

**Universidade Federal do Ceará**  
**Centro de Tecnologia**  
**Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**



**MODELOS DE GERADORES EÓLIO-ELÉTRICOS PARA ESTUDOS DE  
SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE**

**Mário Siqueira de Sales Bastos**

**Fortaleza  
Maio 2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Mário Siqueira de Sales Bastos**

**MODELOS DE GERADORES EÓLIO-ELÉTRICOS PARA ESTUDOS DE  
SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Ailson Pereira de Moura, Dr.

**Fortaleza  
Maio 2006**



## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela por ter iluminado os caminhos da minha vida, pois sem ele hoje não estaria aqui.

Ao meu orientador, Prof. Ailson Pereira de Moura, não somente pela excelente formação profissional que sempre fez questão de compartilhar comigo, mas também pela amizade e confiança a mim dedicadas durante estes anos.

A minha amiga Siomara Peixoto, companheira de mestrado, que trabalhou junto comigo no desenvolvimento do programa computacional e tantos outros momentos.

Ao Ubirajara Leal, o Bira, pela ajuda no desenvolvimento do programa computacional em MATLAB.

A todos os professores e colegas da UFC, pelo compartilhamento não somente do conhecimento científico, mas também da minha formação pessoal.

Agradeço a toda equipe da Nacional Gás, empresa que hoje trabalho, em especial ao Gerente Técnico Ponte Júnior e o Superintendente Edson Queiroz Neto por confiar em meu trabalho e, em diversos momentos, deixar-me desenvolver meu trabalho de mestrado.

Agradeço de coração a meu pai, Felisberto (*in memmorium*), que hoje não está ao meu lado nesta conquista, mas está sempre comigo. A minha Mãe, Joanita, pelos seus esforços para a formação da pessoa que hoje sou. Agliberto, irmão e amigo que me ajudou e orientou em minha formação pessoal. Minhas irmãs Marli, Marta e Marlene que, mesmo distantes, estiveram sempre do meu lado. A minha namorada, Vanessa, pela compreensão e carinho dedicado a mim durante as horas de trabalho empregados nesta dissertação.

Bastos, M. S. S. “Modelos de geradores eólio-elétricos para estudos de sistemas de potência em regime permanente”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2006.

## RESUMO

O crescente aumento da demanda por energia elétrica e a necessidade de uma geração próxima dos centros consumidores fazem com que a geração distribuída e particularmente a geração eólio-elétrica apresente-se como uma fonte de energia com futuro promissor. Além de ser uma energia “limpa”, esta pode ser localizada próxima aos centros consumidores, garantindo a complementação do abastecimento de suas cargas. Para tornar possível a integração da geração eólio-elétrica com o sistema elétrico de potência, vários estudos em regime permanente são necessários, como por exemplo, o estudo do fluxo de carga. Na análise do fluxo de potência, a utilização de modelos adequados é condição essencial para obtenção de resultados confiáveis. Este trabalho apresenta o desenvolvimento, a implementação computacional e a análise de três modelos matemáticos de geradores eólio-elétricos interligados em um sistema de distribuição de energia elétrica real de 40 barras em regime permanente: o modelo PQ da máquina de indução, o modelo PQs da máquina de indução e o modelo simplificado do gerador síncrono. O fluxo de carga implementado com modelos de geradores eólio-elétricos foi baseado no método desacoplado rápido e programado em linguagem MATLAB. Os resultados obtidos comprovam uma boa performance dos modelos implementados. Entre os dois modelos da máquina de indução, mostra-se que a máquina de indução com o modelo PQs apresenta resultados com menores perdas em relação ao modelo PQ. Os resultados do modelo simplificado do gerador síncrono mostraram que esta máquina pode ser utilizada para a regulação de tensão com o controle do fator de potência nas barras do sistema elétrico.

**Palavras-chaves:** Geração Distribuída, Geração Eólio-elétrica, Fluxo de Carga, Regime Permanente.

Bastos, M. S. S. "Models of wind farms generators for studies of power systems in steady-state", University Federal of Ceará – UFC, 2006.

## **ABSTRACT**

The crescent increase of the demand for power and the need of a generation nearest of the consuming centers make the distributed generation and particularly the wind power comes as a source of power with promising future. Besides to be a "clean" power, it can be located near to the consuming centers, guaranteeing the complement provision of their loads. To turn possible the integration of the wind farms with the power system, several studies in steady-state are necessary, as for instance, the study of the load flow. In load flow analysis, the use of appropriate models is an essential condition for obtaining reliable results. This work presents the development, computer implementation and the analysis of three mathematical models of interlinked wind farms in a distribution system of real of 40 buses in steady-state: the PQ model of the induction machine, the PQs model of the induction machine and the model of the synchronous machine. The load flow implemented with models of wind power was based on the method fast decoupled load flow and programmed in language MATLAB. The obtained results prove a good performance of the implemented models. Between the two models of the induction machine, it is shown that the model PQs of the induction machine presents results with fewer losses in relation to the model PQ. The results of the simplified model of the synchronous generator showed that this machine can be used for the tension regulation with the control of the power factor in the buses of the power system.

**Key-words:** Distributed Generation, Wind Power, Load Flow, Steady-state.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 – Energia Eólico-Elétrica.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 – Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 – Objetivos da Dissertação.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 – Estrutura da Dissertação.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 – Principais Contribuições da Dissertação.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 – Trabalhos Decorrentes da Dissertação.....</b>	<b>6</b>
<b>2 – FLUXO DE CARGA.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 – Equações do Fluxo de Carga.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 – Método Desacoplado Rápido.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 – Resolução do Sistema de Equações Lineares.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 – Controle de Tensão em Barras do tipo PQ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5 – Fluxograma do Programa.....</b>	<b>15</b>
<b>2.6 – Programa Computacional.....</b>	<b>20</b>
<b>3 – MODELOS DOS GERADORES EÓLIOS-ELÉTRICOS.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 – Geração Eólico-Elétrica.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 – Análise Estatística.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 – Distribuição de Weibull.....</b>	<b>25</b>



3.4 – Regime dos Ventos.....	26
3.5 – Modelo PQ da Máquina de Indução.....	27
3.5.1 – Equacionamento do Modelo PQ da Máquina de Indução.....	28
3.5.2 – Algoritmo do Modelo PQ da Máquina de Indução.....	30
3.6 – Modelo PQs da Máquina de Indução.....	31
3.6.1 – Equacionamento do Modelo PQs da Máquina de Indução.....	31
3.6.2 – Algoritmo do Modelo PQs da Máquina de Indução.....	35
3.7 – Modelo Simplificado do Gerador Síncrono.....	36
3.7.1 – Equacionamento do Modelo Simplificado do Gerador Síncrono.....	37
3.7.2 – Algoritmo do Modelo Simplificado do Gerador Síncrono.....	39
<b>4 – SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 – Configuração da Rede de Energia Elétrica.....	40
4.2 – Descrição das Usinas Eólio-Elétricas.....	41
4.2.1 – Máquina de indução.....	41
4.2.2 – Máquina síncrona.....	41
4.3 – Simulação dos Modelos dos Geradores Eólio-Elétricos.....	42
4.4 – Modelo PQ da Máquina de Indução.....	42
4.4.1 – Caso Base.....	42
4.4.1.1 – Carga Leve.....	42
4.4.1.2 – Carga Pesada.....	43
4.4.2 – Resultados do Modelo PQ da Máquina de Indução.....	43
4.4.2.1 – Resultados do Primeiro Semestre.....	45
4.4.2.1.1 – Potências Geradas.....	45
4.4.2.1.2 – Magnitude das Tensões.....	47

4.4.2.1.3 – Perdas no Sistema Elétrico.....	50
4.4.2.2 – Resultados do Segundo Semestre.....	53
4.4.2.2.1 – Potências Geradas.....	53
4.4.2.2.2 – Magnitude das Tensões.....	56
4.4.2.2.3 – Perdas no Sistema Elétrico.....	58
4.5 – Modelo PQs da Máquina de Indução.....	59
4.5.1 – Caso Base.....	60
4.5.1.1 – Carga Leve.....	60
4.5.1.2 – Carga Pesada.....	60
4.5.2 – Resultados do Modelo PQs da Máquina de Indução.....	61
4.5.2.1 – Resultados do Primeiro Semestre.....	62
4.5.2.1.1 – Potências Geradas.....	62
4.5.2.1.2 – Magnitude das Tensões.....	64
4.5.2.1.3 – Perdas no Sistema Elétrico.....	66
4.5.2.2 – Resultados do Segundo Semestre.....	68
4.5.2.2.1 – Potências Geradas.....	69
4.5.2.2.2 – Magnitude das Tensões.....	71
4.5.2.2.3 – Perdas no Sistema Elétrico.....	73
4.6 – Comparativo dos Modelos da Máquina de Indução.....	74
4.6.1 – Primeiro Semestre – Carga Leve.....	75
4.6.2 – Primeiro Semestre – Carga Pesada.....	79
4.6.3 – Segundo Semestre – Carga Leve.....	81
4.6.4 – Segundo Semestre – Carga Pesada.....	84
4.7 – Modelo Simplificado do Gerador Síncrono.....	86

<b>4.7.1 – Caso Base.....</b>	<b>87</b>
<b>4.7.1.1 – Carga Leve.....</b>	<b>87</b>
<b>4.7.1.2 – Carga Pesada.....</b>	<b>87</b>
<b>4.7.2 – Resultados do Modelo Simplificado do Gerador Síncrono.....</b>	<b>88</b>
<b>4.7.2.1 – Resultados do Primeiro Semestre.....</b>	<b>88</b>
<b>4.7.2.1.1 – Potências Geradas.....</b>	<b>88</b>
<b>4.7.2.1.2 – Magnitude das Tensões.....</b>	<b>91</b>
<b>4.7.2.1.3 – Perdas no Sistema Elétrico.....</b>	<b>93</b>
<b>4.7.2.1.4 – Faixa de Operação do Gerador Síncrono.....</b>	<b>95</b>
<b>4.7.2.2 – Resultados do Segundo Semestre.....</b>	<b>97</b>
<b>4.7.2.2.1 – Potências Geradas.....</b>	<b>97</b>
<b>4.7.2.2.2 – Magnitude das Tensões.....</b>	<b>99</b>
<b>4.7.2.2.3 – Perdas no Sistema Elétrico.....</b>	<b>101</b>
<b>4.7.2.2.4 – Faixa de Operação do Gerador Síncrono.....</b>	<b>103</b>
<b>5 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>5.1 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>107</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Início do programa do fluxo de carga.....	16
Figura 2.2	Tela do programa MATLAB.....	17
Figura 2.3	Processo iterativo do programa do fluxo de carga.....	19
Figura 2.4	Arquivo de resultados do fluxo de carga – tensões nas barras.....	21
Figura 3.1	Velocidade dos ventos em Carga Leve – 1° e 2° semestre.....	27
Figura 3.2	Velocidade dos ventos em Carga Pesada – 1° e 2° semestre.....	27
Figura 3.3	Circuito simplificado da máquina de indução – gaiola de esquilo...	28
Figura 3.4	Circuito equivalente da máquina de indução – gaiola de esquilo...	31
Figura 3.5	Triângulo de potência para correção do fator de potência.....	34
Figura 3.6	Controle da excitação do gerador síncrono.....	36
Figura 3.7	Curva de Potência Ativa da Máquina de Síncrona de 500 kW.....	38
Figura 4.1	Sistema elétrico da simulação.....	40
Figura 4.2	Curva de potência ativa da máquina de indução.....	44
Figura 4.3	Curvas de potência reativa - modelo PQ da máquina de indução..	44
Figura 4.4	Potências geradas na barra 32 – Carga Leve – 1° semestre.....	45
Figura 4.5	Potências geradas na barra 36 – Carga Leve – 1° semestre.....	46
Figura 4.6	Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada – 1° semestre.....	46
Figura 4.7	Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada – 1° semestre.....	47
Figura 4.8	Magnitude da tensão na barra 32 – Carga Leve – 1° semestre.....	48
Figura 4.9	Magnitude da tensão na barra 36 – Carga Leve – 1° semestre.....	48
Figura 4.10	Magnitude da tensão na barra 32 – Carga Pesada – 1° semestre.	49
Figura 4.11	Magnitude da tensão na barra 36 – Carga Pesada – 1° semestre.	49
Figura 4.12	Perdas ativas no sistema – Carga Leve – 1° semestre.....	50
Figura 4.13	Perdas ativas no sistema – Carga Pesada – 1° semestre.....	51
Figura 4.14	Perdas reativas do sistema – Carga Leve – 1° semestre.....	51

Figura 4.15	Perdas no sistema – Carga Pesada – 1° semestre.....	52
Figura 4.16	Curva de perdas no sistema – Carga Leve.....	52
Figura 4.17	Curva de perdas no sistema – Carga Pesada.....	53
Figura 4.18	Potências geradas na barra 32 – Carga Leve – 2° semestre.....	54
Figura 4.19	Potências geradas na barra 36 – Carga Leve – 2° semestre.....	54
Figura 4.20	Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada – 2° semestre.....	55
Figura 4.21	Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada – 2° semestre.....	55
Figura 4.22	Magnitude da tensão na barra 32 – Carga Leve – 2° semestre.....	56
Figura 4.23	Magnitude da tensão na barra 36 – Carga Leve – 2° semestre.....	56
Figura 4.24	Magnitude da tensão na barra 32 – Carga Pesada – 2° semestre.	57
Figura 4.25	Magnitude da tensão na barra 36 – Carga Pesada – 2° semestre.	57
Figura 4.26	Perdas ativas do sistema – Carga Leve – 2° semestre.....	58
Figura 4.27	Perdas ativas do sistema – Carga Pesada – 2° semestre.....	58
Figura 4.28	Perdas reativas do sistema – Carga Leve – 2° semestre.....	59
Figura 4.29	Perdas reativas do sistema – Carga Pesada – 2° semestre.....	59
Figura 4.30	Curva de potência ativa da máquina de indução – Modelos PQs...	61
Figura 4.31	Curva de potência reativa da máquina de indução – Modelo PQs.	61
Figura 4.32	Potências geradas na barra 32 – Carga Leve – 1° Semestre.....	62
Figura 4.33	Potências geradas na barra 36 – Carga Leve – 1° Semestre.....	63
Figura 4.34	Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada – 1° Semestre.....	63
Figura 4.35	Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada – 1° Semestre.....	64
Figura 4.36	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve – 1° Semestre.....	64
Figura 4.37	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve – 1° Semestre.....	65
Figura 4.38	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada – 1° Semestre	65
Figura 4.39	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada – 1° Semestre	66
Figura 4.40	Perdas ativas do sistema – Carga Leve – 1° Semestre.....	66
Figura 4.41	Perdas ativas do sistema – Carga Pesada – 1° Semestre.....	66

Figura 4.42	Perdas reativas do sistema – Carga Leve – 1° Semestre.....	67
Figura 4.43	Perdas reativas do sistema – Carga Pesada – 1° Semestre.....	67
Figura 4.44	Curva de perdas do sistema – Carga Leve.....	68
Figura 4.45	Curva de perdas do sistema – Carga Pesada.....	68
Figura 4.46	Potências geradas na barra 32 – Carga Leve – 2° Semestre.....	69
Figura 4.47	Potências geradas na barra 36 – Carga Leve – 2° Semestre.....	69
Figura 4.48	Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada – 2° Semestre.....	70
Figura 4.49	Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada – 2° Semestre.....	71
Figura 4.50	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve – 2° Semestre.....	71
Figura 4.51	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve – 2° Semestre.....	72
Figura 4.52	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada – 2° Semestre	72
Figura 4.53	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada – 2° Semestre	73
Figura 4.54	Perdas ativas do sistema – Carga Leve – 2° Semestre.....	73
Figura 4.55	Perdas ativas do sistema – Carga Pesada – 2° Semestre.....	73
Figura 4.56	Perdas reativas do sistema – Carga Leve – 2° Semestre.....	74
Figura 4.57	Perdas reativas do sistema – Carga Pesada – 2° Semestre.....	74
Figura 4.58	Comparativo dos modelos PQ e PQs – 1° Semestre – 01:00.....	78
Figura 4.59	Diferença entre os modelos PQ e PQs – 1° Semestre – 01:00.....	78
Figura 4.60	Comparativo dos modelos PQ e PQs – 1° Semestre – 20:20.....	80
Figura 4.61	Diferença entre os modelos PQ e PQs – 1° Semestre – 20:20.....	81
Figura 4.62	Comparativo dos modelos PQ e PQs – 2° Semestre – 02:40.....	84
Figura 4.63	Diferença entre os modelos PQ e PQs – 2° Semestre – 02:40.....	84
Figura 4.64	Comparativo dos modelos PQ e PQs – 2° Semestre – 20:20.....	86
Figura 4.65	Diferença entre os modelos PQ e PQs – 2° Semestre – 20:20.....	86
Figura 4.66	Curva de potência Reativa – Gerador Síncrono de 500 kW.....	88
Figura 4.67	Potências geradas na barra 32 – Carga Leve – 1° Semestre.....	89
Figura 4.68	Potências geradas na barra 36 – Carga Leve – 1° Semestre.....	90

Figura 4.69	Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada – 1° Semestre.....	90
Figura 4.70	Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada – 1° Semestre.....	91
Figura 4.71	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve – 1° Semestre....	91
Figura 4.72	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve – 1° Semestre....	92
Figura 4.73	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada – 1° Semestre	92
Figura 4.74	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada – 1° Semestre	93
Figura 4.75	Perdas ativas do sistema – Carga Leve – 1° Semestre.....	93
Figura 4.76	Perdas ativas do sistema – Carga Pesada – 1° Semestre.....	94
Figura 4.77	Perdas reativas do sistema – Carga Leve – 1° Semestre.....	95
Figura 4.78	Perdas reativas do sistema – Carga Pesada – 1° Semestre.....	95
Figura 4.79	Faixa de operação de reativos – 1° Semestre – Carga Leve.....	96
Figura 4.80	Faixa de operação de reativos – 1° Semestre – Carga Pesada.....	96
Figura 4.81	Potências geradas na barra 32 – Carga Leve – 2° Semestre.....	97
Figura 4.82	Potências geradas na barra 36 – Carga Leve – 2° Semestre.....	98
Figura 4.83	Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada – 2° Semestre.....	98
Figura 4.84	Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada – 2° Semestre.....	99
Figura 4.85	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve – 2° Semestre.....	99
Figura 4.86	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve – 2° Semestre.....	100
Figura 4.87	Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada – 2° Semestre	100
Figura 4.88	Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada – 2° Semestre	101
Figura 4.89	Perdas ativas do sistema – Carga Leve – 2° Semestre.....	102
Figura 4.90	Perdas ativas do sistema – Carga Pesada – 2° Semestre.....	102
Figura 4.91	Perdas reativas do sistema – Carga Leve – 2° Semestre.....	103
Figura 4.92	Perdas reativas do sistema – Carga Pesada – 2° Semestre.....	103
Figura 4.93	Faixa de operação de reativos – 2° Semestre – Carga Leve.....	104
Figura 4.94	Faixa de operação de reativos – 2° Semestre – Carga Pesada.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Resultados do caso base – Carga Leve – modelo PQ.....	43
Tabela 4.2	Resultados do caso base – Carga Pesada – modelo PQ.....	43
Tabela 4.3	Resultados do caso base – Carga Leve – modelo PQs.....	60
Tabela 4.4	Resultados do caso base – Carga Pesada – modelo PQs.....	60
Tabela 4.5	Modelo PQ – Primeiro Semestre – Carga Leve.....	76
Tabela 4.6	Modelo PQs – Primeiro Semestre – Carga Leve.....	77
Tabela 4.7	Modelo PQ – Primeiro Semestre – Carga Pesada.....	79
Tabela 4.8	Modelo PQs – Primeiro Semestre – Carga Pesada.....	80
Tabela 4.9	Modelo PQ – Segundo Semestre – Carga Leve.....	82
Tabela 4.10	Modelo PQs – Segundo Semestre – Carga Leve.....	83
Tabela 4.11	Modelo PQ – Segundo Semestre – Carga Pesada.....	85
Tabela 4.12	Modelo PQs – Segundo Semestre – Carga Pesada.....	85
Tabela 4.13	Resultados do caso base – Carga Leve.....	87
Tabela 4.14	Resultados do caso base – Carga Pesada.....	87



## LISTA DE SIMBOLOS

A	↔	Área rotórica da turbina;
B' e B''	↔	Matrizes de correção para o método desacoplado rápido;
Branch	↔	Matriz de dados dos elementos que interligam o sistema;
Bus	↔	Matriz de dados dos barramentos do sistema;
c e k	↔	Fator de escala e fator de forma, respectivamente;
CEPEL	↔	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica;
$C_p$	↔	Coeficiente de potência;
$E_i, E_k$	↔	Vetor complexo da tensão nas barras i e k;
ELETROBRÁS	↔	Centrais Elétricas Brasileiras S/A;
F(u)	↔	Função distribuição de Weibull;
FP	↔	Fator de potência da máquina;
$G_{ik} + jB_{ik}$	↔	Elementos (i,k) da matriz de admitância $[Y] = [G] + j[B]$ ;
Gen	↔	Matriz de dados dos geradores do sistema;
H, N, J e L	↔	Submatrizes da matriz jacobiana de Newton;
I	↔	Corrente do rotor;
$I_i, I_k$	↔	Elementos da matriz de correntes elétricas;
$I_{pu}$	↔	Corrente da máquina por unidade;
Kn	↔	Fator de determinação do tipo de carga;
MME	↔	Ministério das Minas e Energia;
P	↔	Potência ativa gerada;
p	↔	Tape em fase;
$P_{calc}$	↔	Potência calculada a partir da velocidade dos ventos;
$P_e$	↔	Potência elétrica disponibilizada pelo gerador;
$P_i$	↔	Potência líquida ativa ( $P^G - P^C$ ) na barra i-ésima;
$P^C$	↔	Potência ativa consumida no sistema elétrico;
$P^G$	↔	Potência ativa gerada no sistema elétrico;
$P_m$	↔	Potência mecânica retirada da turbina eólica;
Q	↔	Potência reativa solicitada pela máquina de indução;

