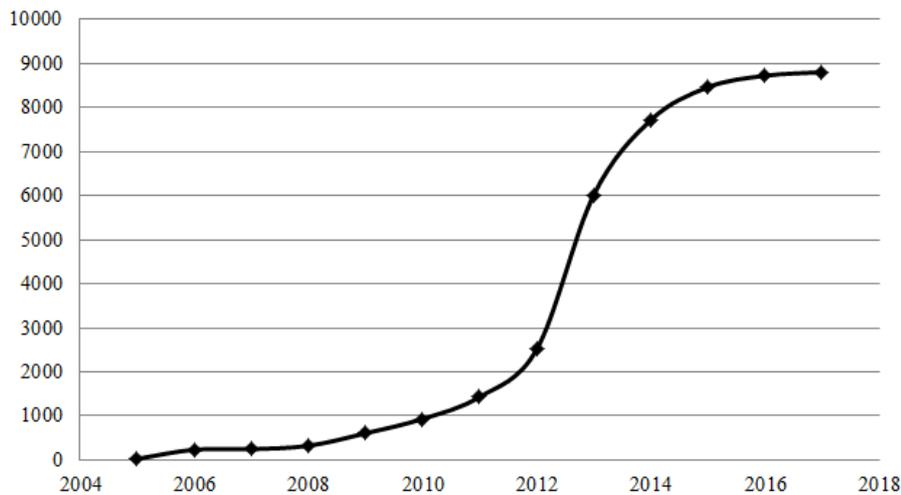


Figura 1.1: Evolução da capacidade instalada no Brasil (MW). Fonte: ABEEólica (2013).

## Brasil.

O crescimento da inserção de geração eólica nas redes levou à necessidade de estudar os impactos desta forma de geração de energia principalmente em razão da variação da velocidade do vento e das diferenças tecnológicas frente aos sistemas convencionais de geração de energia.

Vittal et al. (2007) determinaram a habilidade de um sistema de transmissão controlar grandes incrementos de geração eólica, estudando a capacidade de transmissão de um sistema existente com base nas limitações térmicas e análises em regime permanente. Já Abdelkader and Flynn (2009) apresentaram um método para determinação da capacidade individual dos nós do sistema em acomodar a geração eólica, baseado nos domínios permitidos de injeção de potência no nó candidato, sujeito a variáveis impostas pelos limites de tensão, estabilidade de tensão e os limites de capacidade dos equipamentos sendo satisfeitos. Banakar et al. (2008) avaliaram a inserção eólica decompondo as variações da geração para verificar a influência de cada componente na operação do sistema usando modelos de simulação detalhados. Também Luo et al. (2007) avaliaram as flutuações de potência eólica causadas pelos desvios do padrão de frequência de 60 Hz usando função de transferência composta de um pequeno sistema de plantas térmicas.

Dentre os fatores relacionados ao impacto da geração eólica nos níveis de tensão do sistema foram apontados por Smith et al. (2004): o nível de inserção (potência do parque frente à potência de curto-circuito), a relação  $X/R$  da impedância equivalente do sistema, a tecnologia de turbinas eólicas e sua relação com fornecimento/absorção de reativos e o carregamento do sistema. Nos trabalhos de Reginatto et al. (2009), Reginatto et al. (2008), Lundberg (2000) e da Rocha and Reginatto (2010) o problema foi analisado de forma diferente, estudando os níveis máximos de inserção de geração eólica possíveis quando se deseja atender a determinados requisitos de qualidade da conexão. Nestes casos foram considerados os requisitos da variação de tensão de regime permanente, a margem de potência e limites para o ângulo de tensão interna

do gerador, e avaliou-se a influência da relação  $X/R$  da impedância equivalente, da tecnologia e compensação de reativos.

Estes trabalhos avaliaram a inserção de geração eólica de grande porte, conectadas usualmente nos sistemas de transmissão de energia. Entretanto há ainda grande espaço para a exploração de geração eólica em pequenos aproveitamentos, tanto vinculados ao uso da energia do próprio consumidor como no contexto da geração distribuída (Ullah, 2005; Driesen et al., 2005). Por serem de pequeno porte e estarem próximas ao consumidor, a inserção da geração eólica deveria então ocorrer nos sistemas de distribuição de energia, caracterizando a fonte de energia eólica como fonte disponível para geração distribuída.

Assim, devido à modelagem que foi assumida nos trabalhos Reginatto et al. (2009), Reginatto et al. (2008), Lundberg (2000) e da Rocha and Reginatto (2010), estes resultados foram representativos quando a conexão ocorre em um sistema de transmissão, por exemplo, ou através de uma linha longa entre o parque eólico e o sistema elétrico, o qual pode ser representado pela conexão da geração eólica em uma barra infinita. Esta hipótese não representa adequadamente a realidade do sistema de distribuição no qual as cargas estão próximas dos geradores conectadas através de linhas curtas, por isso devem ser consideradas.

Alguns autores estudaram a inserção da geração eólica em sistemas de distribuição. Pode-se citar Freitas et al. (2005), que apresentaram uma análise comparativa entre os geradores síncrono e de indução para aplicações em geração distribuída. Os impactos desses geradores na performance da rede de distribuição são determinados e comparados através do perfil de tensão de regime permanente, perdas elétricas, estabilidade de tensão, estabilidade transitória, variações na tensão devido a faltas desbalanceadas e corrente de curto circuito. Ullah (2005) estudou o efeito da integração de geração eólica de pequena escala com configuração em velocidade variável nas redes de distribuição, particularmente estudando o efeito do controle da potência reativa das turbinas eólicas na estabilidade de tensão (dinâmica e em regime permanente) considerando diferentes tipos de carga.

A interconexão de sistemas de geração eólica ao sistema elétrico deu origem à diversos estudos, conforme comentado. No Brasil, as regras para interconexão de sistemas de geração em redes de distribuição são estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e também pelas concessionárias locais. A ANEEL estabelece os procedimentos de conexão em sistemas de distribuição na forma das normas PRODIST, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012a). Diversos fatores, inclusive os requisitos técnicos de conexão estabelecidos nestas regras, impõem limitações na máxima potência de geração eólica que pode ser conectada em dado ponto do sistema elétrico. O intuito do trabalho foi analisar a máxima potência a ser inserida atendendo à exigência da tensão de regime permanente dentro de determinados limites considerando parques eólicos conectados ao sistema de distribuição, não foi interesse avaliar se os requisitos técnicos garantem uma condição segura à conexão de

centrais eólicas.

Neste trabalho objetivou-se ampliar a análise dos níveis máximos de inserção de geração eólica no sistema de distribuição considerando uma metodologia de análise similar à apresentada em Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008) através da análise dos indicadores de máxima inserção e penetração de geração eólica. A influência do carregamento do sistema foi considerada. Os níveis máximos de inserção foram avaliados conforme características do alimentador de distribuição como um todo, diferentemente do modelo máquina barra-infinita adotado em Reginatto et al. (2009), Reginatto et al. (2008), Lundberg (2000) e da Rocha and Reginatto (2010).

## **1.1 Objetivos da dissertação**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a conexão de geração eólica em sistemas de distribuição, com vistas à determinação dos níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica, atendendo a limites de variação de tensão de regime permanente nos nós do alimentador.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Estudar as principais características dos sistemas de geração eólica e sistemas de distribuição.
- Estudar a influência da geração eólica nas tensões de regime permanente em diferentes nós dos alimentadores de distribuição.
- Determinar e analisar os limites de inserção e penetração de geração eólica para a conexão de uma ou duas unidades de geração eólica em sistemas de distribuição.
- Reconhecer as variáveis que podem ser determinantes dos limites máximos de inserção e penetração de geração eólica.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- No capítulo 2 são apresentadas as principais tecnologias e topologias empregadas em sistemas de geração eólica de modo a conhecer as características principais que são conside-

radas para estudar o problema da conexão da geração eólica em sistemas de distribuição.

- A contextualização do problema na geração distribuída, além dos principais requisitos técnicos para conexão de centrais eólicas em sistemas de energia, são temas abordados no capítulo 3. Além disso, neste capítulo também apresenta-se a metodologia utilizada para análise da inserção e penetração de geração eólica em um alimentador, a qual é base para as análises dos capítulos seguintes.
- No capítulo 4 apresenta-se uma primeira análise da conexão de geração eólica em um sistema de distribuição utilizando-se da metodologia apresentada no capítulo 3. Considera-se um alimentador de 5 nós suficientemente simples para que se possa ter uma visão mais clara da metodologia, e assim facilitar a aplicação em um alimentador mais complexo. São realizadas análises com relação a inserção e penetração de geração eólica, considerando a conexão em cada um dos diferentes nós do alimentador. Neste capítulo também é apresentada a análise com relação à máxima potência de geração eólica inserível e penetração de geração eólica para o caso da conexão de dois parques eólicos em nós distintos do mesmo alimentador.
- No capítulo 5 são apresentadas análises da inserção e penetração eólica em um sistema de distribuição com 32 nós, considerando 10 diferentes nós de conexão. Neste capítulo também apresenta-se a análise com relação à máxima potência de geração eólica inserível e penetração de geração eólica para conexão de dois parques eólicos em pontos distintos do sistema de distribuição de 32 nós simultaneamente.
- Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões das análises realizadas neste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Tecnologia e topologia de sistemas de geração eólica

### 2.1 Introdução

Este capítulo apresenta as principais características de um sistema de geração eólica quanto às tecnologias e topologias mais encontradas e os geradores utilizados. São descritas as duas formas de operação dos parques eólicos, com velocidade fixa ou variável. Também apresenta-se a modelagem básica das turbinas eólicas e dos geradores eólicos. Este capítulo foi necessário para que sejam observadas as características principais que foram consideradas para estudar o problema da conexão da geração eólica em sistemas de distribuição. Uma das principais características abordadas, que será considerada para as análises nos capítulos seguintes, está na definição da operação dos parques eólicos em velocidade variável.

### 2.2 Evolução das turbinas eólicas

As turbinas eólicas podem ser divididas em seis categorias, sendo estas determinadas de acordo com o diâmetro do rotor ou da área varrida pelas pás. A tabela 2.1 apresenta estas classes de turbinas (Gipe, 2009).

As turbinas eólicas comerciais pequenas são encontradas em pequenas fazendas, escolas e pequenas empresas. Já as médias são para aplicações mais comerciais, como fazendas, fábricas, empresas e pequenos parques eólicos. As grandes turbinas são encontradas em modernos parques eólicos.

A potência de cada classe de turbinas é determinada de acordo com os outros parâmetros da turbina ou local de instalação, conforme será visto na seção 2.4. Como a potência é função da área de varredura, portanto do diâmetro do rotor, e da velocidade do vento, ela pode variar bastante e um valor diferente de diâmetro da turbina pode trazer um mesmo valor de potência

Tabela 2.1: Classe de turbinas. Fonte: Gipe (2009)

<i>Classe</i>		<i>Diâmetro do Rotor (m)</i>	<i>Área varrida (m<sup>2</sup>)</i>
Micro		0,5 a 1,25	0,2 a 1,2
Mini		1,25 a 3	1,5 a 7,1
Doméstica		3 a 10	7 a 79
Nível comercial	Pequena	10 a 20	79 a 314
	Média	20 a 50	314 a 1.963
	Grande	> 50	> 1.963

de turbina.

Na figura 2.1 é mostrada a evolução nos tamanhos das turbinas quanto a seu diâmetro e sua potência nominal (ChemViews, 2012). Há quase três décadas as turbinas eólicas estavam na ordem de grandeza de uma turbina doméstica ou comercial pequena. Com o desenvolvimento da tecnologia das turbinas, visando sempre aproveitar melhor o recurso eólico, as turbinas tiveram, ao longo dos anos, o diâmetro do rotor gradativamente aumentado chegando hoje a existir diversos casos de rotores com diâmetros muito maiores que o comprimento de um avião de grande porte.

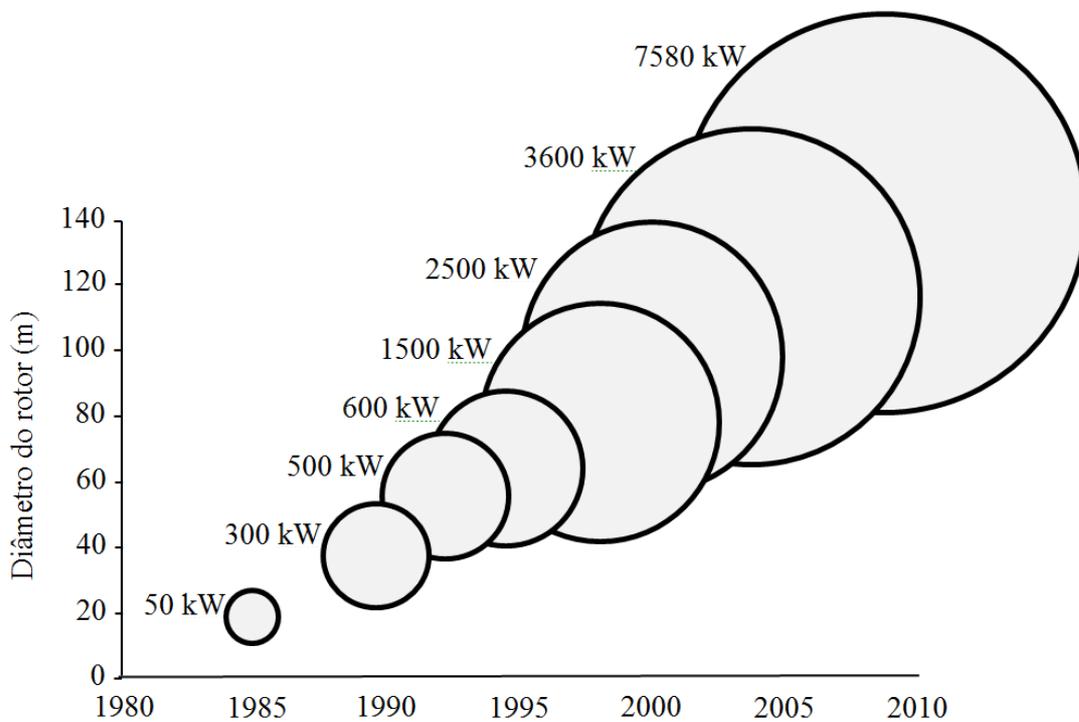


Figura 2.1: Evolução e tamanho relativo das turbinas eólicas. Fonte: ChemViews (2012)

## 2.3 Topologias dos sistemas de geração eólica

São três as topologias mais encontradas em sistemas de geração eólica interligados ao sistema elétrico de potência e estas são basicamente divididas entre os sistemas de velocidade fixa e os sistemas de velocidade variável. Os sistemas de velocidade fixa não têm a capacidade de variar a velocidade do gerador dependendo da velocidade do vento disponível, enquanto os sistemas de velocidade variável podem variar a velocidade do gerador dependendo do vento disponível. Como o vento é inconstante em sua velocidade e também em direção, é possível utilizar a tecnologia dos geradores com velocidade variável para um maior aproveitamento do vento, aumentando a eficiência do sistema.

Nestas topologias vários tipos de geradores podem ser usados. Dentre eles se destacam: gerador de indução (assíncrono) de rotor gaiola de esquilo, gerador de indução (assíncrono) de rotor bobinado e gerador síncrono de ímãs permanentes ou auto-excitados.

### 2.3.1 Sistemas de geração eólica de velocidade fixa com gerador de indução de rotor gaiola de esquilo

Os geradores de indução de rotor gaiola de esquilo foram, por muito tempo, a melhor alternativa de geradores para aplicação em geração eólica, principalmente devido a sua simplicidade elétrica e mecânica, alta eficiência e baixa exigência de manutenção (Ackermann, 2005; Munteanu, 2008). Este tipo de gerador é utilizado em topologias de sistemas de velocidade fixa.

A figura 2.2 apresenta a configuração de um sistema de geração eólica de velocidade fixa, que consiste de um gerador de indução de rotor gaiola de esquilo acoplado ao sistema elétrico de potência através de um transformador.

Este tipo de gerador sempre consome potência reativa, sendo então necessário incluir um banco de capacitores para a correção do fator de potência (FP) de cada sistema de geração eólica. Sua frequência é determinada pela frequência da rede na qual se conecta.

A função da unidade *soft-starter* é de lentamente criar um fluxo magnético e minimizar o transiente de corrente durante a energização do gerador. A corrente de fase é gradualmente aumentada até o valor da corrente nominal. Quando atingida a corrente nominal, ela é desviada para o contator (Anaya-Lara et al., 2009).

Uma caixa de engrenagens (conhecida por seu nome em inglês *gearbox*) aumenta a velocidade rotacional das pás para aquela apropriada para o gerador, localizada entre o gerador e a turbina.

A possibilidade de conexão direta à rede é, ao mesmo tempo, uma vantagem e também uma desvantagem. Vantagem já que dispensa o uso de conversores estáticos para a conexão,

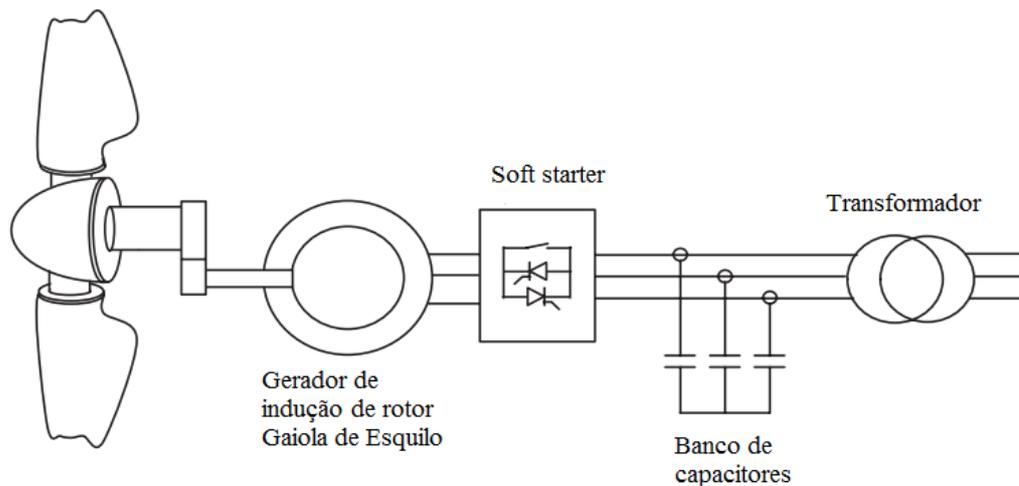


Figura 2.2: Configuração típica de uma turbina eólica de velocidade fixa com gerador de indução de rotor gaiola de esquilo.

o que não é possível no caso dos geradores síncronos. Mas também é uma desvantagem, pois assim o gerador fica preso à rede e por isso sua velocidade fica fixa. Com isso todas as flutuações na velocidade do vento são transmitidas como flutuações de torque mecânico e, por consequência, em flutuações na potência elétrica da rede (Ackermann, 2005). Ainda, a variação de velocidade permitiria um maior aproveitamento do vento, ou seja, ao variar a velocidade do vento poderia ser variada a velocidade da turbina para aumentar o rendimento do conjunto. Como o gerador de indução de rotor gaiola de esquilo não permite a variação da velocidade, somente as soluções mecânicas permitiriam melhor aproveitamento do vento. Contudo, em geral estas soluções mecânicas exigem maior manutenção e são muitas vezes mais caras, então as soluções elétricas tornaram-se mais viáveis. Assim, ao invés de se ter um sistema de engrenagens que pudesse aproveitar melhor a velocidade do gerador investe-se em um gerador que possa variar a velocidade e que seja mais viável.

Esta configuração é simples, robusta e confiável, além do custo da parte elétrica ser relativamente baixo. Porém, o controle da potência reativa e da qualidade de energia é muito limitado (Ackermann, 2005).

### 2.3.2 Sistemas de geração eólica de velocidade variável com gerador de indução de dupla alimentação

A topologia com os geradores de indução de rotor bobinado, mais especificamente o gerador de dupla alimentação, DFIG<sup>1</sup>, possui várias vantagens com relação ao gerador de indução de

<sup>1</sup>DFIG é a sigla em inglês do Gerador de Indução de Dupla Alimentação - *Doubly Fed Induction Generator*, na qual é comumente conhecida.

rotor gaiola de esquilo. A principal delas se refere a sua capacidade de operar com velocidade variável da turbina eólica, aumentando assim o rendimento do conjunto (Munteanu, 2008). Além disso permite a operação e controle de variáveis como a potência reativa, regulação do FP e regulação de tensão devido ao acesso às variáveis do rotor.

Esta configuração, apresentada na figura 2.3, usa um gerador de indução de rotor bobinado no qual a operação de variação de velocidade é obtida pela injeção controlada de tensão no rotor. O elemento de controle de limite de tensão e proteção do gerador e conversores é chamado de *crowbar*. Uma caixa de engrenagens se faz necessária, entre o eixo da turbina e eixo do gerador, para amplificar a velocidade da turbina para aquela apropriada para o gerador.

As configurações usadas na geração eólica geralmente envolvem mais de um conversor estático, sempre em duas partes (lados) separados por um *link* de corrente contínua (CC) e podem atuar em ambas as direções, do tipo *back-to-back*. O enrolamento do rotor é então alimentado através desse conversor estático que desacopla a frequência da rede elétrica da frequência mecânica do rotor, permitindo a operação de variação de velocidade na turbina eólica. O acesso ao rotor possibilita ainda amplo controle das variáveis de interesse, como potência ativa, potência reativa, tensão e velocidade. Com isto, o DFIG pode tanto absorver quanto fornecer reativos para a rede, diferentemente do gerador de indução com rotor gaiola de esquilo. Além disso, o conversor estático entre o rotor e a rede possibilita a extração de potência ativa pelo rotor se operar em velocidades acima da síncrona.

Este gerador não necessariamente precisa ser excitado pela rede, pode ser excitado através do circuito do rotor também. Inevitavelmente, o DFIG precisa de anéis coletores no rotor.

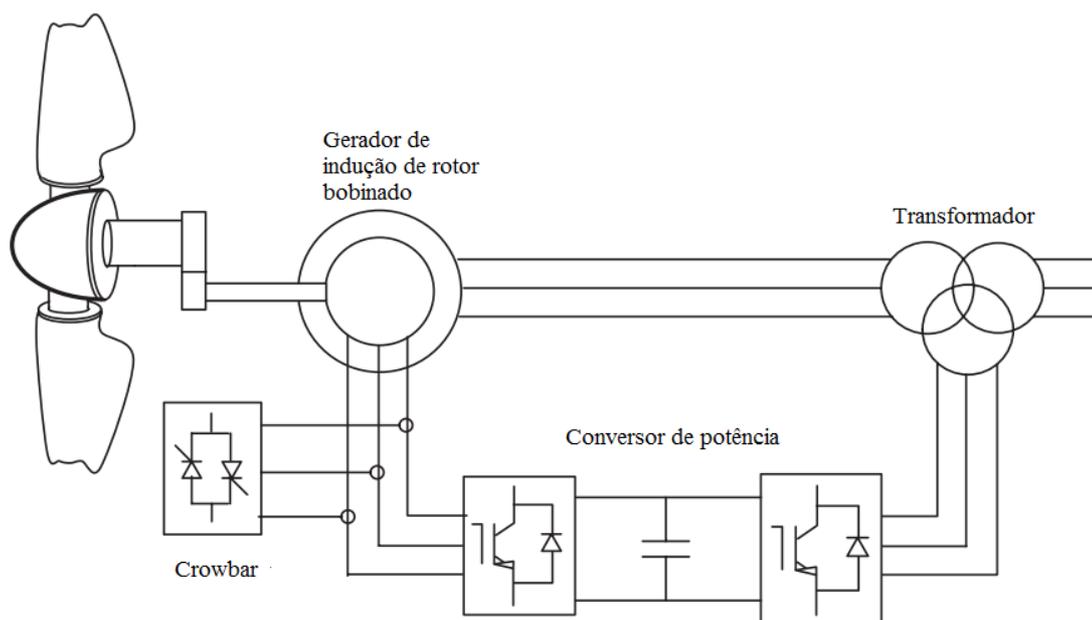


Figura 2.3: Configuração típica de uma turbina eólica de velocidade variável com gerador de indução de rotor bobinado.

Nas topologias de sistema de geração eólica com DFIG a interface da eletrônica de potência é conectada entre o estator e o rotor e permite a operação em velocidade variável da turbina eólica pela injeção de uma tensão variável no rotor (Ackermann, 2005). Dependendo da velocidade de rotação do gerador, o sistema DFIG poderá entregar energia à rede através do estator e rotor, enquanto o rotor pode também absorver energia. Esta regulação é feita através do escorregamento.

### 2.3.3 Sistemas de geração eólica de velocidade variável com conversor estático de potência plena

Nas topologias de geração eólica de velocidade variável é também possível o uso de geradores síncronos, dentre eles, o de ímãs permanentes. Os geradores síncronos de ímãs permanentes são geradores auto-excitados através dos seus ímãs (Munteanu, 2008). Contudo, na configuração deste sistema de geração eólica, apresentada na figura 2.4, podem ser utilizados também os geradores de indução ou síncrono com rotor bobinado. A configuração deste sistema de geração eólica pode ou não incluir uma caixa de engrenagens, dependendo do tipo de gerador utilizado.

Em máquinas síncronas de ímãs permanentes a eficiência é mais alta que nas máquinas de indução, já que a excitação não provém de uma fonte extra de energia (Ackermann, 2005). Possui como algumas desvantagens o custo e sensibilidade do material, mas é a grande tendência do mercado atual para os sistemas de geração eólica pequenos (Gipe, 2009). São os geradores mais indicados para uso em sistemas isolados (Heier and Waddington, 2006).

A topologia com os geradores síncronos de ímãs permanentes e sistema de conversão estática consiste de dois conversores tipo *back-to-back*. Neste arranjo o conversor do lado do gerador controla a operação do gerador e o conversor do lado da rede controla a tensão no *link* CC através da transferência da potência ativa para a rede.

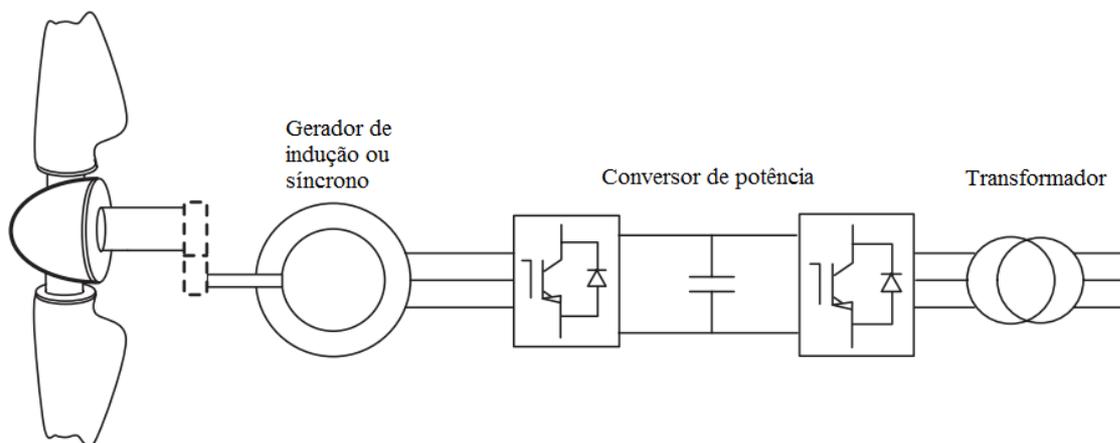


Figura 2.4: Configuração típica de uma turbina eólica de velocidade variável com gerador síncrono ou de indução.

Como estes geradores são máquinas síncronas, a frequência com a qual a energia é gerada depende da velocidade mecânica. Assim, para sua conexão na rede é necessário incluir um conversor estático. A inclusão do conversor estático pode ser vista como uma desvantagem ou uma vantagem. É uma desvantagem considerando que o conversor estático aumenta os custos e as perdas do sistema, mas é também um dos grandes benefícios, já que com este conversor há possibilidade de ajustar a velocidade de rotação da turbina de acordo com a velocidade do vento, melhorando o desempenho aerodinâmico. A operação dinâmica do gerador elétrico é totalmente isolada da rede, já que toda a potência da turbina passa pelos conversores de potência. Dessa forma o gerador fica desacoplado da rede e pode operar com frequência distinta para o controle de velocidade da turbina eólica.

## 2.4 Características operativas das turbinas eólicas

Uma turbina eólica extrai energia cinética do vento que passa pela área varrida por suas pás transformando-a em energia mecânica. A potência disponível no vento varia linearmente com a área varrida pelas pás e com o cubo da velocidade do vento, sendo assim dada por:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho_{ar} A v^3 \quad (2.1)$$

onde  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar que varia com a temperatura e altitude do local ( $kg/m^3$ ),  $A$  é a área varrida pelo rotor que intercepta o vento ( $m^2$ ) e  $v$  é a velocidade do vento ( $m/s$ ) (Burton et al., 2001; Munteanu, 2008; Ackermann, 2005).

A área varrida para turbinas de eixo horizontal varia com o quadrado do raio do rotor, ou seja, a potência irá dobrar à razão que o raio da turbina a ser considerada for maior. Uma relação similar acontece ao variar a velocidade do vento, um incremento na velocidade do vento faz a potência disponível aumentar com o cubo dessa variação.

Nem toda a potência disponível no vento é absorvida e transformada em energia mecânica no eixo da turbina. De acordo com as características das turbinas eólicas, existe um coeficiente de potência,  $C_p$ , que define a potência que poderá ser transformada em energia através da turbina. Desta forma,

$$P_{turbina} = C_p P_{vento} \quad (2.2)$$

Assim, a turbina poderá absorver do vento:

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} C_p \rho_{ar} A v^3 \quad (2.3)$$

Existe um valor máximo do coeficiente de potência definido pelo limite de Betz, sendo esse valor de  $C_p = 0,593$ , ou seja, a máxima potência que a turbina eólica pode absorver é de 59,3% da quantidade de energia disponível no vento (Burton et al., 2001; Zanchettin, 2012). Este é um limite teórico, na prática geralmente as turbinas têm um  $C_p$  de 25 a 45%. As pequenas turbinas eólicas capturam em média 20% ou menos da energia anual disponível no vento (Gipe, 2009).

O coeficiente de potência depende das características da turbina e é uma função da razão da velocidade na ponta da pá,  $\lambda$ , e o ângulo de passo das pás,  $\beta$  (Ackermann, 2005; Burton et al., 2001). A razão de velocidade na ponta da pá,  $\lambda$ , é dada pela razão entre a velocidade na ponta da pá e a velocidade do vento:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (2.4)$$

onde  $\omega$  é a frequência de rotação do rotor,  $R$  é o raio do rotor aerodinâmico e  $v$  é a velocidade do vento.

A figura 2.5 apresenta as curvas típicas de  $C_p$  em função de  $\beta$  e  $\lambda$ . Quanto maior o valor de  $\beta$ , menor o coeficiente de potência da turbina. A figura 2.5 mostra ainda que o máximo coeficiente de potência é somente atingido para um único  $\lambda$  (de cada curva), para o qual uma velocidade rotacional fixa da turbina eólica ocorre para uma única velocidade do vento.

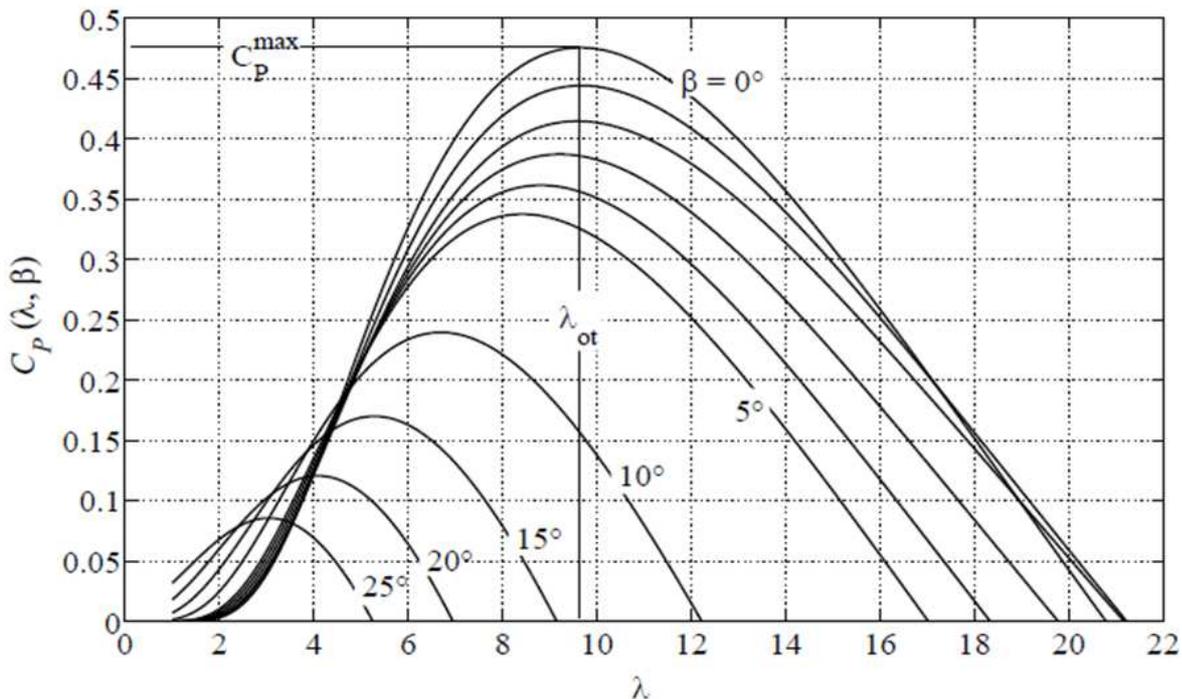


Figura 2.5: Curva de  $C_p$  por  $\lambda$ . Fonte: Ackermann (2005)

Cada ponto de funcionamento sobre as curvas  $C_p(\lambda, \beta)$  representa um ponto de funcionamento em regime permanente. Assim, um argumento para operação de uma turbina eólica a uma velocidade rotacional variável é que é possível operar em um máximo  $C_p$  em várias velocidades do vento. Este é o princípio de controle para os geradores do tipo velocidade variável para a máxima extração de potência do vento (*MPT - Maximum Power Tracking*) (Anaya-Lara et al., 2009; Tarnowski, 2006; Ackermann, 2005; Burton et al., 2001; Munteanu, 2008).

A potência de saída de uma turbina eólica para várias velocidades do vento é convencionalmente descrita por sua curva de potência, geralmente fornecida pelo fabricante. Esta curva mostra a potência de saída da turbina em função da velocidade do vento a certa altitude. Um exemplo de uma curva de potência de uma turbina eólica de 2 MW é dado na figura 2.6 (Ackermann, 2005). Nesta figura podem ser observados os três pontos importantes na escala de velocidade:

- Velocidade do vento de *cut-in*: é o valor mínimo da velocidade do vento para o qual a turbina irá entregar potência útil. Na curva apresentada na figura 2.6 observa-se esta velocidade sendo aproximadamente de  $3 \text{ m/s}$ , assim, abaixo dessa velocidade a turbina permanece desligada já que a velocidade é muito baixa para produção de energia útil. Acima desta velocidade ela então entra em operação e a potência aumenta seguindo a relação cúbica com a velocidade do vento (embora modificada pela variação no  $C_p$ ) até atingir a velocidade do vento nominal. A região entre a velocidade de *cut-in* e a velocidade nominal é chamada de região de potência variável.
- Velocidade do vento nominal: é a velocidade para a qual a turbina passa a fornecer sua potência nominal. No caso da figura esta velocidade é atingida a aproximadamente  $12 \text{ m/s}$ . Acima desta a aerodinâmica do rotor é arranjada para limitar a potência mecânica extraída do vento. A região entre a velocidade do vento nominal e a velocidade de *cut-out* é chamada de região de potência constante, uma vez que a potência gerada é mantida na potência nominal. Nesta região a operação da turbina é em velocidade fixa, embora ocorra a variação da velocidade do vento.
- Velocidade de *cut-out*: é a máxima velocidade do vento na qual é permitida a entrega de potência para a turbina e geralmente é limitada pelo fabricante devido a questões de segurança. Para a turbina da figura 2.6 esta velocidade ocorre a aproximadamente  $25 \text{ m/s}$ , sendo que a partir desta velocidade a turbina é desligada para evitar problemas mecânicos (Ackermann, 2005).

A região de operação em velocidade variável é a região de operação típica dos geradores eólicos, que variam a sua potência de geração de acordo com a variação do vento. Nesta região é possível aplicar o princípio de controle MPT, comentado anteriormente. Esta é a região de

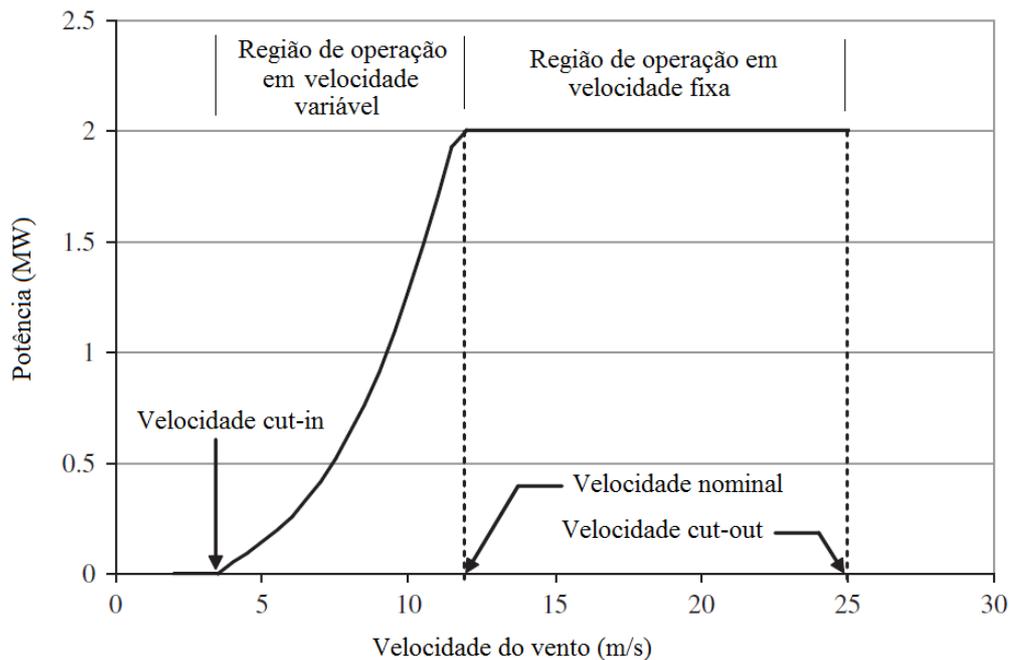


Figura 2.6: Curva de potência de uma turbina eólica de 2MW. Fonte: Ackermann (2005)

estudo do presente trabalho, porém considerou-se que o vento nunca ficará com velocidade tão baixa a ponto da potência gerada no parque ser inferior a 20% de sua potência nominal. Assim, nas análises realizadas neste trabalho considerou-se que os parques eólicos produzem energia desde 20 até 100% de sua potência nominal.

## 2.5 Parques eólicos

Um parque eólico é um espaço terrestre ou marítimo, onde estão concentrados vários sistemas de geração eólica, conectados em paralelo, destinados a transformar energia eólica em energia elétrica. Um sistema de geração eólica é formado basicamente pela turbina, sistema de transmissão e gerador. A figura 2.7 ilustra uma turbina eólica de eixo horizontal. A nacela contém o gerador, caixa de engrenagens e o rotor. Existem diferentes mecanismos para direcionar a turbina para a direção do vento ou mover a turbina para fora do vento no caso de ventos de velocidade muito elevada. Em turbinas eólicas pequenas, o rotor e a nacela são orientados para o vento com um leme instalado no final da nacela. Em turbinas grandes a nacela com a turbina são eletricamente guinadas para o vento ou fora dele, em resposta a um sinal de um sensor de direção de vento (Ackermann, 2005).

O rotor é compreendido das pás da turbina onde a conversão aerodinâmica é realizada. O sistema de transmissão transmite potência mecânica capturada pelo rotor para a máquina

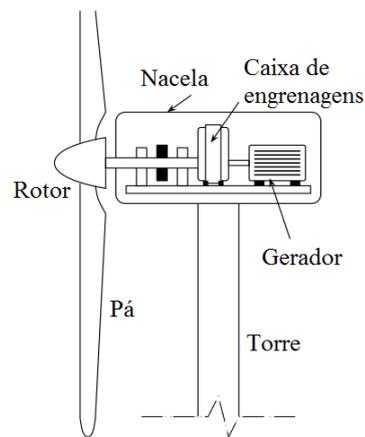


Figura 2.7: Sistema de geração eólica com turbina de eixo horizontal

elétrica. A caixa de engrenagens aumenta a velocidade do rotor para valores mais adequados para o gerador, pois a velocidade da turbina é muito pequena para acionar o gerador.

O rotor é localizado no topo de uma torre onde os ventos são de maior energia e menor turbulência. A torre também suporta a nacela onde está instalada a caixa de comando e gerador (Bianchi et al., 2007).

O gerador elétrico é um equipamento que converte energia mecânica em energia elétrica e seus terminais elétricos são, por sua vez, conectados à rede. No caso de sistemas de velocidade variável (descrito na seção 2.3), um conversor estático é usado entre a rede de corrente alternada (CA) e os enrolamentos do estator ou rotor do gerador.

A potência gerada em cada sistema de geração eólica é recolhida em uma barra do ramal, chamada de ponto comum de conexão (PCC), interligado ao sistema elétrico de potência. Usualmente a conexão se dá através de um transformador de potência e um ramal interno para cada sistema de geração eólica, embora também possa ser utilizado um transformador para um grupo de sistemas de geração eólica com apenas um ramal interno de ligação (Zanchettin, 2012). A figura 2.8 ilustra a conexão típica de várias unidades de geração eólica conectadas ao sistema elétrico de potência, configurando um parque eólico.

As turbinas utilizadas nos sistemas de energia eólica são ainda caracterizadas quanto à orientação do rotor, número de pás, material das pás, tipo de gerador utilizado e a torre correspondente.

### 2.5.1 Orientação do Rotor

A tecnologia das turbinas eólicas mudou muito desde o início da sua utilização para geração de energia, no fim do século XIX (Ackermann, 2005). Elas podem ser do tipo horizontal ou vertical, conforme apresentadas na figura 2.9.

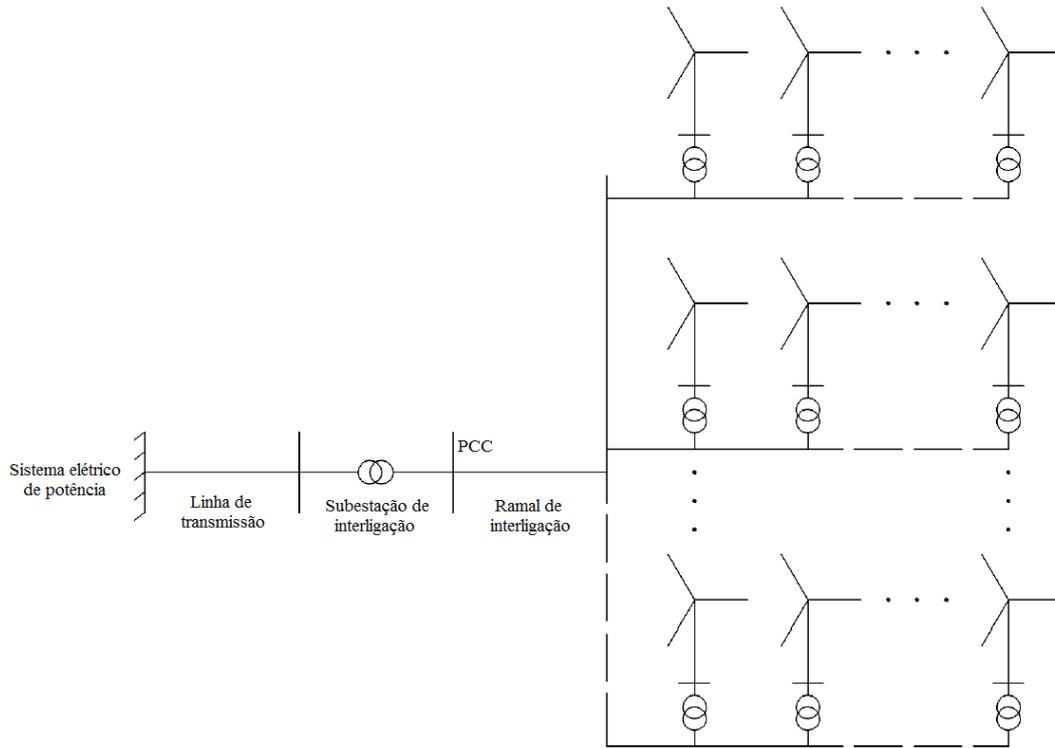


Figura 2.8: Diagrama de interligação entre um parque eólico e o sistema elétrico de potência utilizando um transformador por turbina eólica. Fonte: Zanchettin (2012)

O predomínio hoje em dia está no uso de turbinas com eixo horizontal, sendo muito raro o uso das turbinas de eixo vertical para a aplicação na geração eólica de energia, uma vez que apresentam algumas desvantagens com relação às de eixo horizontal. Dentre elas, destaca-se a manutenção mais complicada das turbinas de eixo vertical, pois há necessidade de remoção do rotor completo. Além disso, apesar de absorverem ventos em qualquer direção, a captura de energia nas turbinas de eixo vertical é reduzida devido aos ventos próximos ao solo serem mais lentos e de mais baixa energia que em maiores altitudes (acima de uma torre livre de obstáculos). Ainda têm a necessidade de maior extensão de terra para instalação já que a sua sustentação é feita por cabos de aço (Bianchi et al., 2007).

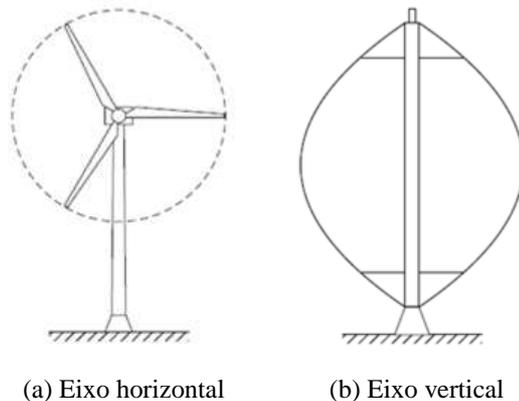


Figura 2.9: Turbinas eólicas

### 2.5.2 Número de pás

O número de pás utilizado em uma turbina eólica de eixo horizontal depende muito da sua aplicação e da velocidade do vento. Turbinas de duas ou três pás são usadas para geração de energia elétrica. Turbinas com 20 ou mais pás são usadas para bombeamento mecânico de água. O número de pás está relacionado indiretamente com a razão de velocidade na ponta da pá,  $\lambda$ , dada pela equação 2.4 apresentada na seção 2.4. Quanto maior a velocidade do vento, menor será  $\lambda$ , assim o torque inicial na turbina será alto (Ackermann, 2005). Da mesma forma, se a velocidade do vento é menor,  $\lambda$  será maior e o torque inicial necessário será baixo. Como as turbinas eólicas com maior número de pás têm uma razão de velocidade na ponta da pá muito baixa, logo elas têm um alto torque inicial. Já as turbinas com duas ou três pás têm uma alta razão da velocidade na ponta da pá, com torque inicial baixo (Ackermann, 2005).

Atualmente as turbinas eólicas de três pás dominam o mercado para as turbinas de eixo horizontal interconectadas ao sistema elétrico de potência. Apesar das turbinas com duas pás serem mais baratas e, por serem menos pesadas requerem uma estrutura não tão robusta quanto para três pás, as turbinas com três pás têm um movimento mais suave e por isso têm vida útil maior.

### 2.5.3 Material das pás

As pás das turbinas eólicas podem ser feitas de madeira, tecido, aço, alumínio ou fibra de vidro ou carbono. Poucas turbinas existentes são feitas de metal e o alumínio não é um bom material, pois é muito propenso à fadiga. A maioria dos fabricantes usa compostos de fibra de vidro, fibra de carbono ou madeira para a construção das pás (Gipe, 2009).

### 2.5.4 Torres

As torres fazem parte do sistema de geração eólica sendo responsáveis pelo suporte do rotor, pás e nacela a uma altura conveniente, onde os ventos sejam de menor turbulência e maior velocidade.

A altura ideal da torre é tal que fique fora da área de turbulência. Esta altura pode chegar a até 20 vezes a altura da obstrução (a favor do vento) e até 2 vezes a altura da obstrução (contra o vento). Consideram-se obstruções as árvores, construções, prédios, encostas de morro, etc. O mínimo recomendado é que as torres estejam a 10 m acima da obstrução mais alta (Gipe, 2009).

A figura 2.10 apresenta a região em cinza que é a área de maior turbulência de ventos, onde não é recomendada a instalação de turbinas eólicas. Torres altas são necessárias para aumentar a altura das turbinas eólicas acima da zona de distúrbio entre edificações, árvores ou outras obstruções de vento (Gipe, 2009).

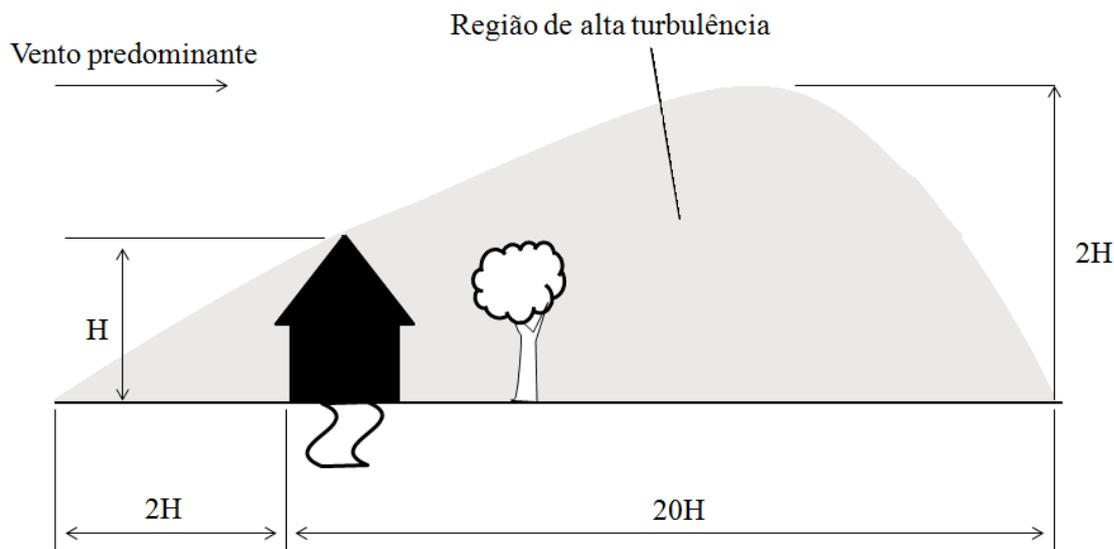


Figura 2.10: Turbulência e altura da torre. Fonte: Gipe (2009)

Quanto maior for a altura da torre, maior a velocidade do vento e mais laminar é o fluxo de vento já que não há obstruções. Porém, deve-se notar que quanto mais altas forem as torres, maior a quantidade de material empregado e melhor deve ser a tecnologia de sustentação, o que pode tornar, em alguns casos, o projeto economicamente inviável.

No caso dos parques eólicos as próprias torres e respectivas turbinas eólicas causam um efeito de sombreamento umas sobre as outras. Dessa forma, é necessário um estudo da melhor disposição das torres no terreno, como apresentado em Saraiva (2007), Ma et al. (2009) e Kusiak and Song (2010).

Considerar um parque eólico com potência nominal equivalente a uma turbina de grande porte pode trazer grandes benefícios para a qualidade da potência gerada no ponto de conexão comum. A figura 2.11 mostra o impacto da distribuição geográfica e adicional de turbinas eólicas na produção de energia. Observa-se que quanto maior o número de turbinas eólicas, menor a variação na potência final do parque eólico. O efeito exato da distribuição geográfica depende muito dos efeitos temporais do local e o tamanho total de uma área geográfica. Contudo, uma distribuição de parques eólicos em uma grande área geográfica usualmente tem um impacto positivo na operação do sistema elétrico (Ackermann, 2005).

## 2.6 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um panorama da tecnologia dos sistemas de geração eólica. Verificou-se que as turbinas são divididas em seis classes dependendo do diâmetro do rotor e que os geradores que fazem parte do sistema de geração eólica podem ser de indução ou síncronos e são componentes capazes de caracterizar o sistema em operação de velocidade fixa ou variável.

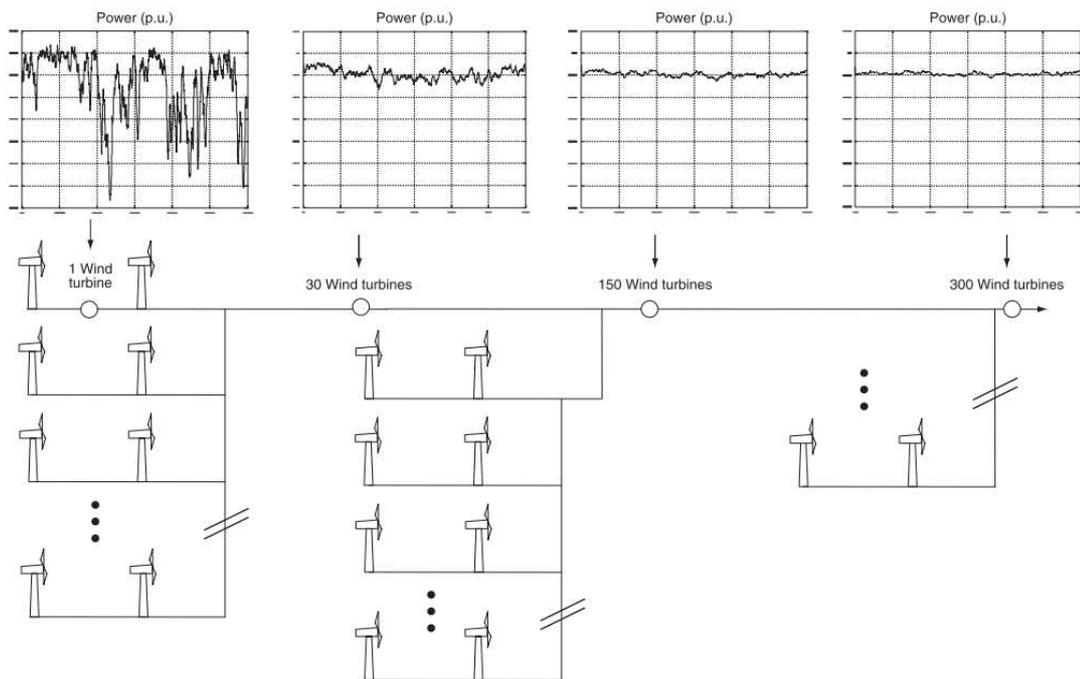


Figura 2.11: Impacto do número de turbinas eólicas na potência gerada no ponto de conexão comum. Fonte: Ackermann (2005)

Apresentou-se ainda a modelagem básica da turbina e seus fundamentos.

A geração de energia através de sistemas de geração eólica é variável de acordo com o vento, já que a potência varia em sua função. Dependendo da topologia do sistema utilizado ele pode aproveitar da melhor forma essa variação do vento, caracterizando sua operação em velocidade variável, com utilização de geradores que permitem esta tecnologia.

Neste trabalho considerou-se que os sistemas de geração eólica estudados estão operando em velocidade variável, embora não se definiu se o gerador utilizado é de dupla alimentação ou síncrono, por exemplo.

Considerou-se ainda que a variação de vento possível é compatível com o parque eólico fornecendo desde 20 até 100% de sua potência nominal, dependendo da variação do vento, para todas as análises do presente trabalho.



# Capítulo 3

## Geração distribuída e conexão de sistemas de geração eólica

### 3.1 Introdução

Neste capítulo serão observadas algumas características principais da geração distribuída e os requisitos para conexão de sistemas de geração eólica. Apresenta-se aqui a contribuição do presente trabalho frente ao que já foi apresentado por alguns autores no contexto dos limites máximos de inserção de geração eólica. Apresenta-se também a metodologia de análise da inserção e penetração de geração eólica em alimentadores em função dos requisitos de tensão de regime permanente aqui determinados, dando base para as análises que serão realizadas nos capítulos 4 e 5.

### 3.2 Geração distribuída

Os principais componentes de um sistema elétrico de potência são mostrados na figura 3.1. A geração é conectada ao sistema de transmissão, que passa pela subestação de energia e rede de transmissão antes de chegar na subestação de distribuição, onde chega através dos alimentadores primários às cargas, ou seja, aos consumidores.

Dentre estes componentes, o paradigma da geração centralizada promoveu grande expansão do sistema de transmissão, interligando grandes centros geradores e consumidores geografi-

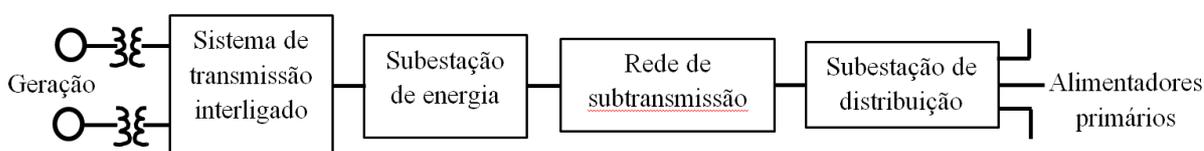


Figura 3.1: Principais componentes de sistemas de energia. Fonte: Kersting (2006)

camente distantes entre si. Neste contexto, os sistemas de distribuição cumpriram o papel apenas de entregar a energia aos consumidores. Assim, os sistemas de distribuição foram projetados para operar com um fluxo de potência unidirecional, da subestação de distribuição para os consumidores. Contudo, devido ao aumento da demanda e à necessidade da diminuição das perdas nas linhas de transmissão ou distribuição e economia com investimentos em transmissão, há algum tempo tem se investido na utilização de geradores de energia localizados próximos ao consumidor, desta forma conectados às redes de distribuição, modelo denominado de geração distribuída (INEE, 2012). Estes geradores provêm de fontes do tipo hidráulica, PCH (pequenas centrais hidrelétricas) e CGH (Central Geradora Hidrelétrica), solar, eólica ou biomassa (Ayres, 2010).

Diversos autores discutiram diferentes definições para a geração distribuída. Segundo Ackermann et al. (2001) a geração distribuída pode ser definida como uma geração de energia elétrica conectada às redes de distribuição ou no lado da rede do consumidor. Já Jenkins et al. (2000) comentam que a geração distribuída está relacionada ao uso de pequenas unidades de geração instaladas em pontos estratégicos do sistema elétrico de potência ou localizadas nos centros de carga. Uma das definições mais recentes, apresenta a geração distribuída como qualquer tecnologia de geração de energia elétrica em pequena escala que fornece energia elétrica no consumidor ou próximo dele e é conectada ao sistema de distribuição ou opera independentemente da rede (Borbely and Kreider, 2010; Dondi et al., 2002).

Porém, a definição que será considerada neste trabalho é a apresentada pela ANEEL, que define nas normas PRODIST a geração distribuída constituída por “centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS” (ANEEL, 2012a).

Dentre as vantagens apontadas para a geração distribuída pode-se citar (Dondi et al., 2002; Mukhopadhyay and Singh, 2009):

- Alta eficiência;
- Redução nas perdas da rede;
- Melhoria da confiabilidade;
- Prorrogação nos investimentos de expansão da rede;
- Utilização de energias à base de fontes renováveis (limpas) e ecologicamente corretas;
- Instalação rápida e fácil devido a utilização de componentes pré-fabricados;
- Diminuição de custos por evitar longas distâncias em linhas de transmissão de alta tensão;
- Custos mais ou menos constantes com o uso de fontes de energia renováveis;
- Construção simples e conseqüentemente fácil operação e manutenção.

As redes de distribuição geralmente são projetadas para um propósito diferente das redes de transmissão. A principal diferença é que os sistemas de distribuição não são desenhados para a conexão de equipamentos geradores de energia. Além disso, as redes de distribuição são geralmente radiais e não em malha como as redes de transmissão. Por isso o fluxo de potência nas redes de distribuição geralmente são unidirecionais, conforme já comentado. Adicionalmente, as linhas de alta tensão tem uma resistência baixa comparada às linhas de baixa tensão nas redes de distribuição (Ackermann et al., 2001).

### **3.3 Conexão de sistemas de geração eólica**

#### **3.3.1 Requisitos técnicos para conexão de sistemas de geração eólica ao sistema elétrico de potência**

A instalação e operação de geradores conectados ao sistema de distribuição não é trivial, já que alguns impactos técnicos afetam o desempenho da operação dessas redes quanto à qualidade e confiabilidade da energia fornecida dependendo do local da conexão (Ayres, 2010). Dentre os principais requisitos técnicos que os acessantes ao sistema elétrico devem cumprir destacam-se: variação de tensão terminal em regime permanente, regulação de potência ativa, regulação de potência reativa, regulação de frequência, *flicker*, conteúdo harmônico e capacidade de sustentação durante faltas (Pires et al., 2008; Zanchettin, 2012). De maneira sintetizada, a seguir são descritos estes requisitos (Ackermann, 2005).

#### **Variação da tensão terminal em regime permanente**

No sentido de evitar que as centrais eólicas sejam desconectadas do sistema elétrico quando a tensão no ponto de conexão é diferente do seu valor nominal as concessionárias de energia elétrica definem limites aceitáveis para a variação de tensão de regime permanente. Estes limites devem ser atendidos e manter os parques eólicos em operação sem a atuação de relés de subtensão ou sobretensão (Zanchettin, 2012).

#### **Regulação de potência ativa**

Requisito referente à habilidade da central em regular a potência ativa a um nível determinado, desconectando a central eólica, ou por ação do controle do ângulo de passo. Objetiva-se assim assegurar que a frequência do sistema se mantenha estável, evitando sobrecargas nas linhas de transmissão, variações bruscas na tensão e correntes de *in rush* durante a partida e parada dos geradores do sistema de geração eólica (Ackermann et al., 2001).

## **Regulação de potência reativa**

O controle de potência reativa no gerador permite que a central eólica participe do controle de tensão do sistema, aumentando as margens de estabilidade de tensão. Este controle pode ser feito de três formas: (i) através do fator de potência, (ii) especificando a potência reativa, (iii) regulando a tensão nos terminais da máquina (Zanchettin, 2012).

## **Regulação de frequência**

Em condições normais de operação a frequência do sistema elétrico deve estar em seu valor nominal. Porém, caso ocorra um desbalanço entre o consumo e a produção de energia, o controle primário e secundário de frequência são utilizados para retomar o balanço. Recentemente alguns países, como Alemanha, estão exigindo a participação das centrais eólicas na regulação de frequência do sistema.

## **Tolerância à cintilação luminosa - *flicker***

A variação do fluxo luminoso das lâmpadas, causada pela flutuação do valor eficaz da tensão, é chamada de cintilação luminosa ou *flicker*. São exemplos de causas de flutuação de tensão devido a operação de sistemas de geração eólica: conexão e desconexão de unidades geradoras, conexão e desconexão de bancos de capacitores empregados na correção de fator de potência, sombreamento de pás, rajadas de vento ou oscilações torcionais (ONS, 2010).

## **Conteúdo harmônico**

O conteúdo harmônico está relacionado à distorção da componente fundamental da tensão ou da corrente senoidal que causa aumento da corrente e sobreaquecimento nos equipamentos elétricos. Dentre as principais causas que geram o conteúdo harmônico estão: operação de inversores de frequência por tiristores ou transistores, bancos de capacitores operados por tiristores, relação não linear entre a corrente e a tensão de transformadores e motores quando o núcleo magnético encontra-se saturado e operação de fornos de arco (Zanchettin, 2012).

## **Capacidade de sustentação durante faltas**

Os fabricantes dos sistemas de geração eólica devem garantir que seus equipamentos sejam capazes de suportar todos os estresses elétricos causados pela ocorrência de distúrbios na rede, responsáveis por dar origem a afundamentos momentâneos de tensão. Para atender

a este requisito técnico a central eólica deve continuar contribuindo com a entrega de potência ativa proporcionalmente ao valor da tensão no ponto de conexão, dentro de um perfil de comportamento momentâneo de tensão em uma escala de, tipicamente, até 5 segundos (Zanchettin, 2012).

### 3.3.2 Conexão de sistemas de geração eólica em redes de distribuição

Muitos dos requisitos de conexão de sistemas de geração em redes de distribuição são estabelecidos pela ANEEL, através das normas PRODIST (ANEEL, 2012a). Regras ou normas complementares são estabelecidas pelas concessionárias locais de energia elétrica. Na definição de diretrizes gerais para conexão de geradores distribuídos, algumas concessionárias limitam a inserção de geração distribuída a uma central geradora por alimentador de distribuição. Outras consideram que a potência máxima de geração não deve ultrapassar a metade da potência instalada no alimentador.

Dentre os impactos da conexão de geradores eólicos em redes de distribuição está a influência na tensão de regime permanente dos nós do alimentador. Devido ao aumento da geração distribuída pode tornar-se difícil a manutenção da tensão em todos os alimentadores dentro de limites desejados em todas as situações (Morren and de Haan, 2008). Um número significativo de trabalhos já discutiu os impactos de unidades de geração distribuída no perfil de tensão. A maioria das publicações concluem que um problema pode ocorrer, são determinadas as magnitudes das alterações nas tensões e são propostas soluções para limitar a variação de tensão no sistema. Ou seja, a partir de um problema são estudadas e consideradas estratégias de controle de tensão para a inserção da geração distribuída em determinado ponto da rede.

A análise apresentada neste trabalho pretende contribuir nesta direção através da avaliação dos limites máximos de geração eólica que podem ser inseridos em um alimentador de distribuição, considerando as limitações impostas pela manutenção da tensão de regime permanente em níveis adequados ou, no pior dos casos, precários. Neste trabalho visou-se buscar a maior possibilidade de conexão de geradores eólicos que obedecem determinados limites de tensão sem a necessidade da utilização de nenhuma estratégia de controle.

## 3.4 Estudo dos limites de inserção de geração eólica

O nível de inserção de geração eólica,  $\rho_s$ , é definido como (Reginatto et al., 2008):

$$\rho_s = \frac{P_n}{S_{sc}} \quad (3.1)$$

onde  $P_n$  é a potência nominal do parque eólico e  $S_{sc}$  a potência de curto circuito do ponto, barra ou nó de conexão. Corresponde ao inverso da razão de curto-circuito e serve como indicador do

percentual da capacidade do ponto de conexão que é aproveitada pelo sistema de geração eólica conectado.

O problema da conexão de parques eólicos no sistema elétrico já foi considerado em trabalhos anteriores. Alguns destes trabalhos avaliam os níveis máximos de geração eólica possíveis, atendendo a determinados requisitos quanto a indicadores de qualidade da conexão. Lundberg (2000) avaliou a máxima potência que um parque eólico pode ter de maneira que a tensão no ponto de conexão não varie além de determinados limites. Também foram determinados limites de potência do parque eólico em função de flutuações máximas da tensão no ponto de conexão (*flicker*). As análises foram feitas para parques eólicos com sistemas de geração eólica com geradores de indução de rotor gaiola de esquilo conectados à rede através de uma linha longa. Os resultados foram apresentados em termos da relação  $X/R$  da impedância da linha e da potência de curto circuito no ponto de conexão. Lundberg (2000) verificou que, devido ao fato dos impactos na qualidade de potência ser dependente da combinação entre a curva  $PQ$  do gerador e a relação  $X/R$  da impedância equivalente da rede, é possível diminuir a variação de tensão de regime permanente e emissão do *flicker* da turbina eólica escolhendo-se adequadamente o gerador. Esta redução da emissão do *flicker* também pode ser observada com instalação de várias pequenas turbinas no lugar de uma turbina grande com a mesma potência nominal do parque eólico.

Estes resultados foram estendidos por Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008) em várias direções: (1) considerando diferentes casos de compensação de reativos para os sistemas de geração eólica com geradores de indução de rotor gaiola de esquilo; (2) considerando também o caso dos parques eólicos com geradores de indução de dupla alimentação operando com regulação de potência reativa, fator de potência ou tensão terminal. Nestes trabalhos foram avaliados os níveis máximos de inserção de geração eólica considerando como requisitos: uma tolerância máxima para a variação da tensão no ponto de conexão, a garantia de uma margem de potência em relação à máxima potência transferível ao sistema elétrico pelo ponto de conexão e uma tolerância máxima para o ângulo de tensão interna do gerador.

Em geral o requisito de variação da tensão terminal apresenta um grande impacto nos limites de inserção de energia eólica. Os outros critérios, ângulo de tensão interna e margem de potência ativa, tendem a prevalecer somente para valores médios da relação  $X/R$ .

A figura 3.2 ilustra o sistema de estudo de Reginatto et al. (2009). Neste sistema as cargas são desprezadas e a conexão do parque eólico pode ser modelada através do sistema equivalente do sistema elétrico, chamado de modelo máquina barra-infinita.

A figura 3.3 apresenta os limites máximos do nível de inserção  $\rho_s$  que pode ser alcançado, satisfazendo a máxima variação da tensão determinada, para o caso do sistema de geração eólica com DFIG com regulação de potência reativa em  $Q = 0$  estudado em Reginatto et al. (2009). Os resultados consideram os limites de variação da tensão de regime permanente na barra de conexão desde 0,93 a 1,05 pu.

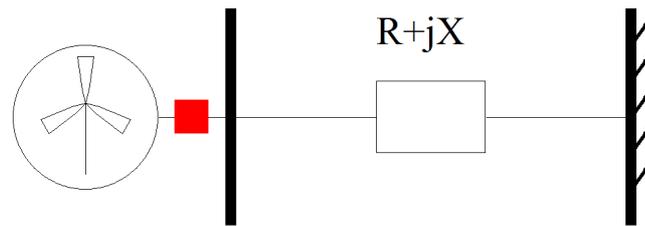


Figura 3.2: Modelo máquina barra-infinita.

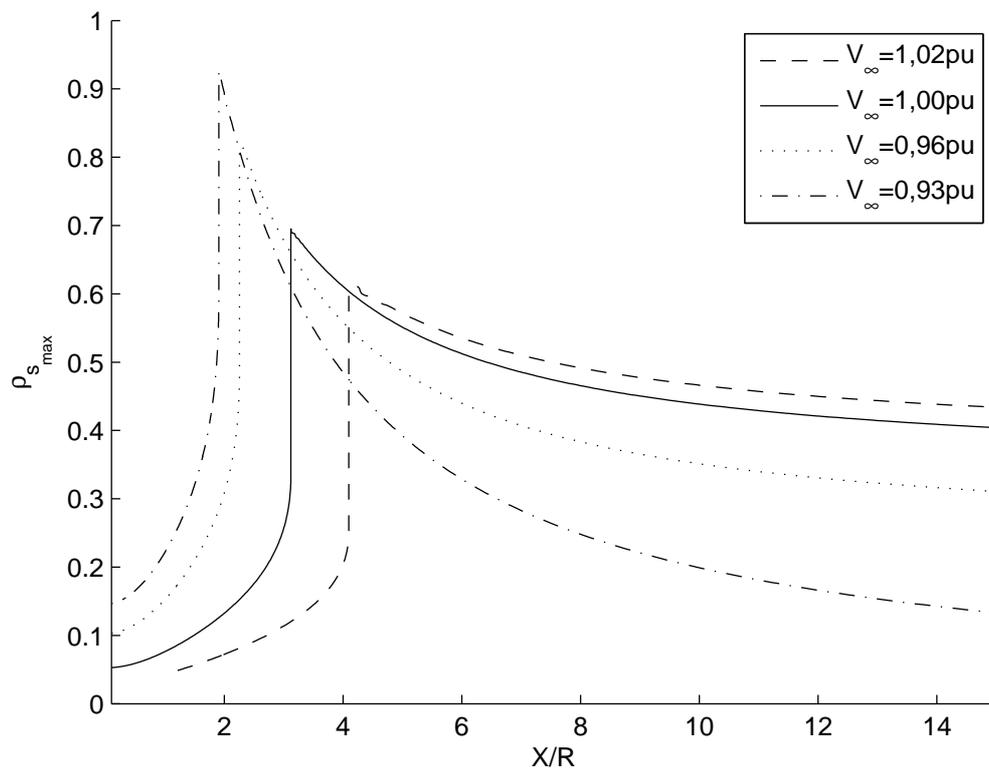


Figura 3.3: Máxima inserção de geração eólica para DFIG com regulação de potência reativa em  $Q = 0$ .