$q$	$\leftrightarrow$	Tape em quadratura;
$Q_i$	$\leftrightarrow$	Potência líquida reativa ( $Q^G - Q^C$ ) na barra i-ésima;
$Q^C$	$\leftrightarrow$	Potência reativa consumida no sistema elétrico;
$Q^G$	$\leftrightarrow$	Potência reativa gerada no sistema elétrico;
$Q_{cap}$	$\leftrightarrow$	Potência reativa capacitiva da máquina;
$Q_{ind}$	$\leftrightarrow$	Potência reativa indutiva da máquina;
$Q_S$	$\leftrightarrow$	Potência reativa absorvida do sistema elétrico;
$R_e$	$\leftrightarrow$	Resistência do estator da máquina de indução;
$R_r$	$\leftrightarrow$	Resistência do rotor máquina de indução;
$s$	$\leftrightarrow$	Escorregamento calculado da equação;
$S$	$\leftrightarrow$	Potência aparente da máquina;
$S_{bus}$	$\leftrightarrow$	Matriz de potência complexa do sistema;
$tp = p + jq$	$\leftrightarrow$	Tape do transformador;
$tp^{NEW}$	$\leftrightarrow$	Novo "tape";
$tp^{OLD}$	$\leftrightarrow$	Antigo "tape";
$u$	$\leftrightarrow$	Velocidade instantânea do vento;
$\bar{u}$	$\leftrightarrow$	Velocidade média;
$V$	$\leftrightarrow$	Tensão da barra em pu;
$V_i$	$\leftrightarrow$	Magnitude da tensão na i-ésima barra;
$V_i, V_k$	$\leftrightarrow$	Magnitude da tensão nas barras i e k;
$X$	$\leftrightarrow$	Reatância equivalente da máquina;
$X_c$	$\leftrightarrow$	Reatância do banco de capacitores;
$X_e$	$\leftrightarrow$	Reatância do estator da máquina de indução;
$X_m$	$\leftrightarrow$	Reatância de magnetização da máquina de indução;
$X_r$	$\leftrightarrow$	Reatância do rotor da máquina de indução;
$Y_{ii}, Y_{ik}$ e $Y_{kk}$	$\leftrightarrow$	Elementos (i,k) da matriz de admitância [Y];
$Y_{bus}$	$\leftrightarrow$	Matriz de admitância do sistema;
$Z$	$\leftrightarrow$	Impedância da máquina já calculada;
$\alpha$	$\leftrightarrow$	Fator de error-feedback empírico ( $\alpha = 1$ );
$\Delta\theta$	$\leftrightarrow$	Vetor de correção dos ângulos das tensões (resíduo);

$\Delta V$	$\leftrightarrow$	Vetor de correção da magnitude das tensões (resíduo);
$\theta_i$	$\leftrightarrow$	Ângulo da tensão na i-ésima barra;
$\theta_i, \theta_k$	$\leftrightarrow$	Ângulos da tensão nas barras i e k;
$\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$	$\leftrightarrow$	Ângulo da tensão entre as barras i e k;
$\Delta P_i, \Delta Q_i$	$\leftrightarrow$	Resíduos de potência ativa e reativa;
$\varphi$	$\leftrightarrow$	Ângulo do fator de potência;
$\rho$	$\leftrightarrow$	Densidade do vento;
$\sigma$	$\leftrightarrow$	Desvio padrão da velocidade dos ventos;

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 ENERGIA EÓLIO-ELÉTRICA

Recentemente, o interesse na utilização da força dos ventos para gerar energia elétrica, denominada como geração eólio-elétrica, tem crescido consideravelmente em razão dos avanços tecnológicos, bem como da necessidade do uso de novas fontes primárias de energia, de uma maior conscientização sobre conservação ambiental e, principalmente, devidos a incentivos governamentais (SALLES, 2003).

Em todo o mundo há procura por esta fonte de energia. A Europa em 1990 somava pouco mais de 400MW. Já em 2001 ultrapassava 25 GW (CIGRÉ, 2001). Dentre os países que mais utilizam esta tecnologia estão: Alemanha, Espanha, EUA e Dinamarca (EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2003), na qual a Dinamarca destaca-se por ter mais de 20% de sua energia produzida a partir da energia eólio-elétrica (AKHMATOV, 2003).

No Brasil, embora a capacidade instalada seja apenas 22MW, espera-se que a tecnologia dê um incremento para os próximos anos. O Ministério das Minas e Energia - MME e a ELETROBRÁS por meio do CEPEL / CRESESB lançaram o ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO. O material apresenta mapas com as velocidades médias anuais dos ventos aos níveis nacional e regional, Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste, constituindo a grande referência nacional para a identificação de locais promissores para prospecção da energia eólica (CRESESB, 2001).

O Atlas traz uma estimativa do potencial disponível da ordem de 143 GW, calculado por meio da integração de mapas digitais, contendo todas as áreas que apresentaram velocidades médias anuais iguais ou superiores a 6,0 m/s e utilizando recursos de geo-processamento com cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado (MME, ELETROBRÁS E CEPEL, 2001).

Grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará, por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico através de medidas de vento com modernos anemômetros computadorizados (AMARANTE, 2001). Todas as usinas instaladas no Estado do Ceará foram fabricadas por uma empresa alemã instalada no Brasil, chamada Wobben Windpower.

A usina eólio-elétrica da Taiba, localizada no município de São Gonçalo do Amarante/CE, foi a primeira no mundo a ser construída sobre dunas de areia. Inaugurada em janeiro de 1999, esta usina possui 10 aerogeradores ENERCON E-40/500kW com capacidade nominal instalada de 5,0 MW, com uma produção de energia elétrica anual da ordem de 17,5 milhões de kWh. A segunda usina eólio-elétrica, também instalada sobre dunas, foi instalada na Prainha, localizada no município de Aquiraz/CE, inaugurada em abril de 1999. Esta usina possui 20 aerogeradores (ENERCON E-40/500kW) com capacidade nominal instalada de 10 MW, com uma produção de energia elétrica anual da ordem de 35 milhões de kWh. (WOBBEN, 2005).

Ainda no nordeste, mais precisamente no arquipélago de Fernando de Noronha, no Estado de Pernambuco, existe uma usina eólio-elétrica com capacidade nominal de 0,3 MW. Em Olinda/PE também existe uma usina eólio-elétrica cuja capacidade nominal 0,225 MW. Em Macau no Estado do Rio Grande do Norte, também região nordestina foi instalada uma usina eólio-elétrica com capacidade nominal de 1,8 MW.

Em Minas Gerais, no Morro do Camelinho, por exemplo, um local afastado mais de 1000 km da costa brasileira, uma central eólica está em funcionamento desde 1994, cuja capacidade nominal é de 1,0 MW, com excelentes condições de vento. Em Santa Catarina, Bom Jardim da Serra, existe uma usina eólio-elétrica com capacidade nominal de 0,6 MW. Em Horizonte, também no Estado de Santa Catarina, existe uma usina eólio-elétrica com capacidade nominal de 4,8 MW. Além de outros estados, como Espírito Santo e Tocantins (EÓLICA, 2005).

Para a inserção deste potencial junto à matriz energética atual é necessário o desenvolvimento de modelos que simulem como o sistema elétrico se comporta com

esta geração. Existem trabalhos que mostram a diversidade de geradores eólio-elétricos, por exemplo, gerador de indução com compensação dinâmica, gerador de indução com resistência variável do rotor, gerador de indução com dupla alimentação (SALLES, 2003). Assim, conhecida a velocidade dos ventos e a curva característica do gerador, são traçadas as curvas de potências ativas e reativas da máquina. Outro desafio é a implementação dos modelos matemáticos dos geradores eólio-elétricos em programas comerciais de fluxo de potência para estudar os impactos em regime permanente causados no sistema elétrico.

## **1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Stott e Alsac desenvolveram o método desacoplado rápido, o qual foi baseado no método de Newton-Raphson, cuja idéia principal foi o desacoplamento entre as potências ativas e os módulos das tensões, e as potências reativas e os ângulos. Esta mudança tornou o fluxo de carga mais simples e mais rápido no processo de convergência (STOTT et al., 1974).

A literatura apresenta diferentes propostas de máquinas de indução, trabalhando como geradores eólio-elétricos interligados à rede elétrica (SALLES, 2003).

São desenvolvidos trabalhos de modelagem de geradores eólio-elétricos ligados à rede elétrica, nos quais, Feijó e Cidras propõem modelos matemáticos de geradores eólio-elétricos, implementados no fluxo de carga, com o método de Newton-Raphson, utilizando a máquina de indução tipo gaiola de esquilo (FEIJOÓ e CIDRÁS, 2000).

Taylor apresenta um trabalho de estabilidade transitória que simula o fluxo de carga para vários tipos de cargas localizadas em um barramento, como: máquina de indução, máquinas síncronas, lâmpadas de descarga (TAYLOR et al., 1995).

A literatura apresenta um trabalho sobre modelagem de geração eólio-elétrica com máquinas de indução, aplicado em fluxo de carga para estudo de análise de

estabilidade, utilizando o programa ANAREDE e ANATEM do CEPEL (RANGEL et al., 2005).

Também a literatura apresenta um trabalho de planejamento e expansão do sistema elétrico com a inserção de centrais eólico-elétricas, especificamente no nordeste Brasileiro, devido a incentivos do PROINFA. Este trabalho visa o planejamento energético, à operação do sistema elétrico, à regulação e à comercialização (CAVALCANTI et al., 2005).

### **1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo de modelos matemáticos de geradores eólico-elétricos conectados ao sistema elétrico em regime permanente. São estudados três modelos: o modelo PQ da máquina de indução, o modelo PQs da máquina de indução e o modelo simplificado do gerador síncrono. As máquinas de indução são do tipo gaiola de esquilo. Estes modelos foram inseridos no programa de fluxo de carga utilizando um dos métodos clássicos, o método desacoplado rápido, que é denominado XB (AMERONGEN, 1989).

Com os resultados obtidos do fluxo de carga, foram traçadas curvas mostrando o comportamento do sistema elétrico, validando os modelos propostos em diversas condições de carga:

- ✓ O sistema elétrico no horário de carga mínima e de carga máxima sem geração eólico-elétrica;
- ✓ O sistema elétrico no horário de carga mínima e de carga máxima com injeção de potência eólico-elétrica, utilizando o modelo PQ da máquina de indução;
- ✓ O sistema elétrico no horário de carga mínima e de carga máxima com injeção de potência eólico-elétrica, utilizando o modelo PQs da máquina de indução;

- ✓ O sistema elétrico no horário de carga mínima e de carga máxima com injeção de potência eólico-elétrica, utilizando o modelo simplificado do gerador síncrono.

#### **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

No Capítulo II é realizado o desenvolvimento do método desacoplado rápido (STOTT et al., 1974) e o modelamento de transformadores com o “tape” fora do nominal. Também é apresentado o fluxograma do programa computacional descrevendo todas as etapas que o programa realiza.

No Capítulo III é mostrado o equacionamento da distribuição de Weibull. Também são descritos os modelos matemáticos e a implementação dos geradores eólico-elétricos. São apresentados três modelos matemáticos: o primeiro trata-se de um modelo simplificado da máquina de indução do tipo gaiola de esquilo, cujo equacionamento é proposto por (FEIJOÓ e CIDRÁS, 2000). Este modelo é denominado de PQ. É proposto e apresentado, também, um outro modelo da máquina de indução do tipo gaiola de esquilo que utiliza a influência do escorregamento e as perdas internas da máquina de indução, na obtenção das potências ativas e reativas. Este modelo é denominado de PQs. Finalmente, é apresentado o modelo simplificado do gerador síncrono.

No Capítulo IV é apresentado o sistema real em que está inserida a geração eólico-elétrica. Também são mostrados e comentados os resultados dos três modelos citados anteriormente. A validação destes modelos é mostrada nas curvas obtidas como: tensões nas barras de geração eólico-elétrica; potências extraídas das máquinas; e perdas no sistema elétrico.

No Capítulo V são apresentadas as considerações finais deste trabalho.

#### **1.5 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO**

As principais contribuições deste trabalho são:



✓ **Modelagem e implementação de aplicações de cálculo de Fluxo de Potência:**

Desenvolvimento de programa computacional de fluxo de carga desacoplado rápido, com função para o cálculo de potências eólio-elétricos, devido às variações dos ventos em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando o programa MATLAB.

✓ **Implementação do modelamento matemático simplificado da máquina de indução:**

Foi implementado o modelo da máquina de indução do tipo gaiola de esquilo (FEIJOÓ e CIDRÁS, 2000), denominado modelo PQ da máquina de indução, o qual foi implementado no fluxo de carga em uma barra do tipo PQ e simulado em um sistema de distribuição de energia elétrica real.

✓ **Modelagem e implementação da máquina de indução:**

Baseado no modelo RX proposto por (FEIJOÓ e CIDRÁS, 2000), foi desenvolvido um novo modelo matemático da máquina de indução, no qual foi incorporada a influência da variação das potências ativas e reativas, ao invés da variação da admitância da máquina, sendo esta modificada dentro da matriz de admitância. O modelo é denominado de modelo PQs da máquina de indução e foi implementado no fluxo de carga em uma barra do tipo PQ e simulado em um sistema de distribuição de energia elétrica real.

✓ **Modelagem e implementação do modelamento matemático simplificado do gerador síncrono:**

Foi desenvolvido e implementado um modelo simplificado do gerador síncrono e testado em um sistema de distribuição de energia elétrica real.

## 1.6 TRABALHOS DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO

Durante o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, foram apresentadas as seguintes publicações:

- ✓ MOURA, A. P., LIMA, S. P., BASTOS, M. S. S., *Modified Newton-Raphson Method with Constant Tangents and with Wind Farm Model*, XXVI CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Guarapari – ES, Brasil, Outubro, 2005.
  
- ✓ MOURA, A. P., FILGUEIRAS, A. R., BASTOS, M. S. S., LIMA, S. P., *Qualidade de Tensão em uma Subestação Conectada com um Parque Eólico*, VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Belém – PA, Brasil, Agosto, 2005.

## **CAPÍTULO II**

### **FLUXO DE CARGA**

Este capítulo aborda o fluxo de carga, desde o desenvolvimento do equacionamento matemático, até a modelagem do método desacoplado rápido, conhecido como o método XB.

É mostrada a modelagem do sistema elétrico, com a implementação de transformadores de energia elétrica com o “tape” fora do nominal para regulação de tensão. Também é apresentado o fluxograma e a ferramenta computacional em MATLAB que gerencia o fluxo de carga.

#### **2.1 EQUAÇÕES DO FLUXO DE CARGA**

O cálculo do fluxo de carga é uma das mais importantes aplicações utilizadas em análise de sistemas de potência. Os resultados obtidos podem ser utilizados em estudos de projetos, planejamento e operação do sistema elétrico. O objetivo básico de um programa de fluxo de carga consiste em determinar os módulos e ângulos das tensões das barras de um sistema elétrico.

Calculadas as magnitudes das tensões nodais  $V_i$  e os ângulos  $\theta_i$  na  $i$ -ésima barra do sistema elétrico, são obtidas quaisquer outras variáveis de interesse como, por exemplo: a potência ativa e reativa de qualquer barra; os fluxos das potências nas linhas de transmissão e transformadores; e as perdas ativas e reativas totais no sistema elétrico.

Os componentes de um sistema elétrico podem ser classificados em dois grupos. O primeiro grupo refere-se àqueles que estão ligados entre um nó qualquer e a terra, geradores, cargas, reatores e capacitores; o segundo, refere-se àqueles que estão ligados entre dois nós quaisquer do sistema elétrico, por exemplo, as linhas de transmissão, transformadores e defasadores. No modelamento matemático do fluxo de carga, os geradores e as cargas são modelados através de injeções de potência aplicada às barras.

Para cada barra do sistema elétrico são associadas quatro variáveis. Duas delas são especificadas no problema, as outras duas são as incógnitas (MONTICELLI, 1983).

As variáveis são:

$V_i$	$\leftrightarrow$	Magnitude da tensão na i-ésima barra;
$\theta_i$	$\leftrightarrow$	Ângulo da tensão na i-ésima barra;
$P_i$	$\leftrightarrow$	Potência ativa ( $P^G - P^C$ ) na i-ésima barra;
$Q_i$	$\leftrightarrow$	Potência reativa ( $Q^G - Q^C$ ) na i-ésima barra;

Durante o processamento do fluxo de carga para calcular os valores de  $\theta_i$  e  $V_i$  em todas as barras  $i$  do sistema elétrico é utilizado um processo iterativo. O fim deste processo iterativo ocorre quando os somatórios das potências ativas e reativas, especificadas e calculadas para a i-ésima barra, devem ser menores que um erro pré-definido, conhecido como resíduo. Este erro deve ser mínimo o suficiente para que o sistema de equações venha a convergir e o resultado seja o mais preciso possível. Para isto, é constituído um sistema de equações algébricas não-lineares no qual o número de equações é igual ao número de barras do sistema elétrico.

$$\sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k = \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*}, \quad (2.1)$$

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k E_i^*, \quad (2.2)$$

$$E_i = V_i e^{j\theta_i}, \quad (2.3)$$

$$E_k = V_k e^{j\theta_k}, \quad (2.4)$$

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}, \quad (2.5)$$

$$P_i + jQ_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k [\cos(\theta_i - \theta_k) + j\text{sen}(\theta_i - \theta_k)] [G_{ik} + jB_{ik}]. \quad (2.6)$$

Separando a parte real da parte imaginária na equação 2.6, são obtidos os resíduos de potência:

$$\Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{\substack{k=1 \\ m \neq k}}^n V_k [G_{ik} \text{sen}(\theta_{ik}) + B_{ik} \cos(\theta_{ik})] \quad (2.7)$$

e

$$\Delta P_i = P_i - V_i \sum_{\substack{k=1 \\ m \in k}}^n V_k [G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik})] \quad (2.8)$$

## 2.2 MÉTODO DESACOLADO RÁPIDO

Este método é baseado no método clássico de Newton-Raphson modificado com tangentes constantes. O algoritmo é mais simples, devido à manipulação das equações. Assim, este método reduz o problema de fluxos de carga não-lineares, considerando algumas simplificações nas submatrizes da matriz jacobiana do método de Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

$$[\Delta P_i] = [H][\Delta \theta] + [L][\Delta V], \quad (2.10)$$

$$[\Delta Q_i] = [J][\Delta \theta] + [L][\Delta V]. \quad (2.11)$$

Este método é transformado em um sistema de equações lineares, fazendo o desacoplamento das ligações fracas da matriz jacobiana. Como as ligações MW/ $\theta$  e MVar/V são consideradas ligações fortes, e quaisquer outras ligações não causam grandes influências no resultado final. Logo, as ligações fracas são desprezadas (MOURA et al, 2005), resultando nas seguintes equações:

$$[\Delta P_i] = [H][\Delta \theta], \quad (2.12)$$

$$[\Delta Q_i] = [L][\Delta V]. \quad (2.13)$$

Nas submatrizes H e L da matriz jacobiana do método de Newton-Raphson:

$$H \begin{cases} H_{ik} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_{ik}} = V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_{ik}} = -(V_{ii})^2 B_{ii} - V_i \sum V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{cases} \quad (2.14)$$

e

$$L \begin{cases} L_{ik} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_k} = V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} = -V_{ii} B_{ii} + \sum V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{cases} \quad (2.15)$$

Partindo do método de Newton-Raphason desacoplado, é demonstrado o método desacoplado rápido, considerando as seguintes simplificações na matriz jacobiana (STOTT et al., 1974):

$$\cos\theta_{ik} \approx 1; \quad (2.16)$$

$$G_{ik} \sin\theta_{ik} \ll B_{ik}; \quad (2.17)$$

$$Q_i \ll B_{ii} V_i^2; \quad (2.18)$$

$$V_i = 1,0 \text{ p. u.} \quad (2.19)$$

As simplificações das equações 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19 são fisicamente justificáveis, considerado um sistema elétrico de potência em que as variações angulares entre barras são muito pequenas. Logo a diferença angular entre uma barra “i” qualquer e uma outra barra “k” qualquer, barras ligadas por uma admitância, seja uma linha de transmissão ou um transformador de potência, é próximo à zero, valores estes medidos em radianos.

Com estas simplificações, as matrizes H e L tornaram-se constantes e são denominadas de B' e B'', respectivamente. Estas duas matrizes têm estruturas e dimensões diferentes. A matriz B' tem dimensão igual ao número de barras do sistema elétrico, menos a barra de referência. Esta matriz é a mesma utilizada na resolução do fluxo de carga linearizado. A matriz B'' tem dimensão igual ao número de barras PQ do sistema elétrico (AMERONGEN, 1989).