O critério da variação de tensão de regime permanente leva a um perfil da máxima inserção de geração eólica que apresenta picos para o intervalo de 2-5 da relação  $X/R$  da impedância equivalente, diminuindo para pequenos valores de  $X/R$  e também decrescendo para grandes valores de  $X/R$ . Observa-se ainda que a variação da inserção de geração eólica para valores da relação  $X/R$  da impedância equivalente menores que 6 é grande, enquanto esta variação para valores maiores que 6 é pequena, ou seja, a sensibilidade da máxima inserção de geração eólica em função da relação  $X/R$  é maior quando a relação  $X/R$  é pequena.

Para valores baixos da relação  $X/R$  a sensibilidade é muito grande, pois apresenta variação bastante grande dos níveis de inserção para pequenas variações da relação  $X/R$  até o pico da curva. Este trecho é onde acontece sobretensão, enquanto o trecho após o pico da curva, com

valores maiores da relação  $X/R$ , é onde acontece a subtensão.

Com relação à influência da tensão na barra infinita na máxima inserção de geração eólica observa-se que grande diferença para valores da relação  $X/R$  menores ou maiores que o valor do pico observado nas curvas. Para relações  $X/R$  elevadas a máxima inserção diminui com a redução da tensão na barra infinita. Já para relações  $X/R$  baixas a máxima inserção cresce com esta redução. Vale destacar ainda que o pico da curva de máxima inserção ocorre para valores menores da relação  $X/R$  à medida que a tensão na barra infinita diminui. Adicionalmente o valor deste pico aumenta à medida que a tensão na barra infinita diminui.

Em todos estes trabalhos comentados foi considerado o modelo máquina barra-infinita, mostrado na figura 3.2, para a conexão do parque eólico ao sistema elétrico. Esta representação é válida, por exemplo, quando a conexão ocorre por meio de uma linha longa. Como as linhas de transmissão são longas, a geração fica muito distante das cargas, sendo então que a sua influência na inserção de geração eólica não é significativa e por este motivo podem ser desconsideradas.

Esta característica é pouco comum para sistemas de distribuição onde as cargas tendem a estar mais próximas da geração, conectadas através de linhas curtas. Portanto, para os objetivos deste trabalho foi necessário considerar modelos mais detalhados para o sistema elétrico nas proximidades do ponto de conexão da unidade geradora.

Em Ullah (2005) já é considerada uma análise da inserção de geração eólica em sistemas de distribuição. Neste trabalho foram analisados os efeitos do controle da potência reativa de pequenas turbinas eólicas com velocidade variável na estabilidade de tensão local, considerando diferentes tipos de cargas. Foram analisados três casos, assumindo a variação de tensão permitida entre 0,96 pu e 1,025 pu, e a capacidade da subestação de 70MVA.

A figura 3.4 ilustra um dos sistemas de estudo de Ullah (2005), constituído do sistema de geração eólica próximo à carga e conectado ao sistema de distribuição através de um alimentador e um transformador. A carga mínima do alimentador foi considerada para determinar a máxima potência eólica a ser inserida neste alimentador.

São apresentadas na figura 3.5 as curvas de potência por tensão ( $P - V$ ) referentes a este caso, na qual observa-se que existe um limite de inserção de geração eólica de 3,6 MW devido à limitação da variação de tensão para o caso com relação  $X/R$  da impedância equivalente de 3.

### 3.4.1 Metodologia de análise

No presente trabalho buscou-se avançar nos estudos da inserção da geração eólica em sistemas de distribuição. A metodologia de Reginatto et al. (2009) foi estendida e adaptada ao caso de sistemas de distribuição e o estudo foi concentrado no impacto do atendimento a limites



Figura 3.4: Diagrama unifilar sistema com um alimentador.

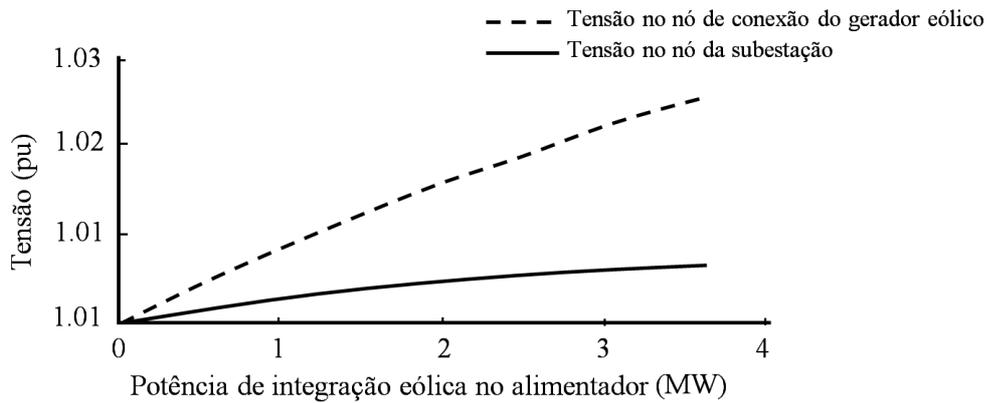


Figura 3.5: Integração de geração eólica no alimentador. Fonte: Ullah (2005)

de variação da tensão de regime permanente ao longo do alimentador.

Para tanto, considerou-se sistemas de distribuição particulares e avaliou-se a conexão de parques eólicos em diferentes pontos deste sistema, determinando a máxima potência destes parques compatível com os limites pré-estabelecidos de variação da tensão de regime permanente. A análise procurou elucidar a influência de diferentes fatores, como as características do nó de conexão, do carregamento do alimentador e de aspectos específicos da topologia do alimentador na potência máxima do parque eólico.

Os nós de conexão do parque eólico do sistema de distribuição foram caracterizados pelos parâmetros do equivalente de Thèvenin do sistema visto do nó de conexão. Foram consideradas a relação  $X/R$  da impedância equivalente, a tensão equivalente ( $V_{th}$ ) e a capacidade equivalente,  $S_{eq}$ , entendida como:

$$S_{eq} = \frac{V_{th}^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.2)$$

A capacidade equivalente e a impedância equivalente foram calculadas através da tensão equivalente e a corrente de curto circuito trifásico ( $I_{sc3\phi}$ ) medidas em cada nó do alimentador por meio das expressões:

$$S_{eq} = V_{th} \cdot I_{sc3\phi}^* \quad (3.3)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{th}}{I_{sc3\phi}} \quad (3.4)$$

Na determinação do equivalente de Thèvenin as cargas foram consideradas do tipo impedância constante. Note que a corrente de curto-circuito calculada varia de acordo com a carga, portanto, a capacidade equivalente e a impedância equivalente também variam conforme a carga.

Um dos indicadores utilizados para este estudo da inserção de geradores eólicos, no contexto da geração distribuída, foi o nível máximo de inserção de geração eólica relativo à capacidade equivalente, definido por:

$$\rho = \frac{P_n}{S_{eq}} \quad (3.5)$$

Outro indicador da análise é o nível máximo de penetração de geração eólica, ( $k$ ), a qual é dada pela relação entre a potência nominal do parque eólico e a potência instalada no alimentador ( $P_{ins}$ ) como um todo:

$$k = \frac{P_n}{P_{ins}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

A penetração de geração eólica é apresentada em porcentagem da potência instalada no alimentador, representando então a porcentagem da demanda de energia que é suprida pela conexão de geração eólica.

A determinação dos níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica é realizada através de simulações, utilizando os aplicativos Anarede, Matlab e Powerworld, com dois sistemas de distribuição, apresentados nos capítulos 4 e 5.

Considerando que o parque eólico está sujeito ao regime de ventos, e o mesmo é inconstante, a potência gerada pelas turbinas eólicas varia de acordo com a variação do vento, conforme visto na seção 2.4 do capítulo 2. Para levar isto em consideração, assumiu-se que o regime de ventos é tal que a potência de operação do gerador eólico vai desde 20% até 100% de sua potência nominal.

Nesse intervalo de operação do parque eólico exigiu-se que o nível de tensão de regime

permanente permanesse dentro de determinados limites em todos os nós do alimentador de distribuição. A escolha dos níveis de tensão aceitáveis tomou como base as definições Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012b), o qual apresenta os limites de tensão de regime permanente para qualquer tipo de geração conectada ao alimentador de distribuição. A tabela 3.1 apresenta tais limites utilizados como base nas análises.

Assim, buscou-se que as tensões em regime permanente de todos os nós do sistema permaneçam entre 0,93 pu e 1,05 pu em todo o intervalo de operação do parque eólico que vai desde 20 até 100% de sua potência nominal. Este requisito de tensão de regime permanente corresponde ao nível adequado, para as características do alimentador considerado, segundo a definição do PRODIST. Considerando que as tensões nos nós do alimentador poderiam estar dentro dos limites da tensão de regime permanente precária, considerou-se também o requisito das tensões em regime permanente de todos os nós do sistema permaneçam entre 0,9 pu e 1,05 pu. Utilizou-se a seguinte terminologia para referir-se a estes casos:

- Atendimento ao critério de tensão de regime permanente adequado: todos os nós estudados mantém sua tensão de regime permanente no intervalo entre 0,93 e 1,05 pu, para o parque eólico produzindo desde 20 até 100% de sua potência nominal;
- Atendimento ao critério de tensão de regime permanente precário: todos os nós estudadas mantém sua tensão de regime permanente no intervalo entre 0,90 e 1,05 pu, para o parque eólico produzindo desde 20 até 100% de sua potência nominal.

Para cada possibilidade de localização do parque eólico na rede de distribuição, foram analisadas as variações de tensão nos nós do sistema à medida que se aumentou a potência nominal de geração eólica. Se considera que o parque eólico é formado pelo gerador eólico, transformadores e linhas internas do parque conforme será discutido nos capítulos 4 e 5.

As análises foram apresentadas para os valores de inserção e penetração de geração eólica em função das características do nó de conexão (relação  $X/R$  e tensão equivalente), em função do próprio nó de conexão, visando capturar a influência da estrutura do alimentador, em

Tabela 3.1: Faixa de variação de tensão de regime permanente para tensão nominal nos nós do alimentador superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

<i>Tensão de Atendimento (TA)</i>	<i>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)</i>
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

função do carregamento do alimentador e também do número de parques eólicos conectados ao alimentador de estudo.

A determinação de  $\rho$  e  $k$  foi baseada na análise do fluxo de potência continuado, através de uma primeira análise nas curvas de potência por tensão ( $P-V$ ) geradas. Na faixa de variação da geração de potência que vai de  $0, 2P_n$  até  $P_n$  a tensão nos nós do alimentador devia atender aos limites máximos e mínimos adotados, conforme tabela 3.1.

Um exemplo da análise é mostrado na figura 3.6, que apresenta as curvas  $P-V$  quando um parque está conectado a um nó de um sistema de distribuição com cinco nós. Pode-se verificar que as tensões nos nós de estudo permanecem dentro dos limites mínimo e máximo de tensão de regime permanente ( $V_{min}$  e  $V_{max}$  respectivamente) até determinado valor de potência limite ( $P_{lim}$ ), quando pelo menos um dos nós passa a apresentar a tensão menor que o limite mínimo. Esta potência limite equivale à máxima potência de conexão do parque eólico que atende aos limites de tensão de regime permanente adequado ( $V_{min} = 0,93pu$ ).

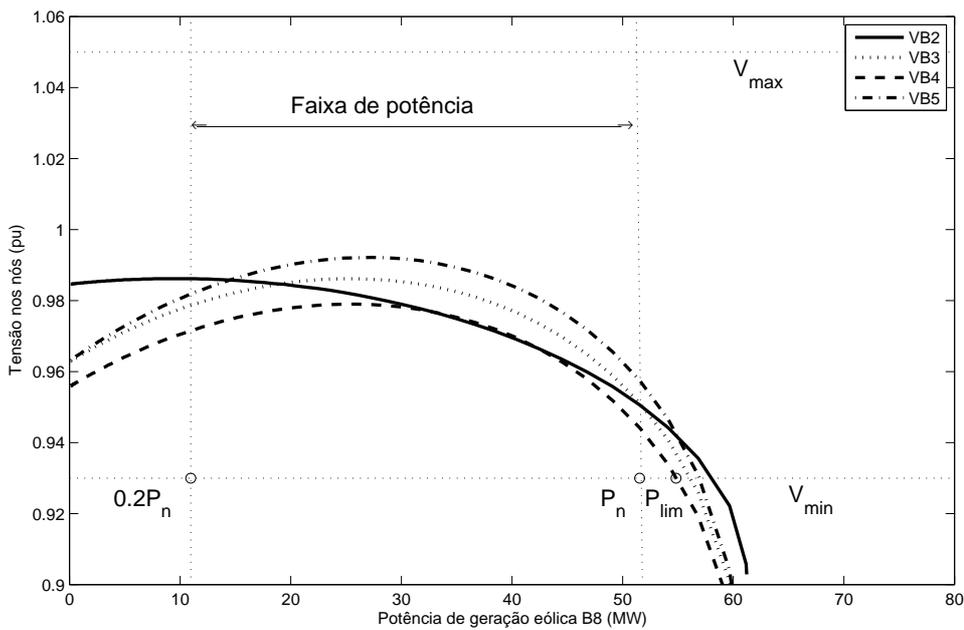


Figura 3.6: Curva  $P-V$  do parque conectado ao nó B5 do sistema 5 nós (carga média).

Para dado ponto de conexão o nível máximo de inserção de geração eólica ( $\rho_{max}$ ) corresponde ao caso de um parque eólico com potência nominal igual a máxima potência nominal possível para a qual os níveis de tensão de regime permanente são respeitados,  $P_{n_{max}} = P_{lim}$ , encontrado através da verificação da curva  $P-V$ . Assim, a equação 3.5 pode ser escrita como:

$$\rho_{max} = \frac{P_{lim}}{S_{eq}} \quad (3.7)$$

Da mesma forma que no caso da determinação do nível de inserção de geração eólica,

buscou-se determinar o nível máximo de penetração de geração eólica ( $k_{max}$ ), que ocorre no mesmo ponto em que o parque eólico com potência nominal igual a máxima potência nominal possível para a qual os níveis de tensão de regime permanente são respeitados,  $P_{nmax} = P_{lim}$ , encontrado através da verificação das curvas  $P - V$ . Assim, a equação 3.6 pode ser descrita por:

$$k_{max} = \frac{P_{lim}}{P_{ins}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

sendo a  $P_{ins}$  a potência total instalada no alimentador.

Desta forma, através da equação 3.8 foi determinada a máxima penetração de geração eólica de acordo com o máximo carregamento do alimentador.

No caso da conexão de dois parques eólicos no mesmo alimentador a metodologia foi similar. Considerou-se que os parques conectados em dois pontos diferentes do alimentador são idênticos e que estão sujeitos às mesmas condições de vento. O fluxo de potência continuado dá origem às curvas  $P - V$ , porém, como os parques são idênticos, a potência limite encontrada equivale ao dobro da potência limite em cada nó de conexão.

Aqui também, para o intervalo de operação dos parques de 20 até 100% de sua potência nominal, as tensões em todos os nós do alimentador estudadas deveriam permanecer dentro dos limites mínimos e máximos da tensão de regime permanente.

Não foi possível neste caso considerar o indicador de máxima inserção de geração eólica, já que cada nó tem uma capacidade equivalente diferente. Porém, a máxima penetração de geração eólica foi analisada uma vez que a potência instalada no alimentador é sempre a mesma.

Nos capítulos a seguir serão apresentados os casos estudados com duas diferentes topologias, nos quais foram aplicados os critérios e metodologia apresentados neste capítulo. O primeiro sistema teste é um alimentador de distribuição com 5 nós, com topologia em malha e sem correção do fator de potência. Este é um alimentador mais simples e com poucos nós para que se tenha uma visão mais clara da metodologia de análise. O segundo sistema teste é um alimentador de distribuição de 32 nós com topologia radial e com correção de fator de potência. Este alimentador auxiliará na comparação e avaliação dos resultados.

### 3.5 Conclusão

Verificou-se neste capítulo que existem diversos requisitos de conexão de sistemas de geração eólica, destacando-se dentre eles o requisito da variação de tensão de regime permanente, utilizado neste trabalho para a determinação dos níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica em alimentadores de distribuição.

Apresentou-se as diferentes abordagens feitas por outros autores assim como a metodologia utilizada para a análise dos alimentadores de distribuição apresentados nos capítulos seguintes.

# Capítulo 4

## Análise da inserção de geração eólica em um alimentador de distribuição com 5 nós

### 4.1 Introdução

Este capítulo trata da análise de inserção e penetração de geração eólica de um parque eólico conectado a um alimentador de distribuição com 5 nós. São observadas as particularidades do alimentador, assim como seus resultados quanto a inserção e penetração de geração eólica com relação a tensão equivalente vista pelo nó de conexão, relação  $X/R$  da impedância equivalente e nó de conexão em três diferentes carregamentos.

São apresentadas também as análises dos limites máximos de penetração de geração eólica de dois parques eólicos conectados no mesmo alimentador.

### 4.2 Alimentador de distribuição de 5 nós

O alimentador de distribuição utilizado para este primeiro estudo da inserção de geração eólica é mostrado na figura 4.1, o qual foi extraído de Holdsworth et al. (2003). Consiste em um alimentador de distribuição de 33 kV, com 5 nós, sendo o nó B1 a subestação de conexão ao sistema de subtransmissão, considerada com tensão de 1,0 pu e sem limitação de capacidade de curto-circuito. Este nó é considerado, portanto, o nó de referência deste alimentador.

Os parâmetros do alimentador são apresentados no apêndice A. A resistência da linha entre os nós B1 e B2 é bastante baixa, apesar da reatância ter valor médio com relação às outras linhas. Observa-se um alto valor de impedância das linhas entre os nós B2 e B3, assim como entre os nós B2 e B5, com relação às outras linhas. As linhas entre os nós B3 e B4 e a linha entre os nós B3 e B5 tem baixo valor de impedância.

As cargas do alimentador somam um total de 52,70 MW e 10,56 MVAR para carga pesada. A partir das cargas pesada e leve definidas por Holdsworth et al. (2003), foi definido um nível

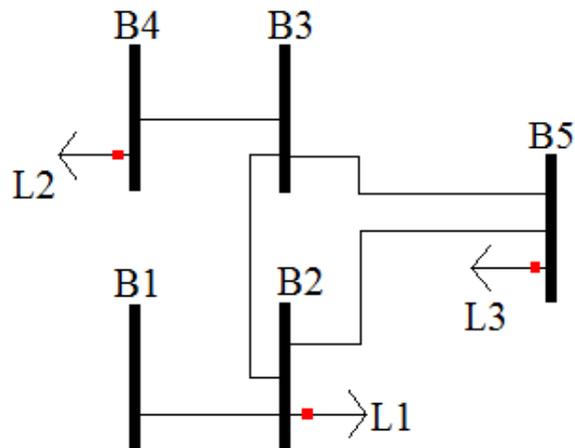


Figura 4.1: Alimentador de distribuição de 5 nós estudado

adicional de carregamento médio do alimentador. Os três carregamentos são definidos na tabela A.2 do apêndice A, sendo que a carga média equivale à metade da carga pesada, enquanto a carga leve é equivalente a 10% da carga pesada. Todas as cargas foram modeladas do tipo potência constante.

Os nós desde B2 a B5 foram tomados como possíveis nós de conexão. Neste sentido, inicialmente buscou-se analisar as características de cada nó a partir do circuito equivalente de Thèvenin visto de cada nó.

Para obtenção dos equivalentes de Thèvenin foram determinadas a tensão equivalente nos nós, a corrente de curto circuito, a impedância equivalente vista por cada nó, e por conseguinte a relação  $X/R$  da impedância equivalente, e a capacidade equivalente em de cada nó.

Os cálculos da tensão equivalente, da capacidade equivalente no nó de conexão do parque eólico e a relação  $X/R$  da impedância equivalente do alimentador foram realizados com auxílio do aplicativo Powerworld e são apresentados na tabela 4.1. Estes dados foram utilizados posteriormente para as análises de máxima inserção e penetração de geração eólica.

Os gráficos da figura 4.2 caracterizam o alimentador quanto ao nível de tensão equivalente e relação  $X/R$  da impedância equivalente vista de cada nó. Observa-se que os nós B3 e B5 têm características e níveis de tensão praticamente iguais. O nó B2 apresenta os maiores níveis de tensão, o que pode ser explicado por sua proximidade ao nó de referência B1. Além disso, o nó B4 é o nó que apresenta maior variação de tensão de acordo com o carregamento.

Uma das características deste sistema é a baixa relação  $X/R$  das linhas comparadas às linhas de transmissão, onde essa relação ultrapassa de 10, exceto o nó de referência. Outra característica particular desse alimentador é a existência de uma malha entre os nós B2-B3-B5, o que não é muito comum em alimentadores de distribuição onde prevalece a topologia radial. Além disso não existem elementos para regular a tensão. Os nós B2, B4 e B5 são nós de carga.

Tabela 4.1: Tensão equivalente, capacidade equivalente e relação  $X/R$  em cada nó e cada carregamento do alimentador de 5 nós.

Cargas	Grandeza	Nó			
		B2	B3	B4	B5
Pesada	Vth (pu)	0,968	0,926	0,912	0,926
	Seq (pu)	5,43	1,92	1,36	1,86
	X/R	5,17	1,75	1,64	1,79
Média	Vth (pu)	0,985	0,963	0,956	0,963
	Seq (pu)	5,53	2,02	1,44	1,96
	X/R	6,64	1,95	1,83	1,99
Leve	Vth (pu)	0,997	0,993	0,991	0,993
	Seq (pu)	5,59	2,10	1,51	2,04
	X/R	8,72	2,15	2,01	2,19

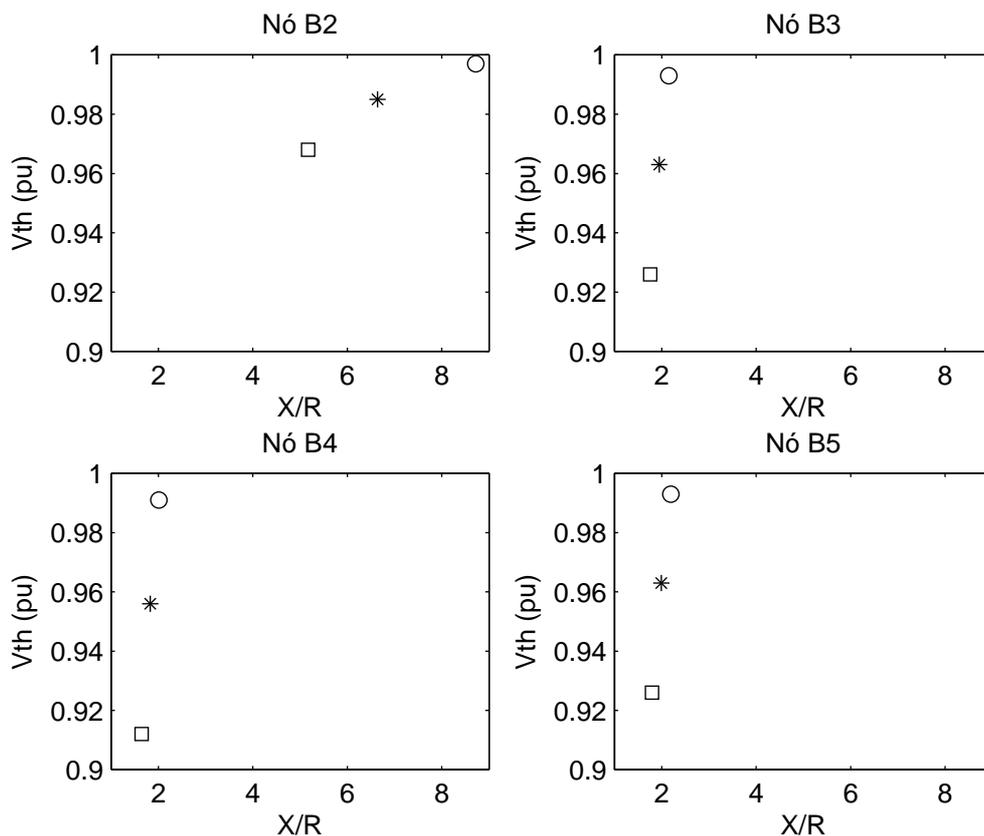


Figura 4.2: Tensão por relação  $X/R$  da impedância equivalente de cada nó para diferentes carregamentos:  $\square$  - carga pesada,  $*$  - carga média e  $\circ$  - carga leve.

Ainda observa-se que a impedância equivalente vista pelo nó B2 tem relação  $X/R$  muito maior que as relações  $X/R$  da impedância equivalente vista pelos outros nós e também entre os diferentes carregamentos há uma grande diferença, que não se repete para os outros nós. Ou seja, a impedância equivalente vista pelo nó B2 varia muito a relação  $X/R$  de acordo com o

carregamento, o que não acontece na impedância equivalente vista pelos outros nós, os quais têm uma relação  $X/R$  bastante menor e mais constante.

Conforme já comentado no capítulo 3, uma relação  $X/R$  da impedância equivalente pequena é uma das características de um sistema de distribuição. Como o nó B2 está muito próximo da conexão ao sistema de subtransmissão, representado pelo nó B1, sua relação  $X/R$  de impedância equivalente é maior.

## 4.3 Caso da conexão de um parque eólico

### 4.3.1 Parque eólico

Esta seção apresenta as características e parâmetros do parque eólico considerado para a conexão ao alimentador de distribuição de 5 nós. O estudo foi realizado para o parque eólico conectado a cada um dos nós do alimentador de distribuição, B2 a B5, da figura 4.1.

A figura 4.3 ilustra a conexão do parque eólico para o caso de conexão ao nó B5 do alimentador de 5 nós. O parque eólico original consiste de 10 turbinas eólicas de 2MW (Holdsworth et al., 2003). Cada turbina é conectada à rede por um transformador com 2,5 MVA 0,69/11 kV com reatância de 5,9%. Para simplificar as análises as 10 turbinas com seus transformadores foram representadas por uma única turbina de potência equivalente à potência total nominal, de 20 MW, e um transformador de 25 MVA 0,69/11 kV com reatância de 5,9%. O circuito interno do parque eólico de 11 kV é representado pela linha entre os nós B7-B6. O parque eólico é conectado à rede de 33 kV através de um transformador de tap manual de 25 MVA 11/33 kV e reatância de 10%, modelado entre os nós B6 e o nó de conexão do parque eólico.

Como o objetivo foi estudar a máxima potência nominal possível de inserção do parque eólico, a conexão à rede foi representada por transformadores de mesma impedância de Holdsworth et al. (2003), porém com maior nível de potência, ficando um transformador equivalente de 50MVA 0,69/11 kV com reatância de 5,9% entre os nós B8 e B7, e o transformador modelado entre o nó B6 e o nó de conexão do parque de 50MVA 11/33 kV e reatância de 10%. A potência de 50MVA foi escolhida por ser compatível com os resultados da máxima inserção e penetração de geração eólica obtidos.

As turbinas do parque eólico foram consideradas com capacidade de regulação da potência reativa, operando com fator de potência unitário, avaliado no nó B8, nó com gerador de potência equivalente ao parque eólico. Considerou-se que a variação de vento possível é compatível com o parque eólico fornecendo desde 20 até 100% de sua potência nominal, dependendo da variação do vento.

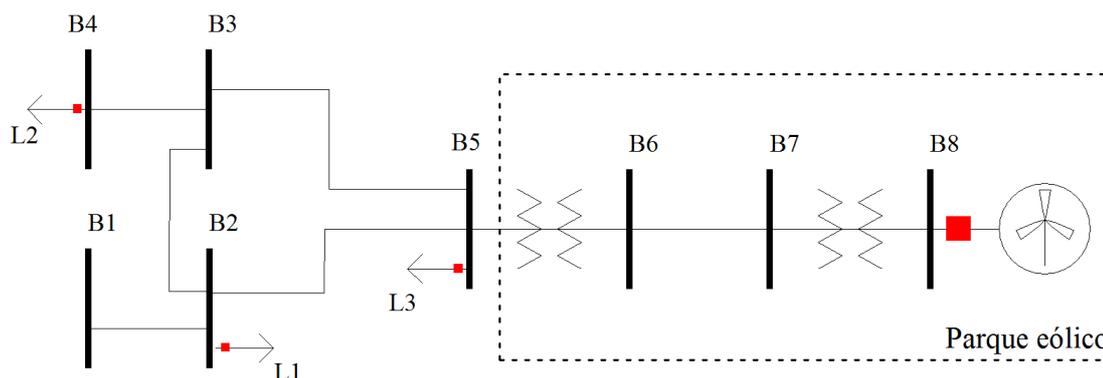


Figura 4.3: Parque eólico conectado ao nó B5 do alimentador de distribuição de 5 nós.

### 4.3.2 Análise da influência na tensão de regime permanente

Esta seção apresenta a análise da influência na tensão de regime permanente devido à inserção de um parque eólico conectado ao alimentador de distribuição de 5 nós. A análise é feita através da observação das curvas  $P - V$  obtidas pelo cálculo do fluxo de potência continuado, conforme metodologia apresentada na seção 3.4.1 do capítulo 3.

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam as curvas  $P - V$  do fluxo de potência continuado do alimentador de 5 nós para os três carregamentos estudados: pesado, médio e leve respectivamente. As curvas foram criadas a partir dos dados do fluxo de potência continuado realizado com auxílio do aplicativo Anarede. Para todos os carregamentos estudados as curvas  $P - V$  mostram não haver ocorrência do problema de sobretensão nos nós do alimentador, somente de subtensão, o que já era esperado dado às características operativas estabelecidas.

Observou-se através da figura 4.4 que quando o parque está conectado ao nó B2 existe uma das curvas de tensão que não atinge em nenhum momento a tensão de regime permanente maior que 0,9 pu (tensão no nó B4), enquanto outras duas também não alcançam os níveis de tensão de regime permanente adequado de 0,93 pu (tensão nos nós B3 e B5). Neste caso não houve nenhuma potência limite que atenda aos critérios de tensão estabelecidos.

Na mesma figura, é possível observar que para o caso do parque conectado ao nó B3, tampouco a tensão no nó B4 alcançou valores maiores que 0,93 pu. Contudo, existe uma potência limite de aproximadamente 34 MW que atendeu ao critério de tensão de regime permanente precário, onde todas as tensões são maiores que 0,9 pu. Vale lembrar que o nível máximo de inserção exigiu que a tensão de regime permanente em todos os nós do alimentador de distribuição satisfaçam os limites pré-estabelecidos de variação para o parque eólico produzindo desde 20 até 100% de sua potência nominal. Neste caso da conexão do parque ao nó B3 em carga pesada, sendo a potência nominal igual a potência limite de 34 MW, o parque deveria satisfazer ao critério de tensão de regime permanente precário na faixa de potência de 6,8 MW a 34 MW. Pode-se observar na figura que para este intervalo, todas as tensões dos nós são maiores que 0,9 pu, satisfazendo tal critério.

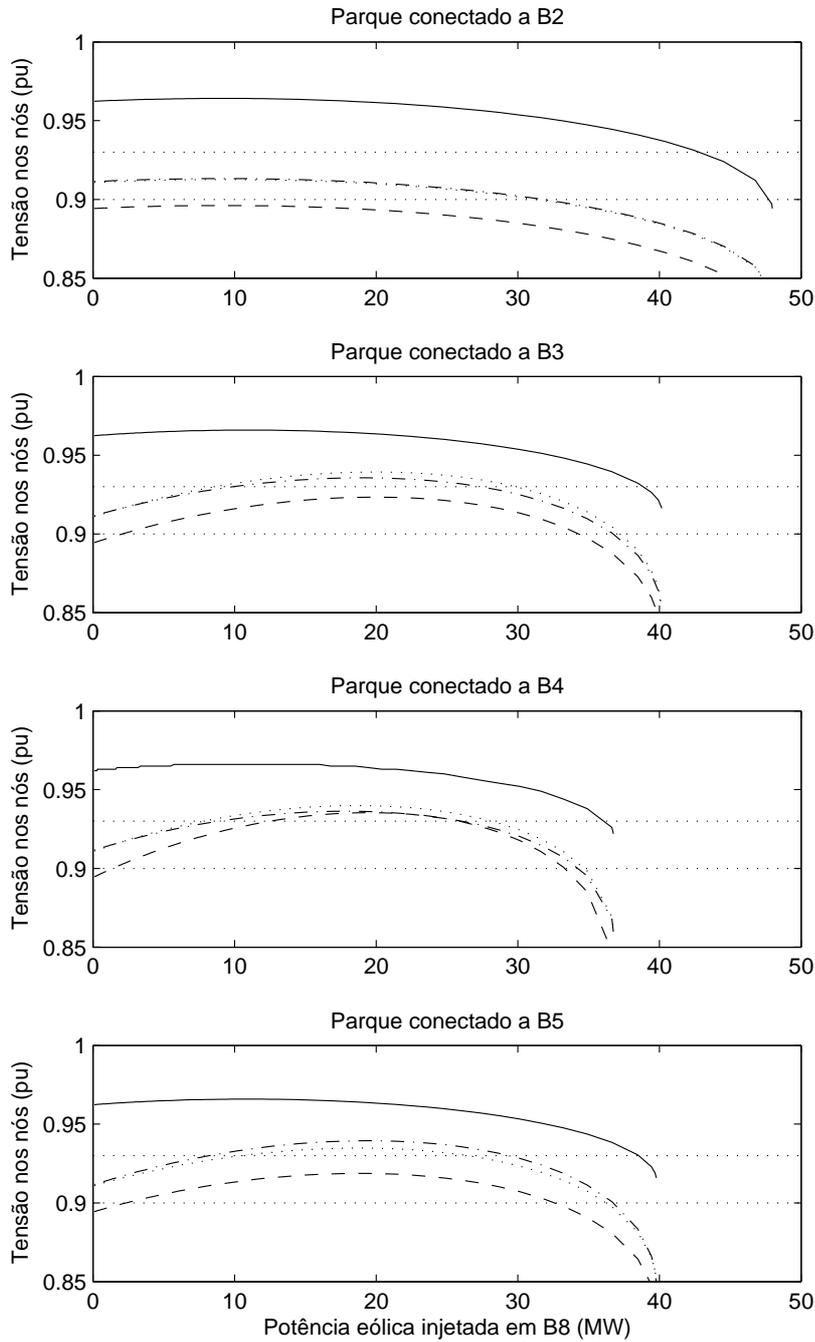


Figura 4.4: Curvas  $P - V$  do parque eólico para carga pesada. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4, linha traço ponto - tensões no nó B5

Da mesma forma que analisados acima os casos da conexão do parque eólico nos nós B2 e B3 nesta figura 4.4, as análises das potências limites nas curvas  $P - V$  para os dois critérios de tensão de regime permanente foram feitas para as demais nós de conexão de carga pesada (B4 e

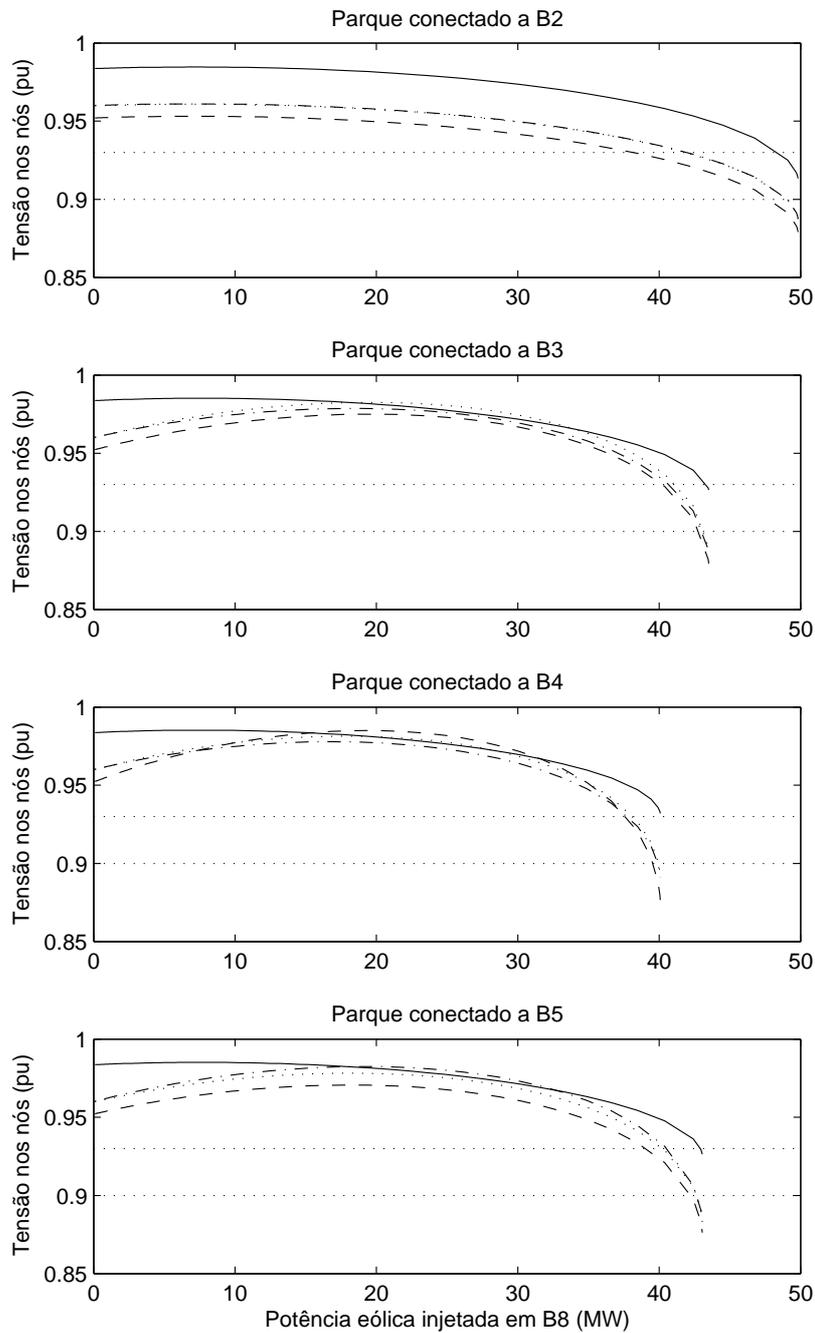


Figura 4.5: Curvas  $P - V$  do parque eólico para carga média. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4, linha traço ponto - tensões no nó B5.

B5), assim como para os carregamentos médio e leve. A tabela 4.2 apresenta as potências limite de inserção de geração eólica para cada critério de tensão estudado, onde  $P_{lim_{ad}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente adequado e  $P_{lim_{pr}}$  é a potência

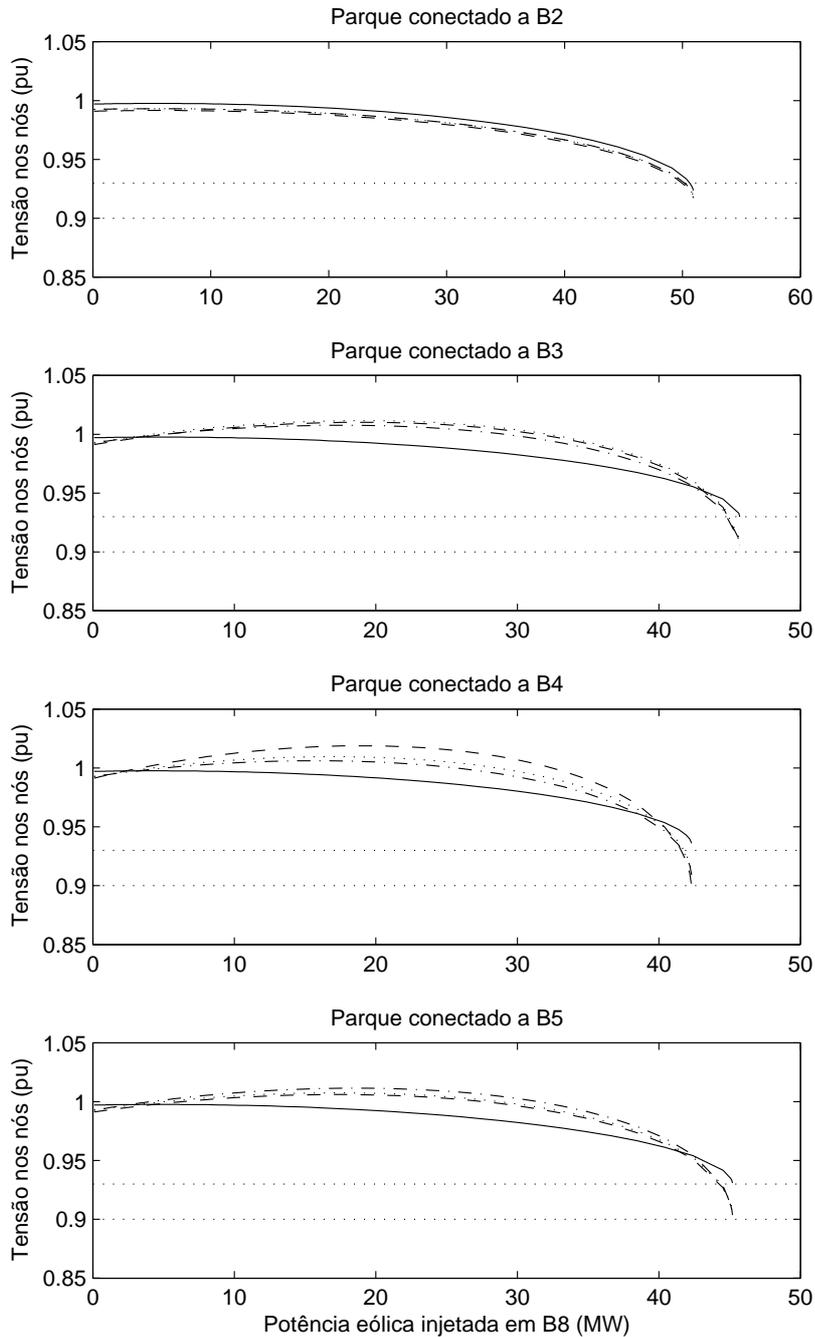


Figura 4.6: Curvas  $P - V$  do parque eólico para carga leve. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4, linha traço ponto - tensões no nó B5.

limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente precário. A sigla NA indica que não houve potência limite que atendesse ao critério.

Tabela 4.2: Potência limite para a conexão de um parque eólico aos diferentes nós do alimentador.

Nó de conexão	Carga pesada		Carga média		Carga leve	
	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)
B2	NA	NA	38,12	47,71	49,95	52,00
B3	NA	34,28	40,18	42,75	44,79	45,72
B4	NA	33,29	37,56	39,54	41,56	42,31
B5	NA	32,57	39,01	42,21	44,25	45,20

Com auxílio das curvas  $P - V$  buscou-se determinar, para os três carregamentos, a máxima potência inserível de geração eólica compatível com os níveis de tensão de regime permanente adequado e precário. Para os casos de carga média e leve observou-se a possibilidade atender aos requisitos de variação de tensão de regime permanente tanto adequado como precário quando a conexão do parque eólico ocorreu em quaisquer nós B2 a B5.

Entretanto, para o caso de carga pesada as características do alimentador não possibilitaram atender ao critério de variação de tensão de regime permanente adequado em nenhum nó de conexão. Para os casos de conexão do parque nos nós B3, B4 e B5 somente observou-se o atendimento ao critério de tensão de regime permanente precário e ainda quando a conexão ocorreu no nó B2 não observou-se nenhuma potência de inserção capaz atender ao critério de variação de tensão de regime permanente precário.

### 4.3.3 Níveis máximos de inserção de geração eólica

Esta seção apresenta os resultados obtidos quanto aos níveis máximos de inserção de geração eólica,  $\rho_{max}$ , considerando a conexão do parque eólico nos nós B2 a B5 do alimentador de distribuição de 5 nós. Os resultados são apresentados em função da nó de conexão e analisados em função da relação  $X/R$  da impedância equivalente vista de cada nó e da tensão equivalente vista de cada nó, além dos três carregamentos considerados.

O cálculo de  $\rho_{max}$  foi realizado com base nos valores das potências limite encontradas na seção anterior, de acordo com a tabela 4.2, assim como a capacidade equivalente vista pelo nó de conexão, conforme a equação 3.7 apresentada na seção 3.4.1 do capítulo 3.

A figura 4.7 mostra a máxima inserção de geração eólica possível respeitando os limites desejados para a tensão de regime permanente precária, conforme o nó de conexão do sistema de geração eólica. Pode-se observar que, para os diferentes níveis de carregamento do alimentador, a conexão do parque eólico no nó B4 atingiu os maiores níveis de inserção enquanto a conexão no nó B2 os menores. Ainda, quando a conexão do parque eólico ocorreu no nó B2, verificou-se

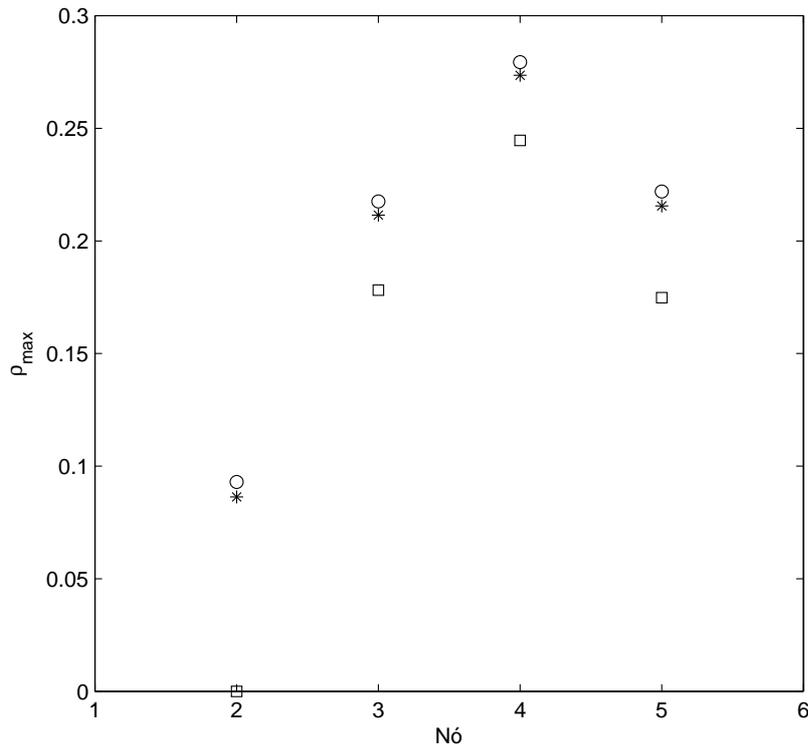


Figura 4.7: Inserção máxima de geração eólica por nó:  $\square$  - carga pesada,  $*$  - carga média e  $\circ$  - carga leve.

a maior variação do nível máximo de inserção em função do carregamento do alimentador.

Observou-se que quanto maior o carregamento do alimentador, menores os níveis máximos de inserção de geração eólica para todos os casos de conexão do parque eólico. Apesar disso, apresentou grande diferença nos níveis máximos de inserção entre os carregamentos, já que os casos de carga leve e média apresentaram níveis de inserção muito próximos enquanto o de carga pesada apresentou valores bem mais baixos. Isto mostrou um comportamento não linear da máxima inserção em relação ao carregamento, do contrário a carga média deveria apresentar valores intermediários de inserção de geração eólica (entre os níveis leve e pesado).

Para identificar os fatores que influenciaram nos valores da máxima inserção de geração eólica obtidos em cada nó de conexão do alimentador, foram avaliados os níveis de inserção máximos em função das características de cada nó de conexão, relação  $X/R$  da impedância e tensão equivalentes vistas de cada nó de conexão (ver tabela 4.1).

A influência da relação  $X/R$  da impedância equivalente é apresentada na figura 4.8, para os três tipos de carga separadamente. Verificou-se que, para os três casos de carregamento do alimentador, o máximo nível de inserção de geração eólica, que ocorreu quando o parque está conectado ao nó B4, correspondeu ao nó de conexão que apresenta a menor relação  $X/R$ . Os níveis de inserção dos nós B3 e B5 foram bastante próximos, provavelmente pelo fato destes

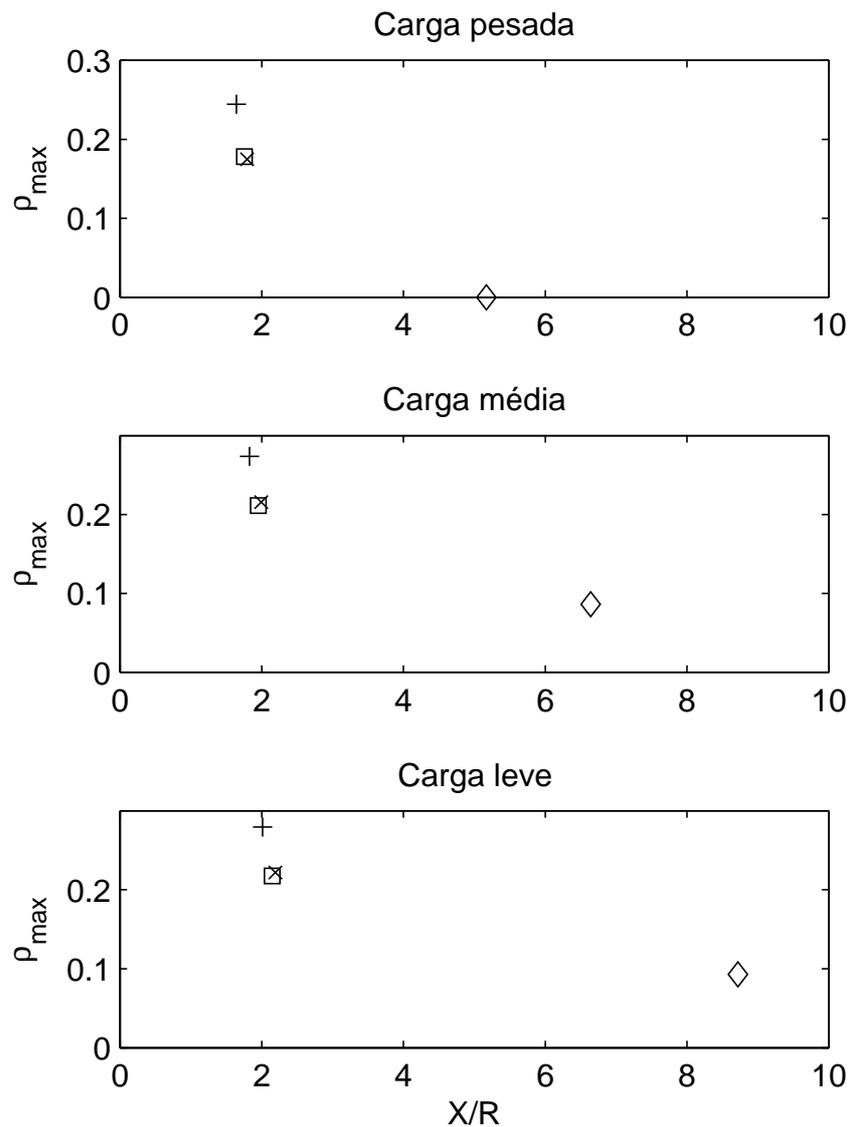


Figura 4.8: Inserção máxima de geração eólica em função de  $X/R$  para o parque eólico conectado ao nó:  $\diamond$  - B2;  $\square$  - B3; + - B4;  $\times$  - B5.

nós apresentarem características bastante próximas, conforme visto na seção 4.2.

De maneira geral  $\rho_{max}$  diminuiu com o aumento da relação  $X/R$ , o que está de acordo com a tendência indicada nos resultados de Reginatto et al. (2009) para os casos de subtensão, os quais se baseiam apenas no modelo máquina barra-infinita visto na figura 3.3 da seção 3.4 do capítulo 3. O caso de carga pesada, entretanto, fugiu a este padrão de comportamento, pois seu valor de máxima inserção de geração eólica, para relação  $X/R$  da impedância equivalente alta, foi nulo, e não somente próximo de zero como se esperaria. Isto provavelmente ocorreu em função da influência da limitação imposta pela tensão em outros nós do alimentador que não o nó de conexão, em especial no caso da conexão do parque eólico no nó B2.

Complementando esta análise, a figura 4.9 apresenta a máxima inserção de geração eólica em função da tensão equivalente nos nós. Notou-se que o nó de conexão que corresponde ao maior valor de máxima inserção de geração eólica foi o nó que apresentou menor tensão de todos em todos os carregamentos. Isto parece estar em desacordo com o comportamento geral esperado, onde a maior inserção deveria ocorrer para tensões mais altas. Entretanto, a influência da tensão equivalente na máxima inserção de geração eólica depende da relação  $X/R$  da impedância equivalente (Reginatto et al., 2009; Reginatto et al., 2008).

Rearranjando algumas curvas  $P - V$  já apresentadas nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 para simplificar a visualização, pode-se observar este comportamento na figura 4.10. Nesta figura podem ser verificadas as curvas da tensão de regime permanente somente no nó B4 em função da

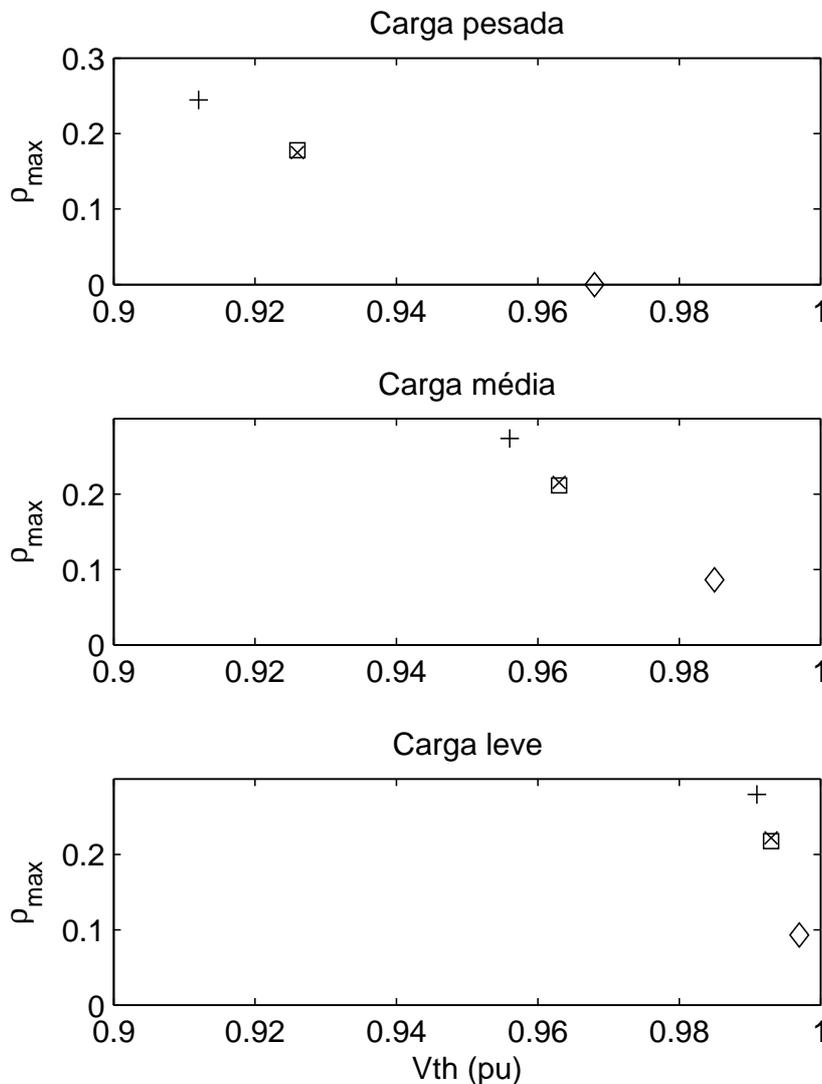


Figura 4.9: Inserção máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó: ◇ - B2; ◻ - B3; + - B4; × - B5.

potência gerada, para os diferentes carregamentos, quando o parque eólico foi conectado nos diferentes nós do alimentador.

Esta figura é importante para explicar-se o detalhe da inserção máxima de geração eólica apresentar-se nula para o caso de carga pesada, observado nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Como já comentado, para carga pesada a tensão de regime permanente não atende aos limites adequados em nenhum dos casos de conexão do parque eólico, com tensão mínima aceitável de 0,93 pu. Nos gráficos da figura 4.10 a linha horizontal traço ponto delimita a mínima tensão de regime permanente aceitável para os níveis precários, 0,9 pu, e foi possível verificar que no caso de carga pesada e conexão do parque no nó B2, a tensão no nó B4 ficou sempre abaixo deste limite. Logo, não houve possibilidade de inserção de geração eólica no nó B2 para este carregamento.

No caso de carga pesada a tensão no nó B4 limitou a inserção de geração eólica para a conexão em todos os nós, inclusive ele mesmo. Por este motivo pode-se dizer que o nó B4 é o mais crítico do alimentador. Notou-se assim a influência da topologia e estrutura do alimentador de distribuição nos níveis máximos de inserção de geração eólica, pois esta leva em conta a variação de tensão e seus limites em todos os nós do alimentador, não apenas no nó de conexão.

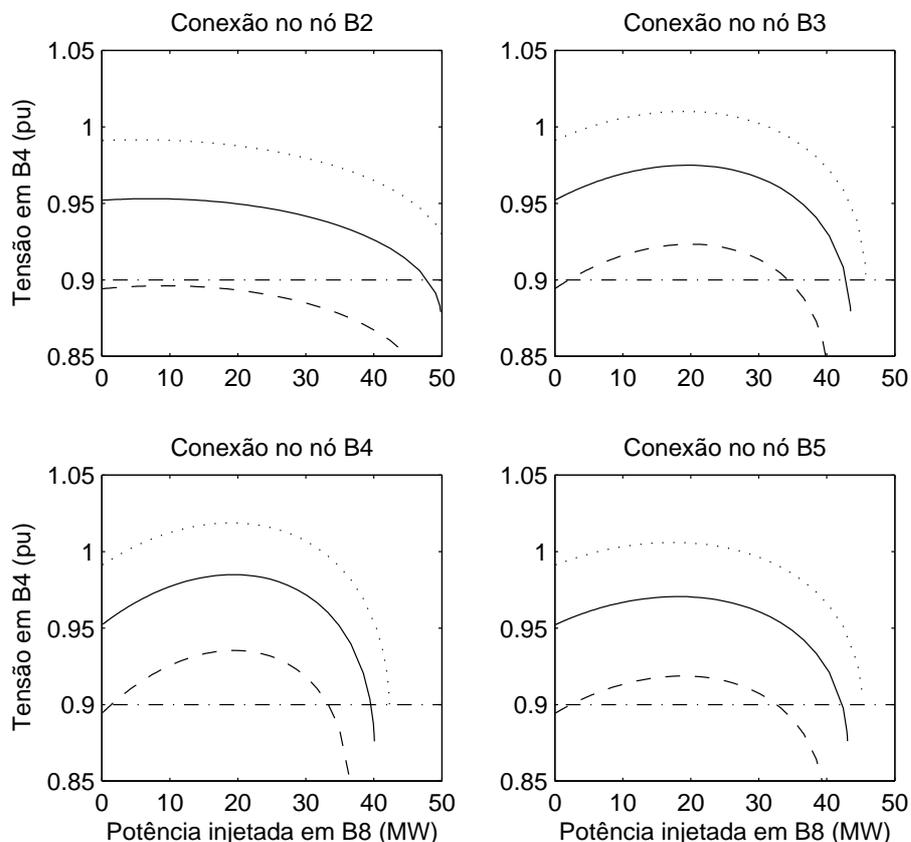


Figura 4.10: Curvas  $P - V$  no nó B4 com conexão do parque eólico em diferentes nós para as cargas: leve - linha pontilhada; média - linha contínua; pesada - linha tracejada.

#### 4.3.4 Níveis máximos de penetração de geração eólica

A seguir são apresentados os resultados e análises relativas à penetração de geração eólica,  $k$ , a qual fornece uma medida relativa à potência instalada no alimentador e não relativa ao nó de conexão, como é o caso do nível de inserção. São apresentados resultados gráficos em função dos diferentes nós de conexão do alimentador, da relação  $X/R$  da impedância equivalente e da tensão equivalente vista em cada nó.

Apresenta-se na figura 4.11 a máxima penetração de geração eólica com relação ao nó de conexão e seus diferentes carregamentos. Através dela observou-se que a máxima penetração de geração eólica diminuiu quanto maior o carregamento do alimentador em todos os nós de conexão. Além disso, a variação da máxima penetração de geração eólica variou muito no próprio nó de conexão de acordo com o carregamento do alimentador. No caso da conexão do parque eólico no nó B2 os casos de carga leve e pesado, por exemplo, foram totalmente opostos, sendo que em carga leve a penetração máxima atingiu quase 100% enquanto em carga pesada é nula a penetração de geração eólica. Nos casos de conexão do parque eólico nos nós B3, B4 e B5 existiu também grande diferença de penetração com relação à carga, maiores em alguns casos e menores no outro.

Uma característica que ocorreu nos quatro casos de conexão foi a falta de linearidade com relação ao carregamento. Seria esperado que a carga média, que equivale a 50% da carga

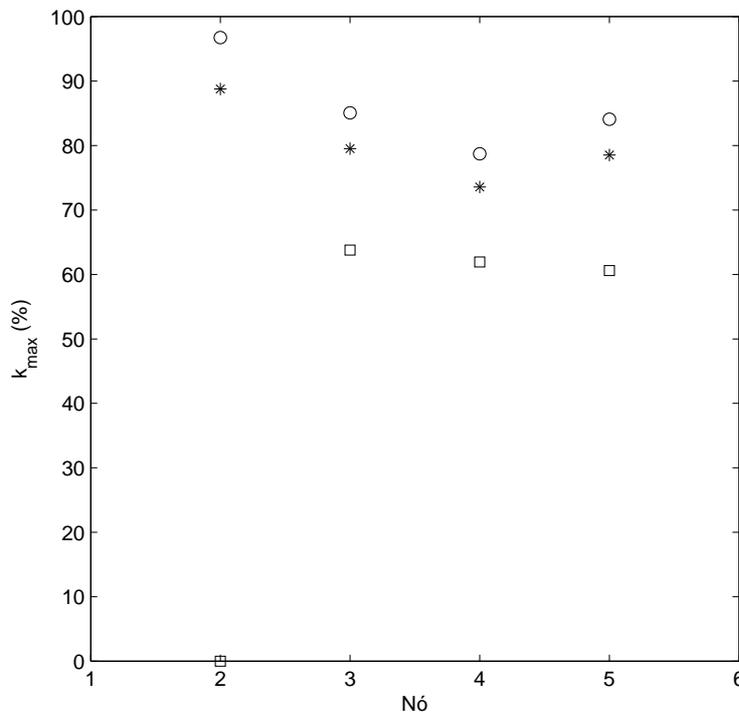


Figura 4.11: Penetração máxima de geração eólica por nó: □ - carga pesada, \* - carga média e ○ - carga leve

pesada, tivesse um valor de máxima penetração de geração eólica intermediário à carga pesada e a carga leve, que corresponde a 10% da carga pesada. No entanto, as cargas média e leve tiveram níveis máximos de penetração de geração eólica muito próximos entre si e distantes do caso da carga pesada.

Uma vez que a penetração de geração eólica representa a quantidade de potência eólica injetada no nó com relação à potência instalada do alimentador, ela pode ser vista como um indicador do atendimento da demanda do alimentador, conforme comentado na seção 3.4.1 do capítulo 3. Observou-se que no caso de carga pesada a penetração máxima foi de aproximadamente 64% para o caso da conexão do parque eólico no nó B3, ou seja, só foi possível atender no máximo aproximadamente 64% da demanda do alimentador com a geração eólica quando o parque foi conectado no nó B3. Quando o parque foi conectado aos outros nós, este valor foi ainda menor, ou nulo, como no caso particular da conexão do parque eólico no nó B2. Mesmo nos casos do alimentador em carga média e nos casos do alimentador em carga leve, onde a carga é bem menor, a demanda total do alimentador não pôde ser atendida pela geração eólica. A maior penetração de geração eólica observada ocorreu no caso de carga leve, ligeiramente inferior a 100%, quando o parque eólico foi conectado ao nó B2.

Embora não seja indicado na figura, comparando-se a máxima penetração de geração eólica com a carga instalada em cada nó, concluiu-se que em todos os casos se consegue atender a demanda da carga do nó de conexão (ver tabelas A.2 e 4.2). A maior carga, instalada no nó B2, é sempre menor que as potências limite encontradas em qualquer um dos carregamentos .

Observou-se ainda que o caso da conexão do parque eólico no nó B4 apresentou a menor penetração de geração eólica para as cargas leve e média, embora uma das maiores no caso de carga pesada. Mais uma vez se verificou o comportamento não linear da máxima penetração de geração eólica em função do carregamento do alimentador.

Comparando-se as figuras 4.7 e 4.11 podem ser estabelecidas relações entre a máxima inserção e penetração de geração eólica. Conforme visto na figura 4.7, quando a conexão do parque eólico ocorreu no nó B4, encontraram-se os maiores níveis de inserção de geração eólica. Entretanto, de acordo com a figura 4.11 observou-se a menor penetração de geração eólica quando o parque foi conectado a este mesmo nó. Dessa maneira, verificou-se que localmente o nó pode possibilitar conexão com elevado nível de inserção frente à capacidade do nó, mas ela não necessariamente foi representativa frente a demanda do alimentador. Já quando a conexão ocorreu no nó B2, ocorreu o inverso, um nível baixo de inserção de geração eólica frente à capacidade do nó, mas grande penetração de geração eólica.

Voltando-se a análise para os efeitos da relação  $X/R$  da impedância equivalente vista em cada nó sobre a penetração máxima de geração eólica, a figura 4.12 mostrou que a conexão do parque eólico no nó B3 foi a que levou a maiores valores da máxima penetração de geração eólica dentre as mais regulares, apesar de não ser a mais alta em todos os casos.

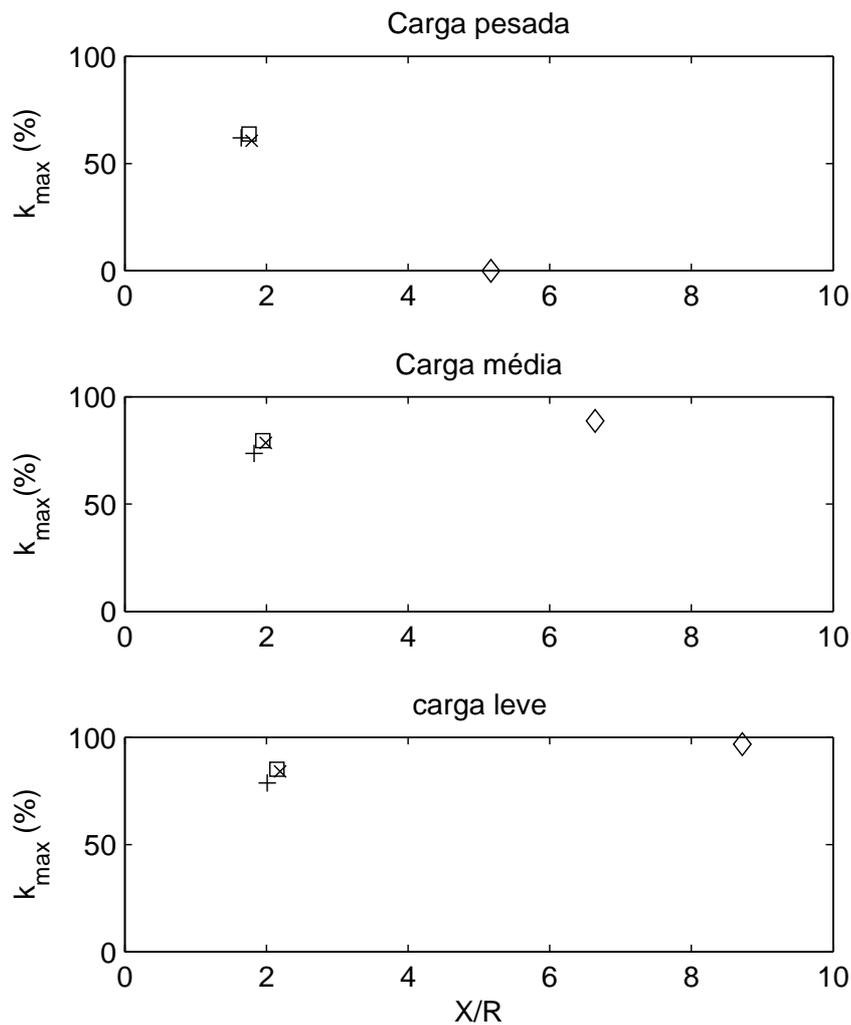


Figura 4.12: Penetração máxima de geração eólica em função de  $X/R$  para o parque eólico conectado ao nó:  $\diamond$  - B2;  $\square$  - B3;  $+$  - B4;  $\times$  - B5.

Observou-se ainda que a grande variação da máxima penetração de geração eólica, quando o parque foi conectado ao nó B2 para os diferentes carregamentos, deve-se também ao fato de apresentar na conexão deste nó uma relação  $X/R$  da impedância equivalente que variou muito com o carregamento.

A relação  $X/R$  da impedância equivalente vista em cada nó não evidenciou influência significativa sobre a máxima penetração de geração eólica, pois valores bastante distintos da relação  $X/R$  levaram a valores próximos da máxima penetração de geração eólica, conforme pôde ser observado nos casos de conexão do parque com alimentador em cargas média ou leve.

A figura 4.13 apresenta a relação da máxima penetração de geração eólica com a tensão equivalente vista em cada nó do alimentador. Através dela observou-se a mais baixa tensão equivalente no nó B4 para todos os carregamentos.

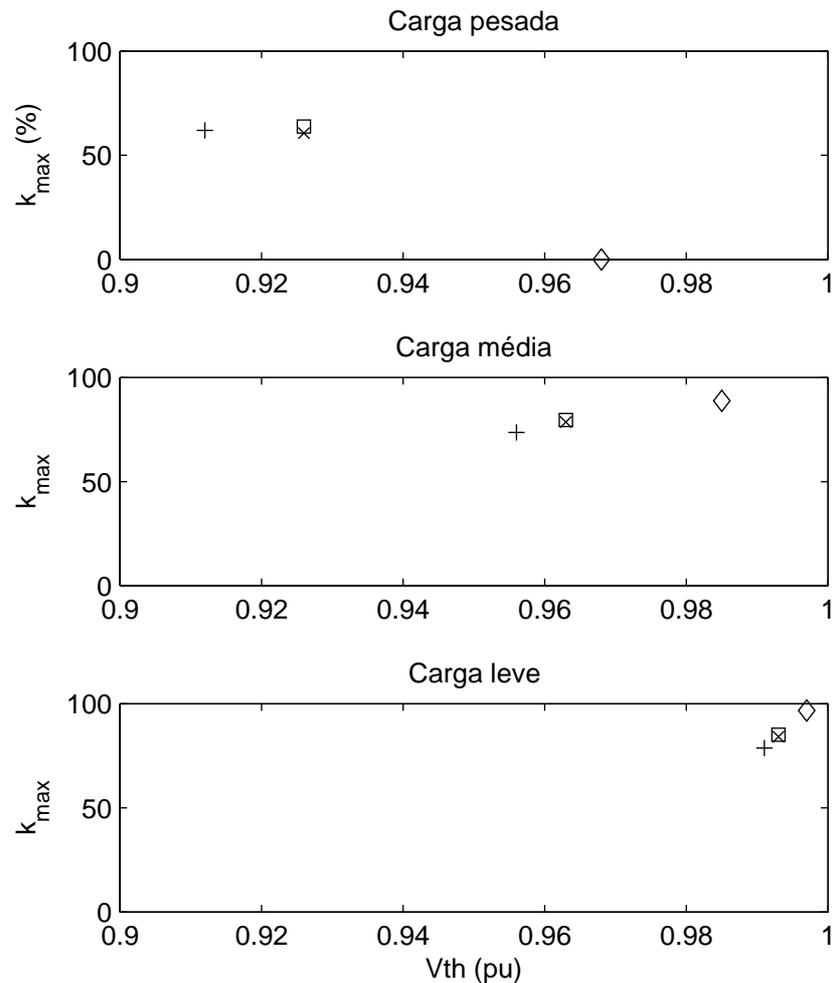


Figura 4.13: Penetração máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó:  $\diamond$  - B2;  $\square$  - B3;  $+$  - B4;  $\times$  - B5.