As matrizes B' e B'' são utilizadas no método desacoplado rápido durante a resolução dos subproblemas P-MW e Q-MVAr, e são calculadas uma única vez durante a resolução do problema. Esta simplificação altera o processo de convergência do método, exigindo um maior número de iterações durante o processo de convergência. As simplificações citadas acima são substituídas nas equações 2.14 e 2.15, resultando:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ V_i \end{bmatrix} = [B'] [\Delta\theta] \quad (2.20)$$

e

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ V_i \end{bmatrix} = [B''] [\Delta V] \quad (2.21)$$

Na formação da matriz B' são omitidas as representações do sistema que interferem nos reativos do fluxo e as resistências série. Na formação da matriz B'' os elementos que influenciam no defasamento angular são omitidos (STOTT et al., 1974), onde:

$$B'_{ik} = (-x_{ik})^{-1}, \quad (2.22)$$

$$B'_{ii} = \sum_k^{NB} (x_{ik})^{-1}, \quad (2.23)$$

$$B''_{ik} = (-x_{ik})^{-1}, \quad (2.24)$$

$$B''_{ii} = -B'_{ii}. \quad (2.25)$$

Na matriz B' não aparece a linha e a coluna referentes à barra de referência. Na matriz B'' não aparecem as linhas e colunas referentes às barras de referência e as barras do tipo PV. As matrizes B' e B'' são reais, esparsas e simétricas, e, como em sua formação são consideradas apenas as admitâncias do sistema, estas são constantes e só precisam ser montadas uma única vez (AMERONGEN, 1989).

A formação das matrizes B' e B'' do método desacoplado rápido, proposta por Stott, é conhecida como o método XB, cuja característica principal está na formação das matrizes B' e B'', no qual, este método é caracterizado por mostrar um processo de convergência mais rápido em sistemas de transmissão de energia elétrica.

O método BX mostra bons resultados, sendo aplicado em sistemas fortemente carregados, mostrando uma relação entre a resistência e a reatância indutivas R/X muito pequena (HUBBI, 1991).

Os valores dos parâmetros físicos como as resistências e as reatâncias indutivas têm a relação R/X muito pequena. Isto é, os valores das reatâncias indutivas são muito grandes em relação aos valores das resistências, tornando assim, rápido o processo de convergência. Entretanto, quando a relação R/X muda em relação à situação anterior, o processo de convergência torna-se mais lento. Esta situação é

caracterizada por um sistema com pequenas distâncias, isto é, linhas de distribuição de energia elétrica.

Para solução deste problema, quando é utilizado no fluxo de carga um sistema de distribuição, é realizada uma variação no método desacoplado rápido, na qual, são desprezadas as resistências apenas na formação da matriz B". Este método é conhecido como BX. A diferença entre os métodos XB e BX está na formação de B' e B" (AMERONGEN, 1989).

### 2.3 RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES

Como foi visto anteriormente, o problema do fluxo de carga, utilizando o método desacoplado rápido, depende a cada iteração da resolução do sistema de equações 2.20 e 2.21. O sistema de equações para se obter os valores de  $\Delta\theta$  e  $\Delta V$ , incógnitas do problema, pode ser escrito da seguinte forma:

$$A \vec{x} = \vec{b}. \quad (2.26)$$

Dentre os métodos utilizados para resolver os sistemas de equações lineares provenientes do Método Desacoplado Rápido, duas grandes famílias se destacam: diretos e iterativos. Os métodos diretos, tais como Fatoração LU (MONTICELLI, 1983) e Bifatoração (BORGES, 1996), são muito utilizados na resolução do problema de fluxo de carga e em outras aplicações na análise de sistemas de potência, devido a sua confiabilidade e rapidez. Para este trabalho foi utilizada a fatoração LU.

Como a matriz A do sistema de equações, mostrado na equação 2.26, é uma matriz esparsa e constante, os métodos diretos são bem mais indicados para se resolver este tipo de problema, pois a fatoração da matriz A só precisa ser feita uma única vez.

### 2.4 CONTROLE DE TENSÃO EM BARRAS DO TIPO PQ

Um dos padrões de qualidade de fornecimento de energia elétrica é a tensão de operação da barra. A tensão da barra deve estar na faixa de variação de  $0,95 \text{ p.u.} \leq V_i \leq 1,05 \text{ p.u.}$  para sistemas de distribuição. Como o sistema elétrico é variável, as cargas são dinâmicas, os fluxos são modificados e as tensões das barras podem



sair da faixa de tolerância de  $\pm 5\%$  do valor nominal, devendo ocorrer intervenções nas tensões para que retornem as condições normais de operação do sistema elétrico. As intervenções são compensações reativas, injeções de potências ativas e reativas, ou mudança do “tape” de transformadores.

Apenas a barra de referência e as barras PV possuem tensões pré-estabelecidas. As tensões nas barras PQ dependem exclusivamente do resultado do fluxo de carga. As cargas que estão nestas barras podem ser alteradas com a influência das variações das tensões.

Na prática existem transformadores com controles eletrônicos que tendem a ajustar o valor da tensão em seu secundário no qual um dos lados é mantido fixo, enquanto o outro vai depender da variação do fluxo de carga. O controle modifica a relação de transformação para que sempre a tensão no secundário seja constante, ficando na faixa de tolerância de  $\pm 5\%$  (ANEEL, 2006).

A equação a seguir mostra o algoritmo para o controle de tensão com o “tape” de um transformador fora do nominal –  $tp$  (valores em p.u), controlando a tensão na barra  $k$  em uma tensão especificada  $V_k^{SP}$  em p.u. Esta modificação afeta os elementos  $(i,k)$  da matriz de admitância  $Y_{bus}$  a cada iteração. A medida em que o processo busca a convergência, o “tape” muda. Assim é necessário mais iterações para o programa convergir. A relação de transformação para este modelo é de  $1:t$  (STOTT et al., 1974), conforme é mostrado nas equações abaixo.

$$tp = p + jq, \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii}(p^2 + q^2) & -Y_{ik}(p - jq) \\ -Y_{ki}(p + jq) & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

$$tp_i^{new} - tp_i^{old} = \alpha(V_k - V_k^{sp}), \quad (2.29)$$

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + y_{ik}((tp_i^{new})^2 - (tp_i^{old})^2), \quad (2.30)$$

$$Y_{ik}^{new} = Y_{ik}^{old} \left( \frac{tp_i^{new}}{tp_i^{old}} \right), \quad (2.31)$$

$$Y_{ik} = Y_{ki}. \quad (2.32)$$

## 2.5 FLUXOGRAMA DO PROGRAMA

O fluxograma tem como objetivo mostrar o diagrama de blocos de todas as rotinas feitas pelo programa, desde a inicialização inserindo os parâmetros e leitura dos dados dos ventos, até a criação dos arquivos com resultados do fluxo de carga.

O início do fluxograma do método desacoplado rápido é apresentado na Figura 2.1. O programa desenvolvido em MATLAB é iniciado com a definição de parâmetros como: o método do fluxo de carga utilizado, a escolha do modelo do gerador eólico-elétrico e o tipo de carga que é simulada sistema elétrico.

Este tipo de carga pode ser: potência constante, corrente constante ou impedância constante. Este parâmetro é definido antes do início do laço do fluxo de carga. A equação que usa este parâmetro é a seguinte:

$$S_{bus} = S_{bus,i} \cdot |V_i|^{kn} . \quad (2.33)$$

O valor da potência em p.u da barra “i” deve ser multiplicada pela magnitude da tensão elevado ao valor de kn.

Se kn for igual a zero, a carga é do tipo potência constante. Assim, independente da modificação da tensão na barra não há alterações nos valores das potências. Se kn for igual a um, a carga é do tipo corrente constante. Assim, quando houver uma redução na magnitude da tensão deve ser mantida a corrente, então é modificado o valor da impedância. Se kn for igual a dois, esta é do tipo impedância constante, ou seja, a situação real. Para o sistema elétrico em estado permanente, qualquer variação na tensão modifica o valor da potência, porque a impedância permanece inalterada.

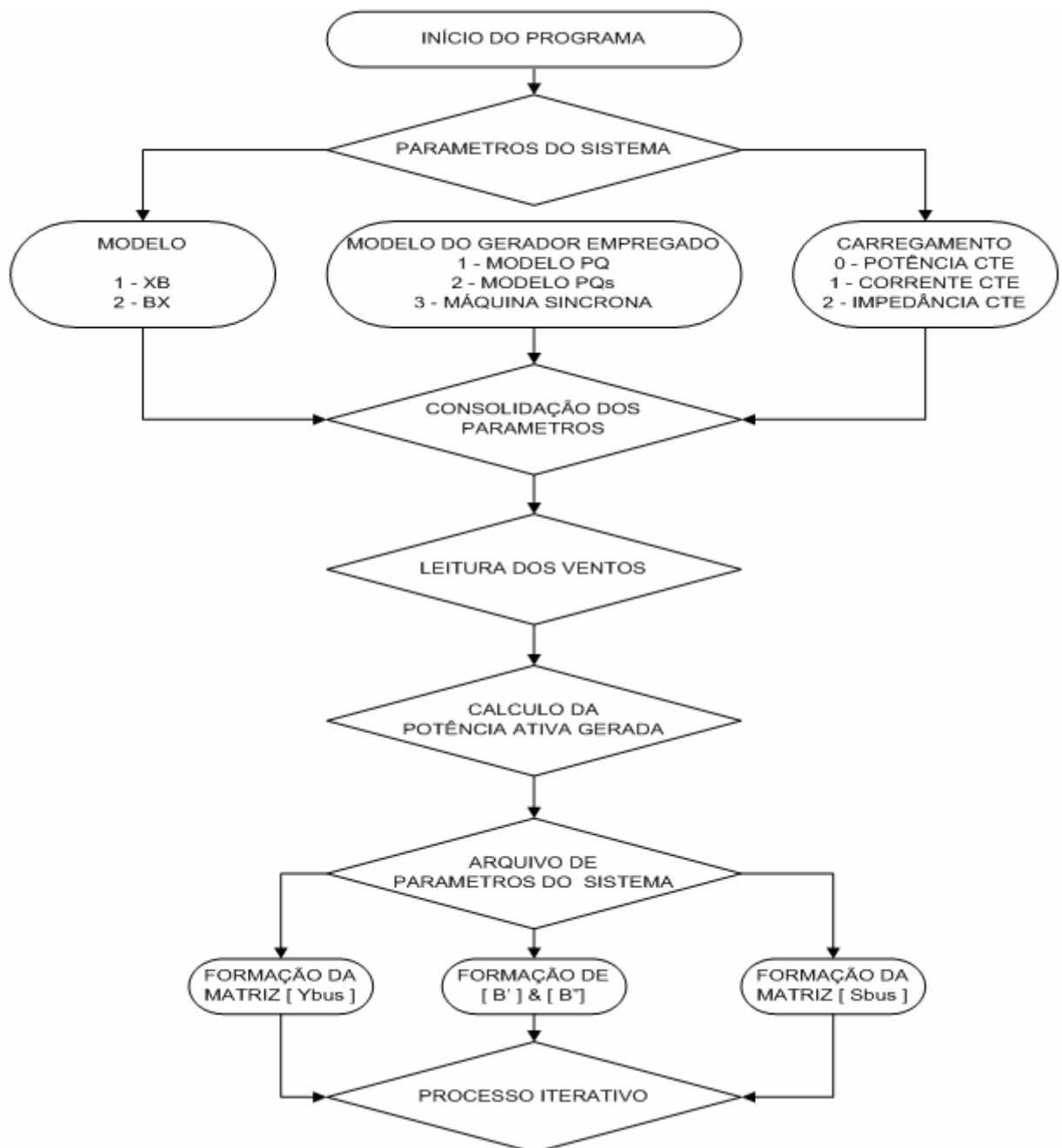


Figura 2.1 – Início do programa do fluxo de potência

A figura 2.2 mostra a tela do programa em MATLAB. Nesta tela são inseridos os parâmetros para a inicialização do fluxo de carga.

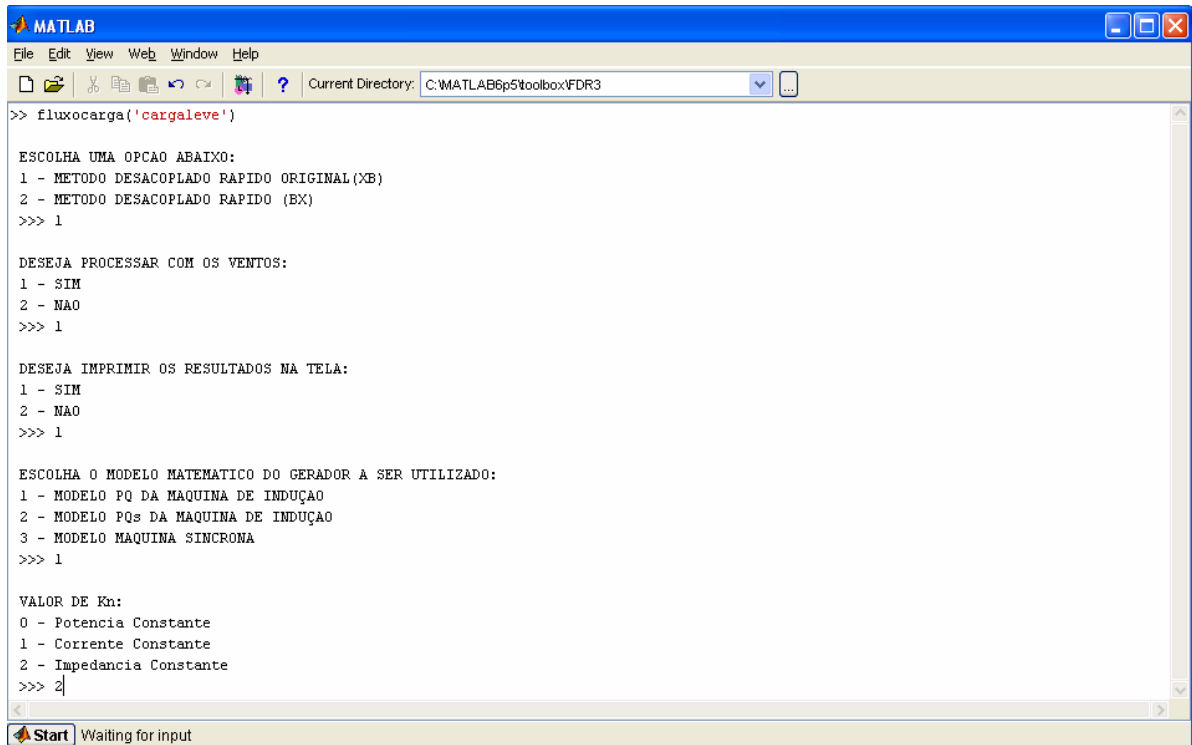


Figura 2.2 – Tela do programa MATLAB

Iniciando o laço iterativo, é procurada a função que calcula as potências ativas e reativas do modelo do gerador eólico-elétrico que foi escolhida. Para cada resposta possível, é direcionada uma função para um dos três modelos de geradores eólico-elétricos. Em seguida, acontece o retorno do resultado da função e a atualização da matriz de cargas  $S_{bus}$  que contém os valores das potências ativas e reativas da usina eólico-elétrica.

É utilizada a seguinte convenção: quando as potências ativas e reativas estiverem sendo injetadas no sistema elétrico, os valores destas potências são apresentados positivos. Quando as potências ativas e reativas estiverem no sentido contrário, isto é, absorvendo potências ativas e reativas do sistema elétrico, os valores das potências são apresentados negativos. Assim, são diferenciadas as potências ativas e reativas geradas e consumidas.

Após a atualização da matriz de carga  $S_{bus}$ , é aplicada a equação 2.33 para o tipo de carga escolhida.

Atualizada a matriz  $S_{bus}$ , é calculado o vetor de resíduos de potência  $\Delta P$  pela equação 2.8. Se este valor for maior que um erro pré-estabelecido devem ser calculados novos ângulos pela equação 2.20 e atualizados no programa. Caso contrário, o programa continua sem modificar os ângulos das barras.

O passo seguinte é o cálculo do vetor de resíduos de potência  $\Delta Q$  pela equação 2.7. Se este valor for maior que um erro pré-estabelecido, são calculadas as novas magnitudes de tensão pela equação 2.21 e atualizadas no programa. Caso contrário, o programa continua sem modificar as magnitudes das tensões nas barras.

Se o controle do “tape” estiver acionado, isto é, for habilitado dentro do programa, significa que deve existir uma regulação de tensão entre duas barras através de um transformador com “tape” variável. O programa faz uma varredura nos barramentos até achar a barra de regulação.

A regulação é realizada modificando o “tape” do transformador, isto é, modificando a admitância entre os barramentos. Em seguida, deve ser atualizada a matriz de admitância para que, no próximo ciclo, a magnitude da tensão tenda a convergir para um valor pré-estabelecido de tensão.

No final do programa avaliam-se os valores de  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  em relação ao erro pré-estabelecido. Se maiores que o erro, o processo é reiniciado, refazendo o cálculo da potência reativa no modelo matemático do tipo de gerador escolhido, utilizando agora os novos valores de tensão e seguindo o processo como foi descrito anteriormente.

Quando a resposta for igual ou menor que o erro, o programa é finalizado, mostrando os resultados do fluxo de carga na tela e salvando-os em arquivos de texto, simultaneamente.

A figura 2.3 mostra o diagrama do fluxo de carga correspondente ao cálculo iterativo dos ângulos e magnitude das tensões.

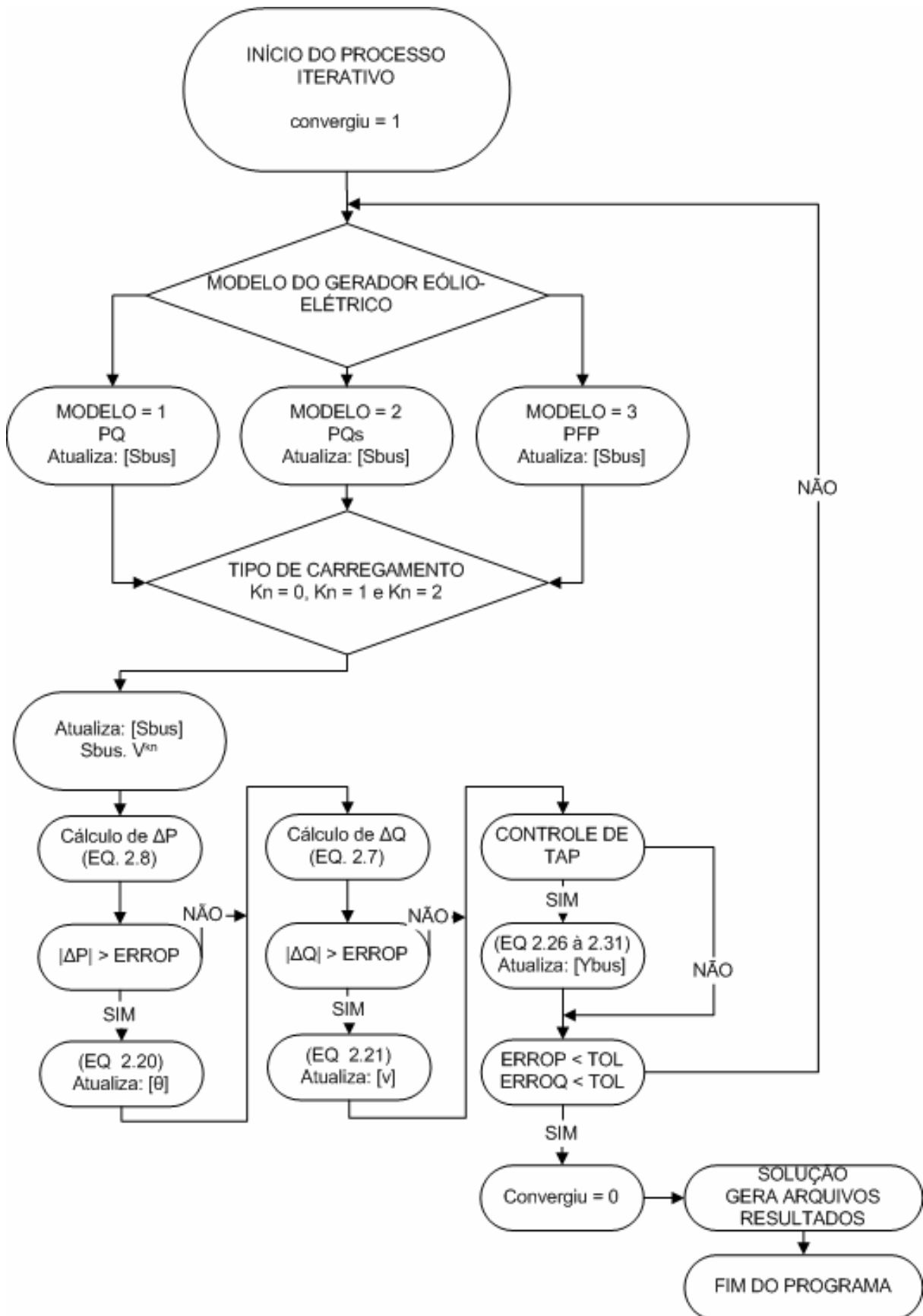


Figura 2.3 – Processo iterativo do programa do fluxo de carga

## 2.6 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para este trabalho foi utilizada a ferramenta computacional MATLAB 6.5 release 13.