Além disso, foi possível visualizar que quanto menores as tensões observadas menor a máxima penetração de geração eólica, salvo no caso da conexão do parque eólico no nó B2. Ou seja, observou-se maior penetração de geração eólica para nós de maior tensão, já que assim atenderiam mais adequadamente os limites de tensão de regime permanente devido a suas características elétricas. A conexão do parque no nó B2 fugiu a este raciocínio devido a grande variação da relação  $X/R$  da impedância equivalente para os diferentes carregamentos, conforme já comentado.

#### 4.3.5 Comparação dos resultados com o modelo máquina barra-infinita

Esta seção apresenta um comparativo entre os resultados obtidos nas análises da conexão de um parque eólico ao alimentador de distribuição de 5 nós e o modelo máquina barra-infinita de Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008), apresentado na figura 3.2 do capítulo 3.

Se o modelo máquina barra-infinita fosse considerado para as análises de máxima inserção de geração eólica seria o mesmo que considerar somente as variações das tensões de regime permanente no nó de conexão do parque eólico e desconsiderar todas as tensões nos outros nós do alimentador. O nível máximo de inserção de geração eólica seria determinado apenas pelo equivalente visto de cada nó de conexão e a tensão observada seria somente a do próprio nó de conexão. Neste caso, os níveis máximos de inserção previstos seriam maiores, em alguns casos, como pode ser observado na figura 4.14.

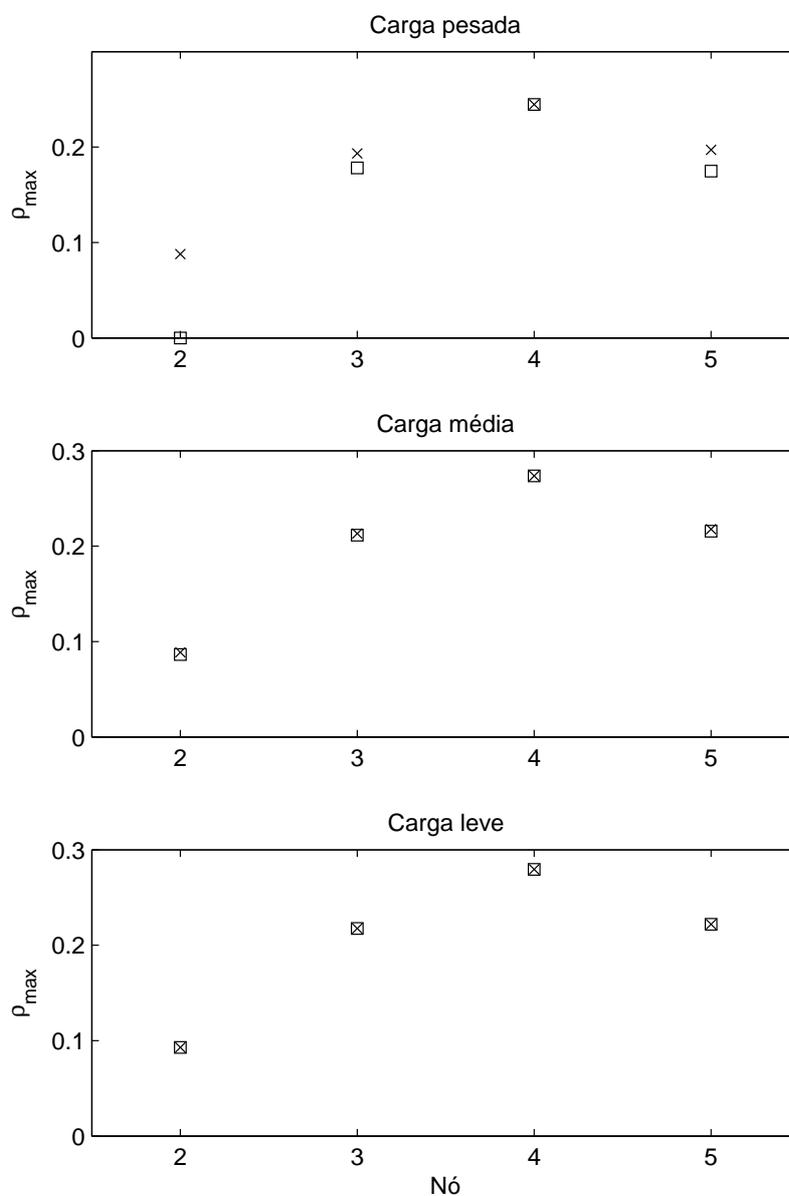


Figura 4.14: Inserção máxima de geração eólica por nó:  $\square$  para os limites de tensão em todos os nós do alimentador e  $\times$  para os limites de tensão vistos do próprio nó de conexão.

Nesta figura 4.14 não foram observadas diferenças entre a máxima inserção de geração eólica com relação à tensão em todos os nós ou para os limites vistos do próprio nó de conexão no caso de carga leve. Para o caso de carga média as diferenças foram quase insignificantes. No caso de carga pesada foram observadas diferenças significativas a menos da conexão do parque eólico no nó B4. No caso da conexão do parque eólico no nó B2, por exemplo, que não foi possível considerar inserção de geração eólica atendendo as tensões de regime permanente em todos os nós do alimentador, se dependesse apenas da tensão neste nó haveria inserção de geração eólica possível.

Dessa forma, verificou-se que considerar o modelo equivalente visto do nó de conexão na determinação do máximo nível de inserção de geração eólica no caso de sistemas de distribuição, como é feito para sistemas de transmissão estudados em Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008) que utilizam o modelo máquina barra-infinita, pode levar a resultados incorretos (maiores) da máxima inserção de geração eólica.

## 4.4 Caso da conexão de dois parques eólicos

Em nenhum dos casos de carga pesada analisados na seção 4.3.4 foi possível atender mais de 64% da demanda do alimentador através da geração eólica instalada e nos outros carregamentos também não foi possível atender 100% da demanda do alimentador. Contudo, foi considerada a instalação de apenas um parque eólico no alimentador. Nesta seção é interessante verificar a influência de mais de um parque conectado ao mesmo alimentador a fim de atender a demanda total do mesmo e observar a influência destas conexões na tensão de regime permanente dos nós do alimentador.

Assim, foi analisada a influência da instalação de dois parques eólicos no mesmo alimentador na tensão de regime permanente, com vistas à determinação da máxima inserção e penetração de geração eólica. Optou-se por utilizar dois parques acreditando que estes já seriam suficientes para atender a demanda do alimentador de 5 nós estudado e que a influência de mais de dois parques poderá ser analisada futuramente.

Conforme comentado na seção 4.3.1, a conexão do parque eólico no nó B2 não permitia atender nem mesmo o critério de tensão de regime permanente precário. A conexão do parque eólico no nó B3 não atendia aos requisitos de tensão de regime permanente adequado, somente precário. Da mesma forma ocorreu para a conexão do parque no nó B5. Já a conexão do parque no nó B4 atendia aos limites de tensão de regime permanente adequado, contudo não atendia à demanda do alimentador.

Visando a verificação dos novos níveis máximos de inserção de geração eólica, foram analisadas as seis combinações possíveis de conexão de geração eólica de dois em dois nós neste alimentador de estudo. Os casos para o alimentador estão descritos na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Casos de combinação de conexão de dois parques eólicos nos diferentes nós do alimentador.

<i>Caso</i>	<i>Nó de conexão 1</i>	<i>Nó de conexão 2</i>
1	B2	B3
2	B2	B4
3	B2	B5
4	B3	B4
5	B3	B5
6	B4	B5

Optou-se por considerar nesta análise somente o caso do alimentador de 5 nós em carga pesada, uma vez que este apresentou-se como o caso mais crítico na conexão de apenas um parque.

#### 4.4.1 Parques eólicos

A figura 4.15 apresenta o diagrama unifilar do alimentador para o caso 5 da tabela 4.3. O alimentador onde foram conectados os parques é o mesmo descrito na seção 4.2 e os parques também são idênticos ao descrito na seção 4.3.1. Nesta análise considerou-se que os dois parques eólicos conectados são idênticos. Considerou-se ainda que a potência gerada por cada parque eólico pode variar desde 20 até 100% de sua potência nominal ( $P_n$ ).

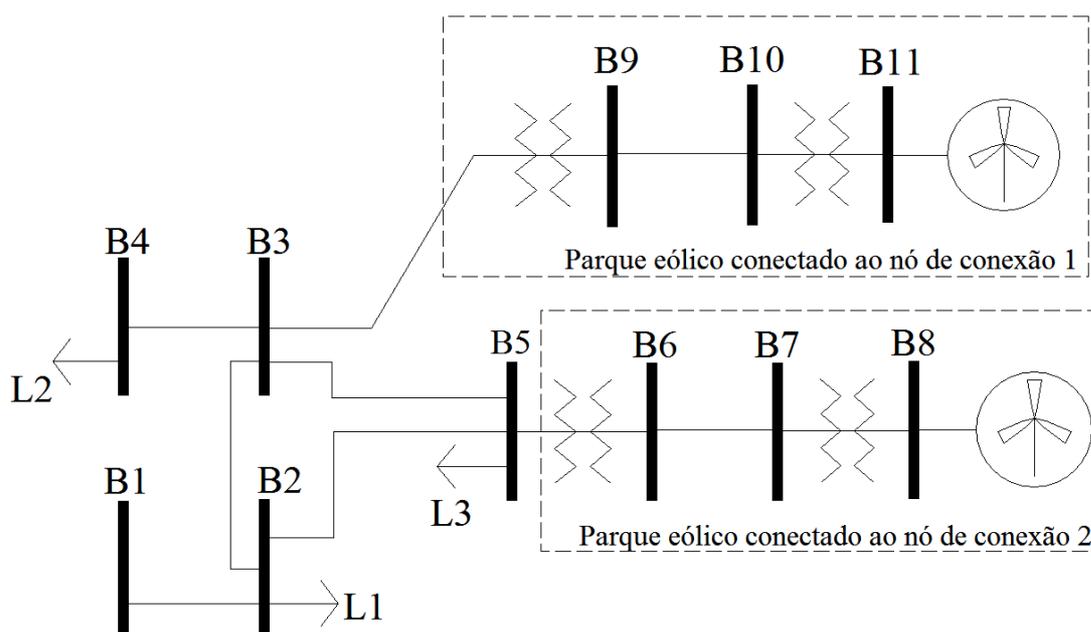


Figura 4.15: Alimentador com dois parques eólicos conectados aos nós B3 e B5

#### 4.4.2 Análise da influência na tensão de regime permanente

Nesta primeira análise foi estudado o perfil de tensão de regime permanente em função da potência gerada pelos parques eólicos. Considerou-se que os dois parques eólicos variam sempre com a mesma potência, ou seja, estavam sujeitos às mesmas condições de ventos.

A figura 4.16 apresenta as curvas  $P - V$  de cada caso estudado conforme descritos na tabela 4.3, que indicam a tensão nos nós do alimentador em função da potência eólica injetada nos nós B8 e B11 do parque eólico. Em nenhum dos carregamentos estudados as curvas  $P - V$  indicaram haver ocorrência do problema de sobretensão nos nós do alimentador, somente de subtensão.

Observou-se nesta figura, no caso 1 por exemplo, que a potência limite para atendimento da tensão de regime permanente adequada seria em torno de 74 MW instalados no total. Considerando a potência limite igual a potência nominal do parque eólico, para verificar que este limite de potência era aceitável, os parques deveriam permanecer com as tensões acima de 0,93 pu no intervalo de 20 a 100% dessa potência, ou seja, no intervalo 14,8 a 74 MW. Porém, neste limite inferior de potência, a tensão no nó B4 ainda era mais baixa que 0,93 pu. O mesmo ocorreu para o caso 3, onde o intervalo seria de 13 a 65 MW aproximadamente, já que a potência limite verificada neste caso foi de aproximadamente 65MW. Contudo, a tensão no nó B4 só atingiu 0,93 pu para potências acima de aproximadamente 20 MW, então quando o parque estiver gerando entre e 20 e 30% de sua potência nominal as tensões de regime permanente

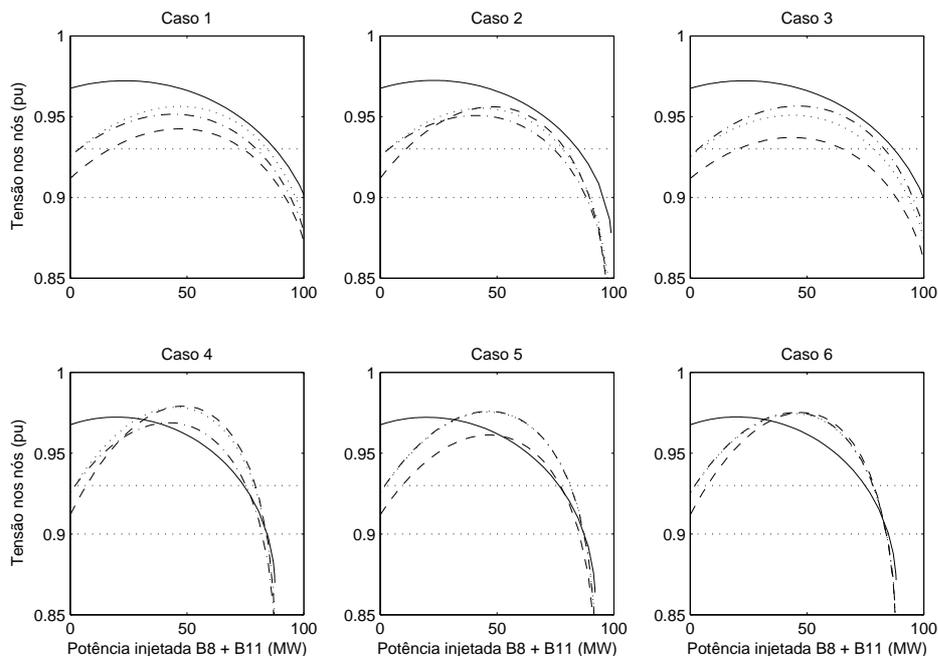


Figura 4.16: Curvas  $P - V$  dos parques combinados conectados ao alimentador de 5 nós em carga pesada. Linha contínua - tensões no nó B2, linha pontilhada - tensões no nó B3, linha tracejada - tensões no nó B4 e linha traço ponto: tensões no nó B5 para cada caso.

estarão abaixo dos limites estabelecidos. Portanto, nos casos 1 e 3 não foi possível atender aos limites de tensão de regime permanente adequado, já que não atenderam aos limites de tensão em todo o intervalo que vai de 20 a 100% de  $P_n$ .

Entretanto, todos os casos atenderam aos limites de tensão de regime permanente precário dentro deste mesmo intervalo. Este fato ocorreu inclusive nas combinações realizadas com um parque eólico no nó B2 conectado ao alimentador. Vale lembrar que para este carregamento não era viável a inserção de geração eólica se a conexão ocorresse somente naquele nó. Foi possível verificar através dos casos 1, 2 e 3, que envolvem a conexão de um dos parques no nó B2, que existiu a possibilidade de inserção de geração eólica por este nó, assim como, no caso 2, foi possível atender até mesmo limites de tensão de regime permanente adequado, em consequência da conexão de dois parques no mesmo alimentador.

A tabela 4.4 apresenta os valores encontrados para as potências limites para cada nível de tensão estudado, onde  $P_{lim_{ad}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente adequado e  $P_{lim_{pr}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente precário. A sigla NA indica que não houve potência limite que atendesse ao critério. Estas potências equivalem ao total inserido no alimentador, ou seja, para este cenário onde os dois parques estão variando com a mesma potência, a potência conectada à cada nó do alimentador é equivalente à metade desta potência descrita na tabela.

Neste primeiro teste realizado foram analisadas as conexões dos parques eólicos para cada caso da tabela 4.3 produzindo sempre a mesma potência. Contudo, esta consideração pode não se aproximar da real, já que nem sempre os parques estão sujeitos aos mesmos ventos (intensidade, velocidade, direção etc). Foram analisados então, dentro de cada caso da tabela 4.3, outros novos seis cenários, descritos na tabela 4.5. Nestes cenários um dos parques fica fixo em determinada potência e o outro varia sua potência gerada de acordo com os ventos, procurando representar situações em que os parques estão sujeitos a ventos distintos. Assim, esta análise foi feita visando preencher uma maior quantidade de possibilidades de geração combinada que não somente quando os dois parques estão produzindo a mesma potência.

Tabela 4.4: Limites de potência para os casos combinados dos parques eólicos do alimentador 5 nós.

<i>Caso</i>	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)
1	NA	92,085
2	74,253	88,200
3	NA	88,175
4	74,245	82,028
5	76,504	85,217
6	74,794	83,880

Tabela 4.5: Subcasos da conexão dos parques combinados no sistema de 5 nós.

<i>Cenário</i>	<i>Nó de conexão 1</i>	<i>Nó de conexão 2</i>
A	Fixo em 20% $P_n$	Variando de 20 a 100% $P_n$
B	Fixo em 50% $P_n$	Variando de 20 a 100% $P_n$
C	Fixo em 100% $P_n$	Variando de 20 a 100% $P_n$
D	Variando de 20 a 100% $P_n$	Fixo em 20% $P_n$
E	Variando de 20 a 100% $P_n$	Fixo em 50% $P_n$
F	Variando de 20 a 100% $P_n$	Fixo em 100% $P_n$

A verificação do atendimento aos limites desejados para a tensão de regime permanente foi feita da seguinte forma:

1. Das curvas  $P - V$  obtidas com os dois parques eólicos variando em conjunto a potência gerada foram verificados os limites de potência possíveis atendendo aos critérios de tensão de regime permanente adequado e precário (tabela 4.4).
2. Fixou-se a potência nominal de um dos parques eólicos, segundo a potência limite obtida no item anterior, conforme o caso da tabela 4.5, e variou-se a potência do outro parque de 0,2 a 1 pu da potência nominal.
3. Se a nova potência limite encontrada fosse maior que a potência nominal fixada no item 2, este teste atendia aos limites de tensão de regime permanente. Assim, os valores encontrados no primeiro teste seriam confirmados como limites de potência inserível no alimentador. Caso contrário, poderia ser testada uma nova potência limite inferior buscando uma que atendesse aos critérios de tensão de regime permanente.

Para cada caso das combinações apresentadas na tabela 4.3 são apresentadas nas figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 as curvas  $P - V$  dos 6 cenários apresentados na tabela 4.5, mostrando com um  $\times$  o valor da potência limite de cada caso retirada da análise da figura 4.16. Como em alguns casos não houve potência a ser inserida que atendesse ao critério de tensão de regime permanente adequada, uniformizou-se a análise considerando somente os limites de potência de acordo com o critério de tensão de regime permanente precário.

Da análise do método considerando os 6 cenários da tabela 4.5 para cada caso, observou-se que:

- Caso 1 - De acordo com a figura 4.17, a potência limite de 46,04 MW, referente ao atendimento dos limites precários de tensão de regime permanente quando dois parques variam em conjunto a potência gerada, permaneceu com os níveis de tensão de regime permanente sendo atendidos para todos os cenários estudados. Assim sendo, atendeu ao teste.

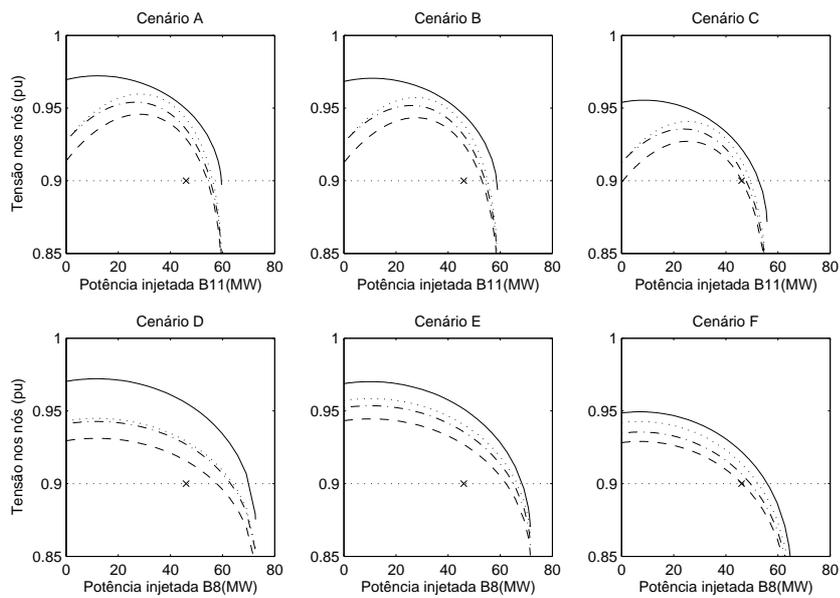


Figura 4.17: Curvas  $P-V$  para a conexão dos parques eólicos nos nós B2 e B3 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5.

- Caso 2 - De acordo com a figura 4.18, a potência limite de 44,10 MW, referente ao atendimento dos limites precários de tensão de regime permanente quando dois parques variam em conjunto a potência gerada, permaneceu com os níveis de tensão de regime permanente sendo atendidos para todos os cenários estudados. Assim sendo, atendeu ao teste.

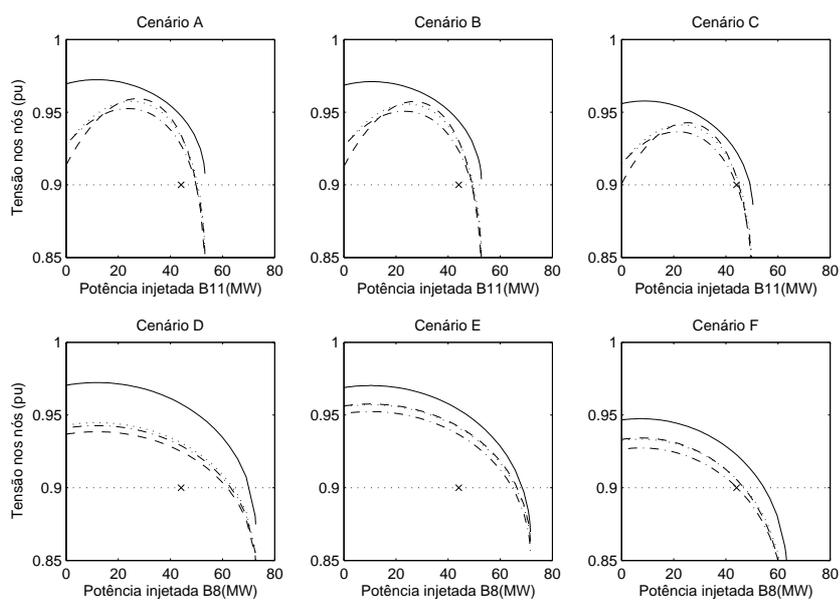


Figura 4.18: Curvas  $P-V$  para a conexão dos parques eólicos nos nós B2 e B4 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5

- Caso 3 - De acordo com a figura 4.19, a potência limite de 44,09 MW, referente ao atendimento dos limites precários de tensão de regime permanente quando dois parques variam em conjunto a potência gerada, permaneceu com os níveis de tensão de regime permanente sendo atendidos para todos os cenários estudados. Assim sendo, atendeu ao teste.
- Caso 4 - De acordo com a figura 4.20, a potência limite de 41,01 MW, referente ao atendimento dos limites precários de tensão de regime permanente quando dois parques variam em conjunto a potência gerada, permaneceu com os níveis de tensão de regime permanente sendo atendidos para todos os cenários estudados. Assim sendo, atendeu ao teste.
- Caso 5 - De acordo com a figura 4.21, a potência limite de 42,61 MW, referente ao atendimento dos limites precários de tensão de regime permanente quando dois parques variam em conjunto a potência gerada, permaneceu com os níveis de tensão de regime permanente sendo atendidos para todos os cenários estudados. Assim sendo, atendeu ao teste.
- Caso 6 - De acordo com a figura 4.22, a potência limite de 41,94 MW, referente ao atendimento dos limites precários de tensão de regime permanente quando dois parques variam em conjunto a potência gerada, permaneceu com os níveis de tensão de regime permanente sendo atendidos para todos os cenários estudados. Assim sendo, atendeu ao teste.

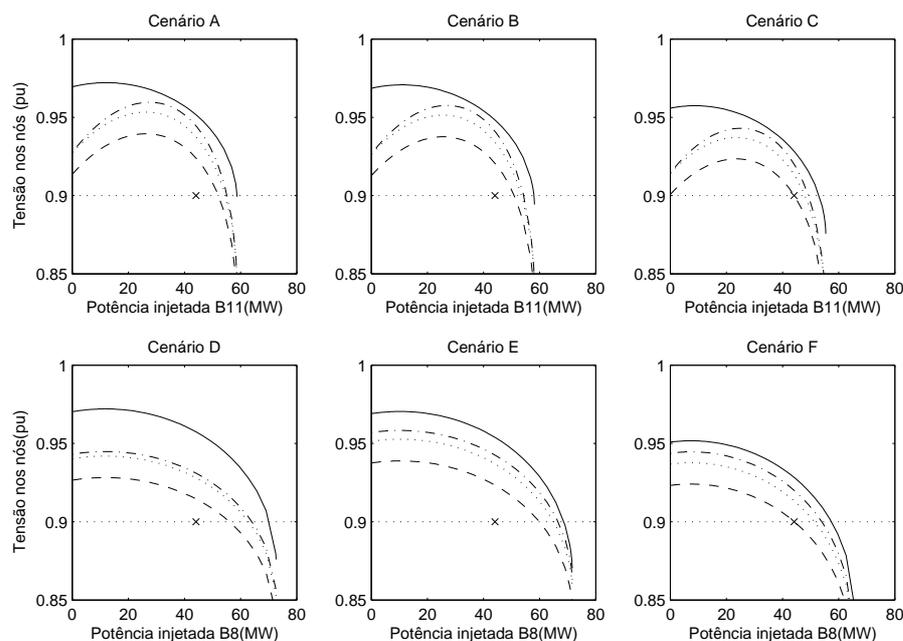


Figura 4.19: Curvas  $P-V$  para a conexão dos parques eólicos nos nós B2 e B5 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5.

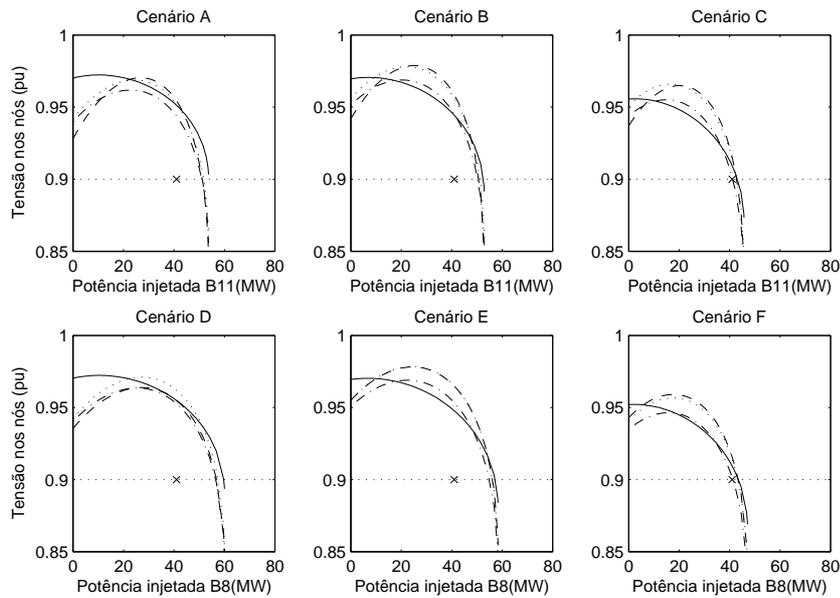


Figura 4.20: Curvas  $P-V$  para a conexão dos parques eólicos nos nós B3 e B4 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5.

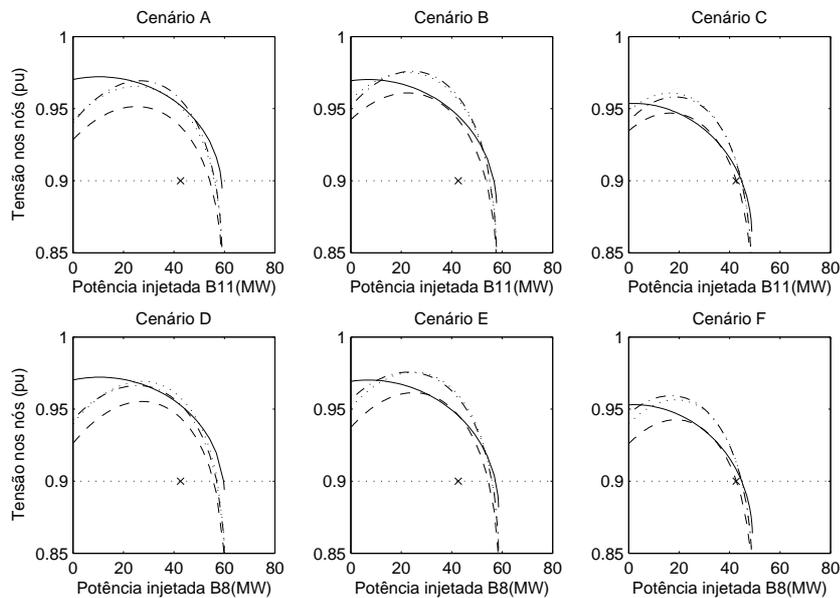


Figura 4.21: Curvas  $P-V$  para a conexão dos parques eólicos nos nós B3 e B5 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5.

Observou-se que os cenários mais críticos, dentre os escolhidos da tabela 4.5, foram os que apresentam um dos parques operando a 100% da potência nominal do parque eólico enquanto o outro estava a 20% dela (cenários C e F). Entretanto, apesar de muito próximos dos valores de potência limite considerada para a análise, as potências limites nestas configurações não excederam os limites verificados na tabela 4.4.

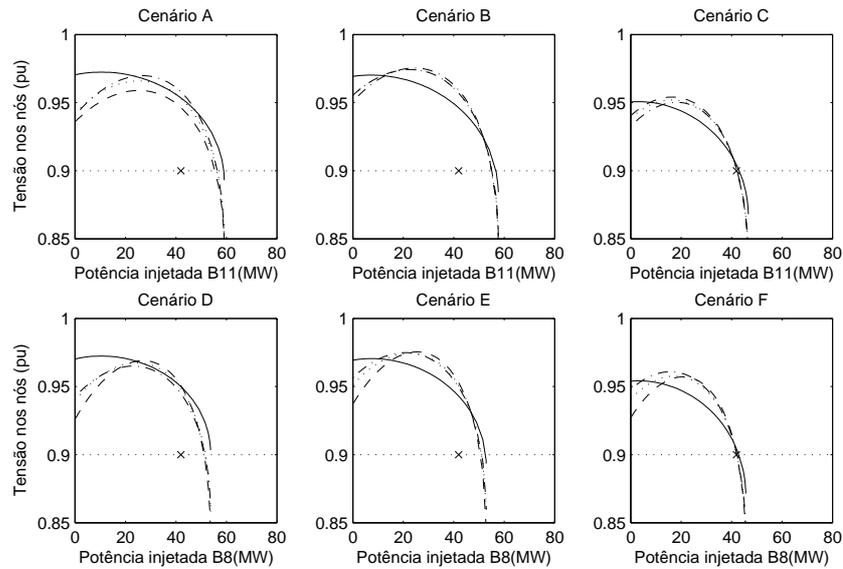


Figura 4.22: Curvas  $P-V$  para a conexão dos parques eólicos nos nós B4 e B5 para os cenários de geração indicados na tabela 4.5.

#### 4.4.3 Comparação dos resultados para os casos de um e dois parques eólicos conectados ao alimentador

Esta seção apresenta a comparação dos resultados dos limites de potência que pode ser inserida/injetada e de máxima penetração de geração eólica para os casos de um e dois parques eólicos conectados ao alimentador de distribuição de 5 nós.

A figura 4.23 mostra a máxima potência inserível no nó de conexão quando um parque eólico foi conectado ao alimentador, utilizando os resultados apresentados na tabela 4.2 para o caso de carga pesada, em comparação com a máxima potência inserível somente neste mesmo nó de conexão quando dois parques foram conectados ao alimentador, equivalente à metade da potência descrita na tabela 4.4 para cada caso. Observou-se que a potência limite que pode ser injetada em cada nó quando dois parques estão conectados foi sempre maior que a potência limite que pode ser injetada em cada nó quando um único parque está conectado ao alimentador. Sendo assim, a combinação de dois parques eólicos no mesmo alimentador aumentou a potência que um nó poderia suportar se este estivesse operando sozinho com geração eólica inserida.

A figura 4.24 mostra a máxima penetração de geração eólica quando dois parques foram conectados ao alimentador, de acordo com os casos da tabela 4.3, em relação à máxima penetração de geração eólica de cada nó de conexão desses casos quando apenas um parque foi conectado ao alimentador. Neste comparativo observou-se a potência de geração eólica instalada no alimentador como um todo, não apenas observando o nó onde está conectado o parque. Observou-se que a penetração de geração eólica quando há dois parques eólicos conectados ao alimentador foi sempre maior que a penetração de geração eólica quando há apenas um parque conectado ao alimentador.

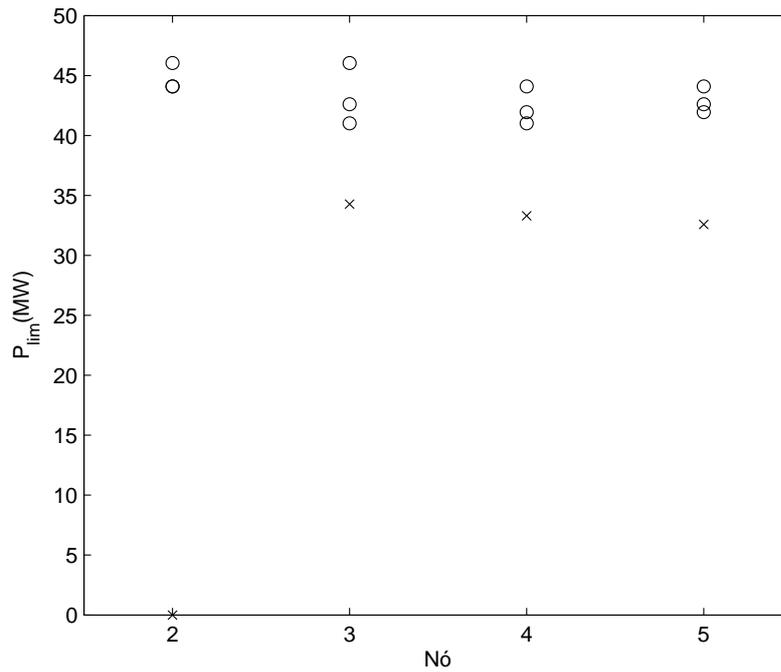


Figura 4.23: Comparativo da potência limite injetada para:  $\times$  - somente um parque conectado ao alimentador e  $\circ$  - dois parques conectados ao alimentador.