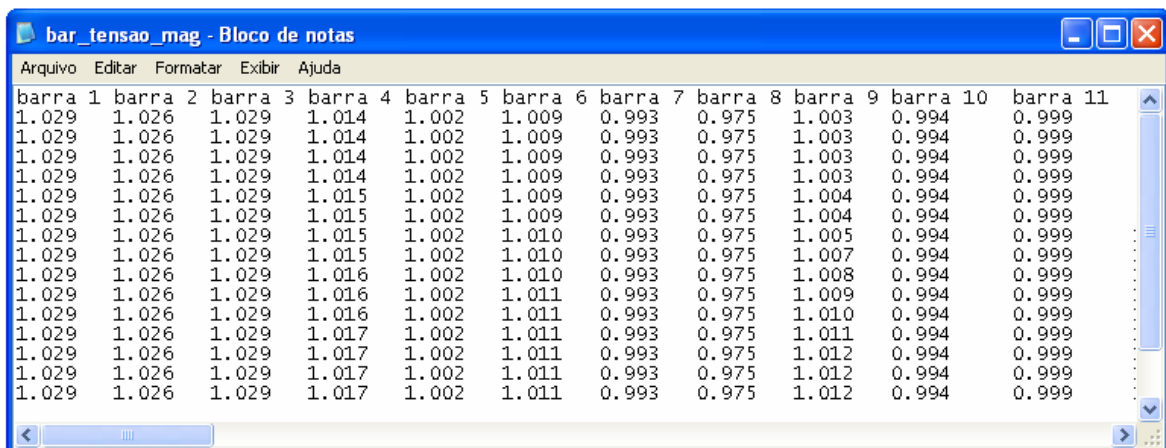
No programa do fluxo de carga foram implementadas as seguintes funções:

- ✓ **case** – o nome do caso a ser simulado. Neste arquivo contém as informações do sistema elétrico como ramos, barras e geradores;
- ✓ **fluxocarga** – programa principal. Este programa gerencia todas as funções do programa do fluxo de carga;
- ✓ **ventos** – lê um arquivo de dados vent.txt que contém todos os ventos do período e calcula a potência média ponderada de Weibull;
- ✓ **matrizY** – monta a matriz Ybus a partir dos dados contidos no arquivo case;
- ✓ **maq\_ind** – realiza os cálculos da potência reativa do modelo PQ da máquina de indução;
- ✓ **maq\_ind2** – realiza os cálculos da potência reativa do modelo PQs da máquina de indução;
- ✓ **maq\_sinc** – realiza os cálculos da potência reativa do modelo simplificado do gerador síncrono;
- ✓ **metdesacr** – processa o laço iterativo do fluxo de carga utilizando o método desacoplado rápido XB ou BX, definido em **fluxocarga**. Realiza o controle do “tape” do transformador, estabelecido no arquivo **case**;
- ✓ **solufc** – calcula os fluxos de potência nos ramos. Mostra os resultados na tela e gera os arquivos de texto onde são alocados os arquivos de resultados.

Os resultados são gerados a partir da função **solufc** e alocados em arquivos do tipo “.txt”, com valores numéricos em p.u, com três casas decimais de precisão e disponibilizados por:

- ✓ Magnitude das tensões;
- ✓ Ângulos das tensões;
- ✓ Potências ativas geradas;
- ✓ Potências reativas geradas;
- ✓ Potências ativas consumidas;
- ✓ Potências reativas consumidas;
- ✓ Perdas ativas do sistema elétrico;
- ✓ Perdas reativas do sistema elétrico;
- ✓ Fluxos entre barras.

A figura 2.4 mostra um dos arquivos de resultados do programa. Nele são apresentadas as magnitudes das tensões nas barras.



barra 1	barra 2	barra 3	barra 4	barra 5	barra 6	barra 7	barra 8	barra 9	barra 10	barra 11
1.029	1.026	1.029	1.014	1.002	1.009	0.993	0.975	1.003	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.014	1.002	1.009	0.993	0.975	1.003	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.014	1.002	1.009	0.993	0.975	1.003	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.014	1.002	1.009	0.993	0.975	1.003	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.015	1.002	1.009	0.993	0.975	1.004	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.015	1.002	1.009	0.993	0.975	1.004	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.015	1.002	1.010	0.993	0.975	1.005	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.015	1.002	1.010	0.993	0.975	1.007	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.016	1.002	1.010	0.993	0.975	1.008	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.016	1.002	1.011	0.993	0.975	1.009	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.016	1.002	1.011	0.993	0.975	1.010	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.017	1.002	1.011	0.993	0.975	1.011	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.017	1.002	1.011	0.993	0.975	1.012	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.017	1.002	1.011	0.993	0.975	1.012	0.994	0.999
1.029	1.026	1.029	1.017	1.002	1.011	0.993	0.975	1.012	0.994	0.999

Figura 2.4 – arquivo de resultados do fluxo de carga – tensões nas barras



# CAPÍTULO III

## MODELOS DOS GERADORES EÓLIO-ELÉTRICOS

### 3.1 GERAÇÃO EÓLIO-ELÉTRICA

Nos últimos anos a geração eólio-elétrica vem tomando espaço dentro da matriz energética. É fato que não pode ser desprezada a contribuição desta geração, e é preciso cada vez mais desenvolver modelos matemáticos que permitam simulações computacionais desta fonte energética integrada ao sistema elétrico de maneira confiável. Assim, é possível adequar os programas de fluxo de carga a esta nova fonte de geração, buscando resultados confiáveis. Um dos problemas enfrentados é a dependência da potência ativa injetada na barra onde está localizado o parque eólio-elétrico. A potência mecânica captada pelas pás das turbinas eólicas é função da velocidade dos ventos ao cubo, como é mostrado na equação abaixo.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3. \quad (3.1)$$

A equação 3.1 mostra cálculo da potência mecânica extraída dos ventos. Como existe o acoplamento entre a turbina e o gerador elétrico, para a obtenção da potência ativa realmente gerada através dos ventos, é necessário utilizar as curvas de potência das máquinas fornecidas pelos fabricantes de geradores eólio-elétricos. Desta forma, existe um fator de multiplicação na equação 3.1, que conduz a:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p. \quad (3.2)$$

A variabilidade da velocidade do vento é uma das principais dificuldades encontradas na viabilidade operacional de projetos de geração eólio-elétrica. Os dados históricos da velocidade de ventos, sejam estes catalogados de minuto em minuto, de hora em hora, diariamente, mensalmente ou até anualmente, não são suficientes para dispor de uma amostra precisa aos cálculos dos indicadores estatísticos. Por isto, faz-se necessário a construção de uma predição estatística baseada em modelos de distribuição estatística, a partir de uma amostragem da velocidade dos ventos e suas variações.

Para analisar o comportamento dos ventos, é preciso fazer um tratamento estatístico nos dados históricos dos mesmos. Logo, para conhecer o potencial médio produzido por uma determinada turbina, é preciso calcular a distribuição da potência dos ventos para as diferentes velocidades, em vez de calcular a média das velocidades dos ventos de uma série histórica e convertê-la em potência.

### 3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O processo estocástico ou processo aleatório representa um conjunto de variáveis aleatórias definida no mesmo espaço de probabilidade. São mostrados a seguir alguns dos conceitos básicos de probabilidade e estatística (JOHNSON, 2001).

Uma medida estatística muito utilizada é a *Média*. Tem-se um conjunto de números  $u_i$ , como os valores medidos das velocidades do vento. A média destes valores é calculada pela equação:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i, \quad (3.3)$$

onde  $n$  é o tamanho da amostra ou o número de valores medidos.

Outra medida conhecida é a *Mediana*. Se  $n$  for ímpar, a mediana corresponde ao elemento central do conjunto, quando os valores do conjunto são arrumados em ordem crescente. Se  $n$  for par, a mediana corresponde à média aritmética dos dois elementos centrais do conjunto.

A *Variância* e o *Desvio Padrão*, outras duas medidas de importância, medem o grau de dispersão do conjunto em relação à média. Um valor pequeno da variância indica que os valores dos elementos do conjunto concentram-se próximos do valor médio. A variância e o desvio padrão são, respectivamente, calculadas pelas expressões:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2, \quad (3.4)$$

$$\text{Desvio Padrão} = \sqrt{\sigma^2}. \quad (3.5)$$

No caso de grande número de registros de velocidade de vento, o procedimento usual consiste em agrupar os dados dentro de vários intervalos, chamados de

classes. Este agrupamento permite evidenciar certas propriedades da variável que não seria possível identificar pela simples análise dos dados brutos. Para determinar a que classe pertence determinada velocidade, tem-se:

$$C = \left[ \text{INTEIRO} \left( \frac{u_i}{\Delta u} \right) \right] + 1, \quad (3.6)$$

onde  $C$  é a classe;  $\Delta u$  é a amplitude da classe, normalmente igual a 1m/s.

Definidas as classes, é calculada a velocidade média de toda a amostra através da equação:

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot u_i}{n}, \quad (3.7)$$

onde  $F_i$  é a Freqüência Absoluta, ou seja, o número de ocorrências de velocidades em cada classe, e  $n$  o tamanho da amostra.

A Variância então é calculada com a equação:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot (u_i - V_m)^2}{n}. \quad (3.8)$$

Calculam-se as Freqüências Relativas  $F_R$ , isto é, o número de vezes que os valores contidos na amplitude de classe ocorrem, Freqüência Absoluta, em relação ao tamanho da amostra total. Neste caso, tem-se:

$$F_R = \frac{F_i}{n}, \quad (3.9)$$

em que,  $F_i$  é a Freqüência Absoluta e  $n$  o tamanho da amostra.

Assim, pode-se reescrever as equações associadas à velocidade média e a variância em cada classe da seguinte forma:

$$V_m = F_{Ri} \cdot u_i, \quad (3.10)$$

$$\sigma^2 = F_{Ri} \cdot (u_i - V_m)^2, \quad (3.11)$$

onde  $i$  é a classe em questão.

É importante entender a necessidade de trabalhar com a distribuição de frequência da velocidade do vento. Essa velocidade representa um instante no tempo e não a média de um determinado período, isto porque a média do cubo de diferentes velocidades dos ventos, durante um determinado intervalo de tempo, é maior que o cubo da média das velocidades de ventos neste intervalo.

Para obter-se a distribuição de velocidade do vento, é necessário definir qual o percentual de ocorrência de uma dada velocidade, como por exemplo, a 5,0 m/s ou 15 m/s, num período de tempo. Assim, é possível calcular o montante de energia elétrica gerada em um ano, por exemplo. Como as distribuições das velocidades dos ventos são diferentes, para cada local que apresente um potencial de geração de energia elétrica, o histograma de potência de cada um deles varia significativamente, mesmo que registrem a mesma média anual de velocidade do vento. Normalmente, a função de distribuição de Weibull é a que melhor representa o comportamento dos ventos, ou seja, a melhor que aproxima a distribuição de velocidade dos ventos no tempo (GIPE, 1995).

### 3.3 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Como foi citado anteriormente, verificou-se que a duração e a ocorrência da velocidade do vento é normalmente aproximada pela distribuição de Weibull. A energia elétrica provida dos ventos é calculada a partir dos valores de potência gerada multiplicados pelo tempo de duração da ocorrência, conforme os intervalos de velocidade de vento (AMARANTE, 2001). A função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull depende do fator de escala e do fator de forma, apresentados em seguida:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{u}{c} \right)^k}, \quad (3.12)$$

$$k = \left( \frac{\sigma}{u} \right)^{-1,086} e \quad (3.13)$$

$$c = \frac{\bar{u}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}. \quad (3.14)$$

Conhecida a curva de carga de um gerador e a velocidade dos ventos, é possível determinar a potência útil gerada por um gerador eólico-elétrico. Para várias máquinas distribuídas em um parque eólico, é feita uma simplificação. Todo o parque eólico é equacionado, considerando apenas uma máquina equivalente, na qual é calculado apenas um valor para a velocidade do vento, e assim é obtido o valor da potência equivalente das máquinas deste parque eólico.

Neste caso, são desconsiderados alguns fatores que não fazem parte deste trabalho como o efeito do sombreamento que uma turbina faz na máquina que está logo atrás dela. Este efeito é causado pelas pás da turbina da frente que causam turbulência, assim o vento não chega na outra turbina como chegou na anterior. A outra simplificação é considerar que todas as máquinas são idênticas, caso contrário seria necessário implementar os cálculos para cada gerador eólico-elétrico do parque eólico-elétrico.

### **3.4 REGIME DOS VENTOS**

Os ventos apresentam características aleatórias que podem ser estimadas usando a distribuição de Weibull como é mostrado na equação 3.12. São analisados períodos distintos dentro do levantamento anual dos ventos.

No Estado do Ceará, o primeiro semestre é caracterizado pelo período de chuvas, sendo menores em relação ao segundo semestre.

Baseado em um levantamento da velocidade dos ventos, foi calculado um valor médio dos ventos para cada intervalo de 10 minutos dentro do período considerado. Isto é, período de carga leve e período de carga pesada. As figuras a seguir mostram o comportamento dos ventos nos períodos supracitados.

A figura 3.1 mostra o comportamento dos ventos no horário de menor carregamento do sistema elétrico, denominado carga leve. Este horário está compreendido entre 00:00 e 05:00 horas. Como pode ser observado na figura 3.1, os valores obtidos no segundo semestre são maiores do que os valores obtidos no primeiro semestre.

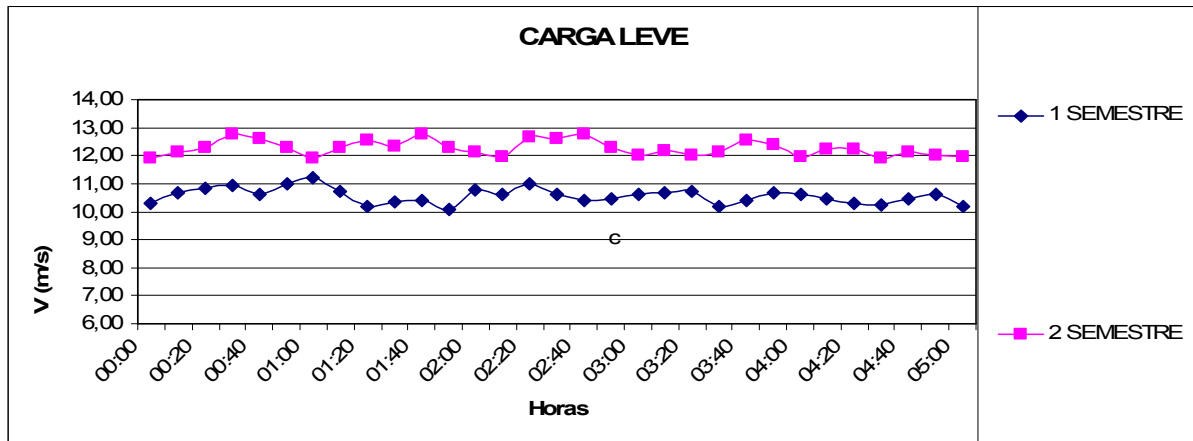


Figura 3.1 – Velocidade dos ventos em Carga Leve – 1º e 2º semestre

A figura 3.2 mostra o comportamento dos ventos no horário de maior carregamento do sistema elétrico, denominado carga pesada. Este horário está compreendido entre 18:00 e 20:30 horas. Nas curvas da figura 3.2, também pode ser observado que os valores de ventos obtidos no segundo semestre são maiores do que os valores dos ventos obtidos no primeiro semestre.

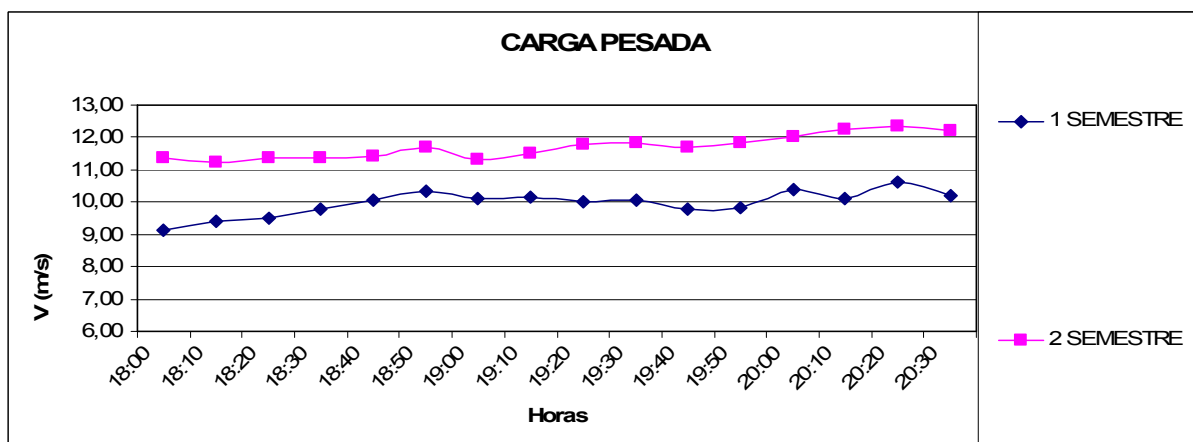


Figura 3.2 – Velocidade dos ventos em Carga Pesada – 1º e 2º semestre

Independente do semestre, no horário de carga leve as velocidades médias dos ventos são maiores em relação ao período de carga pesada.

### 3.5 MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Na utilização do fluxo de carga implementado em uma barra do tipo PQ, os valores especificados são as potências ativas e reativas. Como as cargas variam a todo instante, devido ao processo de entrada e saída aleatório, as potências ativas e reativas da geração eólio-elétrica apresentam variações resultantes do comportamento intermitente dos ventos. Com isto, esta geração é analisada como

uma “carga negativa”, ao invés de importar potência ativa do sistema elétrico, esta exporta potência ativa.

Para a modelagem de um parque eólico em um barramento do tipo PQ, é calculada a geração de potência ativa e, a partir do fator de potência deste parque eólico, é obtido o consumo de potência reativa. Existe uma potência ativa positiva, injetada no sistema elétrico e uma potência reativa negativa, isto é, absorvida do sistema elétrico (FEIJOÓ e CIDRÁS, 2000).

Para o desenvolvimento do modelo PQ da máquina de indução é utilizado o circuito equivalente da máquina de indução - tipo gaiola de esquilo em estado permanente. Também é considerado um banco de capacitores para a compensação dos reativos da máquina e desprezadas as perdas ôhmicas dos enrolamentos.

### 3.5.1 EQUACIONAMENTO DO MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

A figura 3.3 mostra o circuito elétrico simplificado da máquina de indução, tipo gaiola de esquilo, em regime permanente, com a correção do fator de potência.

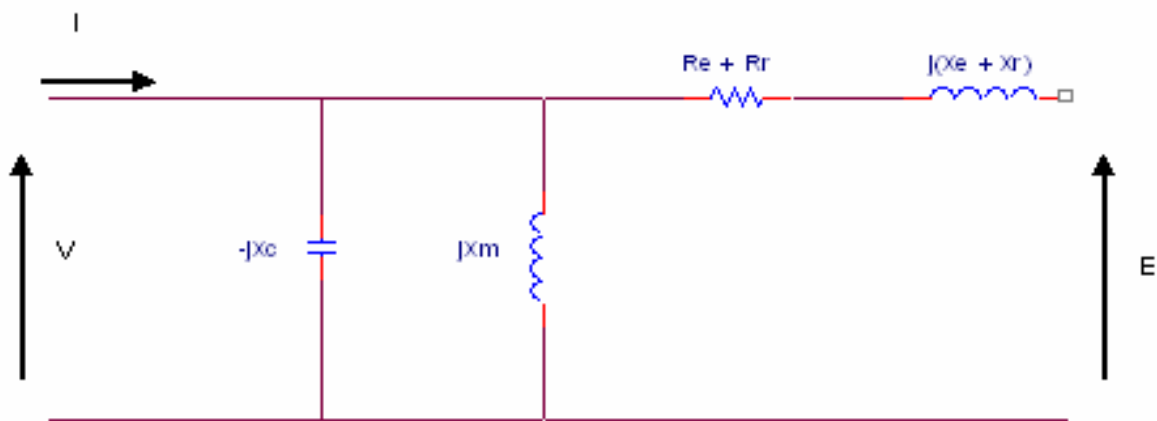


Figura 3.3 – Circuito simplificado da máquina de indução - gaiola de esquilo

Seja uma potência ativa obtida na equação 3.2. Existe uma potência mecânica no rotor da turbina que se transforma em potência elétrica, como mostra a expressão a seguir.

$$Z_{EQ} = \frac{-jX_c \cdot jX_m}{-jX_c + jX_m} = j \frac{X_c \cdot X_m}{X_c - X_m}, \quad (3.15)$$

$$S = VI^*, \quad (3.16)$$

$$I = \frac{V - E}{R + jX} + \frac{V}{Z_{EQ}}, \quad (3.17)$$

sendo

$$R = R_e + R_r \text{ e} \quad (3.18)$$

$$X = X_e + X_r. \quad (3.19)$$

Substituindo-se a equação 3.17 em 3.18, resulta:

$$S = V \left( \frac{V^* - E^*}{R - jX} + \frac{V^*}{Z_{EQ}^*} \right). \quad (3.20)$$

Substituindo-se a equação 3.15 em 3.20 e realizado o desenvolvimento matemático, é obtida a seguinte expressão:

$$S = \frac{\frac{X_C X_m}{X_C - X_m} \left( |V|^2 R - VE^* R + j \left( |V|^2 X - VE^* X \right) \right) + j |V|^2 (R^2 + X^2)}{(R^2 + X^2) \frac{X_C X_m}{X_C - X_m}}. \quad (3.21)$$

Separando-se a parte real da parte imaginária da equação 3.21, resultam:

$$P = \frac{|V|^2 R - VE^* R}{(R^2 + X^2)} \quad (3.22)$$

e

$$Q = \frac{|V|^2 X - VE^* X}{(R^2 + X^2)} + \frac{|V|^2 (X_C - X_m)}{X_C X_m}. \quad (3.23)$$

Desenvolvendo-se a equação 3.22, ocorre:

$$P(R^2 + X^2) = |V|^2 R - VE^* R, \quad (3.24)$$

$$VE^* = |V|^2 - P \frac{(R^2 + X^2)}{R}. \quad (3.25)$$

Substituindo-se a equação 3.25 em 3.23:



$$Q = \frac{|V|^2 X - |V|^2 X + P \frac{(R^2 + X^2)}{R} X}{(R^2 + X^2)} + \frac{|V|^2 (X_c - X_m)}{X_c X_m}. \quad (3.26)$$

Desenvolvendo-se a equação 3.26, ocorre:

$$Q = \frac{PX}{R} + \frac{|V|^2 (X_c - X_m)}{X_c X_m}. \quad (3.27)$$

A equação que é empregada para calcular a potência reativa de forma aproximada:

$$Q \cong \frac{P^2 X}{V^2} + \frac{|V|^2 (X_c - X_m)}{X_c X_m}. \quad (3.28)$$

A equação 3.28 mostra o resultado do modelo matemático da potência reativa na barra onde está localizada uma usina eólico-elétrica.