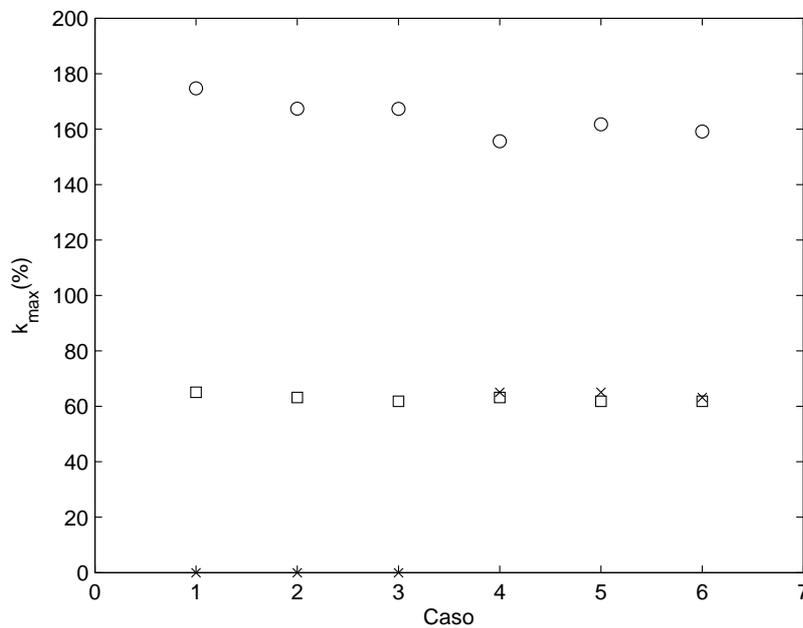


Figura 4.24: Penetração de geração eólica nos casos combinados:  $\times$  - nó de conexão 1,  $\square$  - nó de conexão 2 e  $\circ$  - conexão dos dois parques.

Observou-se que a potência inserível no alimentador quando dois parques estão conectados a ele foi bastante superior à potência inserível no mesmo alimentador quando um único parque está conectado. Além disso, observou-se novamente a possibilidade da penetração de

geração eólica em casos em que o parque, quando estava único no alimentador, não permitia a integração de nenhuma geração (casos 1, 2 e 3 que envolvem a conexão do parque no nó B2).

## 4.5 Conclusão

Este capítulo descreveu a primeira análise da máxima inserção e penetração de geração eólica realizada sobre um alimentador de distribuição de 5 nós. Foram consideradas quatro nós de conexão neste alimentador, para os casos da conexão de um e dois parques eólicos.

A influência na tensão de regime permanente foi analisada através das curvas  $P - V$  geradas com base no fluxo de potência continuado do alimentador quando era conectado um ou dois parques eólicos em um dos nós do alimentador. Com base nesta análise foram observados os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica para cada diferente conexão.

Observou-se a similaridade entre os nós B3 e B5 e a grande variação da relação  $X/R$  da impedância equivalente vista pelo nó B2 frente aos diferentes carregamentos estudados. Verificou-se que a maior inserção eólica ocorre quando a conexão do parque se dá no nó B4, sendo este o nó de menor relação  $X/R$  do alimentador (entre 1,6 e 2 para os diferentes carregamentos). A inserção de geração eólica com conexão do parque no nó B2 não foi possível para o caso de carga pesada devido a tensão no nó B4 ser sempre menor que 0,9 pu.

Com relação à penetração de geração eólica observou-se que seu valor máximo quando o parque foi conectado ao nó B2 dependeu fortemente do carregamento, mas ocorreu de forma menos intensa nos outros nós.

Além disso, a penetração de geração eólica mostrou que em nenhum dos carregamentos o parque eólico conectado supriu toda a demanda do alimentador. Por este motivo, estudou-se o caso da conexão de dois parques eólicos conectados ao alimentador com potências idênticas. Verificou-se que foi possível suprir toda a demanda do alimentador e ainda verificou-se a possibilidade de inserção de geração eólica até mesmo no nó B2 quando combinada com conexão em outro nó.



# Capítulo 5

## Análise da inserção de geração eólica em um alimentador de distribuição com 32 nós

### 5.1 Introdução

Este capítulo trata da análise de inserção e penetração de geração eólica de um parque eólico conectado a um alimentador de distribuição de 32 nós. São observadas as particularidades do alimentador, assim como seus resultados quanto aos máximos níveis de inserção e penetração de geração eólica com relação a tensão equivalente vista pelo nó de conexão, relação  $X/R$  da impedância equivalente e nó de conexão em três diferentes carregamentos.

Este alimentador apresenta-se mais complexo que o estudado no capítulo 4, pelo seu tamanho, parâmetros e características, assim como também diferencia-se na ocorrência de sobretensão nos nós em diversos casos, o que não ocorria no alimentador de 5 nós estudado anteriormente.

São apresentadas também as análises dos limites de penetração de geração eólica para o caso da conexão simultânea de dois parques eólicos.

### 5.2 Alimentador de distribuição de 32 nós

Esta nova análise da inserção e penetração máximas de geração eólica foi realizada sobre o alimentador de distribuição mostrado na figura 5.1, o qual é apresentado em Salim (2011) e de Abreu (2005). Consiste de um alimentador localizado no interior do estado de São Paulo, no qual a rede é interligada ao sistema de transmissão nacional através da conexão com um sistema de subtransmissão de 138 kV, 60 Hz, através do nó de referência 291. A rede de distribuição tem uma conexão robusta, já que o valor da potência de curto-circuito no ponto de conexão com o sistema de subtransmissão é cerca de 2000 MVA.

O sistema de distribuição é interligado ao sistema de subtransmissão através de um trans-

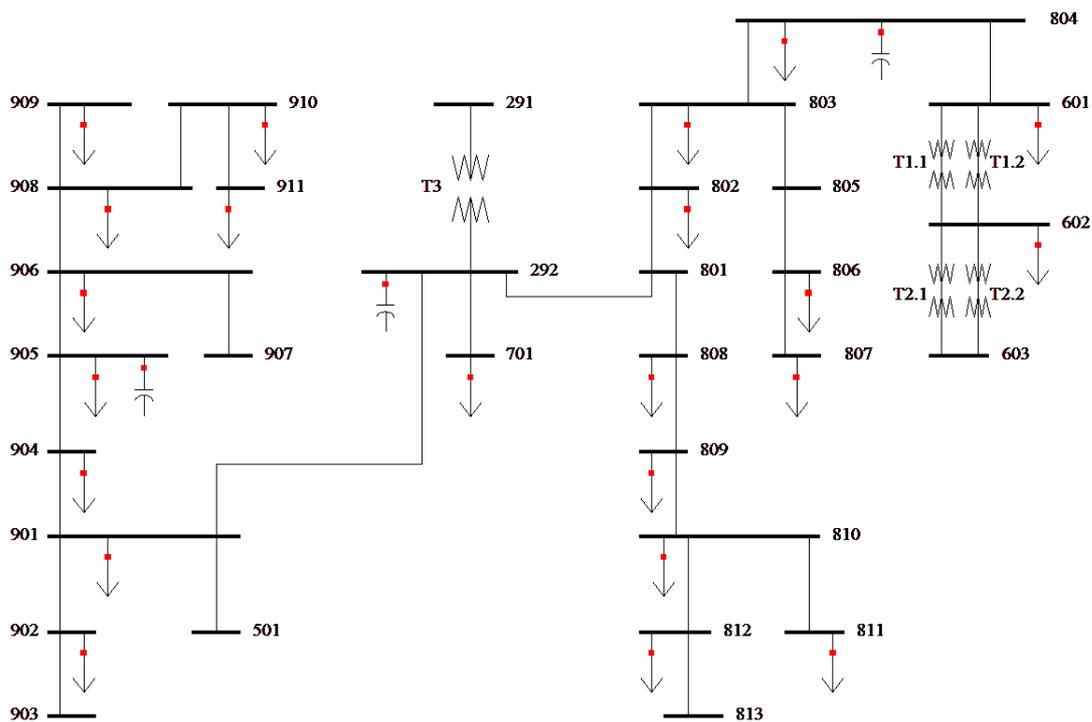


Figura 5.1: Alimentador de distribuição de 32 nós estudado

formador de três enrolamentos de 138/11,5/13,8 kV. Para as análises realizadas no trabalho, o terceiro enrolamento foi negligenciado por não interferir nas análises do fluxo de carga. Assim, este transformador foi considerado como de dois enrolamentos, 138/13,8 kV, e desprezou-se o nó 293 do sistema original.

Com excessão do nó 603, que tem o nível de tensão abaixado mais uma vez para 2,4 kV por um transformador, todos os demais nós do sistema operam com nível de tensão de 13,8 kV. O alimentador em estudo é composto de 32 nós, 5 transformadores e seus ramos totalizam 51 km em linhas de distribuição.

Este alimentador apresenta três capacitores *shunt* em diferentes nós para regulação da tensão do sistema. Sua topologia é totalmente radial, diferente do alimentador de 5 nós estudado no capítulo anterior. A relação  $X/R$  da impedância equivalente das linhas entre os nós é bastante diversificada, variando desde valores próximos a zero até valores próximos ou maiores a 35, sendo a maior delas apresentada no nó de referência.

Os parâmetros deste alimentador são apresentados no Apêndice B. As cargas somam um total de 10,48 MW e 2,51 MVar e foram modeladas como tipo potência constante. Considerando como carga pesada as cargas do alimentador definidas por Salim (2011) e de Abreu (2005), foram definidos dois níveis adicionais de carregamento do alimentador, leve e médio. Os três carregamentos são apresentados na tabela B.2 do apêndice B, sendo que a carga média corresponde à metade da carga pesada e a carga leve à 10% da carga pesada, mantido o mesmo fator de potência em todos os casos.

Nos casos de carga média e leve foram desconsiderados os capacitores dos nós 292, 804 e 905 para que o sistema seja mais representativo da realidade, assumindo que são bancos de capacitores que são desligados em determinadas condições de operação do alimentador.

Dez diferentes nós foram tomados como possíveis nós de conexão do parque eólico no alimentador. Estes nós foram escolhidos da seguinte forma:

- Nó 911 - nó mais distante do ponto de conexão ao sistema de subtransmissão (nó 291) à esquerda;
- Nó 910 - nó com relação  $X/R$  da impedância equivalente próxima de 1;
- Nó 909 - nó com relação  $X/R$  da impedância equivalente próxima de 1;
- Nó 906 - nó do alimentador à esquerda do ponto de conexão ao sistema de subtransmissão, próximo de vários outros nós;
- Nó 902 - nó do alimentador à esquerda do ponto de conexão ao sistema de subtransmissão, de distância intermediária;
- Nó 807 - nó mais distante do ponto de conexão ao sistema de subtransmissão à direita;
- Nó 805 - nó com relação  $X/R$  da impedância equivalente próxima de 1;
- Nó 804 - nó com relação  $X/R$  da impedância equivalente próxima de 1,5;
- Nó 803 - nó do alimentador à direita do ponto de conexão ao sistema de subtransmissão, de distância pequena porém parcialmente central no alimentador em relação às cargas;
- Nó 602 - nó do alimentador à direita do ponto de conexão ao sistema de subtransmissão, de distância intermediária e próxima da maior carga do sistema.

Neste sentido inicialmente buscou-se analisar as características de cada nó de conexão da figura 5.1 a partir do circuito equivalente de Thèvenin, visto de cada nó. Para obtenção dos circuitos equivalentes foram determinadas a tensão equivalente nos nós, corrente de curto circuito, impedância equivalente vista por cada nó e, daí a relação  $X/R$  da impedância equivalente e a capacidade equivalente vista de cada nó.

Os cálculos de tensão equivalente, capacidade equivalente e relação  $X/R$  da impedância equivalente foram realizados com auxílio do aplicativo Powerworld e são apresentados na tabela 5.1. Vale lembrar que para estes cálculos as cargas foram consideradas do tipo impedância constante.

Estes dados são melhor visualizados na figura 5.2 que mostra o nível de tensão equivalente pela relação  $X/R$  da impedância equivalente vista de cada nó. Observou-se que para todos os nós, quando o sistema estava em carga leve a tensão foi sempre maior nos nós, mesmo tendo sido desconsiderados os capacitores do sistema. Para a carga média, as tensões também permaneceram intermediárias às tensões de carga leve e pesada, sendo que neste carregamento também foram desconectados os capacitores do sistema.

Tabela 5.1: Tensão equivalente, capacidade equivalente e relação X/R da impedância equivalente em cada nó estudado e cada carregamento

Nó	Pesada			Média			Leve		
	Vth (pu)	Seq (pu)	X/R	Vth (pu)	Seq (pu)	X/R	Vth (pu)	Seq (pu)	X/R
911	0,960	0,774	0,586	0,965	0,793	0,623	0,994	0,855	0,662
910	0,960	2,039	1,281	0,963	2,097	1,552	0,994	2,235	1,863
909	0,961	2,156	1,390	0,964	2,213	1,716	0,994	2,347	2,105
906	0,962	2,843	2,452	0,965	2,847	3,775	0,994	2,930	6,315
902	0,965	2,465	2,682	0,967	2,464	3,951	0,995	2,545	6,186
807	0,930	0,860	0,619	0,945	0,910	0,697	0,991	1,015	0,774
805	0,933	1,533	0,927	0,947	1,619	1,144	0,991	1,782	1,384
804	0,919	2,206	1,654	0,936	2,219	2,763	0,989	2,330	4,935
803	0,936	2,614	2,001	0,948	2,616	3,402	0,992	2,711	6,595
602	0,918	2,072	1,797	0,936	2,079	2,974	0,989	2,186	5,275

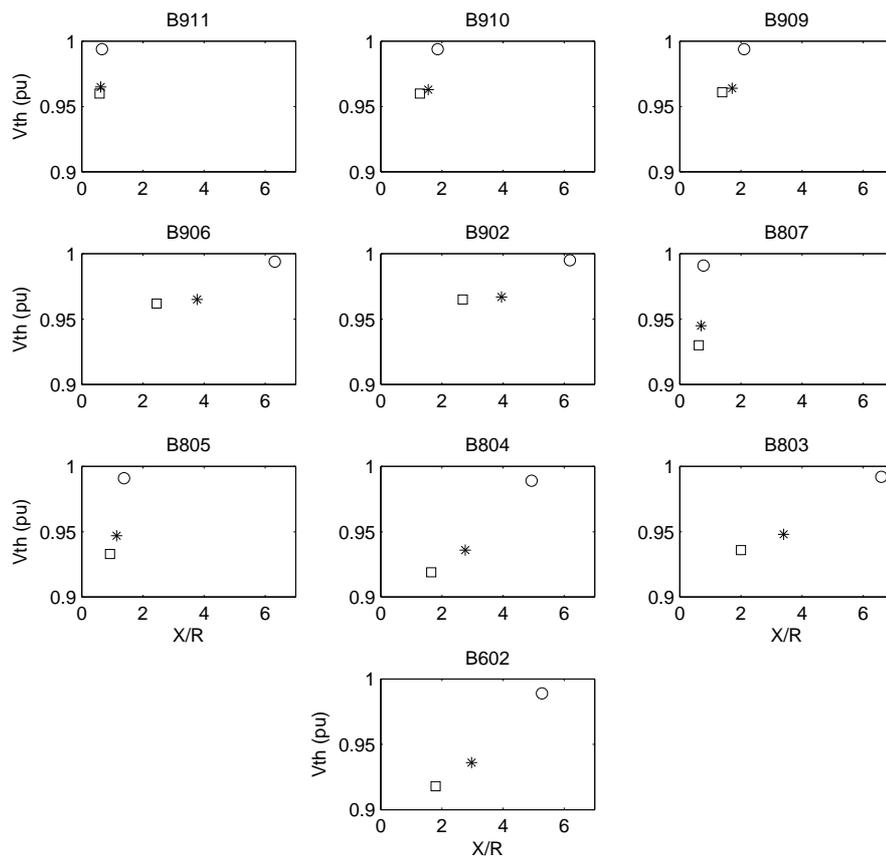


Figura 5.2: Tensão equivalente por  $X/R$  em cada nó: □ - carga pesada, \* - carga média e ○ - carga leve.

Os nós 805, 807, 909, 910 e 911 são os nós que apresentaram menor variação da relação  $X/R$  de acordo com o carregamento. Estes foram nós para os quais os limites de inserção foram determinados pela tensão no próprio nó de conexão. Já os nós 602, 803, 804, 902 e 906 são nós que apresentaram maior variação da relação  $X/R$  de acordo com o carregamento e são os nós nos quais o limite de inserção foi determinado pela tensão em outro nó distinto do nó de conexão. Estas afirmações poderão ser verificadas na seção 5.3.5.

## 5.3 Caso da conexão de um parque eólico

### 5.3.1 Parque eólico

Esta seção apresenta as características e parâmetros do parque eólico considerado para a conexão ao alimentador de distribuição de 32 nós. O estudo é realizado para o parque eólico conectado a 10 diferentes nós do sistema, escolhidos conforme comentado na seção 5.2.

O parque eólico estudado é o mesmo que o considerado no capítulo 4, porém os dados são reproduzidos aqui para facilitar a leitura. Cada turbina do parque eólico é conectada à rede por um transformador com 2,5 MVA 0,69/11 kV com reatância de 5,9%. O circuito interno do parque eólico de 11 kV é representado pela linha entre os nós B7-B6 apresentados na figura 5.3. O parque eólico é conectado à rede de 13,8 kV através de um transformador de tap manual de 25 MVA 11/13,8 kV e reatância de 10%, modelado entre os nós B6 e nó de conexão do parque eólico. A figura 5.3 ilustra o parque eólico conectado ao nó 807 do alimentador de distribuição da figura 5.1.

Para as análises neste trabalho o parque eólico foi representado por uma única turbina de potência equivalente à potência total nominal do parque. Como o objetivo foi estudar a máxima potência nominal possível do parque eólico, a conexão à rede foi representada por transformadores de mesma impedância de Holdsworth et al. (2003), porém com maior nível de potência, ficando um transformador equivalente de 50MVA 0,69/11 kV com reatância de 5,9% entre os nós B8 e B7, e o transformador modelado entre o nó B6 e o nó de conexão do parque de 50MVA 11/13,8 kV e reatância de 10%.

As turbinas do parque eólico foram consideradas com capacidade de regulação da potência reativa, operando com fator de potência unitário, avaliado no nó B8, nó do sistema de geração eólica equivalente ao parque eólico. Considerou-se que a variação de vento possível é compatível com o parque eólico fornecendo desde 20 até 100% de sua potência nominal, dependendo da variação do vento.

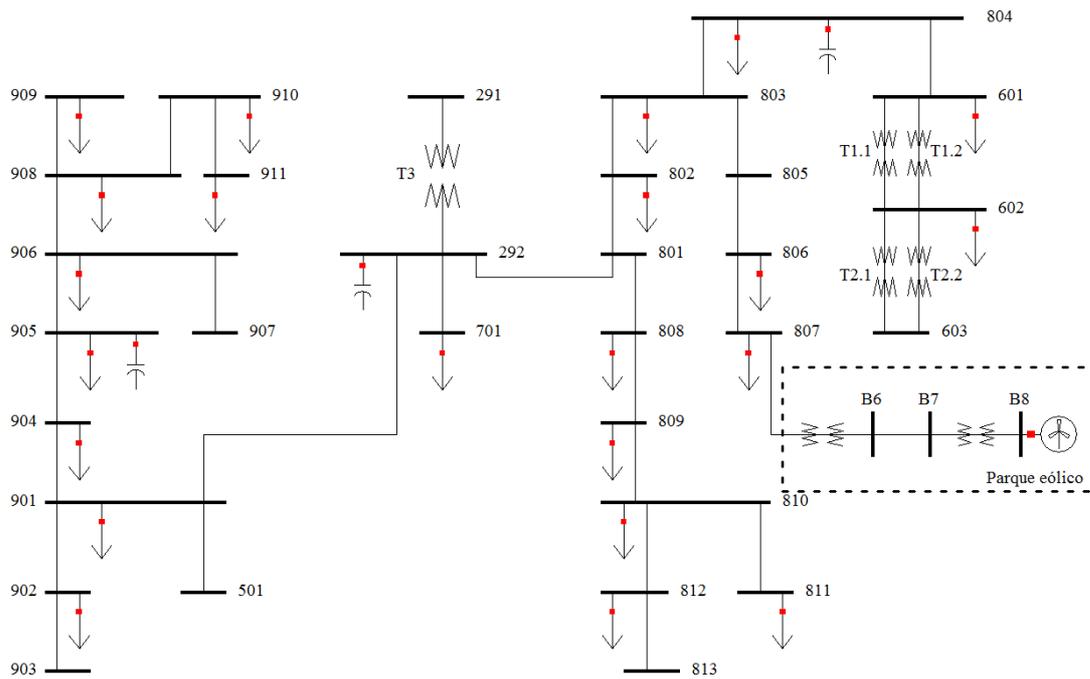


Figura 5.3: Parque eólico conectado ao nó 807 do alimentador de distribuição de 32 nós.

### 5.3.2 Análise da influência na tensão de regime permanente

Esta seção apresenta a análise da influência na tensão de regime permanente, no caso de um parque eólico conectado ao alimentador de distribuição de 32 nós, através da observação das curvas  $P - V$  obtidas pelo cálculo do fluxo de potência continuado nos nós, conforme metodologia apresentada na seção 3.4.1 do capítulo 3.

As curvas  $P - V$  que representam a conexão em cada um dos diferentes nós citados na seção 5.2 são apresentadas de maneira ilustrativa nas figuras 5.4 e 5.5, consideradas para a verificação das potências limites de acordo com os critérios de tensão de regime permanente para o caso de carga pesada. As curvas foram obtidas a partir dos dados do fluxo de potência continuado realizado com o auxílio do aplicativo Anarede.

Os valores encontrados de potência limite foram utilizados posteriormente na análise da máxima inserção e penetração de geração eólica neste alimentador. Para tanto foram examinadas as tensões em todos nós de carga e também no nó de conexão com base nos critérios de tensão de regime permanente descritos no capítulo 3, para o parque eólico gerando desde 20 até 100% de sua potência nominal ( $P_n$ ).

Observou-se que nos casos da conexão do parque aos nós 805, 807, 909, 910 e 911 há ao menos um dos nós que apresenta tensão que ultrapassa o limite de tensão de 1,05 pu. Quando a tensão no nó ultrapassa esse limite, diz-se que ali ocorre sobretensão.

Ocorreu no caso do parque conectado ao nó 911, na figura 5.4, que o limite máximo de potência foi determinado pela máxima tensão de 1,05 pu, já que, tomando como base os

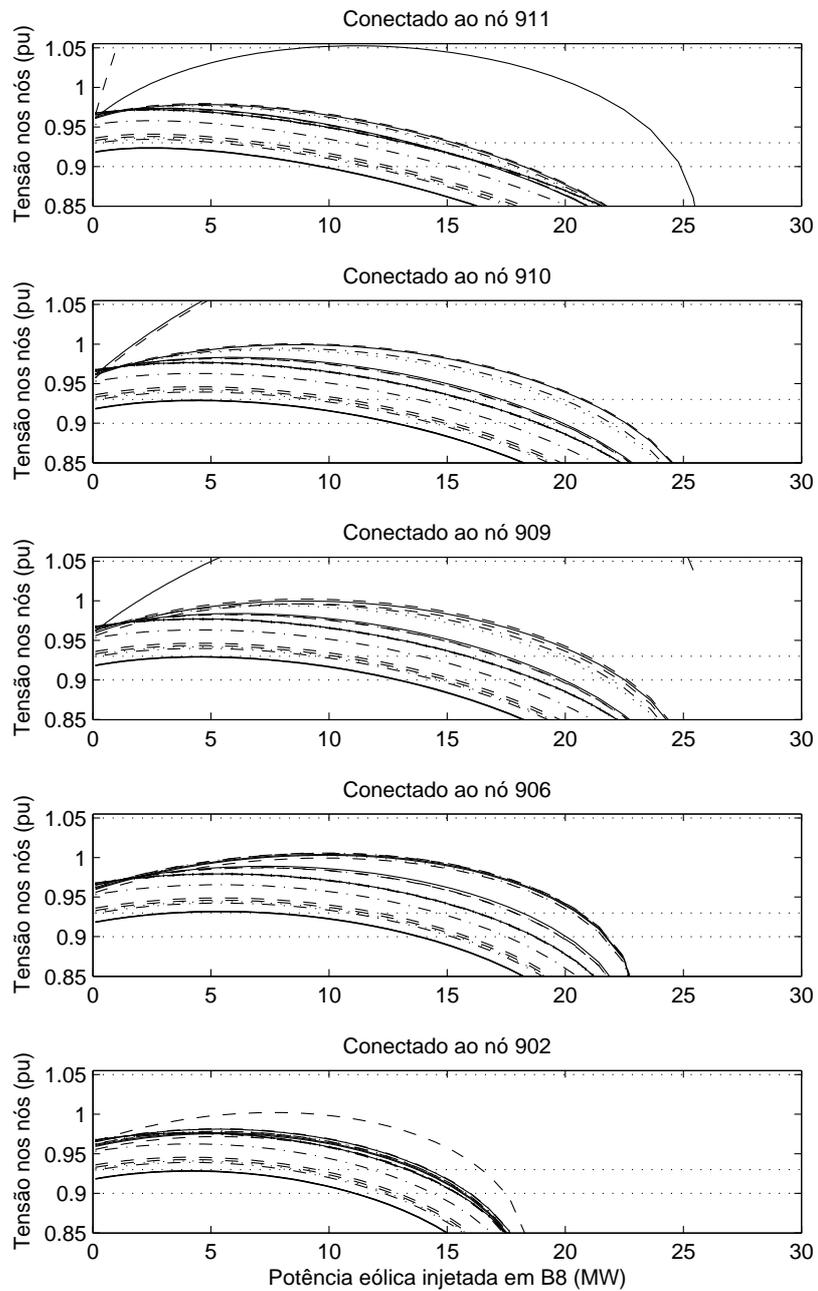


Figura 5.4: Curvas  $P - V$  dos parques conectados aos nós 911, 910, 909, 906 e 902.

valores de variação de tensão de regime permanente apresentados na tabela 3.1 no capítulo 3, tensões acima de 1,05 pu são consideradas críticas. Dessa forma, a potência limite de inserção de geração eólica para que a tensão de regime permanente de nenhum nó do sistema atingisse níveis críticos, neste caso, foi de aproximadamente 1 MW. Existiram diversos nós que tampouco atenderiam os limites de tensão adequados, pois pode-se observar que várias curvas estão abaixo

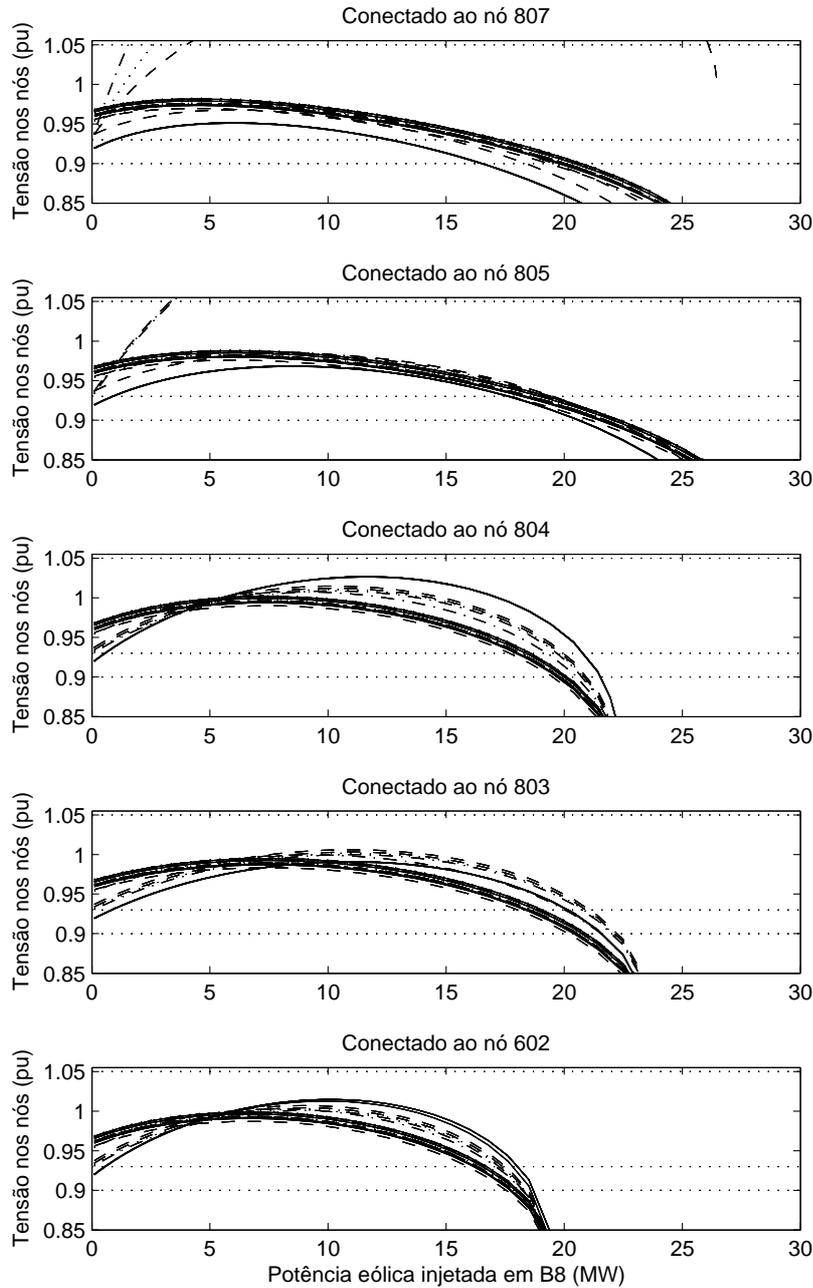


Figura 5.5: Curvas  $P - V$  dos parques conectados aos nós 807, 805, 804, 803 e 602.

de 0,93 pu. Apesar de todos os nós permanecerem com tensões acima de 0,9 pu até uma potência limite de aproximadamente 10 MW, o limite superior de tensão (1,05 pu) limitou a potência de geração eólica em 1 MW.

Já no caso da conexão do parque eólico no nó 906, por exemplo, isso não ocorreu, conforme pode ser visto na mesma figura. Para a conexão neste nó o limite superior de tensão de

regime permanente de 1,05 pu não foi ultrapassado em nenhum nó observado, resultando em comportamento similar ao caso do alimentador de 5 nós. Neste caso de conexão houve alguns nós para as quais a tensão de regime permanente adequada não foi atendida, porém, para potências de até aproximadamente 14 MW todas as tensões nos nós estudados ficaram acima de 0,9 pu, sendo então essa a potência limite de inserção.

Da mesma forma que exemplificado para as conexões do parque nos nós 911 e 906 em carga pesada, as verificações foram feitas para a conexão do parque eólico nos demais nós do conjunto de 10 nós de conexão considerados para este alimentador. Na tabela 5.2 são apresentadas as potências para cada limite de tensão estudado, onde  $P_{lim_{ad}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente adequado e  $P_{lim_{pr}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente precário. A sigla NA indica que não houve potência limite que atendesse ao critério.

Por questões de espaço, não são apresentadas as curvas  $P - V$  para os carregamentos leve e médio. Porém também são apresentadas na tabela 5.2 as potências limite de inserção para estes casos.

Assim como para o caso de carga pesada, tanto para o caso de carga média como o caso de carga leve os casos de conexão aos nós 805, 807, 909, 910 e 911 também apresentaram sobretensão.

Não foi possível atender os critérios de tensão de regime permanente adequada para nenhuma potência quando o parque eólico foi conectado aos nós 902, 906, 909, 910 e 911 com o alimentador em carga pesada. Nos casos dos nós de conexão nos quais foi observada sobretensão, os limites de potência encontrados foram bastante baixos, conforme a tabela 5.2.

Tabela 5.2: Potência limite para a conexão de um parque eólico aos diferentes nós do alimentador 32 nós.

Nó de conexão	Carga pesada		Carga média		Carga leve	
	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)
911	NA	1,009	0,967	0,967	0,622	0,622
910	NA	4,359	4,707	4,707	3,131	3,131
909	NA	5,027	5,601	5,601	3,739	3,739
906	NA	13,768	7,435	12,696	13,549	16,087
902	NA	11,049	6,150	10,850	11,944	14,119
807	1,538	1,538	1,430	1,430	0,828	0,828
805	3,314	3,314	3,398	3,398	2,044	2,044
804	17,691	19,510	11,977	14,491	11,987	13,940
803	18,020	20,176	12,756	15,581	13,158	15,322
602	15,920	17,550	11,037	13,347	11,257	13,046

### 5.3.3 Níveis máximos de inserção de geração eólica

Esta seção apresenta os resultados obtidos quanto aos níveis máximos de inserção de geração eólica,  $\rho_{max}$ , considerando a conexão do parque eólico nos 10 nós do sistema de distribuição comentados na seção 5.2. Os resultados são apresentados em função do nó de conexão e analisados em função da relação  $X/R$  da impedância e da tensão equivalente vista de cada nó, além dos três carregamentos considerados.

O cálculo de  $\rho_{max}$  foi realizado com base nos valores das potências limite encontradas na seção anterior, de acordo com a tabela 5.2, assim como a capacidade equivalente vista pelo nó de conexão (ver tabela 5.1), conforme a equação 3.7 apresentada na seção 3.4.1 do capítulo 3.

A figura 5.6 mostra a máxima inserção de geração eólica possível respeitando os limites da tensão de regime permanente precária, conforme o nó de conexão do gerador. Pode-se observar que há grande variação da máxima inserção de geração eólica conforme o nó de conexão e também o carregamento. Para os diferentes níveis de carregamento do alimentador, a conexão no nó 804 atingiu os maiores níveis de inserção de geração eólica, enquanto a conexão no nó 911 os menores. Ainda, a conexão no nó 911 apresentou pequena variação do nível máximo de inserção em função do carregamento do alimentador.

Em relação à influência do carregamento a inserção máxima de geração eólica não apresentou um comportamento regular. A conexão do parque eólico em alguns nós apresentou inserção máxima de geração eólica maior quanto maior o carregamento do alimentador (nós 602, 803, 804). Outros (especialmente os nós 902 e 906) apresentaram um comportamento diverso, sendo a inserção de geração eólica maior quando o carregamento do alimentador era leve. Outros nós ainda, como 909 e 910, tiveram a máxima inserção de geração eólica para carregamento médio. A sensibilidade da máxima inserção de geração eólica com o carregamento também foi diferente conforme o nó de conexão.

Vale lembrar novamente que o nível máximo de inserção de geração eólica exigia que a tensão de regime permanente em todos os nós do alimentador de distribuição satisfizessem os limites pré-estabelecidos de variação para o parque eólico produzindo desde 20 até 100% de sua potência nominal. Para este sistema, em todos os casos buscou-se a máxima inserção compatível com o nível de tensão de regime permanente precário, sendo este o pior cenário a ser estabelecido. Para todos os casos de conexão estudados foi possível atender estes níveis de tensão, embora para potências bastante pequenas comparadas à potência instalada no alimentador.

Para identificar os fatores que influenciaram nos valores da máxima inserção de geração eólica obtida em cada ponto de conexão ao alimentador de distribuição, foram avaliados os níveis máximos de inserção em função das características de cada ponto de conexão ao alimentador de distribuição, relação  $X/R$  da impedância equivalente e tensão equivalente vista pelo nó de conexão.