### 3.5.2 ALGORITMO DO MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O algoritmo do modelo PQ da máquina de indução é desenvolvido nas seguintes etapas:

1. Cálculo da potência ativa extraída do gerador eólico-elétrico, usando os dados dos ventos e a curva da máquina de indução;
2. Cálculo da potência reativa da máquina de indução a partir da reatância de magnetização;
3. Cálculo do fator de potência da máquina de indução;
4. Cálculo da reatância capacitiva para correção do fator de potência da máquina;
5. Aplicação da equação 3.19 para o cálculo da potência reativa da máquina de indução;

6. Atualização da matriz de carga com os valores das potências ativas e reativas da máquina de indução no barramento correspondente.

### 3.6 MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O modelo PQs da máquina de indução foi desenvolvido a partir do modelo RX proposto por (FEIJOÓ e CIDRÁS, 2000). No modelo RX, devido à variação do escorregamento da máquina, a admitância da máquina é modificada. Esta admitância modificada é atualizada na matriz jacobiana de Newton a cada iteração. Quando este modelo foi implementado em um sistema real de 40 barras, ocorreram problemas de convergência, sendo necessária a implementação de uma nova metodologia.

A partir da necessidade de um modelo mais completo da máquina de indução, foi desenvolvido o modelo PQs. Neste modelo considera-se a incorporação das potências ativas e reativas na matriz de potências  $S_{bus}$ , sempre que houver a variação do escorregamento.

Enquanto, no modelo PQ foram desprezados os efeitos das perdas internas e o escorregamento da máquina de indução. Para esta nova proposta, é considerado tanto o efeito do escorregamento, como as perdas internas no equacionamento da máquina de indução.

#### 3.6.1 EQUACIONAMENTO DO MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O equacionamento do modelo completo da máquina de indução apresenta a influência do escorregamento. A figura 3.4 mostra o circuito equivalente completo da máquina de indução.

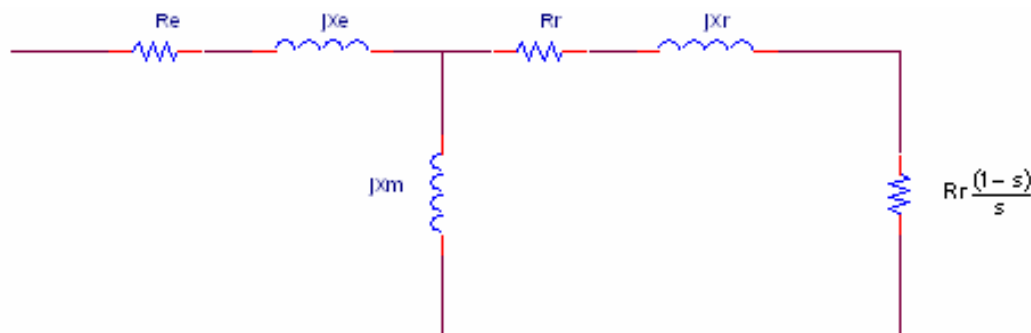


Figura 3.4 – Circuito equivalente da máquina de indução - gaiola de esquilo

Da figura 3.4 são obtidas as seguintes equações:

$$|I_R|^2 = \frac{|V|^2}{\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + X_R^2} \quad (3.29)$$

e

$$P = |I_R|^2 R_R \left(\frac{1-s}{s}\right). \quad (3.30)$$

Substituindo-se 3.29 em 3.30, resulta:

$$P(R_R)^2 + s^2 P X_R^2 = V^2 R_R s - V^2 R_R s^2 = 0. \quad (3.31)$$

Ajustando-se a equação do segundo grau:

$$s^2(PX_R^2 + V^2R_R) - s(V^2R_R) + PR_R^2. \quad (3.32)$$

Suas raízes são determinadas pela expressão:

$$s = \frac{V^2 R_R \pm \sqrt{V^4 R_R^2 - 4 P R_R^2 (P X_R^2 + V^2 R_R)}}{2 (P X_R^2 + V^2 R_R)}. \quad (3.33)$$

Duas raízes satisfazem à equação 3.33, a primeira é próxima de zero, enquanto a segunda é próxima de um. Para o desenvolvimento deste trabalho foram simuladas as duas situações, em que a primeira situação mostra-se satisfatória na convergência do fluxo de carga.

Baseado na figura 3.4 é obtido o valor da impedância da máquina de indução - tipo gaiola de esquilo pela seguinte equação.

$$z = R_e + jX_e + \frac{jX_m \left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right)}{jX_m + \frac{R_r}{s} + jX_r}. \quad (3.34)$$

A equação 3.34 mostra a impedância equivalente da máquina de indução. Conhecida a impedância equivalente, é calculada a potência da máquina, com a ajuda das equações:

$$P_G = \left( \frac{|V|}{|z|} \right)^2 \cdot \text{real}(z) \quad (3.35)$$

e

$$Q_M = - \left( \frac{|V|}{|z|} \right)^2 \cdot \text{imag}(z) \quad (3.36)$$

Substituindo a equação 3.34 em 3.35 e 3.36 são determinadas as seguintes expressões:

$$P_G = \left( \frac{|V|}{|z|} \right)^2 \cdot \left( \text{Re} + \frac{Xm^2 Rr}{s \left( \left( \frac{Rr}{s} \right)^2 + (Xm + Xr)^2 \right)} \right) \quad (3.37)$$

e

$$Q_M = - \left( \frac{|V|}{|z|} \right)^2 \cdot \left( Xe + \frac{Xm \left( \frac{Rr}{s} \right)^2 + Xm Xr (Xm + Xr)}{\left( \frac{Rr}{s} \right)^2 + (Xm + Xr)^2} \right) \quad (3.38)$$

As equações 3.37 e 3.38 são usadas para calcular as potências ativas e reativas da máquina de indução, onde:

- ✓  $P_G$  - Potência ativa útil gerada, em que esta potência é obtida a partir da curva de potência elétrica da máquina, menos as perdas elétricas internas da máquina, como: perdas no entreferro, no cobre, etc. O valor desta potência é considerado positivo, pois indica que ela está sendo injetada no sistema elétrico.
- ✓  $Q_M$  - Potência reativa de magnetização da máquina de indução, isto é, a potência reativa que a máquina requer para entrar em operação. Este valor é considerado negativo, pois esta potência está sendo fornecida pelo sistema elétrico.

Como o fator de potência da máquina de indução é considerado baixo, logo é solicitada do sistema elétrico a potência reativa, fazendo que a magnitude da tensão seja reduzida, ficando abaixo de 0,95 p.u. Este valor é o limite inferior de tensão da faixa de operação para sistemas de distribuição.

Para a correção deste impacto no sistema elétrico, são instalados bancos de capacitores para a correção do fator de potência em um valor já especificado, corrigindo desta forma o valor da magnitude da tensão na barra onde está localizado o parque eólio-elétrico.

A figura 3.5 mostra graficamente a correção do fator de potência, com a instalação do banco de capacitores.

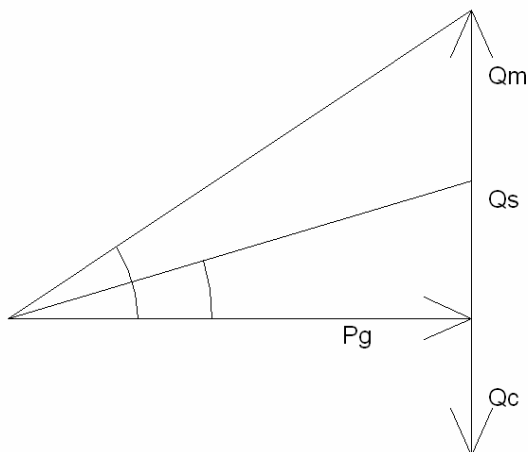


Figura 3.5 – Triângulo de potência para correção do fator de potência

Considerando a potência complexa do gerador, conforme equações 3.37 e 3.38, potência ativa e reativa, respectivamente, como sendo o triângulo de maior área da figura 3.5. Considerando também que o banco de capacitores possui uma perda ativa desprezível em relação à potência ativa gerada e, a sua potência reativa no sentido oposto à potência reativa de magnetização da máquina de indução, teremos:

$$Q_C = Q_m - Q_S. \quad (3.39)$$

Conhecido o fator de potência da máquina e a potência ativa, é obtida a potência reativa de magnetização, mostrada na equação a seguir:

$$Q_m = |P_G| \left[ \operatorname{tg} \left( \cos^{-1} \left( \operatorname{FP}^{\text{MÁQUINA}} \right) \right) \right]. \quad (3.40)$$

Como as perdas ativas do banco de capacitores são desprezadas, a potência ativa não será alterada. Logo, a potência reativa absorvida do sistema elétrico é obtida da mesma potência ativa e do fator de potência especificado, conforme equacionamento abaixo:

$$Q_S = |P_G| \left[ \operatorname{tg} \left( \cos^{-1} \left( FP^{ESPECIFICADO} \right) \right) \right]. \quad (3.41)$$

Substituindo as equações 3.38 e 3.39 em 3.37, resulta:

$$Q_C = |P_G| \left[ \operatorname{tg} \left( \cos^{-1} \left( FP^{MÁQUINA} \right) \right) - \operatorname{tg} \left( \cos^{-1} \left( FP^{ESPECIFICADO} \right) \right) \right]. \quad (3.42)$$

### 3.6.2 ALGORITMO DO MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O algoritmo do modelo PQs da máquina de indução é desenvolvido nas seguintes etapas:

1. Cálculo dos parâmetros a serem utilizados, na base da máquina de indução;
2. Cálculo da potência elétrica no rotor do gerador eólio-elétrico, usando os dados dos ventos e a curva da máquina de indução;
3. Cálculo do escorregamento da máquina de indução;
4. Cálculo da impedância equivalente  $z$  da máquina de indução, a partir do escorregamento já calculado;
5. Cálculo da potência ativa e reativa da máquina de indução, a partir da sua impedância equivalente;
6. Cálculo do fator de potência da máquina;
7. Cálculo do banco de capacitores e correção do fator de potência do barramento onde está localizado o parque eólio-elétrico;
8. Cálculo dos parâmetros calculados na base do sistema elétrico;

9. Atualização da matriz de carga Sbus inserindo o valor da potência ativa e reativa da máquina de indução no barramento correspondente.

### 3.7 MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR SÍNCRONO

A excitação de geradores conectados em sistemas de transmissão de energia elétrica é normalmente controlada de forma a manter a tensão constante. De forma geral, há dois tipos de controle que podem ser empregadas: tensão constante e fator de potência constante, isto é, potência reativa constante, (CIGRÉ, 1998), (JENKINS et al., 2000) e (HURLEY et al., 1999). Portanto, neste trabalho, ambas as formas de controle são analisadas. Uma descrição detalhada sobre o sistema de excitação de geradores síncronos atuando como um regulador de tensão ou de fator de potência é apresentado em (HURLEY et al., 1999).

A figura 3.6 apresenta o sistema de controle da excitação do gerador síncrono, o qual pode realizar tanto o controle da tensão, quanto controle do fator de potência.

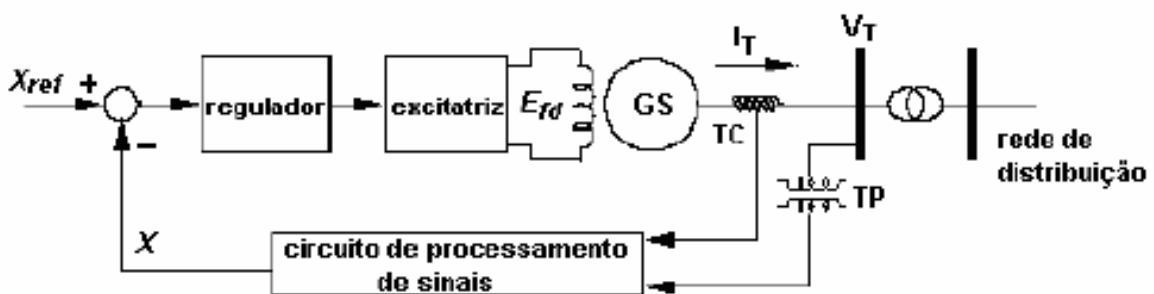


Figura 3.6 – Controle da excitação do gerador síncrono

A modelagem com o controle de tensão é a configuração convencional. Para isto, é considerado o princípio da barra do tipo PV do fluxo de carga, potência especificada, geralmente a nominal, e a tensão especificada, na qual, a barra possui um regulador de tensão e, sempre que a tensão tender a modificar, o controle deste regulador irá atuar na excitação da máquina, fazendo a correção da tensão, modificando os reativos absorvidos ou injetados do sistema elétrico.

A modelagem com o controle de reativos é uma configuração alternativa que modela as máquinas síncronas pelo controle do fator de potência. Neste caso, a tensão de campo é automaticamente ajustada para manter o fator de potência constante. Esse

tipo de regulador é freqüentemente utilizado no controle de excitação de grandes motores síncronos (HURLEY et al., 1999). Este tipo de modelo é denominado de modelo simplificado do gerador síncrono.

Para a geração distribuída, o controle do fator de potência é adotado para evitar o pagamento de penalidades devido ao consumo de potência reativa ou para maximizar a geração de potência ativa. Neste caso, a operação com o fator de potência unitário é usualmente adotada.

Além dos casos citados acima, alguns órgãos de regulamentação de países com tradição em geração distribuída requerem que o gerador opere importando potência reativa da rede de forma a contra-balancear o aumento do perfil da magnitude da tensão. Assim, verifica-se que a geração distribuída pode operar com fator de potência unitário, indutivo ou capacitivo.

No Brasil, apesar de não haver regulamentação que obrigue o autoprodutor a importar potência reativa da rede de forma a contra-balancear o aumento do perfil da magnitude da tensão, a faixa de tensão para sistemas de distribuição de energia elétrica está entre 0,95 pu e 1,05 pu, conforme regulamentação vigente, resolução Nº 505 da ANEEL de 2001 (ANEEL, 2006).

### **3.7.1 EQUACIONAMENTO DO MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR SÍNCRONO**

Conhecido o espaço amostral com as velocidades dos ventos de um dado período, feito o tratamento estatístico, é obtida a velocidade média dos ventos, conforme equação 3.7.

Com o valor da velocidade média do vento é possível calcular a potência ativa da máquina síncrona, a partir da curva da máquina simulada para diversos valores de velocidades, como é mostrado na figura a seguir.

A figura 3.7 mostra a curva de potência ativa de uma máquina síncrona de 500kW em função da velocidade do vento. Então, conhecida a velocidade do vento é obtida a potência de um gerador síncrono.



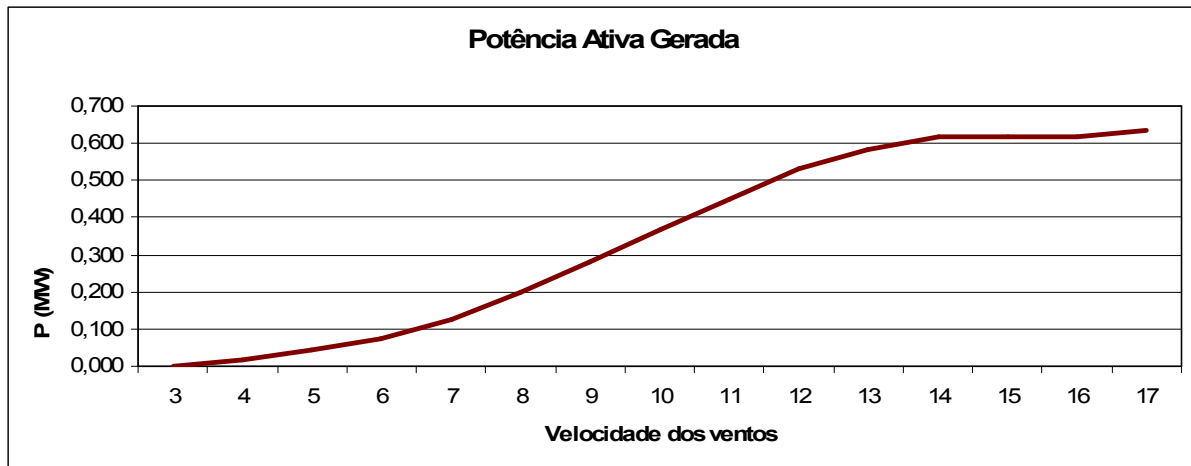


Figura 3.7 – Curva de Potência Ativa da Máquina de Síncrona de 500 kW

Seja uma potência ativa e um fator de potência especificado pelo fabricante, assim é definida a faixa de potência reativa que esta máquina pode operar, calculada com as seguintes equações:

$$\varphi_{Fab} = \cos^{-1}[FP], \quad (3.43)$$

$$Q = P \operatorname{tg}(\varphi_{Fab}). \quad (3.44)$$

Considerando que o gerador síncrono pode trabalhar com um fator de potência indutivo ou um fator de potência capacitivo, valores máximos estabelecidos pelo fabricante, é mostrada a faixa de potência reativa que este gerador pode operar, conforme equação 3.45.

$$Q_{ind} \leq Q \leq Q_{cap}. \quad (3.45)$$

Os geradores síncronos são projetados em termos da máxima geração de potência aparente [MVA], para uma dada tensão e um dado fator de potência especificado que o equipamento pode operar sem sofrer um considerável aquecimento (KUNDUR, 1994). As potências ativas e reativas que os geradores síncronos podem gerar são limitada por diversos aspectos, dentre os quais podem ser citados, a capacidade da máquina primária que transmite energia mecânica ao gerador, o aquecimento dos enrolamentos de armadura e de campo, o aquecimento do núcleo do gerador, e os limites de estabilidade e excitação mínima (KUNDUR, 1994) e (MONTICELLI e GARCIA, 1999).

Como a potência reativa é função da potência ativa, conforme equação 3.44, a quantidade de reativos,  $Q_{ind}$  ou  $Q_{cap}$ , é variável para a geração eólio-elétrica. Logo, a variação de reativos para que a máquina opere está compreendida em:

- ✓ **Zero** - Situação em que a usina eólio-elétrica não está gerando devido a baixas velocidades dos ventos;
- ✓ **Nominal** – Situação em que a usina eólio-elétrica está gerando a potência nominal devido a altas velocidades dos ventos;
- ✓ **Intermediária** – Situação em que a usina eólio-elétrica está gerando uma potência ativa qualquer que não é a potência nominal.

### **3.7.2 ALGORITMO DO MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR SÍNCRONO**

O algoritmo do modelo simplificado do gerador síncrono é desenvolvido nas seguintes etapas:

1. Especificação do fator de potência para operação da máquina síncrona;
2. Cálculo da potência ativa extraída do gerador eólio-elétrico, usando os dados dos ventos e a curva da máquina síncrona;
3. Cálculo da potência reativa da máquina síncrona, a partir da potência ativa e do fator de potência;
4. Atualização da matriz de carga  $S_{bus}$  inserindo o valor das potências ativas e reativas da máquina síncrona do barramento correspondente.

# CAPITULO IV

## SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é mostrar e analisar os resultados obtidos através do programa computacional desenvolvido, baseado no método desacoplado rápido, com as seguintes implementações:

- ✓ Caso base, situação sem geração eólico-elétrica;
- ✓ Modelo PQ da máquina de indução;
- ✓ Modelo PQs da máquina de indução;
- ✓ Modelo simplificado do gerador síncrono.

A tolerância para a convergência do programa computacional foi especificada para todos os casos simulados em  $10^{-6}$  pu.

### 4.1 CONFIGURAÇÕES DA REDE ELÉTRICA

A figura 4.1 mostra o sistema de distribuição de energia elétrica real. Nela a barra N° 1 é a barra de referência. Esta é barra que separa a subtransmissão da distribuição de energia elétrica. As demais são barras do tipo PQ, onde só existe carregamento, inclusive as barras onde está localizada a geração eólico-elétrica.