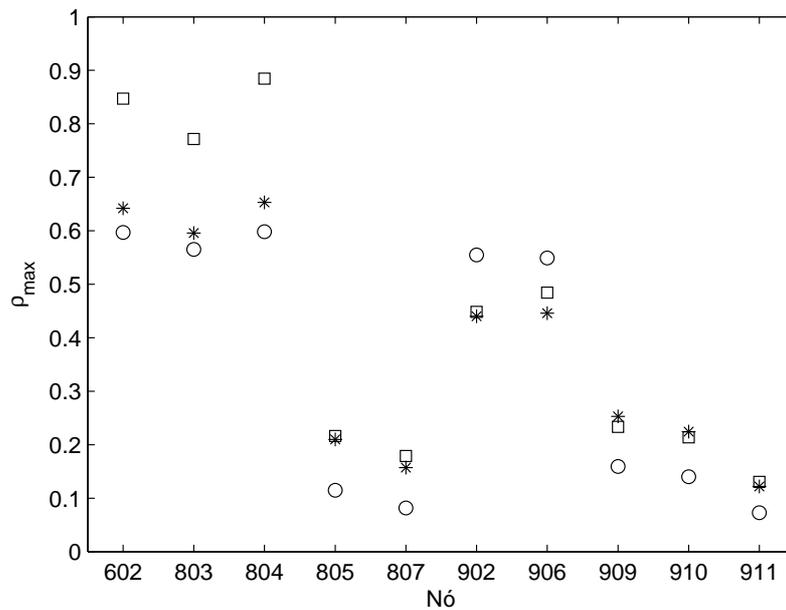


Figura 5.6: Inserção máxima de geração eólica por nó:  $\square$  - carga pesada, \* - carga média e  $\circ$  - carga leve.

A influência da relação  $X/R$  da impedância equivalente na máxima inserção de geração eólica é apresentada na figura 5.7, para os três níveis de carregamento do alimentador.

De maneira geral o comportamento de  $\rho_{max}$  em função da relação  $X/R$  da impedância equivalente está de acordo com a tendência indicada nos resultados de Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008) (visto na figura 3.3 do capítulo 3), os quais se baseiam apenas no modelo máquina barra-infinita. Para valores pequenos de relação  $X/R$  há uma tendência crescente de inserção de geração eólica com o aumento da relação  $X/R$  da impedância equivalente, atingindo um pico e em seguida, para valores maiores da relação  $X/R$ , a tendência é de diminuição. Os nós 911, 910, 909, 807 e 805 estão na região da curva de  $X/R$  pequeno, onde ocorreu sobretensão, apresentando os menores níveis de inserção de geração eólica. Os nós 906, 902, 804, 803 e 602 são nós com maiores níveis de inserção de geração eólica e correspondem ao grupo em que os limites de inserção foram determinados pela subtensão e que correspondem a  $X/R$  maiores.

Com relação à influência do carregamento nos níveis máximos de inserção eólica, a variação da relação  $X/R$  da impedância equivalente com o carregamento foi menor para os nós com relação  $X/R$  pequena. No caso de carga pesada, os nós estudados apresentaram relação  $X/R$  da impedância equivalente mais próximas. Estando mais concentradas a diferença de inserção entre os diferentes nós de conexão foi um pouco maior, principalmente para os nós de conexão com relação  $X/R$  maiores que 1,6 aproximadamente. No caso de carga média a relação  $X/R$  entre os diferentes nós de conexão começou a se distanciar, sendo que no caso de carga leve estes valores foram bem mais dispersos. Assim, a relação  $X/R$  da impedância equivalente mostrou-se bastante determinante do nível de inserção de geração eólica no alimentador.

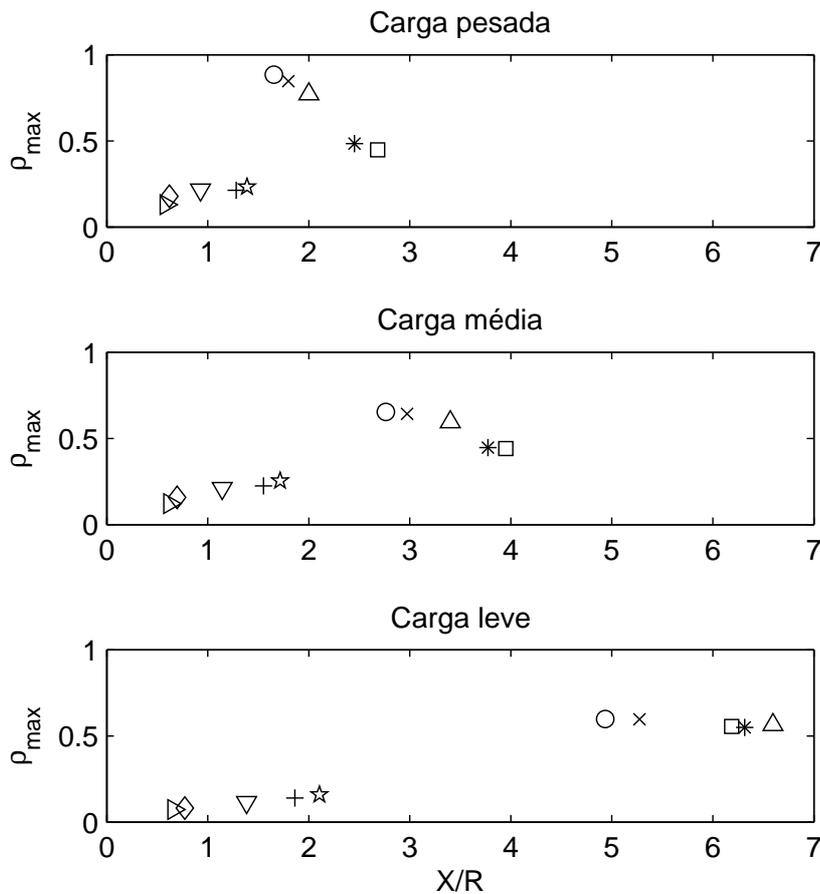


Figura 5.7: Inserção máxima de geração eólica em função de  $X/R$  para o parque eólico conectado aos diferentes nós do sistema considerando o limite de tensão de regime permanente precário para o parque eólico conectado ao nó:  $\triangleright$  - B911;  $+$  - B910;  $*$  - B909;  $*$  - B906;  $\square$  - B902;  $\diamond$  - B807;  $\nabla$  - B805;  $\circ$  - B804;  $\triangle$  - B803;  $\times$  - B602.

Complementando esta análise, a figura 5.8 apresenta a inserção de geração eólica em função da tensão equivalente nos nós. Notou-se que o nó de conexão correspondente ao maior valor de máxima inserção de geração eólica (804) está entre os que apresentam tensão equivalente menor em todos os carregamentos. Como se observa das análises do caso máquina a influência da tensão equivalente na máxima inserção de geração eólica depende da relação  $X/R$  (Reginatto et al., 2009; Reginatto et al., 2008). Em função disso, não se observa uma relação consistente entre a tensão equivalente e o nível máximo de inserção de geração eólica.

### 5.3.4 Níveis máximos de penetração de geração eólica

A seguir são apresentados os resultados e análises relativas à máxima penetração de geração eólica,  $k_{max}$ , a qual fornece uma medida relativa à potência instalada no alimentador e não relativa ao nó de conexão, como é o caso do nível de inserção. São apresentados resultados grá-

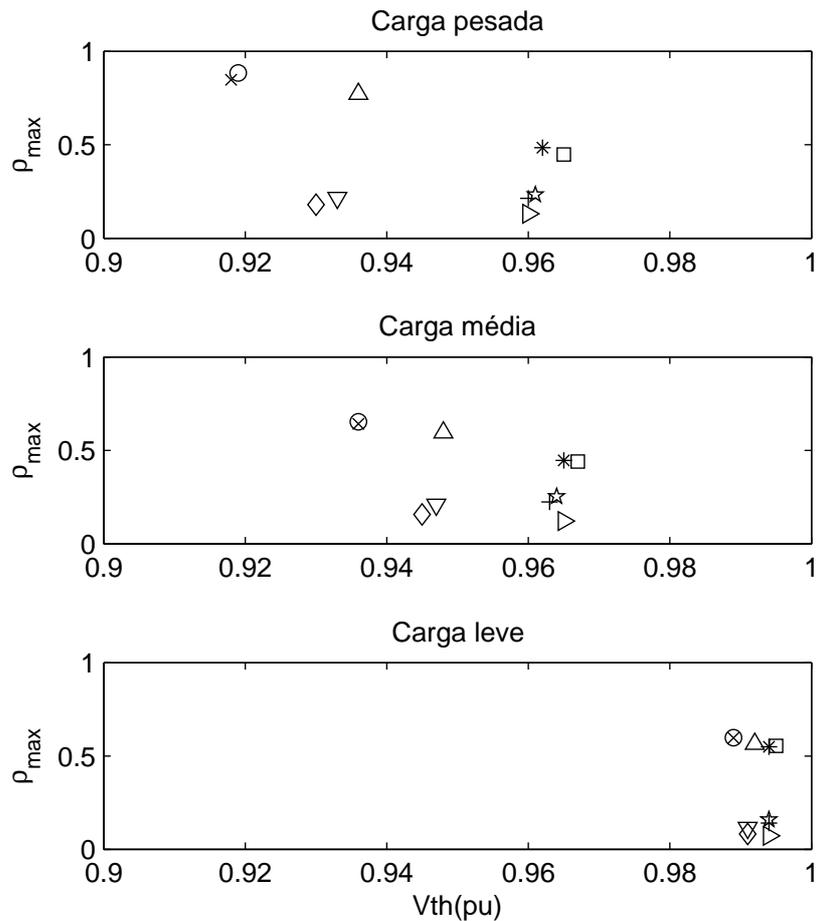


Figura 5.8: Inserção máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó:  $\triangleright$ - B911;  $+$  - B910;  $*$ - B909;  $*$  - B906;  $\square$  - B902;  $\diamond$  - B807;  $\nabla$  - B805;  $\circ$  - B804;  $\triangle$  - B803;  $\times$ - B602.

ficos em função dos diferentes nós de conexão ao alimentador, da relação  $X/R$  da impedância equivalente e tensão equivalente, além dos três carregamentos considerados.

O cálculo de  $k_{max}$  é realizado com base nos valores das potências limite, encontradas na seção 5.3.2, mostradas na tabela 5.2, assim como a potência instalada no alimentador, de acordo com a tabela B.2 do apêndice B, conforme a equação 3.8 apresentada na seção 3.4.1 do capítulo 3.

A figura 5.9 apresenta a máxima penetração de geração eólica em cada um dos 10 nós de conexão do sistema de geração eólica para cada carregamento estudado. A penetração de geração eólica atingiu valores bastante diversos conforme o nó de conexão. Nos casos da conexão do parque eólico nos nós 602, 803, 804, 902 e 906 a máxima penetração de geração eólica foi maior que 100%, ou seja, foi possível atender mais de 100% da demanda do alimentador para todos os carregamentos. Interessante observar que estes casos não foram os que a tensão no próprio nó foi responsável pela limitação de potência, conforme será visto na seção 5.3.5.

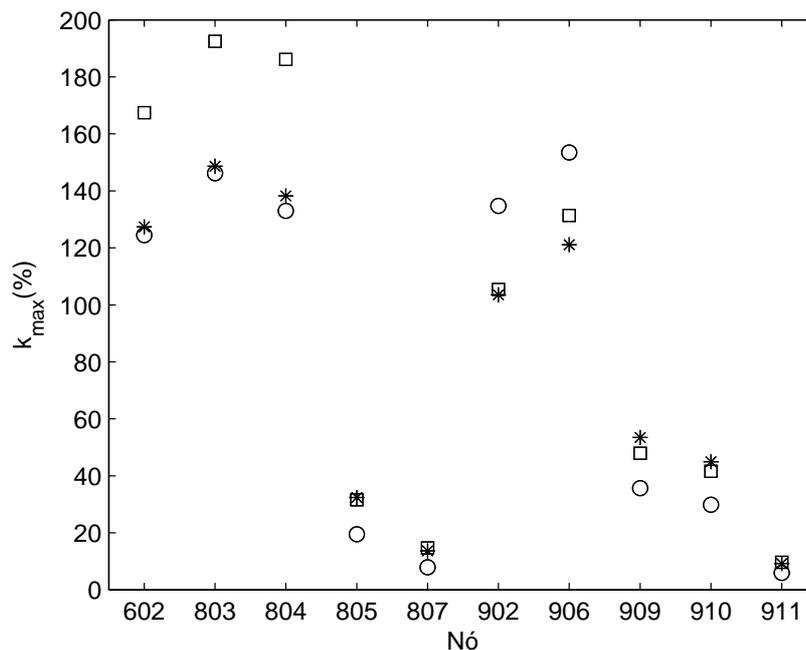


Figura 5.9: Penetração máxima de geração eólica por nó: □ - carga pesada, \* - carga média e ○ - carga leve.

Observou-se que os nós de conexão do parque eólico 805, 807, 909, 910 e 911, que apresentaram baixa inserção de geração eólica, também apresentaram baixa penetração de geração eólica. Entretanto, observou-se que a máxima penetração de geração eólica não ocorreu quando o parque eólico estava conectado ao mesmo nó que apresentou maior inserção de geração eólica. Enquanto a inserção de geração eólica era maior com o parque conectado ao nó 804 para todos os carregamentos, observou-se que a conexão do parque ao nó 803 (carga pesada e média) e a conexão do parque ao nó 906 (carga leve) apresentaram-se como de maior penetração de geração eólica. Apesar disso, a conexão do parque ao nó 804 também apresentou um bom nível de penetração de geração eólica.

Nos casos da conexão do parque eólico nos nós 602, 803 e 804 observou-se que a penetração eólica foi muito maior para o nível de carregamento pesado do alimentador, enquanto que para os níveis de carregamento leve e médio atingiu valores próximos um do outro. Isto mostra a dependência não linear da penetração frente ao carregamento do alimentador, já que, sendo a carga média equivalente a 50% da carga pesada e a carga leve equivalente a 10% da carga pesada, esperar-se-ia que a penetração de geração eólica em carga média tivesse valores intermediários à carga pesada e leve.

Além disso, para alguns nós de conexão a penetração de geração eólica mostrou-se maior quanto maior o carregamento do alimentador, enquanto para outros a penetração de geração eólica foi maior para o carregamento leve do alimentador. Nos casos de conexão do parque eólico nos nós 902 e 906, quando o alimentador está em carga leve, a penetração de geração eólica foi bastante maior que nos resultados obtidos para os níveis de carregamento médio e

pesado. Já nos casos de conexão do parque nos nós 602, 803 e 804 a penetração de geração eólica apresentou níveis maiores para o caso de carga pesada.

Este efeito pode ser explicado da seguinte forma. Para todos os carregamentos do alimentador observou-se que quando o parque eólico é conectado aos nós 602, 803 e 804, casos que apresentaram maior penetração de geração eólica quanto maior a carga do alimentador, o nó que definiu o limite de potência inserível, de acordo com os limites de tensão de regime permanente, foi o nó 911. Já no caso da conexão do parque nos nós 902 e 906, casos que apresentaram maior penetração de geração eólica para o carregamento leve do alimentador, os limites de potência inserível foram definidos pela tensão no nó 602. Quando o parque foi conectado aos outros nós (805, 807, 909, 910 e 911) a tensão no próprio nó definiu os limites de potência inserível de acordo com os níveis de tensão de regime permanente estabelecidos devido ao aparecimento da sobretensão em alguns nós do alimentador. Esta característica será melhor detalhada na seção 5.3.5.

Observou-se ainda que a conexão ao nó 911 apresentou a menor penetração de geração eólica para todos os carregamentos, mesmo caso que mostrou-se de menor inserção de geração eólica, conforme visto na figura 5.6. Este mesmo nó 911 apresentou menor relação  $X/R$  dentre os estudados, conforme pode ser visto na figura 5.2.

A figura 5.10 mostra a penetração máxima de geração eólica em função da relação  $X/R$  da impedância equivalente vista pelo nó de conexão do parque eólico. Diferente do caso da inserção de geração eólica, a influência da relação  $X/R$  da impedância equivalente nos níveis máximos de penetração eólica não mostrou-se muito linear. Tanto que não existiu uma uniformidade dos valores de penetração de geração eólica para determinados valores da relação  $X/R$  entre os diferentes carregamentos, somente para os casos de conexão do parque nos nós de baixa relação  $X/R$  (805, 807, 909, 910 e 911) onde nem a relação  $X/R$  variou muito com o carregamento, nem tampouco a penetração.

No caso dos nós de conexão do parque eólico 602, 803, 804, 902 e 906 a relação  $X/R$  da impedância equivalente foi bastante influenciada pelo carregamento. Observou-se que no caso de carga pesada a relação  $X/R$  era mais próxima e levou a resultados de penetração mais distintos. Enquanto isso, quanto menor o carregamento nestes nós, menor a diferença de penetração de geração eólica entre eles, contudo a relação  $X/R$  passou a aumentar entre estes nós quanto menor o carregamento do alimentador.

A figura 5.11 mostra a máxima penetração de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado aos 10 nós de conexão escolhidos para os três carregamentos do alimentador. Observou-se que a tensão equivalente (sem a inserção de geração eólica) não explica os diferentes níveis de penetração de geração eólica. A conexão do parque ao nó 803, que apresentou maior penetração de geração eólica nos casos de carga pesada e média, apresentou tensão equivalente em valores intermediários aos outros nós de conexão. Apesar disso, os nós que apresentaram maior nível de penetração de geração eólica apresentaram os

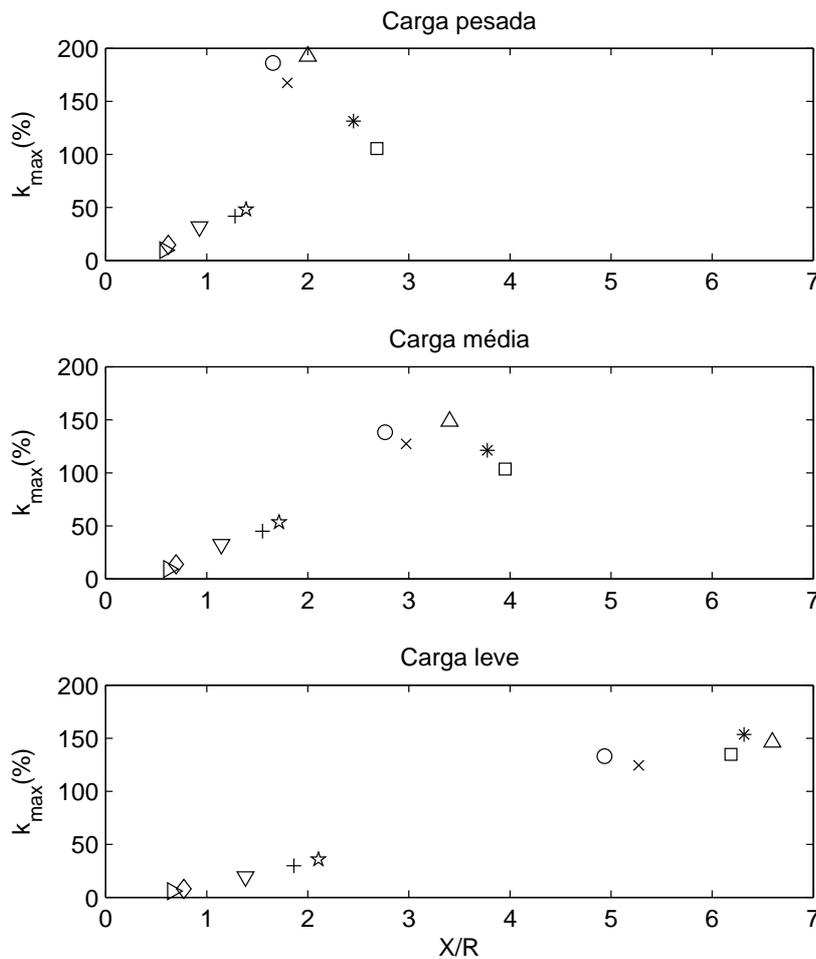


Figura 5.10: Penetração máxima de geração eólica em função de  $X/R$  para o parque eólico conectado ao nó: ▷ - B911; + - B910; \* - B909; \* - B906; □ - B902; ◇ - B807; ▽ - B805; ○ - B804; △ - B803; × - B602.

menores valores de tensão equivalente do alimentador. Porém, para valores similares de tensão equivalente, como dos nós 803 e 805, os níveis de penetração de geração eólica foram bastante diferentes, por isso a tensão equivalente não mostrou-se determinante frente aos níveis de penetração de geração eólica.

### 5.3.5 Comparação dos resultados com o modelo máquina barra infinita

Esta seção apresenta um comparativo entre os resultados obtidos nas análises da conexão de um parque eólico ao alimentador de distribuição de 32 nós e o modelo máquina barra-infinita de Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008), apresentado na figura 3.2 do capítulo 3.

A figura 5.12 apresenta os níveis máximos de inserção de geração eólica por nó de conexão considerando os limites de variação da tensão de regime permanente em todos os nós

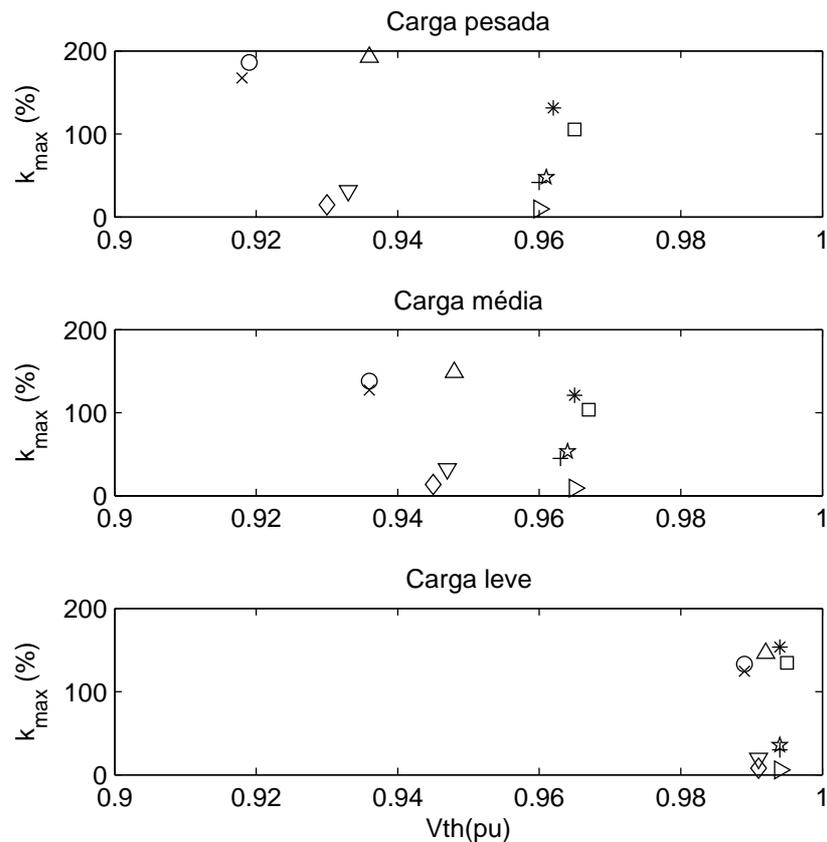


Figura 5.11: Penetração máxima de geração eólica em função da tensão equivalente para o parque eólico conectado ao nó: ▷- B911; + - B910; \* - B909; \* - B906; □ - B902; ◇ - B807; ▽ - B805; ○ - B804; △ - B803; × - B602.

do alimentador e somente no próprio nó de conexão, ou seja, do equivalente visto do nó de conexão.

Se o modelo máquina barra-infinita fosse considerado para as análises de máxima inserção de geração eólica seria o mesmo que considerar somente as variações das tensões de regime permanente no nó de conexão do parque eólico e desconsiderar todas as tensões nos outros nós do alimentador. O nível máximo de inserção de geração eólica seria determinado apenas pelo equivalente visto de cada nó de conexão e a tensão observada seria somente a do próprio nó de conexão. Neste caso, os níveis máximos de inserção previstos seriam bem maiores em alguns casos, como pode ser observado na figura 5.12.

Observou-se que, para os três tipos de carregamento, quando a conexão ocorreu nos nós 602, 803, 804, 902 e 906 observa-se maior nível de inserção de geração eólica se somente a tensão no próprio nó fosse considerada no atendimento dos critérios de tensão de regime permanente estudados. Sendo maiores, verificou-se que nestes nós há dependência da topologia do alimentador, pois a tensão em outros nós saíram da faixa de variação aceitável para a tensão de regime permanente. Como outro nó foi responsável pela definição dos limites de potência

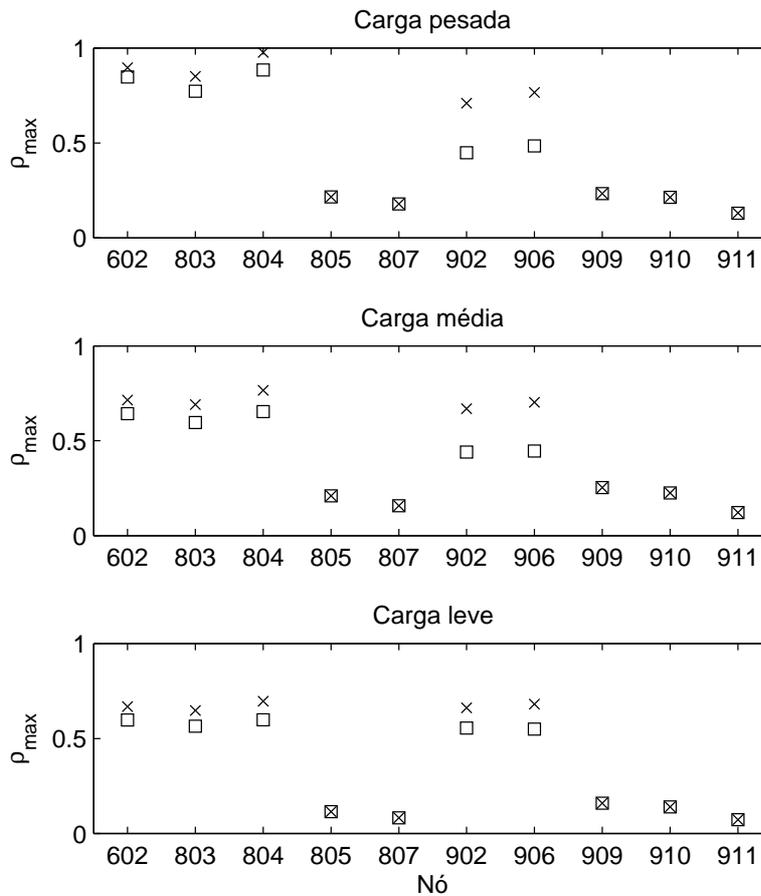


Figura 5.12: Inserção máxima de geração eólica por nó: □ para os limites de tensão em todos os nós do alimentador e × para os limites de tensão vistos do próprio nó de conexão.

inseríveis quando a conexão do parque eólico foi feita nestes nós, os níveis de inserção de geração eólica foram menores do que se fossem determinados pelo próprio nó de conexão.

Isto não ocorreu para as conexões do parque aos nós 805, 807, 909, 910 e 911, onde observa-se que o próprio nó foi responsável pela determinação dos limites de potência analisados por critérios de tensão de regime permanente. Estes são os mesmos nós que apresentaram menor variação da relação  $X/R$  de acordo com o carregamento (conforme comentado na seção 5.3), assim como são os mesmos nós que apresentaram sobretensão, observadas nas curvas  $P-V$  (conforme comentado na seção 5.3.2). Como a sobretensão ocorreu para potências limite muito baixas é coerente que estas sobretensões delimitem as potências nestes nós.

Verificou-se, então, que considerar um sistema equivalente na determinação do máximo nível de inserção de geração eólica no caso de sistemas de distribuição como ocorre para sistemas de transmissão, estudados em Reginatto et al. (2009) e Reginatto et al. (2008), pode trazer uma informação incorreta da máxima inserção de geração eólica, já que nem sempre a tensão no próprio nó é responsável pela determinação do limite de inserção.

## 5.4 Caso da conexão de dois parques eólicos

Esta seção apresenta o caso da conexão de dois parques eólicos ao alimentador de distribuição de 32 nós. Apesar de em alguns casos a potência gerada no parque eólico conectado ao sistema de distribuição atender a demanda do alimentador, é possível que a partir de combinações destes parques seja atingida uma potência total ainda maior, podendo atender tanto a demanda como um possível incremento da mesma. Assim, nesta seção analisa-se a influência da instalação destes dois parques eólicos na inserção e penetração máxima de geração eólica.

As combinações foram escolhidas dividindo em dois grupos, cada um com três casos de estudo, e dentre eles a combinação de parques do mesmo lado do alimentador ou em lados diferentes, conforme a tabela 5.3.

Tabela 5.3: Casos de combinação de conexão de parques eólicos no alimentador de distribuição de 32 nós

<i>Caso</i>	<i>Nó de conexão 1</i>	<i>Localização no alimentador</i>	<i>Nó de conexão 2</i>	<i>Localização no alimentador</i>	<i>Característica</i>
1	805	Direito	909	Esquerdo	X/R similares
2	602	Direito	803	Direito	X/R similares
3	902	Esquerdo	906	Esquerdo	X/R similares
4	807	Direito	906	Esquerdo	X/R diferentes
5	804	Direito	807	Direito	X/R diferentes
6	902	Esquerdo	910	Esquerdo	X/R diferentes

Optou-se por considerar as análises somente para o caso do alimentador de 32 nós em carga pesada, considerando que este apresentou-se como o caso de maior limitação da inserção e penetração de geração eólica na conexão de um único parque.

### 5.4.1 Parques eólicos

A figura 5.13 apresenta o diagrama unifilar da conexão de dois parques eólicos ao alimentador de 32 nós para o caso 4 da tabela 5.3. O alimentador onde foram conectados os parques é o mesmo descrito na seção 5.2 e os parques eólicos são também idênticos ao descrito na seção 5.3.1.

Considerou-se que a potência gerada por cada parque eólico pode variar desde 20 até 100% de sua potência nominal ( $P_n$ ). Além disso, admitiu-se que os parques eólicos conectados são idênticos.

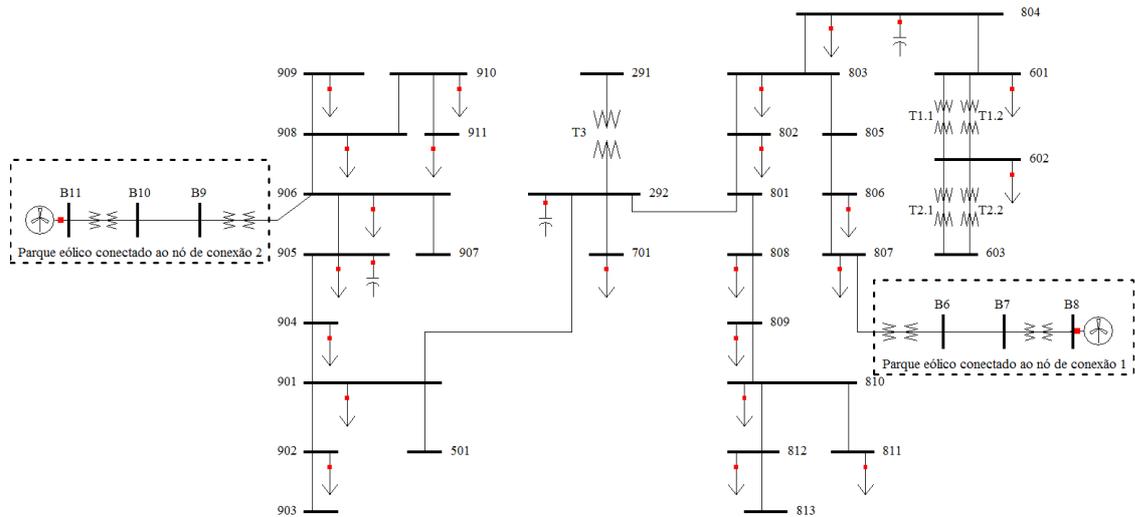


Figura 5.13: Alimentador com dois parques eólicos conectados aos nós 807 e 906

## 5.4.2 Análise da influência na tensão de regime permanente

Esta seção apresenta a análise da influência na tensão de regime permanente quando dois parques eólicos são conectados ao alimentador de distribuição de 32 nós.

A figura 5.14 apresenta as curvas  $P - V$  de cada caso estudado conforme tabela 5.3, que indicam a tensão nos nós de carga e de geração em função da potência gerada pelos parques eólicos conectados ao alimentador de distribuição de 32 nós. Estas foram obtidas a partir do fluxo de potência continuado quando os parques eólicos eram conectados aos nós de conexão escolhidos, sempre dois a dois. Considerou-se que os parques combinados estavam gerando sempre a mesma potência, como se estivessem submetidos aos mesmos regimes de ventos.

Observou-se que para 4 dos 6 casos estudados as curvas  $P - V$  indicaram a ocorrência de sobretensão em alguns nós do alimentador. Para o caso 1, por exemplo, a potência limite para que a tensão de regime permanente não atinja limites críticos (acima de 1,05 pu) seria de pouco mais de 6 MW instalados no total. Isto se deve à sobretensão que ocorre em alguns nós do alimentador quando foi feita esta combinação.

Como critério, as tensões de regime permanente nos nós estudados deveriam permanecer dentro dos limites aceitos para o parque operando desde 20 até 100% de sua potência nominal, conforme já foi comentado. Para o caso 1, por exemplo, com a potência nominal igual a potência limite de 6 MW, as tensões de regime permanente nos nós deveriam permanecer entre 0,93 e 1,05 pu para o intervalo de potência gerada pelos parques de 1,2 a 6 MW. Verificou-se porém que neste caso 1 as tensões atenderam este critério de tensão de regime permanente adequada somente a partir de potências de aproximadamente até 1,3 MW. Portanto, não foi possível atender aos limites de tensão de regime permanente adequados nem mesmo com a potência limite determinada pela sobretensão em alguns nós.

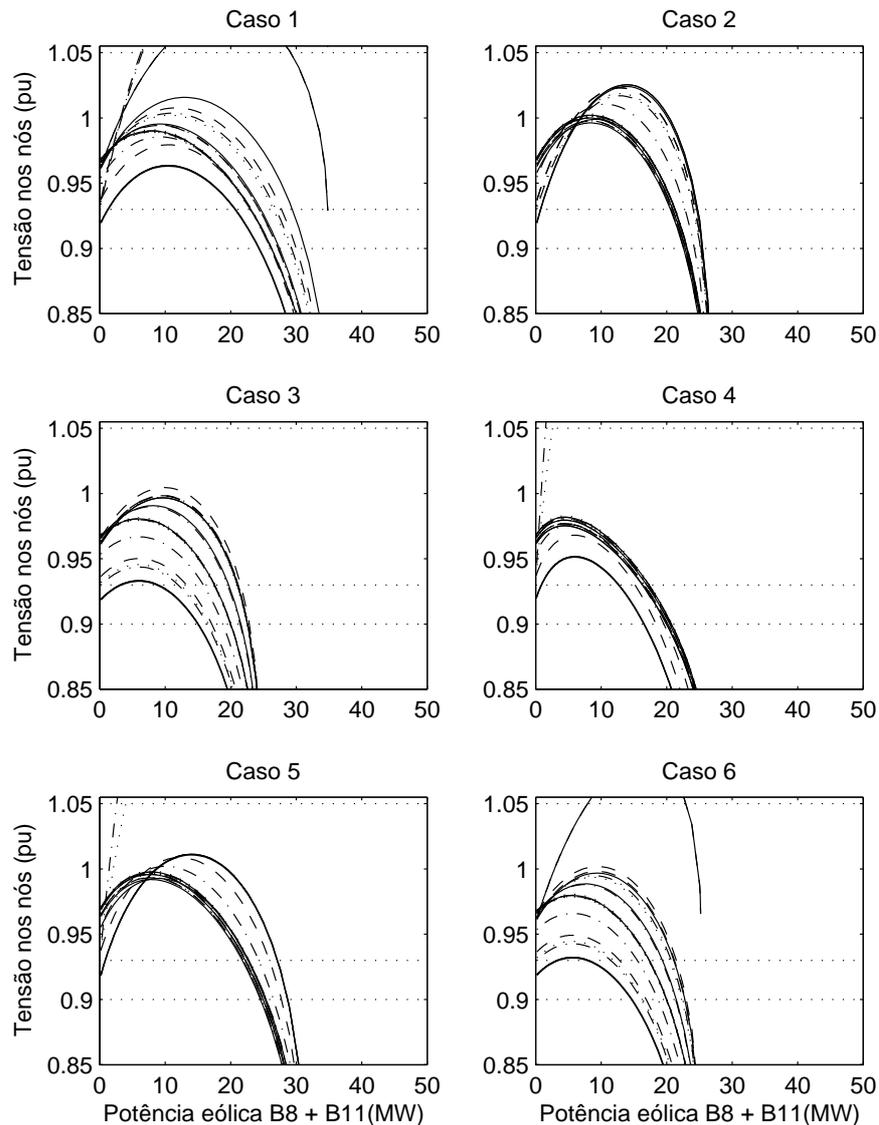


Figura 5.14: Curvas  $P - V$  dos parques combinados conectados ao alimentador de 32 nós em carga pesada

De forma similar ocorreu nos casos 4, 5 e 6 que também apresentaram a sobretensão em ao menos um nó como fator limitante da máxima potência de geração eólica que pode ser inserida.