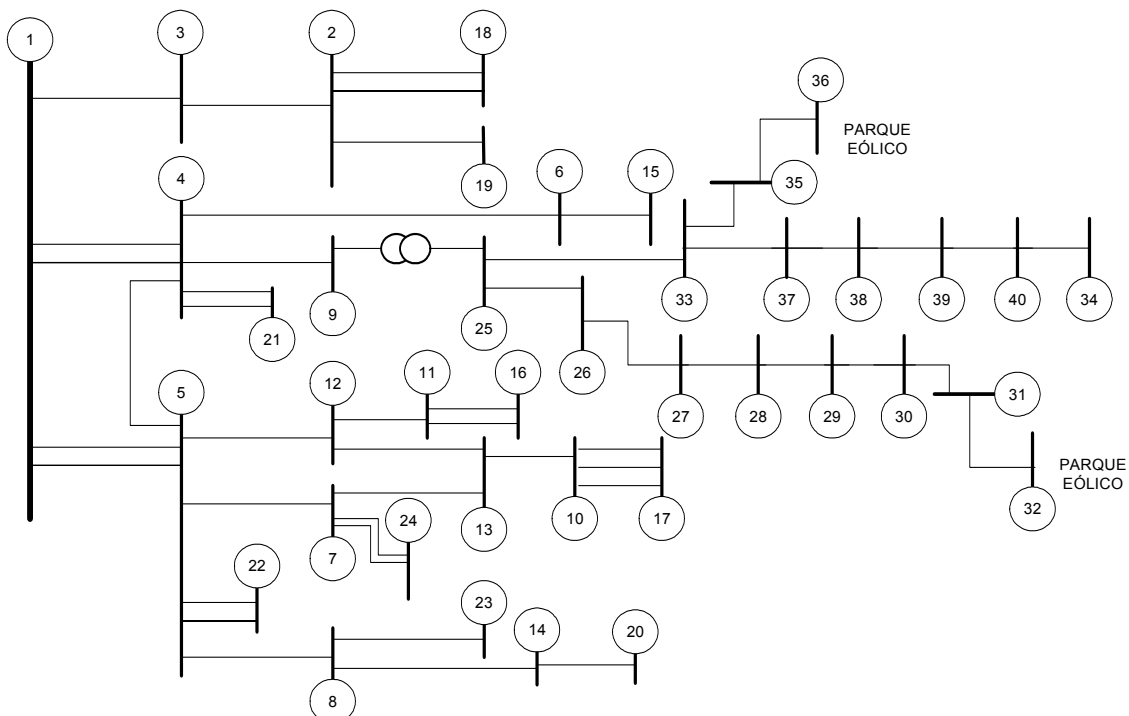


Figura 4.1 – Sistema elétrico da simulação

A rede elétrica descrita acima é um sistema misto, contendo barramentos de alta tensão, 69 kV, e de média tensão, 13,8 kV. Todos os barramentos que estiverem entre a barra de referência e a barra N° 25 fazem parte do sistema de alta tensão de 69 kV. Os barramentos que estiverem após a barra N° 25 fazem parte do sistema de média tensão de 13,8 kV. Por limitações do sistema elétrico, o parque eólico está localizado nas barras N° 32 e N° 36.

## **4.2 DESCRIÇÃO DAS USINAS EÓLIO-ELÉTRICAS**

São apresentados dois modelos matemáticos de usinas eólio-elétricas, utilizando máquinas de indução:

### **4.2.1 MÁQUINAS DE INDUÇÃO**

- ✓ **Modelo PQ da máquina de indução** - Neste modelo o parque eólico é composto por 20 aerogeradores de 600 kW cada, totalizando uma potência instalada de 12 MW. Por limitações do sistema elétrico, houve a necessidade de dividi-lo em dois barramentos de 6,0 MW cada, localizado nas barras N° 32 e N° 36.
- ✓ **Modelo PQs da máquina de indução** - Neste modelo o parque eólico também é composto por 20 aerogeradores de 600 kW cada, totalizando uma potência instalada de 12 MW e também ele está localizado nas barras N° 32 e N° 36.

### **4.2.2 MÁQUINA SÍNCRONA**

É apresentado um modelo simplificado de usinas eólio-elétricas, utilizando o gerador síncrono:

- ✓ **Modelo simplificado do gerador síncrono** - Neste modelo o parque eólico também é composto por 20 aerogeradores de 500 kW cada, totalizando uma potência instalada de 10 MW. Também por limitações do sistema elétrico, o parque eólico foi dividido em dois barramentos, localizado nas barras N° 32 e N° 36.

### **4.3 SIMULAÇÃO DOS MODELOS DOS GERADORES EÓLIO-ELÉTRICOS**

Para validar os modelos apresentados, várias simulações computacionais foram realizadas. Para cada modelo, as simulações computacionais foram divididas nos seguintes casos:

Caso 1 – caso base, sem geração eólio-elétrica:

- 1.1 – Caso base no horário de carga leve;
- 1.2 – Caso base no horário de carga pesada.

Caso 2 – caso com geração eólio-elétrica:

- 2.1 – Caso com geração no horário de carga leve;
- 2.2 – Caso com geração no horário de carga pesada.

Os casos com geração eólio-elétrica foram simulados, utilizando os ventos médios obtidos a partir de um levantamento histórico, aplicados às curvas de geração das máquinas, valores simulados e comprovados pelos fornecedores, tanto para o primeiro semestre do ano, como para o segundo semestre do ano.

### **4.4 MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO**

#### **4.4.1 CASO BASE**

As barras N° 32 e N° 36 fazem parte do sistema de distribuição de energia elétrica e são do tipo PQ sem injeção de potência eólio-elétrica, com a finalidade de calcular o fluxo de carga.

##### **4.4.1.1 CARGA LEVE**

O horário de carga leve no caso base é a situação de menor carregamento do sistema elétrico. Este caso é caracterizado por uma menor potência demandada, com tensões elevadas e menores perdas no sistema elétrico.

Do fluxo de carga simulado na situação de carga leve, foram obtidos os seguintes resultados na tabela 4.1.

Resultados Obtidos	Simbologia	Valores	Unidade
Potência Aparente na barra N° 01	$S = P + jQ$	59,20 + j13,77	MVA
Tensão na Barra N° 32	V	1,034<-2,855°	p.u
Tensão na Barra N° 36	V	1,028<-3,019°	p.u
Perdas no Sistema de 40 barras	$S = P + jQ$	0,599 +j3,841	MVA

Tabela 4.1 – Resultados do caso base – Carga leve – modelo PQ

Os valores citados acima foram obtidos do cálculo do fluxo de carga para uma única situação, o período de carga leve. Os valores são considerados constantes durante todo o período. A explicação desta simplificação é facilmente comprovada fisicamente. Durante este período, as variações nas cargas são tão pequenas que não interferem nos resultados.

#### 4.4.1.2 CARGA PESADA

O horário de carga pesada no caso base é a situação de maior carregamento do sistema elétrico. Este caso é caracterizado por uma maior potência demandada, baixas tensões e maiores perdas no sistema elétrico.

Do fluxo de carga foram obtidos os seguintes resultados na tabela 4.2.

Resultados Obtidos	Simbologia	Valores	Unidade
Potência Aparente na barra N° 01	$S = P + jQ$	78,72 + j23,48	MVA
Tensão na Barra N° 32	V	1,018<-5,055°	p.u
Tensão na Barra N° 36	V	1,010<-5,759°	p.u
Perdas no Sistema de 40 barras	$S = P + jQ$	1,329 +j7,251	MVA

Tabela 4.2 – Resultados do caso base – carga pesada – modelo PQ

Os valores mostrados na tabela 4.2 foram obtidos do cálculo do fluxo de carga no horário de carga pesada. As mesmas simplificações aplicadas no caso de carga leve são também aplicadas neste caso.

#### 4.4.2 RESULTADOS DO MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Este modelo é utilizado para a realização dos cálculos das potências extraídas das turbinas eólicas. Para cada valor da velocidade dos ventos existe uma potência ativa e uma potência reativa correspondente.

A figura 4.2 mostra a potência ativa em função da velocidade dos ventos. Esta curva é obtida da simulação de uma máquina de indução, tipo gaiola de esquilo de 600 kW.



Figura 4.2 – Curva de potência ativa da máquina de indução

O equacionamento do modelo PQ da máquina de indução apresentado no capítulo III, mostra que, para cada valor de potência ativa, existe um banco de capacitores que mantém o fator de potência da barra, onde está localizada a geração eólio-elétrica em um valor estabelecido. O equacionamento mostra a quantidade de reativos absorvidos em um parque eólico de 6,0 MW.

A figura 4.3 mostra as curvas de potência reativa absorvidas pela máquina de indução para diversos valores do fator de potência. Observam-se diferentes curvas traçadas que quanto maior o fator de potência, menor é o consumo de reativos absorvidos em função do valor da velocidade dos ventos.

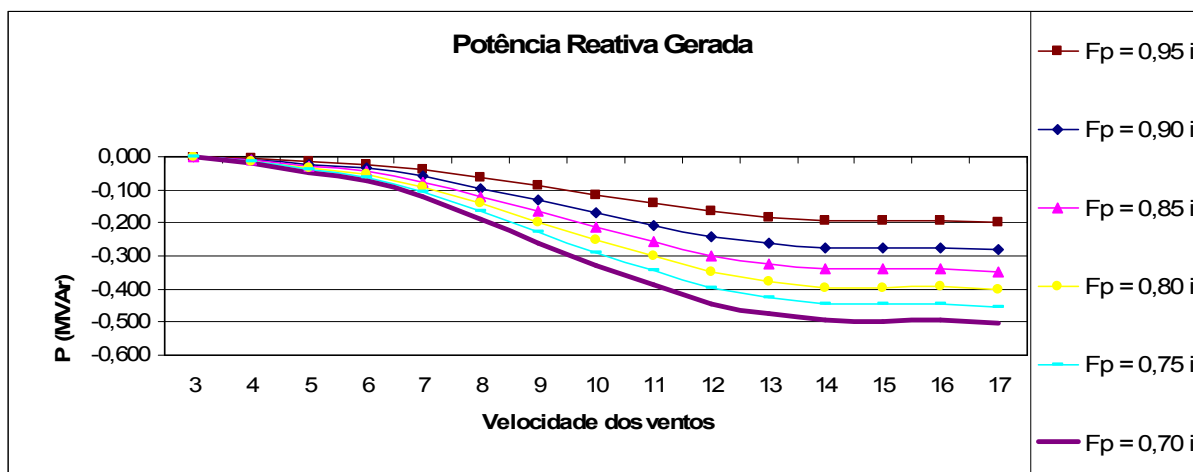


Figura 4.3 – Curva de potência Reativa - Modelo PQ da Máquina de indução

#### 4.4.2.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO SEMESTRE

Baseado na curva dos ventos mostrado na figura 3.1 e aplicando à curva de potência ativa traçada na figura 4.2, obtém-se o perfil da potência gerada tanto no horário de carga leve, como no horário de carga pesada.

##### 4.4.2.1.1 POTÊNCIAS GERADAS

A figura 4.4 mostra o comportamento da potência ativa gerada no horário de carga leve. Na simulação realizada, foi observado que o menor valor do fator de potência é 0,775 indutivo, para que nenhuma barra do sistema elétrico, no horário de carga leve, não ultrapasse o limite inferior da magnitude da tensão. Isto é, valores menores que 0,95 p.u.

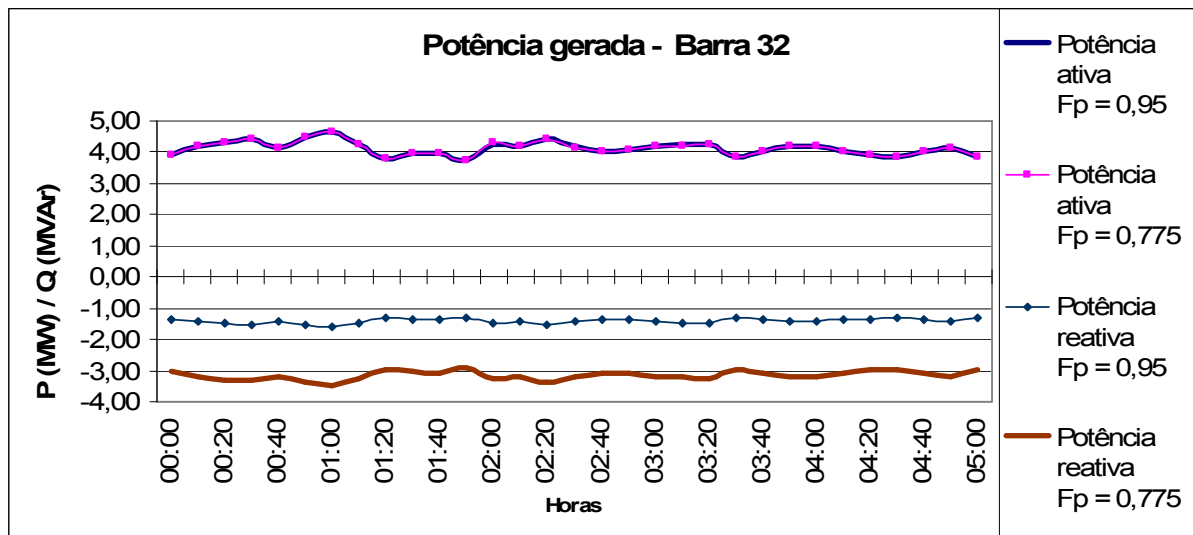


Figura 4.4 – Potências geradas na barra 32 – Carga Leve - 1º Semestre

Observou-se que a variação do valor do fator de potência tem influência direta na potência ativa gerada. A potência reativa, ao longo do horário de carga leve, é menor para o fator de potência 0,95 indutivo. Esta observação é comprovada pela equação 3.19.

A potência reativa importada do sistema elétrico está representada com o sinal negativo para os dois valores do fator de potência indutivo calculados. Isto comprova que neste modelo a potência reativa está sendo importada do sistema elétrico para o parque eólico-elétrico, afim da magnetização das máquinas elétricas.



Como a modelagem das cargas é do tipo impedância constante, todas as potências mostradas são diretamente proporcionais ao valor da tensão ao quadrado, justificando as variações observadas nas curvas de potência ativa.

A figura 4.5 mostra as curvas de potência na barra N° 36. Comparando a mesma com a figura 4.4, as curvas das potências ativas e reativas estão variando com o valor do fator de potência. Os valores das potências são maiores quando o fator de potência for elevado, solicitando menos reativos do sistema elétrico, como também, fornecendo mais potência ativa para o sistema elétrico.

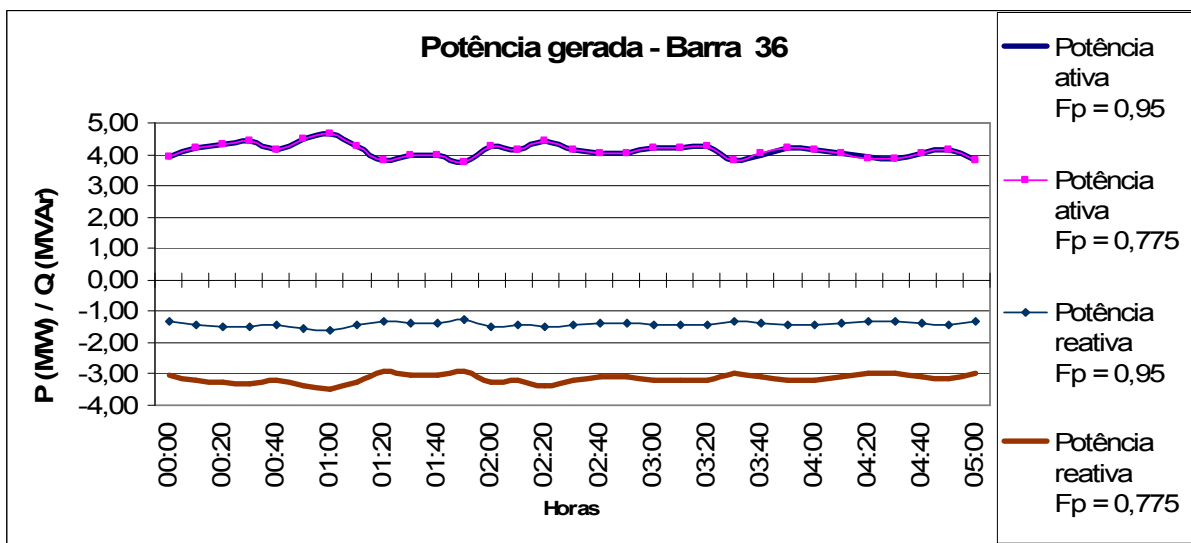


Figura 4.5 – Potências geradas na barra 36 – Carga Leve - 1° Semestre

A figura 4.6 mostra o comportamento da potência ativa gerada no período de carga pesada.

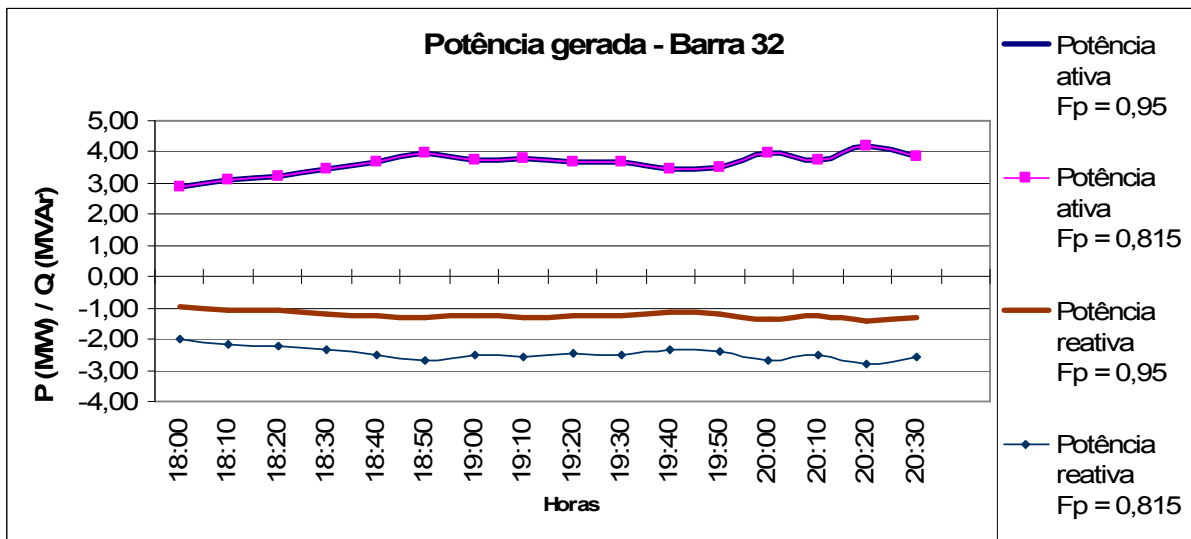


Figura 4.6 – Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada - 1° Semestre

Observou-se o valor do fator de potência de 0,815 indutivo, maior em relação à situação de carga leve, mostrado nas figuras 4.4 e 4.5, para que as tensões nas barras do sistema elétrico fiquem com valores permitidos pela legislação. Logo, para manter as tensões acima de 0,95 p.u é necessário a elevação do fator de potência.

As potências ativas e reativas neste horário são menores em relação o horário de carga leve. Este fato pode ser explicado a partir das figuras 3.1 e 3.2. Nestas, o valor da velocidade dos ventos para o horário de carga pesada é menor em relação ao horário de carga leve, logo as potências geradas são menores.

O mesmo é observado na figura 4.7 em relação às curvas da figura 4.6. Situação semelhante ocorre em relação ao período de carga leve, em que valores das potências ativas e reativas foram alterados devido à variação do valor do fator de potência.

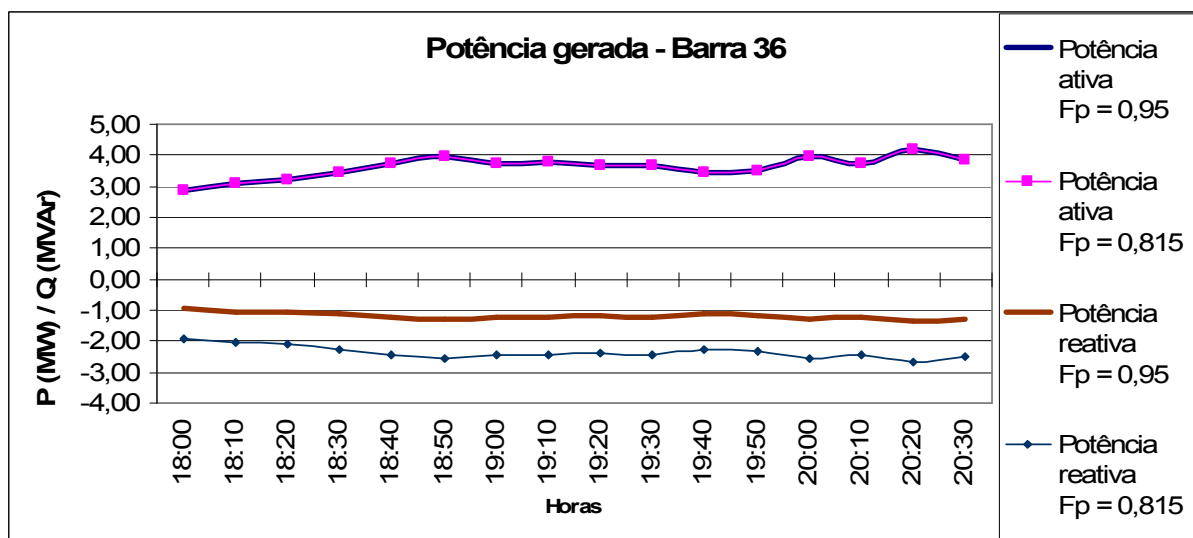


Figura 4.7 – Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada - 1° Semestre

#### 4.4.2.1.2 MAGNITUDE DAS TENSÕES

A magnitude das tensões possui uma forte ligação com a potência reativa. Logo o fator de potência tem influência direta nas tensões do barramento. A figura 4.8 mostra o perfil da tensão na barra N° 32 com o fator de potência 0,95 indutivo e com o fator de potência 0,775 indutivo.