Os casos 2 e 3 não apresentaram sobretensão. No caso 2 a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente adequado foi de aproximadamente 20 MW, pois todas as tensões eram maiores que 0,93 pu a partir de pouco menos de 1 MW, o que inclui toda a faixa de operação do parque eólico, de 4 MW a 20 MW (20 a 100% da potência nominal), o que permitiu a inserção de geração eólica para parques com até 20 MW. Já no caso 3 este intervalo seria de aproximadamente 1,7 a 8,6 MW para atendimento do critério da tensão de

regime permanente adequada, porém para alguns nós a tensão só atingiu 0,93 pu a partir de aproximadamente 3,4 MW. Assim, neste caso não foi possível a inserção de geração eólica com atendimento da tensão de regime permanente adequada.

A tabela 5.4 apresenta os valores encontrados das potências limite para cada faixa de operação de tensão estudado, onde  $P_{lim_{ad}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente adequado e  $P_{lim_{pr}}$  é a potência limite que atendeu ao critério de tensão de regime permanente precário. A sigla NA indica que não houve potência limite que atendesse ao critério.

Estas potências equivalem ao total inserido no alimentador, ou seja, para este cenário onde os dois parques são idênticos, a potência nominal de cada parque é equivalente à metade da potência descrita na tabela 5.4.

Ocorreu portanto, que os casos em que a tensão no próprio nó limitava a inserção continuaram da mesma forma também quando os parques foram combinados, devido à manutenção da sobretensão em alguns nós do alimentador. Em função disso os limites de potência observados não foram tão mais elevados dos que os encontrados quando somente um parque era conectado ao sistema (ver tabelas 5.2 e 5.4).

Verificou-se que todos os casos em que a conexão de dois parques eólicos incluiu um nó para o qual a conexão de apenas um parque eólico apresentava sobretensão em algum nó do alimentador (casos 1, 4, 5 e 6), apresentaram o mesmo comportamento.

Considerando-se que as potências limite encontradas foram em maioria bastante baixas e que o teste realizado para diferentes cenários no caso do sistema de distribuição de 5 nós, realizado na seção 4.4.2 do capítulo 4, mostrou que o pior cenário a ser considerado era de que os parques eólicos sempre produzissem a mesma potência, optou-se por desprezar os demais cenários de teste para o sistema de distribuição de 32 nós.

Tabela 5.4: Limites de potência para os casos combinados dos parques eólicos conectados ao alimentador de 32 nós

<i>Caso</i>	$P_{lim_{ad}}$ (MW)	$P_{lim_{pr}}$ (MW)
1	NA	6,272
2	20,582	22,591
3	NA	14,966
4	NA	1,532
5	NA	2,615
6	NA	7,935

### 5.4.3 Comparação dos resultados para os casos de um e dois parques eólicos conectados ao alimentador

Esta seção apresenta a comparação dos resultados dos limites máximos de potência que pode ser inserida e de máxima penetração de geração eólica para os casos de um e dois parques eólicos conectados ao alimentador de distribuição de 32 nós.

A figura 5.15 mostra a máxima potência inserível no nó de conexão quando um parque eólico é conectado ao alimentador, utilizando os resultados apresentados na tabela 5.4 para o caso de carga pesada, em comparação com a máxima potência inserível somente neste mesmo nó de conexão quando dois parques estão conectados ao alimentador, equivalente à metade da potência descrita na tabela 5.2 para cada caso.

Observou-se que a potência limite no nó quando há um único parque conectado ao alimentador foi sempre maior que a potência limite naquele nó quando há dois parques conectados ao alimentador. Todos os novos limites de potência inserível no nó foram sempre menores que quando os parques estão combinados, apesar de sutis em alguns casos. Em alguns casos, como nas conexões do parque nos nós 602, 803, 804, 902 e 906 a diferença foi bastante significativa, enquanto para a conexão dos parques nos nós 805, 807, 909 e 910 a diferença não foi muito significativa.

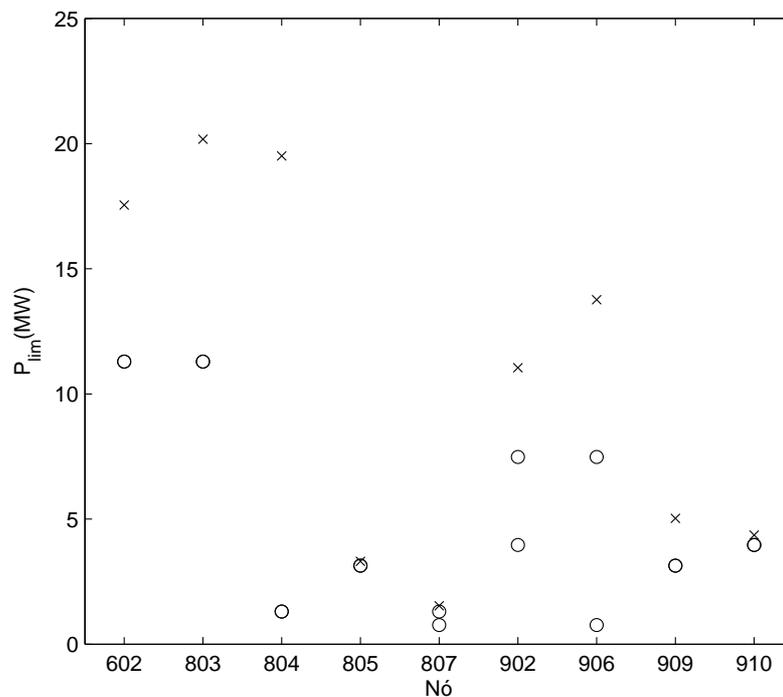


Figura 5.15: Comparativo da potência limite de inserção para: × - um único parque conectado ao alimentador e o - dois parques

Esta figura 5.15 mostra que não houve aumento na potência limite que pode ser inserida no nó, ao contrário, a potência limite que pode ser inserida naquele nó foi sempre menor quando dois parques são conectados ao alimentador. Contudo, se forem comparadas a potência limite inserível quando apenas um parque está conectado ao alimentador com a potência total dos dois parques juntos, o panorama foi diferente e é apresentado na figura 5.16.

A figura 5.16 mostra a máxima penetração de geração eólica quando há dois parques conectados ao alimentador, de acordo com os casos da tabela 5.3, em relação à máxima penetração de geração eólica nos casos quando há apenas um parque conectado ao alimentador.

Para os casos de conexão dos parques em nós nos quais a relação  $X/R$  da impedância equivalente, vista de cada nó de conexão de cada parque eólico combinado, era similar (casos 1, 2 e 3), a máxima penetração de geração eólica no alimentador foi maior quando houve dois parques conectados. Para os parques conectados em nós com relação  $X/R$  diferentes (casos 4, 5 e 6) a máxima penetração de geração eólica no alimentador, com dois parques conectados a ele, foi menor que pelo uma das configurações com apenas um parque eólico conectado (ver tabela 5.3).

Percebe-se então que nos casos onde a relação  $X/R$  da impedância equivalente vista dos nós de conexão dos parques era diferente, as características do nó de conexão com menor penetração de geração eólica (baixa relação  $X/R$ ) não permitiram obter melhorias na penetração pela combinação com outro parque eólico conectado a um nó com características distintas. Pode-se então concluir que nós com características distintas como estas não deveriam ser combinados ou então os parques eólicos conectados deveriam ser distintos, adequando-se às características de cada nó de conexão.

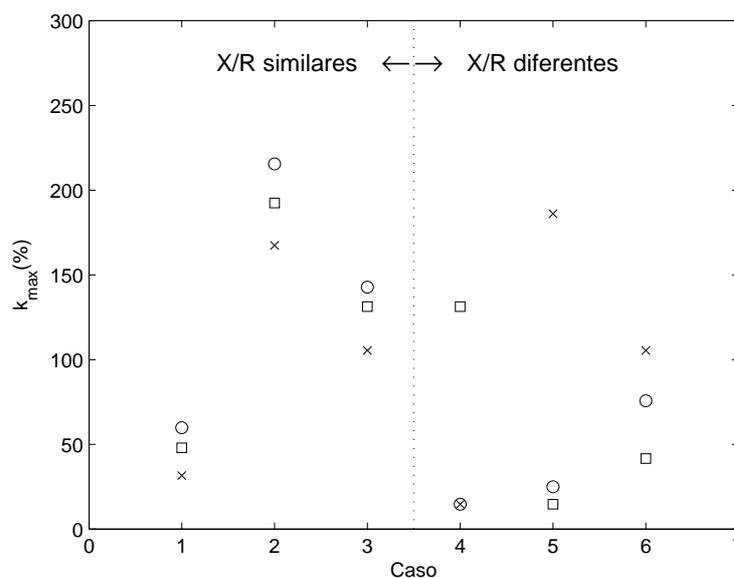


Figura 5.16: Penetração de geração eólica nos casos combinados:  $\times$  - Nó de conexão 1,  $\square$  - Nó de conexão 2 e  $\circ$  - conexão dos dois parques.

## 5.5 Conclusão

Este capítulo descreveu a análise da máxima inserção e penetração de geração eólica para o caso de um alimentador de distribuição de 32 nós. Foram considerados 10 nós de conexão neste alimentador, para os casos da conexão de um e dois parques eólicos.

Observou-se que os nós 805, 807, 909, 910 e 911 são nós de menor relação  $X/R$  da impedância equivalente e são nós que quando utilizados para conexão do parque eólico ao alimentador implicaram em sobretensão em alguns nós de carga do alimentador. Foram nós nos quais a tensão no próprio nó foi responsável por limitar a potência máxima de geração eólica. Além disso são nós em que a máxima inserção e penetração de geração eólica foram independentes da topologia do alimentador, já que a tensão no próprio nó de conexão definiu estes níveis máximos.

Verificou-se que a relação  $X/R$  da impedância equivalente influencia na inserção e penetração de geração eólica. Além disso, houve forte dependência do carregamento e da topologia do alimentador. Contudo, observou-se que a máxima penetração de geração eólica dependeu mais fortemente do carregamento nos nós com maior relação  $X/R$  e que também apresentaram mais altos níveis de penetração de geração eólica.

A análise da máxima penetração de geração eólica mostrou que, em alguns casos um único parque eólico conectado supriu toda a demanda do alimentador em todos os carregamentos. Estudou-se assim mesmo o caso da conexão de dois parques eólicos ao alimentador, com potências idênticas. Apesar da máxima inserção de geração eólica no próprio nó de conexão ter diminuído em comparação à conexão de apenas um parque eólico no alimentador, em alguns casos a máxima penetração de geração eólica aumentou ao se conectar dois parques eólicos ao alimentador. Porém, foi vantajoso apenas para as combinações de conexão do parque em nós com relação  $X/R$  da impedância equivalente similares.

Observou-se níveis máximos de inserção de geração eólica no alimentador de distribuição de 32 nós muito maiores que os níveis encontrados para o alimentador de distribuição de 5 nós. Esperava-se que os níveis de inserção de geração eólica vistos pelo equivalente do nó de conexão, verificados na figuras 4.14 e 5.12, fossem similares caso os nós de conexão do parque tivessem relação  $X/R$  de impedância equivalente similares, como por exemplo o nó B3 do alimentador de 5 nós e o nó 602 do alimentador de 32 nós, porém, não o foram. Isto significa que as impedâncias associadas ao parque eólico em si (linhas internas e transformadores de conexão), possuem uma influência considerável nos níveis de inserção e penetração de geração eólica. Neste trabalho o fator de potência do parque eólico foi considerado unitário nos terminais do aerogerador, não no nó de conexão do parque eólico.



# Capítulo 6

## Conclusão

Este trabalho estudou a conexão de unidades de geração eólica em sistemas de distribuição no sentido de verificar quais os limites máximos de potência que podem ser interligados atendendo a determinados requisitos de conexão. Foram observadas as principais tecnologias e topologias de sistemas de geração eólica, principalmente as topologias com utilização de geradores com tecnologia de operação em velocidade variável. Esta tecnologia permite aproveitar as variações do vento da melhor forma possível.

Os limites máximos de potência foram caracterizados em termos dos níveis máximos de inserção de geração eólica, relativos à capacidade equivalente do nó de conexão, e da máxima penetração de geração eólica, relativos à carga instalada no alimentador. Exigiu-se que a tensão de regime permanente nos nós do alimentador de distribuição atendesse a limites máximos pré-estabelecidos de variação para todas as condições operativas possíveis do parque eólico produzindo desde 20% até 100% de sua potência nominal.

O estudo foi realizado através de simulação computacional sobre dois alimentadores de distribuição diferentes: um alimentador de distribuição com 5 nós, conectando o parque eólico em quatro diferentes pontos deste sistema e considerando três níveis diferentes de carregamento; e um alimentador de distribuição com 32 nós, conectando o parque eólico em dez diferentes pontos deste sistema e considerando também três níveis diferentes de carregamento.

Os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica foram analisados em função: (i) das características do nó de conexão (relação  $X/R$  da impedância e tensão equivalentes); (ii) do carregamento do alimentador; (iii) do nó de conexão.

Observou-se através das análises realizadas para conexão de um parque eólico ao alimentador que:

1. A relação  $X/R$  da impedância equivalente mostrou grande influência sobre os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica. Observou-se grande diferença de inserção de geração eólica conforme o valor da relação  $X/R$  da impedância equivalente vista do nó de conexão ser pequena ou grande.

2. O carregamento mostrou uma influência não linear sobre estes níveis, além de ocorrerem de maneira inversa em alguns casos. Como a carga média estudada equivale a 50% da carga pesada e a carga leve a 10% da carga pesada, esperou-se que os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica tivessem valores intermediários para a carga média, entre a carga pesada e leve, mas isso não ocorreu. Em alguns casos a carga média atingiu níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica muito próximos da carga leve e distantes da carga pesada, enquanto em outros casos aproximou-se dos níveis em carga pesada e distanciou-se dos níveis em carga leve.
3. A influência da tensão equivalente nos níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica não mostrou-se evidente nos testes realizados. Os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica apresentaram-se bastante dispersos, sendo em alguns casos similares para diferentes tensões, em outros distintos para tensões similares.
4. A topologia do alimentador teve influência sobre os níveis máximos de inserção e penetração de geração eólica já que em diversos casos os limites observados não foram determinados pela tensão no próprio nó de conexão e sim em outros nós. Isto foi observado em 57% dos casos, para os 14 nós de conexão estudados nos alimentadores de 5 e 32 nós, no caso de carga pesada.

A possível influência da topologia do alimentador de distribuição devido a proximidade do nó de conexão do parque eólico dos nós de carga constituiu uma das principais motivações para a realização deste trabalho. Os resultados obtidos evidenciam tal influência, que mostrou-se significativa no caso de carga pesada, nos 2 alimentadores estudados. Entretanto, nos casos de carregamentos leves do alimentador, tal influência mostrou-se nula ou desprezível.

Com relação à conexão de dois parques eólicos no mesmo alimentador, de maneira geral observou-se níveis superiores de penetração eólica comparados a um só parque conectado ao alimentador, exceto nos casos de combinação de nós de conexão com relação  $X/R$  muito distintas.

## 6.1 Conclusões específicas

No caso do alimentador de 5 nós, observou-se que a máxima inserção de geração eólica foi influenciada pelas características do nó de conexão, pelo nível de carregamento e pela topologia do alimentador. Para os três carregamentos estudados a máxima inserção de geração eólica ocorreu para os nós com menor relação  $X/R$  de impedância equivalente. Em todos os nós, o nível máximo de inserção de geração eólica diminuiu com o aumento do carregamento do sistema, devido a maior precariedade das tensões nos nós do alimentador. Ainda, a máxima inserção pode ser determinada pela tensão em nós diferentes do nó de conexão do parque eólico, o que mostrou a influência da topologia e estrutura do alimentador.

As análises mostraram o nó B4 como um nó bastante crítico do sistema, que limitou a inserção e penetração de geração eólica em praticamente todos os casos, devido a subtensão. Isto mostrou que a avaliação da máxima inserção de geração eólica em sistemas de distribuição com base apenas no sistema equivalente, equivalente de Thèvenin visto do nó de conexão, tipicamente levou a resultados equivocados, sendo necessário considerar a estrutura do alimentador. Comparativamente à máxima inserção de geração eólica, a máxima penetração de geração eólica trouxe uma informação relativa ao alimentador como um todo.

Em nenhum dos casos de carga pesada foi possível atender mais de 64% da demanda do alimentador pela geração eólica instalada, tampouco foi possível para os demais carregamentos do sistema atender os 100% da demanda. Dessa forma foi analisada a conexão de duas unidades de geração eólica idênticas em dois diferentes nós do alimentador e observou-se um aumento na potência limite a ser inserida nos nós comparado à conexão de apenas um parque eólico. Foi possível até mesmo inserir geração eólica em nós que se não fossem combinados não permitiriam tal conexão, ou seja, houve uma melhora significativa no atendimento da demanda do alimentador quando os parques são conectados em conjunto no mesmo alimentador.

Diferente do caso do alimentador de 5 nós, o alimentador de 32 nós estudado apresentou características particulares principalmente devido ao aparecimento de sobretensões em alguns nós do sistema. Estes nós que apresentaram sobretensão fizeram com que os níveis de inserção de geração eólica neste nó fossem reduzidos. Estes mesmos nós apresentaram relação  $X/R$  da impedância equivalente bastante pequenas, como era esperado. Entretanto os nós que possibilitaram maior inserção de geração eólica apresentaram valores da relação  $X/R$  em torno de 1,6 e 2 no caso de carga pesada, por exemplo, e apresentaram subtensão. Apesar do modelo máquina barra-infinita não representar muito bem um alimentador de distribuição, a tendência das curvas  $\rho_{s_{max}} \times X/R$  de iniciar por baixos valores de inserção, atingir um pico e novamente diminuir para valores altos de relação  $X/R$  também se mostrou válida.

Aqui também a máxima inserção de geração eólica em alguns casos foi determinada pela tensão em nós diferentes do nó de conexão do parque eólico, o que mostra novamente a influência da topologia e estrutura do alimentador.

Em todos dos casos de carga pesada no alimentador de 32 nós foi possível atender toda a demanda do alimentador pela geração eólica instalada, para todos carregamentos do sistema, desde que a conexão fosse em nós que não apresentassem sobretensão. Isto foi observado tanto para conexão de um parque eólico como a conexão de dois parques eólicos idênticos neste alimentador. Assim, sempre que um dos nós de conexão apresentou sobretensão, não foi possível melhorar a potência instalada naquele nó nem mesmo com a combinação com outro parque eólico instalado no alimentador.

Como foi considerado que o fator de potência do parque eólico é regulado nos terminais do aerogerador, as impedâncias associadas ao parque eólico em si (linhas internas e transformadores de conexão) utilizados nos dois casos estudados, tiveram uma influência considerável

nos níveis de inserção e penetração de geração eólica. Como o parque eólico foi considerado idêntico nos 2 casos, esta influência foi maior no caso do alimentador de 5 nós (de maior capacidade) do que no caso do alimentador de 32 nós (de menor capacidade), o que explica o fato dos níveis máximos de inserção de geração eólica obtidos terem sido maiores no caso do alimentador de 32 nós. Vale ainda destacar que o estudo foi realizado apenas para o caso em que o parque eólico produz apenas potência ativa.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros são propostos os seguintes assuntos:

- Analisar a influência de outros critérios como estabilidade de tensão ou comportamento transitório no alimentador de distribuição quando da conexão de unidades de geração eólica em nós deste alimentador.
- Estudar dos níveis de inserção de geração eólica para sistemas de geração eólica que empregam diferentes tecnologias de geradores, diferenciando-se uma das outras, como o uso do DFIG ou síncrono;
- Analisar a influência na tensão de regime permanente dos nós de um alimentador quando da conexão de mais de dois parques eólicos nos diferentes nós do alimentador;
- Com base nos resultados obtidos nesta dissertação propor um método do dimensionamento da potência de um parque eólico a ser conectado ao alimentador.

# Referências Bibliográficas

- Abdelkader, S. and Flynn, D. (2009). Graphical determination of network limits for wind power integration, *IET Generation, Transmission & Distribution* **3**(9): 841.
- ABEEólica (2013). Boletim Mensal de Dados do Setor Eólico - Público, *Technical report*, Associação Brasileira de Energia Eólica.  
Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/Boletim-Dados-ABEolica-janeiro-2013-Publico.pdf>
- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*, Wiley.
- Ackermann, T., Andersson, G. and Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research* **57**(3): 195–204.
- Anaya-Lara, O., Hughes, M., Hughes, M., Cartwright, M. and N.Jenkins (eds) (2009). *Wind energy generation: Modeling and Control*, John Wiley & Sons, England.
- ANEEL (2012a). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 1 - Introdução, *Technical report*, Agência Nacional de Energia Elétrica.  
Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo1\\_Revisao\\_6.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo1_Revisao_6.pdf)
- ANEEL (2012b). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, *Technical report*, Agência Nacional de Energia Elétrica.  
Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8\\_Revisão\\_4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_4.pdf)
- Ayres, H. M. (2010). *Desenvolvimento de metodologias de análise de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica*, PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Banakar, H., Luo, C. and Ooi, B. T. (2008). Impacts of Wind Power Minute-to-Minute Variations on Power System Operation, *IEEE Trans. Energy Convers.* **23**(1): 150–160.
- Bianchi, F., De Battista, H. and Mantz, R. (2007). *Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design*, Advances in industrial control, Springer.
- Borbely, A. and Kreider, J. (2010). *Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*, Mechanical Engineering Series, Taylor & Francis.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons.
- ChemViews (2012). How Wind Turbines Work, Magazine Article.

- da Rocha, C. and Reginatto, R. (2010). Influence of control strategies on DFIG-based wind farms integration in the power systems, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 2570–2576.
- de Abreu, L. V. L. (2005). *Análise do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*, PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Dondi, P., Bayoumi, D., Haederli, C., Julian, D. and Suter, M. (2002). Network integration of distributed power generation, *Journal of Power Sources* **106**: 1–9.
- Driesen, J., Brabandere, K. D., Reinilde, D., Belmans, R. and Member, S. (2005). Small Wind Turbines in the Built Environment : Opportunities and Grid-Connection Issues, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*.
- Freitas, W., Vieira Jr., J. C. M., França, A. M., da Silva, L. C. P. and da Costa, V. F. (2005). Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída, *Controle & Automação* **16**(3): 332–344.
- Gipe, P. (2009). *Wind Energy Basics: A Guide to Home- And Community-Scale Wind Energy Systems*, Chelsea Green Publishing Company.
- GWEC (2013). Global Wind Statistics, *Technical report*, Global Wind Energy Council.  
Disponível em: [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012\\_english.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012_english.pdf)
- Heier, S. and Waddington, R. (2006). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley.
- Holdsworth, L., Wu, X. G., Ekanayake, J. B. and Jenkins, N. (2003). Direct solution method for initialising doubly-fed induction wind turbines in power system dynamic models, *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. I.
- INEE (2012).  
Disponível em: <http://www.inee.org.br/default.asp>
- Jenkins, N., Jenkins, N. and of Electrical Engine, I. (2000). *Embedded Generation, Power and Energy Series*, The Institution of Engineering and Technology.
- Kersting, W. H. (2006). *Distribution System Modeling and Analysis, Second Edition (Electric Power Engineering Series)*, 2 edn, CRC Press.
- Kusiak, A. and Song, Z. (2010). Design of wind farm layout for maximum wind energy capture, *Renewable Energy* **35**(3): 685–694.
- Lundberg, S. (2000). *Electrical limiting factors for wind energy installations*, PhD thesis, Chalmers University of Technology.
- Luo, C., Far, H. G., Banakar, H., Keung, P.-k., Ooi, B.-t. and Fellow, L. (2007). Estimation of Wind Penetration as Limited by Frequency Deviation, *IEEE Trans. Energy Convers.* **22**(3): 783–791.

- Ma, Y., Yang, H., Zhou, X., Li, J. and Wen, H. (2009). The dynamic modeling of wind farms considering wake effects and its optimal distribution, *2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference* pp. 1–4.
- Morren, J. and de Haan, S. W. (2008). Maximum penetration level of distributed generation without violating voltage limits, *CIREN Seminar 2008: SmartGrids for Distribution* (0074): 23–24.
- Mukhopadhyay, S. and Singh, B. (2009). Distributed Generation - Basic Policy , Perspective Planning , and Achievement so far in India.
- Munteanu, I. (2008). *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach*, Advances in Industrial Control Series, Springer-Verlag London Limited.
- ONS (2010). Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira e de seus componentes, *Technical report*, Operador Nacional do sistema.  
Disponível em: [http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo\\_2/Submódulo%202.8\\_Rev\\_1.1.pdf](http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_2/Submódulo%202.8_Rev_1.1.pdf)
- Pires, F. L. C., Neto, M. R. B., da Silva, F. C. M., Xavier, J. B., Serpa, F. L. L. and Leão, R. P. S. (2008). Análise das regulamentações para conexão de parques eólicos à rede elétrica, *Induscon - VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*.
- Reginato, R., Bazanella, A. S. and Zanchettin, M. (2008). Região de Penetração Segura de Geração Eólica com Aerogeradores de Indução, *XVII Congresso Brasileiro de Automática*, Juíz de Fora, MG.
- Reginato, R., Zanchettin, M. G. and Tragueta, M. (2009). Analysis of safe integration criteria for wind power with induction generators based wind turbines, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Ieee, pp. 1–8.
- Salim, R. H. (2011). *Uma nova abordagem para a análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores síncronos distribuídos*, PhD thesis, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Saraiva, R. V. (2007). *Localização óptima dos conversores de um parque eólico para minimização de custos totais* , Master's thesis, Universidade Técnica de Lisboa.
- Slootweg, J. and Kling, W. (2003). Is the Answer Blowing in the Wind?, *IEEE power & energy magazine* (december): 26–33.
- Smith, J. W., Taylor, J. A., Brooks, D. L. and Dugan, R. C. (2004). Interconnection Studies for Wind Generation, *Rural Electric Power Conference*, number 04, pp. C3 1–8.
- Tarnowski, G. C. (2006). *Metodologia de regulação da potência ativa para operação de sistemas de geração eólica com aerogeradores de velocidade variável*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica., Rio Grande do Sul, Brasil.
- Ullah, N. (2005). Small scale integration of variable speed wind turbines into the local grid and its voltage stability aspects, *2005 International Conference on Future Power Systems*, Ieee, pp. 8 pp.–8.

Vittal, E., McCalley, J. D., Ajarapu, V. and Harbour, T. (2007). Wind Penetration Limited by Thermal Constraints and Frequency Stability, *North American Power Symp.*, pp. 353–359.

Zanchettin, M. G. (2012). *Análise da inserção de geração eólica em aerogeradores de indução*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Campus de Foz do Iguaçu. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Foz do Iguaçu, Brasil.

# Apêndice A

## Parâmetros do sistema 5 nós

Os parâmetros do alimentador de distribuição de cinco nós são apresentados na tabela A.1. Os parâmetros têm potência base de 100 MVA.

Tabela A.1: Parâmetros dos nós do sistema 5 nós

<i>Nós</i>		<i>Parâmetros</i>	
<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>R (pu)</i>	<i>X (pu)</i>
B1	B2	0.01869	0.17726
B2	B3	0.31000	0.40174
B2	B5	0.33290	0.58310
B3	B4	0.09000	0.15770
B3	B5	0.06446	0.08600
B6	B7	0.13900	0.31040

O alimentador apresentado na figura 4.1 possui uma carga pesada total de 52,70 MW e 10,56 MVar distribuídos nos nós conforme detalhado na tabela A.2. A primeira coluna apresenta o nó de carga e a segunda e terceira colunas apresentam os valores de potência ativa e reativa da carga respectivamente. O sistema estudado foi modelado com as cargas tipo potência constante. A carga média considerada nas análises corresponde a 50% da carga pesada e a carga leve corresponde a 10% da carga pesada.

Tabela A.2: Carregamentos do alimentador de 5 nós.

<i>Cargas / Nó</i>	<i>Pesada</i>		<i>Média</i>		<i>Leve</i>	
	<i>MW</i>	<i>MVar</i>	<i>MW</i>	<i>MVar</i>	<i>MW</i>	<i>MVar</i>
L1 / B2	31,50	6,31	15,75	3,155	3,15	0,631
L2 / B4	12,00	2,40	6,00	1,200	1,20	0,240
L3 / B5	9,20	1,85	4,60	0,925	0,92	0,185



# Apêndice B

## Parâmetros do sistema 32 nós

Os parâmetros do alimentador de distribuição de 32 nós são apresentados nas tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4. A potência base do sistema é de 10 MVA.

### B.1 Dados das linhas

Os dados das linhas do sistema de distribuição da figura 5.1 são apresentados na tabela B.1. As duas primeiras colunas indicam o nó de origem e o nó de destino respectivamente. A resistência e a reatância das linhas são descritas na terceira e quarta colunas dados em unidades por quilômetro. A distância da linha entre os nós é apresentada na última coluna.

### B.2 Dados das cargas

O alimentador apresentado na figura 5.1 possui uma carga pesada total de 10,482 MW e 2,513 MVar distribuídos nos nós conforme detalhado na tabela B.2. A primeira coluna apresenta o nó de carga e a segunda e terceira colunas apresentam os valores de potência ativa e reativa da carga respectivamente. O sistema estudado foi modelado com as cargas tipo potência constante. A carga média considerada nas análises corresponde a 50% da carga pesada e a carga leve corresponde a 10% da carga pesada.

### B.3 Dados dos transformadores

Os dados dos transformadores do sistema de distribuição da figura 5.1 são apresentados na tabela B.3. As duas primeiras colunas indicam o nó de origem e o nó de destino respectivamente. A resistência e a reatância das linhas são descritas na terceira e quarta colunas dados no sistema por unidade. A potência base para todos os transformadores é de 10 MW.

Tabela B.1: Dados das linhas do sistema 32 nós

<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>R (pu/km)</i>	<i>X (pu/km)</i>	<i>Linha (km)</i>	<i>R (pu)</i>	<i>X (pu)</i>	<i>R (%)</i>	<i>X (%)</i>
292	701	0,0100	0,0208	0,25	0,002500	0,005200	0,2500	0,5200
292	901	0,0100	0,0208	1,75	0,017500	0,036400	1,7500	3,6400
292	801	0,0100	0,0208	0,01	0,000100	0,000208	0,0100	0,0208
901	501	0,0193	0,0250	0,01	0,000193	0,000250	0,0193	0,0250
901	902	0,0100	0,0208	3,65	0,036500	0,075920	3,6500	7,5920
901	904	0,0100	0,0208	0,33	0,003300	0,006864	0,3300	0,6864
902	903	0,0100	0,0208	4,40	0,044000	0,091520	4,4000	9,1520
904	905	0,0365	0,0275	0,55	0,020075	0,015125	2,0075	1,5125
905	906	0,0292	0,0269	0,13	0,003796	0,003497	0,3796	0,3497
906	907	0,0292	0,0269	0,75	0,021900	0,020175	2,1900	2,0175
906	908	0,0292	0,0269	0,30	0,008760	0,008070	0,8760	0,8070
908	909	0,0839	0,0276	1,42	0,119138	0,039192	11,9138	3,9192
908	910	0,0839	0,0276	1,76	0,147664	0,048576	14,7664	4,8576
910	911	0,0839	0,0276	9,00	0,755100	0,248400	75,5100	24,8400
801	802	0,0100	0,0208	2,00	0,020000	0,041600	2,0000	4,1600
802	803	0,0100	0,0208	2,30	0,023000	0,047840	2,3000	4,7840
803	804	0,0100	0,0208	2,65	0,026500	0,055120	2,6500	5,5120
804	601	0,0000	0,0001	0,00	0,000000	0,000000	0,0000	0,0000
803	805	0,0839	0,0276	3,20	0,268480	0,088320	26,8480	8,8320
805	806	0,0839	0,0276	1,73	0,145147	0,047748	14,5147	4,7748
806	807	0,0839	0,0276	3,55	0,297845	0,097980	29,7845	9,7980
801	808	0,0100	0,0208	2,30	0,023000	0,047840	2,3000	4,7840
808	809	0,0100	0,0208	0,25	0,002500	0,005200	0,2500	0,5200
809	810	0,0100	0,0208	1,55	0,015500	0,032240	1,5500	3,2240
810	811	0,0551	0,0278	0,92	0,050692	0,025576	5,0692	2,5576
810	812	0,0100	0,0208	1,00	0,010000	0,020800	1,0000	2,0800
812	813	0,0100	0,0208	4,50	0,045000	0,093600	4,5000	9,3600

## B.4 Elementos shunt

O sistema de distribuição apresentado na figura 5.1 possui três nós com componente reativa da admitância shunt, conforme a tabela B.4.

Tabela B.2: Dados das cargas do sistema 32 nós

<i>Nó</i>	<i>Pesada</i>		<i>Média</i>		<i>Leve</i>	
	<i>P (MW)</i>	<i>Q (MVar)</i>	<i>P (MW)</i>	<i>Q (MVar)</i>	<i>P (MW)</i>	<i>Q (MVar)</i>
601	5,500	0,000	2,750	0,000	0,550	0,000
602	0,000	0,200	0,000	0,100	0,000	0,020
701	1,900	0,866	0,950	0,433	0,190	0,087
802	0,013	0,006	0,007	0,003	0,001	0,001
803	0,022	0,010	0,011	0,005	0,002	0,001
804	1,248	0,569	0,624	0,285	0,125	0,057
806	0,040	0,018	0,020	0,009	0,004	0,002
807	0,052	0,024	0,026	0,012	0,005	0,002
808	0,056	0,026	0,028	0,013	0,006	0,003
809	0,111	0,051	0,056	0,026	0,011	0,005
810	0,103	0,047	0,052	0,024	0,010	0,005
811	0,067	0,031	0,034	0,016	0,007	0,003
812	0,028	0,013	0,014	0,007	0,003	0,001
901	0,121	0,059	0,061	0,030	0,012	0,006
902	0,057	0,028	0,029	0,014	0,006	0,003
904	0,105	0,051	0,053	0,026	0,011	0,005
905	0,590	0,286	0,295	0,143	0,059	0,029
906	0,158	0,077	0,079	0,039	0,016	0,008
908	0,076	0,037	0,038	0,019	0,008	0,004
909	0,094	0,046	0,047	0,023	0,009	0,005
910	0,100	0,048	0,050	0,024	0,010	0,005
911	0,041	0,020	0,021	0,010	0,004	0,002

Tabela B.3: Dados dos transformadores do sistema 32 nós

<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Nome</i>	$S_{base}$ (MVA)	$R$ (pu)	$X$ (pu)	$R$ (%)	$X$ (%)
291	292	TR3	10	0	0,1740	0	17,40
601	602	TR1.1	10	0	0,0565	0	5,65
601	602	TR1.2	10	0	0,0565	0	5,65
602	603	TR2.1	10	0	0,0396	0	3,96
602	603	TR2.2	10	0	0,0396	0	3,96

Tabela B.4: Dados dos elementos shunt do sistema 32 nós

<i>Nó</i>	$B$ (MVar)
292	1,2
804	1,5
905	0,3