Os resultados obtidos mostram um perfil de tensão mais elevada e com menos picos para o fator de potência 0,95 indutivo. Comparando com a curva que está com o

fator de potência 0,775 indutivo, esta possui uma menor magnitude e com maiores variações em torno do seu valor eficaz.

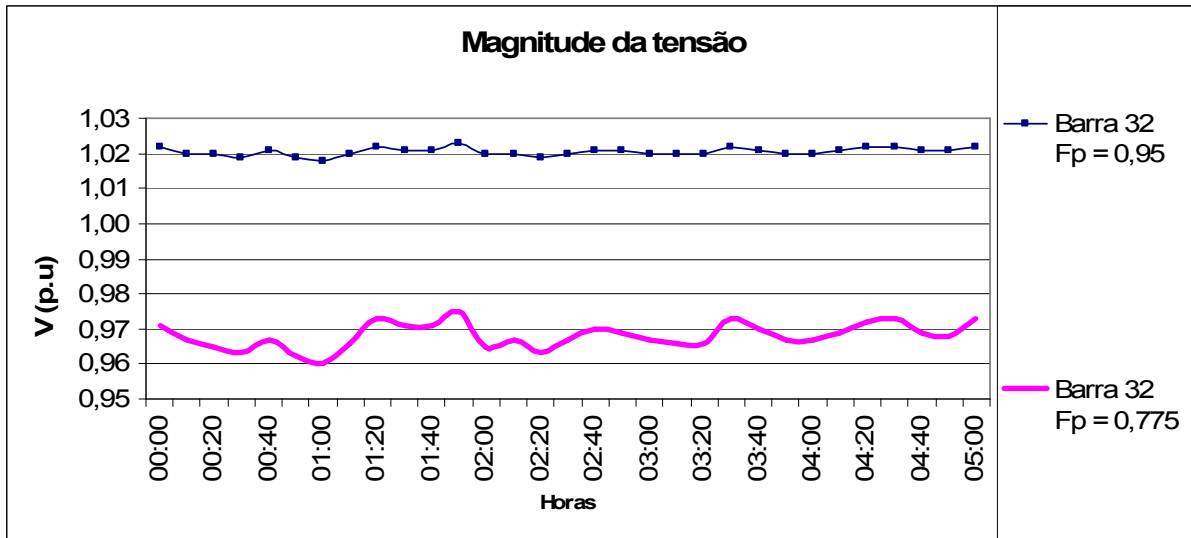


Figura 4.8 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve - 1° Semestre

Quando o fator de potência é elevado, a barra consome menos reativo do sistema elétrico e o perfil da tensão tende a elevar-se.

A figura 4.9 mostra a magnitude da tensão na barra N° 36. A mesma situação ocorrida na barra N° 32 é apresentada para esta barra, com: tensões mais elevadas e com menos picos, com o fator de potência 0,95 indutivo.

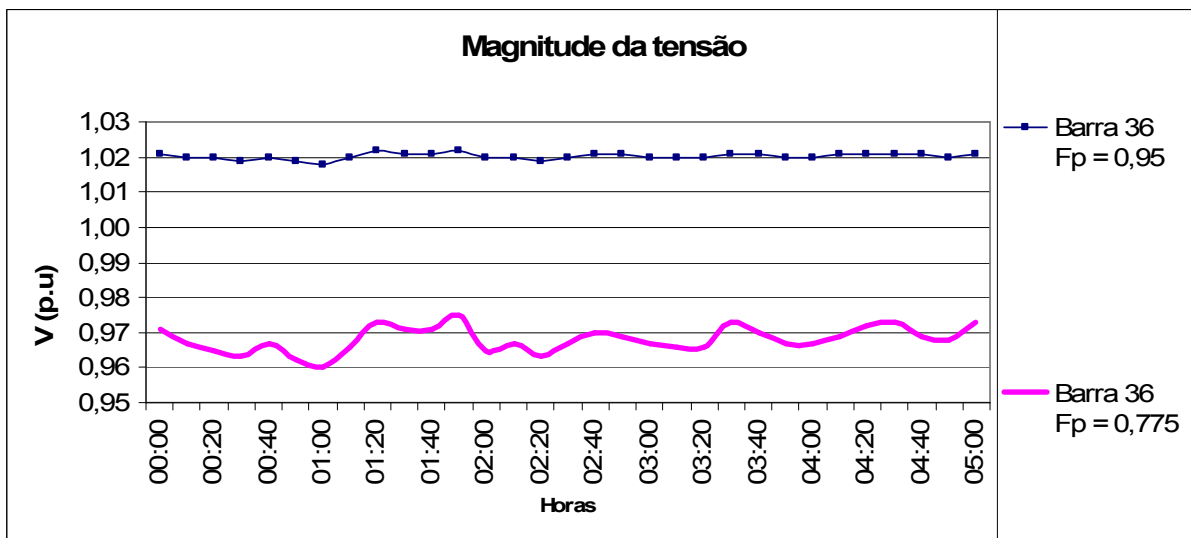


Figura 4.9 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 1° Semestre

Comparado com o caso base, as tensões nas barras N° 32 e N° 36 são menores, como é mostrado na tabela 4.1. No caso base não existe o consumo de reativos nas

barras onde está localizada a geração eólico-elétrica no modelo PQ da máquina de indução. Então, a queda de tensão é menor ao longo do sistema elétrico.

A figura 4.10 mostra o fator de potência mínimo 0,815 indutivo, valor elevado no horário de carga pesada em relação ao horário de carga leve, comprovando que a magnitude das tensões no período de carga pesada é menor comparado com o horário de carga leve.

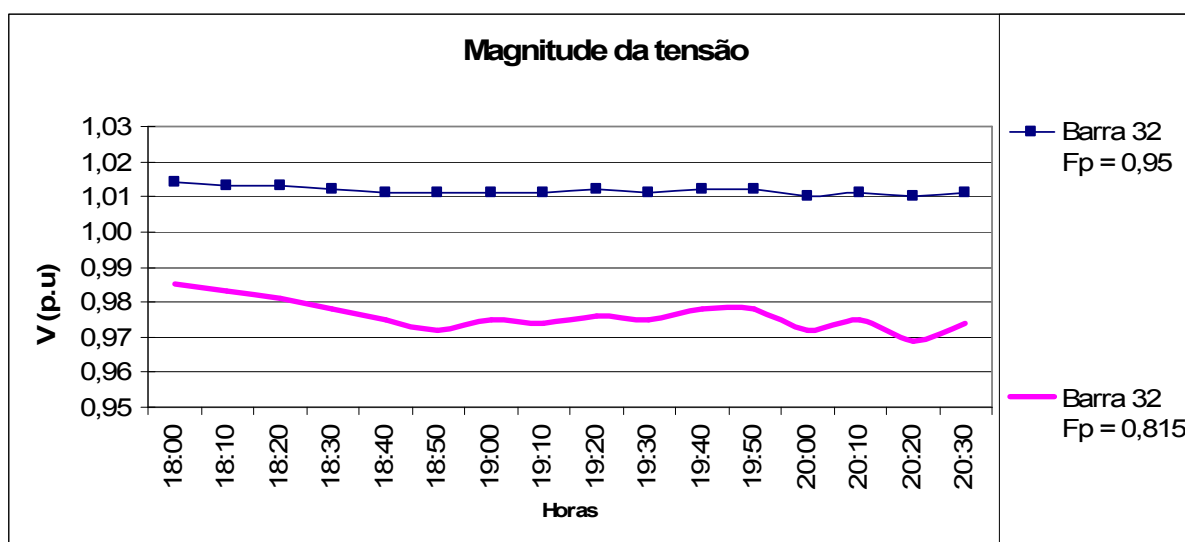


Figura 4.10 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada - 1° Semestre

A figura 4.11 mostra o perfil da tensão na barra N° 36. Os valores obtidos nas curvas são menores em relação à barra N° 32, pois apesar do fator de potência ser o mesmo para ambas as barras, as admitância das barras são diferentes, causando tensões diferentes entre elas no resultado do fluxo de carga.

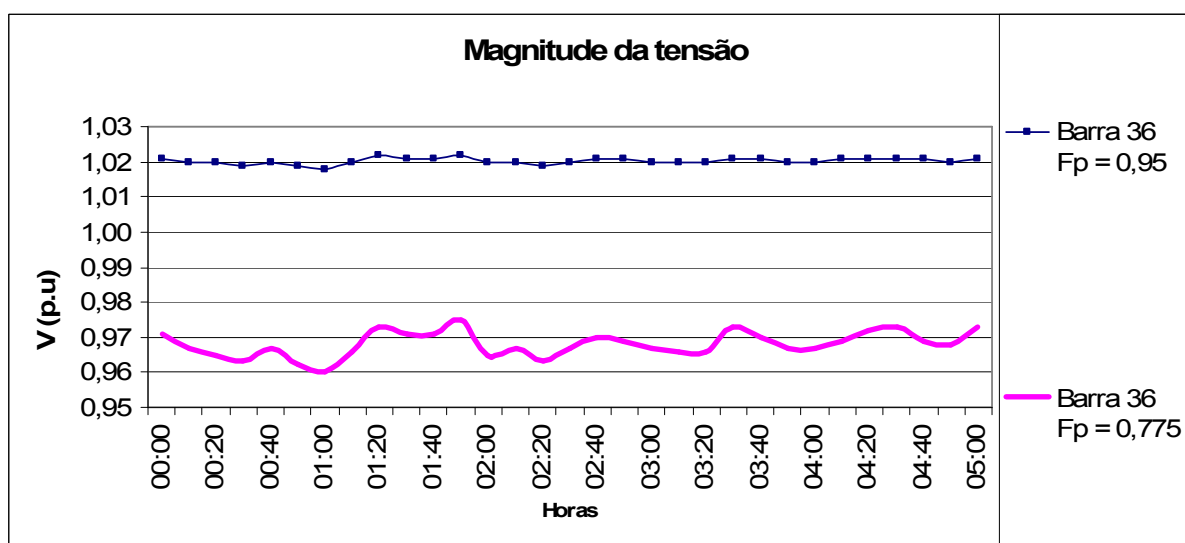


Figura 4.11 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada - 1° Semestre

Comparando a situação de carga pesada com o caso base na tabela 4.2, é observado que as tensões são menores, pois o sistema elétrico está com mais perdas elétricas, logo a queda de tensão tende a ser maior.

#### 4.4.2.1.3 PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO

As perdas ativas no sistema elétrico são mostradas na figura 4.12. É observado que quanto menor for o fator de potência, maior são as perdas ativas, mostrando que a quantidade de reativos importada do sistema elétrico tem influência direta no cálculo das perdas ativas.

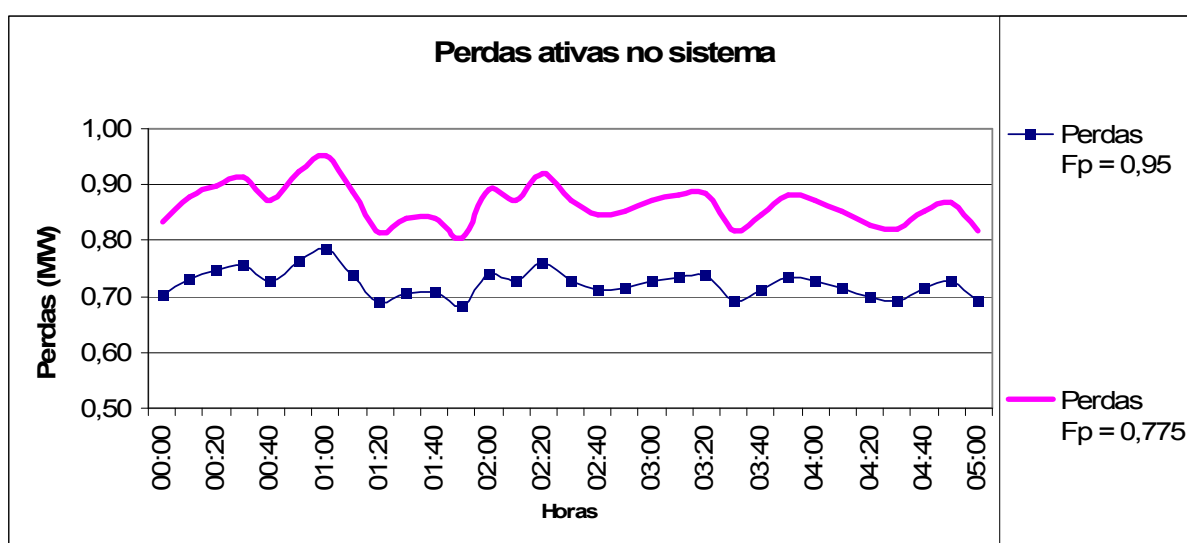


Figura 4.12 – Perdas ativas no sistema – Carga Leve - 1º Semestre

O motivo das perdas serem maiores está ligado à quantidade de potências ativa e reativa gerada no parque eólico-elétrico. A partir de uma determinada velocidade de vento, existe uma potência ativa e uma reativa correspondente. Estes valores interferem no módulo da corrente elétrica nos barramentos do sistema elétrico, interferindo assim nas perdas do sistema elétrico.

Na figura 4.13 são mostradas as perdas ativas no horário de carga pesada. Comparando com as curvas da figura 4.12, as perdas no horário de carga pesada são maiores, pois o sistema elétrico é mais solicitado pelas cargas.

Logo, a influência das correntes elétricas, tanto na barra de referência, como nas barras onde estão localizadas as usinas eólico-elétricas, é maior para o horário de carga pesada.

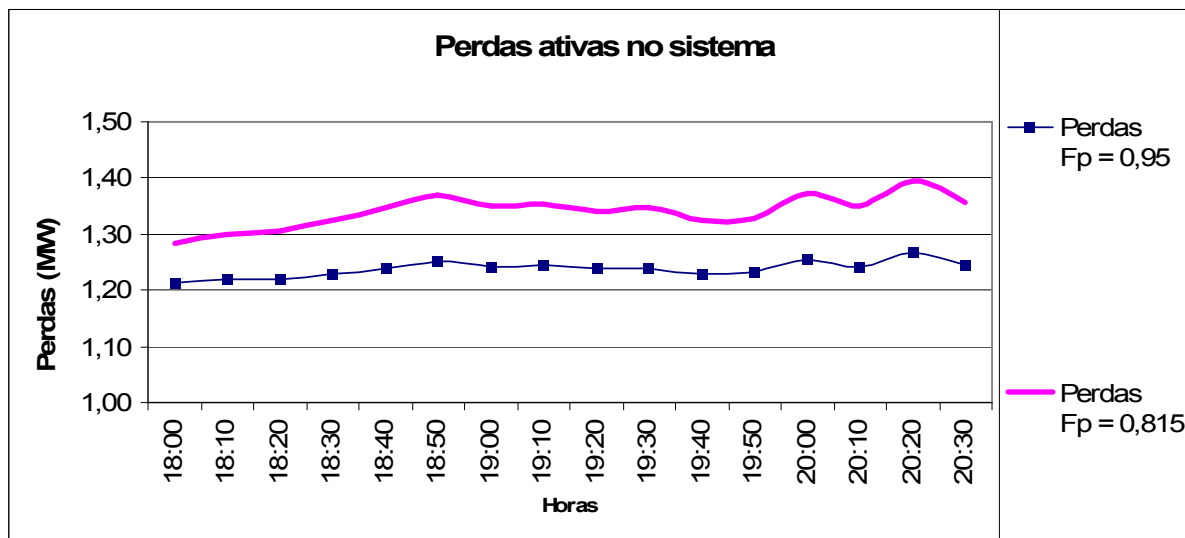


Figura 4.13 – Perdas ativas do sistema – Carga Pesada - 1° Semestre

Comparando com o caso base, nas tabelas 4.1 e 4.2, é visto que as perdas aumentaram tanto para o horário de carga leve, quanto no horário de carga pesada, mesmo com a injeção de potência ativa no sistema elétrico.

As perdas reativas no horário de carga leve são mostradas na figura 4.14. As perdas são elevadas devido às próprias perdas reativas do sistema elétrico, acrescida das perdas reativas acarretadas pela integração dos geradores eólio-elétricos ao sistema elétrico.

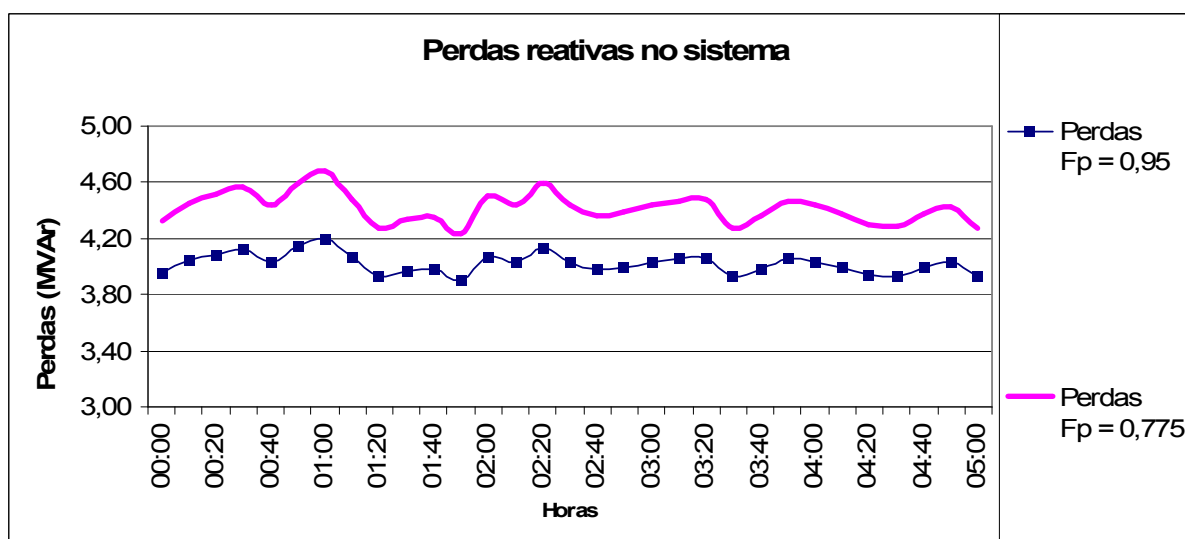


Figura 4.14 – Perdas reativas do sistema – Carga Leve - 1° Semestre

O fator de potência influencia nas perdas reativas, pois quanto menor é o fator de potência, mais reativos são solicitados do sistema elétrico. Logo, quando a demanda por reativos no sistema elétrico aumenta, as perdas reativas também aumentam.

As curvas da figura 4.15 mostram que as perdas reativas no horário de carga pesada são maiores em relação ao horário de carga leve. Como a quantidade de reativos solicitados neste período é elevada, em relação ao horário de carga leve, os níveis de perdas reativas do sistema elétrico também são maiores.

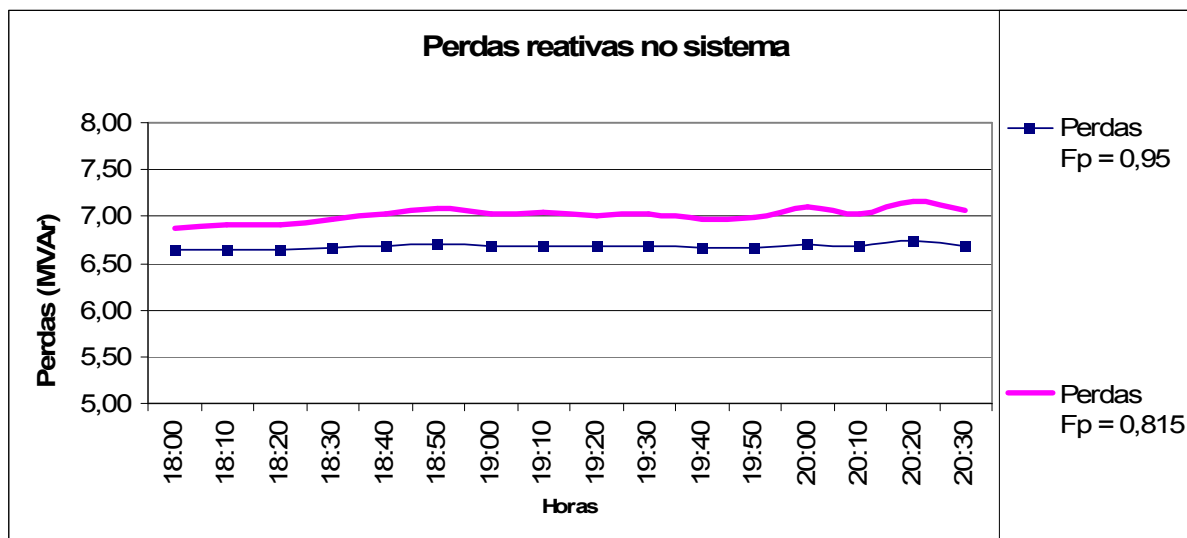


Figura 4.15 – Perdas do sistema – Carga Pesada - 1º Semestre

Comparado com o caso base citado nas tabelas 4.1 e 4.2, as perdas reativas são maiores devido ao aumento de reativos solicitados do sistema elétrico.

A figura 4.16 mostra o comportamento das perdas do sistema elétrico para o horário de carga leve em função da potência gerada pelo parque eólico-elétrico. Para cada valor da velocidade dos ventos, existe uma perda correspondente.

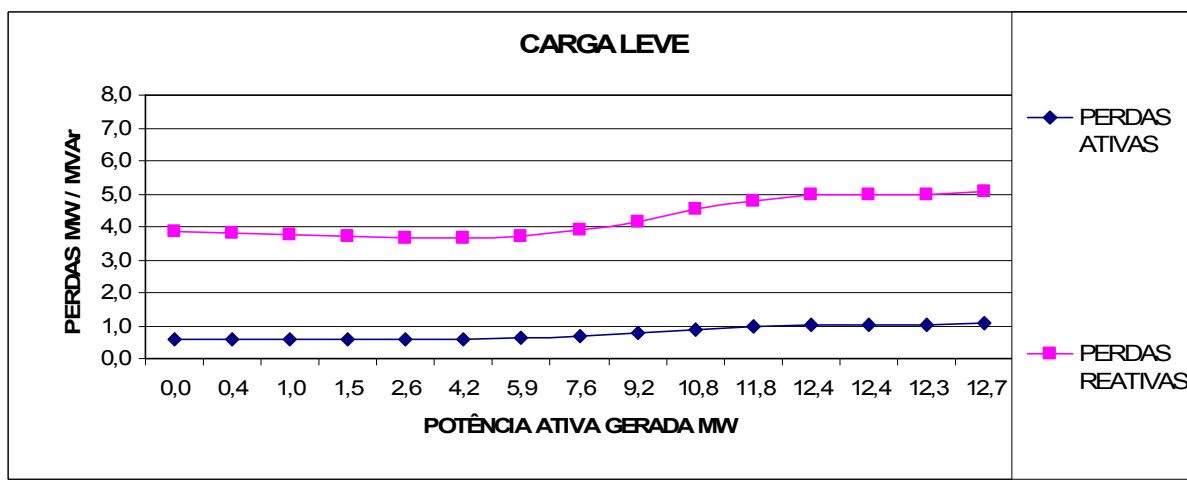


Figura 4.16 – Curva de perdas do sistema – Carga Leve

Para baixas potências geradas, as perdas tendem a diminuir. Entretanto, com altos valores das potências geradas, as perdas tendem a aumentar em relação ao caso

base. As potências geradas, tanto no horário de carga leve, quanto no horário de carga pesada, são elevadas, conforme figuras 3.1 e 3.2. Os resultados das figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 confirmam elevados níveis de perdas no sistema elétrico.

A figura 4.17 mostra o comportamento das perdas do sistema elétrico para o horário de carga pesada. O mesmo comportamento no valor das perdas no sistema elétrico para o horário de carga leve é observado para o horário de carga pesada.

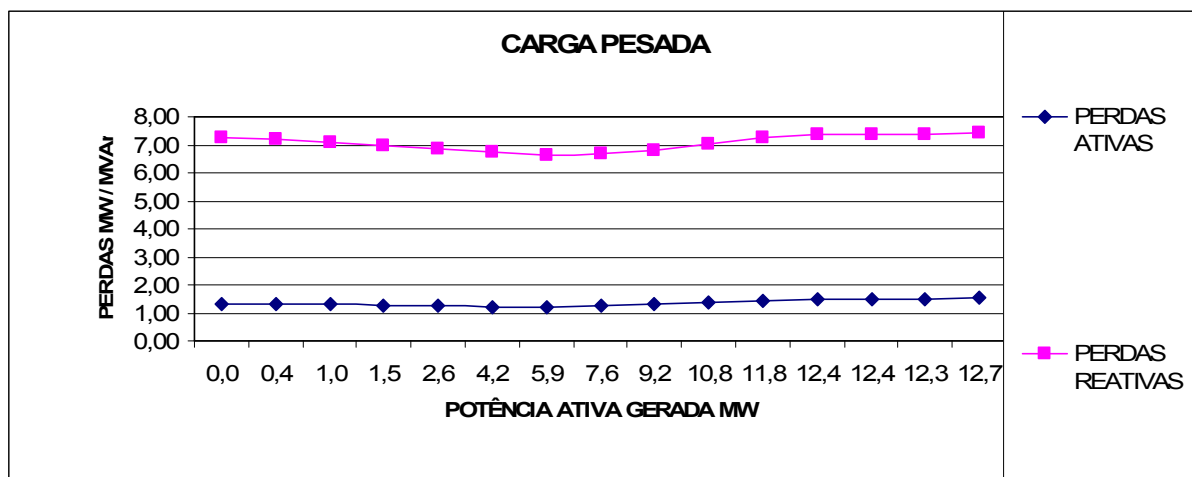


Figura 4.17 – Curva de perdas do sistema – Carga Pesada

#### 4.4.2.2 RESULTADOS DO SEGUNDO SEMESTRE

O segundo semestre é o período do ano em que as velocidades dos ventos são maiores em relação ao primeiro semestre, como mostram as figuras 3.1 e 3.2, podendo chegar a ter uma diferença de mais de 2,0 m/s em relação ao primeiro semestre. Logo, as potências ativas e reativas são maiores, caracterizando uma situação diferente o primeiro semestre.

##### 4.4.2.2.1 POTÊNCIAS GERADAS

As potências geradas no parque eólico-elétrico são maiores, como mostra a figura 4.18. Comparando-a com a figura 4.6, o nível de potência ativa é elevado em relação ao primeiro semestre, ocorrendo o mesmo com as potências reativas.

O fator de potência 0,824 indutivo é o menor valor para que a magnitude das tensões não sejam inferiores a 0,95 p.u. Este fator de potência é maior, comparado com o fator de potência no horário de carga leve do primeiro semestre.



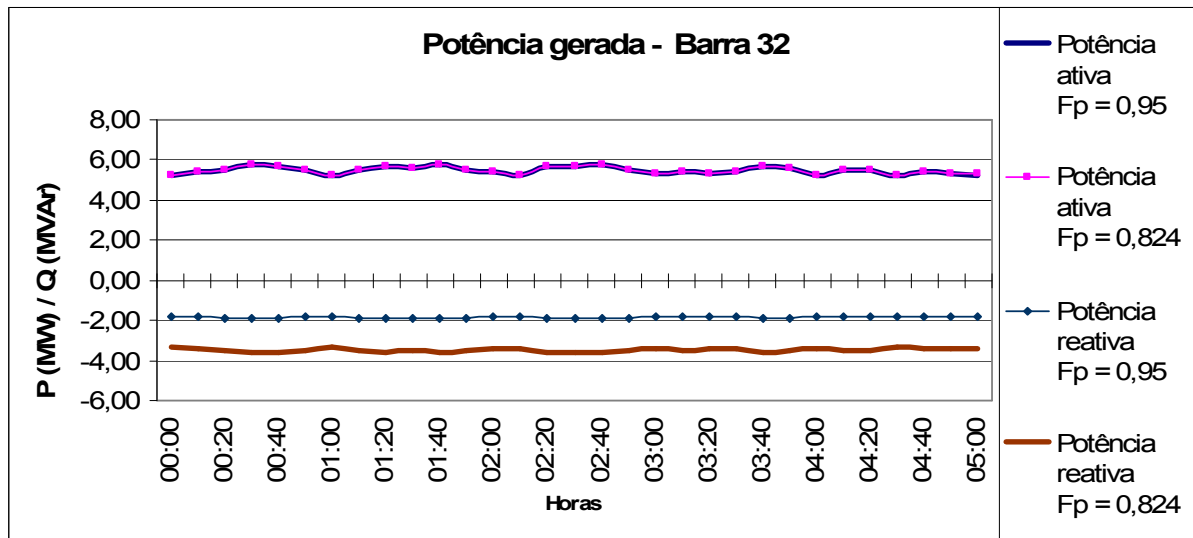


Figura 4.18 – Potências geradas na barra 32 – Carga Leve - 2° Semestre

Analogamente, as observações feitas as curvas da figura 4.18, são também mostradas na figura 4.19, tanto para a potência ativa gerada, como para a potência reativa gerada na barra N° 36.

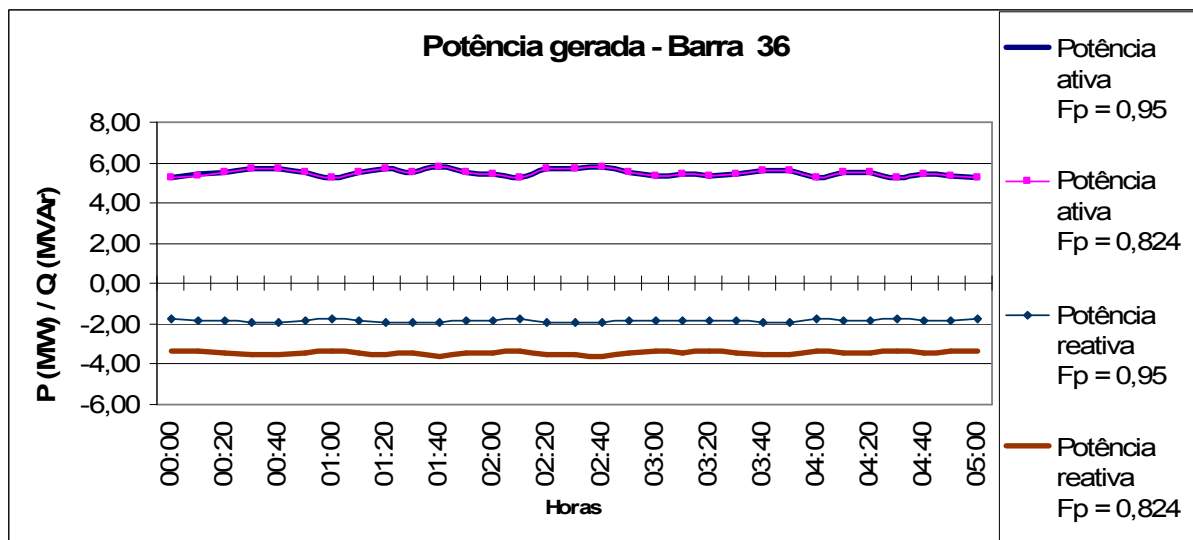


Figura 4.19 – Potências geradas na barra 36 – Carga Leve - 2° Semestre

Em comparação com o primeiro semestre, conforme figura 4.4, a potência ativa gerada ficou próxima de 4,0 MW nas barras N° 32 e N° 36, enquanto no segundo semestre a potência ativa ficou acima de 5,0 MW, devido às velocidades dos ventos serem maiores para o segundo semestre.

As potências reativas geradas são maiores no segundo semestre e mostram o mesmo comportamento do primeiro semestre, onde, quanto menor o fator de potência, mais reativos são solicitados do sistema elétrico.

No horário de carga pesada, mostrado na figura 4.20, foram obtidas as mesmas conclusões em relação ao primeiro semestre, observadas na figura 4.6.

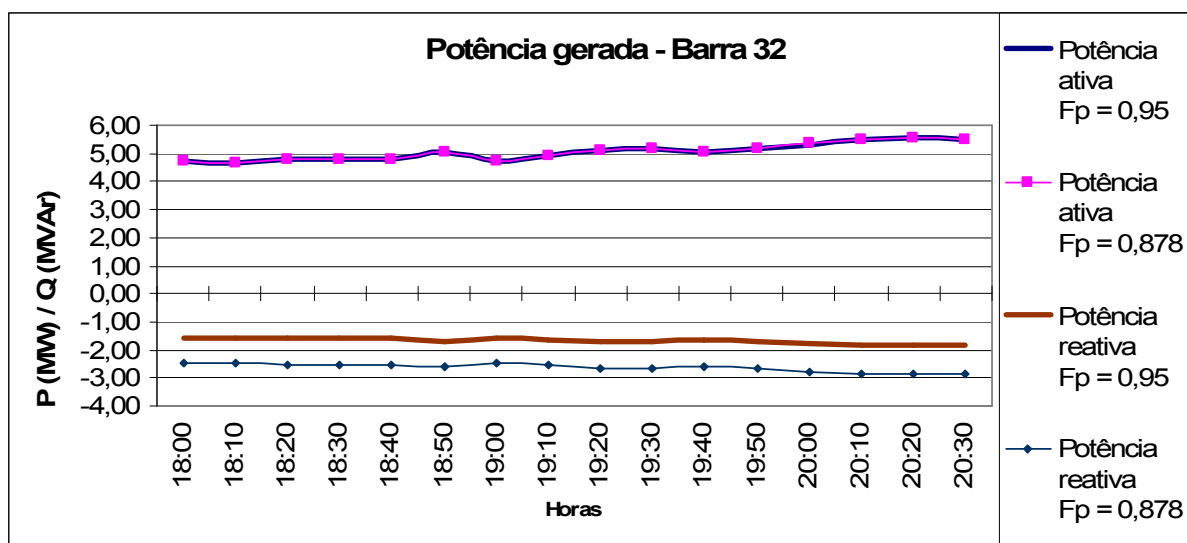


Figura 4.20 – Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada - 2º Semestre

As potências ativas geradas variaram com o valor do fator de potência. Foram verificados maiores valores nas potências ativas a reativas, como também as potências reativas importadas do sistema elétrico são maiores para baixos fatores de potência.

Analogamente, as observações feitas para as curvas da figura 4.20 são aplicadas às curvas da figura 4.21, como: a influência do fator de potência nos reativos importados, potências mais elevadas para o segundo semestre e as potências ativas sem a influência do fator de potência.

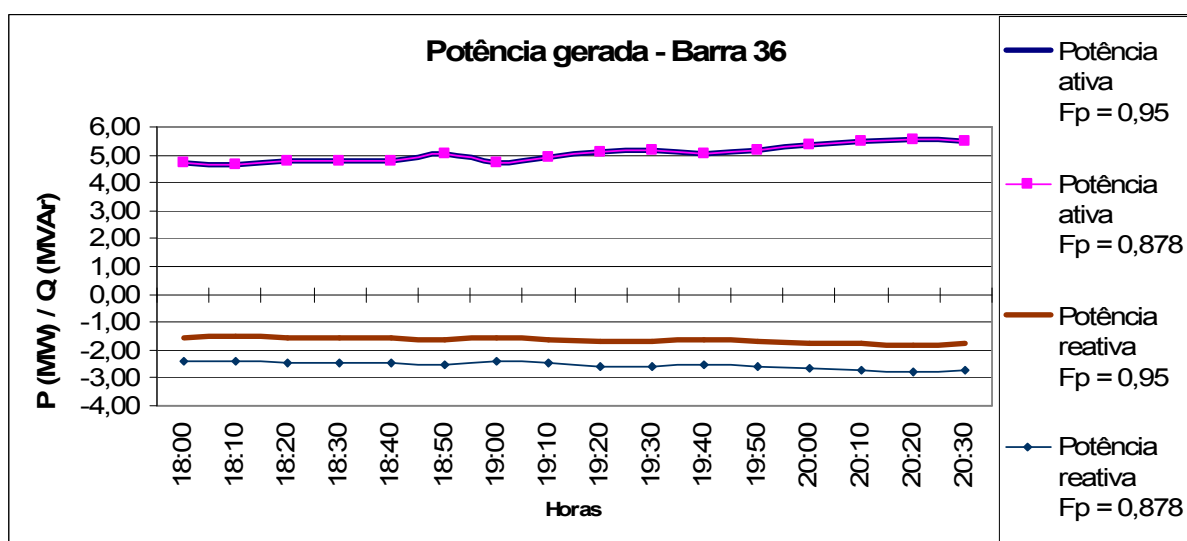


Figura 4.21 – Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada - 2º Semestre

#### 4.4.2.2.2 MAGNITUDE DAS TENSÕES

A figura 4.22 mostra o comportamento da tensão na barra N° 32. O fator de potência 0,824 indutivo é o valor limite para que as tensões do sistema elétrico não sejam inferiores a 0,95 p.u. Para o fator de potência 0,95 indutivo, a curva de tensão mostra pouca variação em relação à curva com o fator de potência menor.

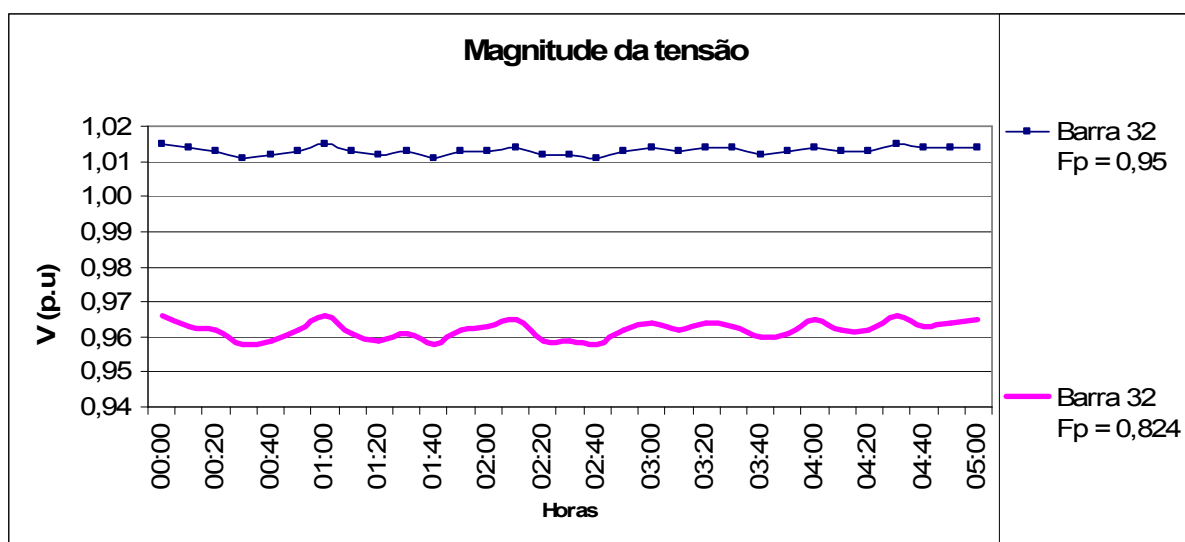


Figura 4.22 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve - 2° Semestre

A mesma situação ocorre no primeiro semestre, tanto para o horário de carga leve, quanto para o horário de carga pesada.

O mesmo é observado nas curvas da figuras 4.23 em relação ao comportamento das curvas da figura 4.22.

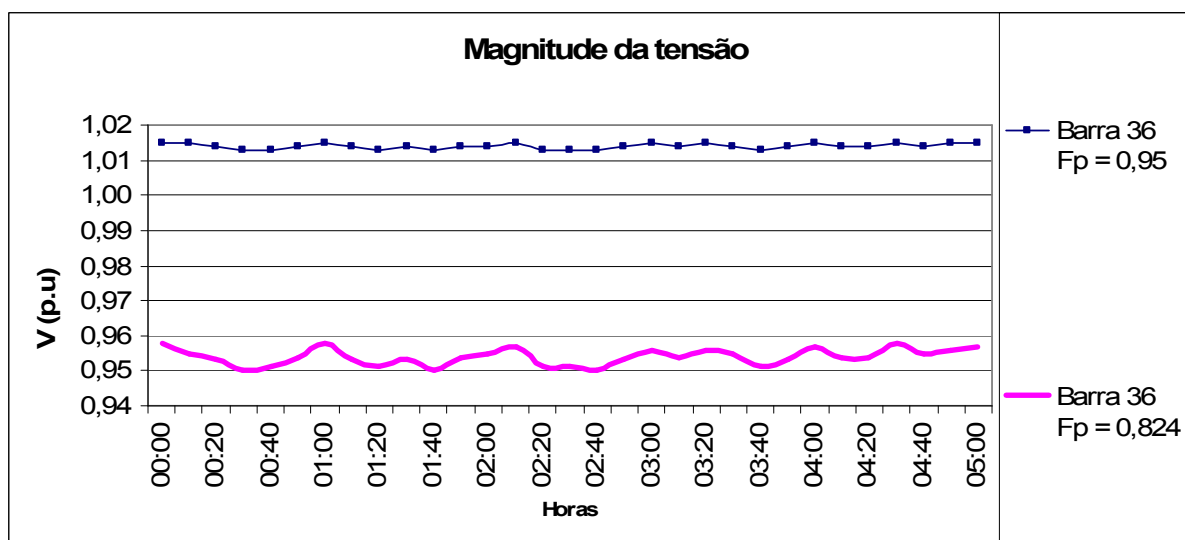


Figura 4.23 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 2° Semestre

As curvas da figura 4.24 apresentam conclusões semelhantes para o mesmo período no primeiro semestre. O valor do fator de potência 0,878 indutivo é o valor limite para que as tensões do sistema elétrico não sejam inferiores a 0,95 p.u. Este fator de potência é maior em relação ao valor obtido no primeiro semestre, que foi 0,815 indutivo.

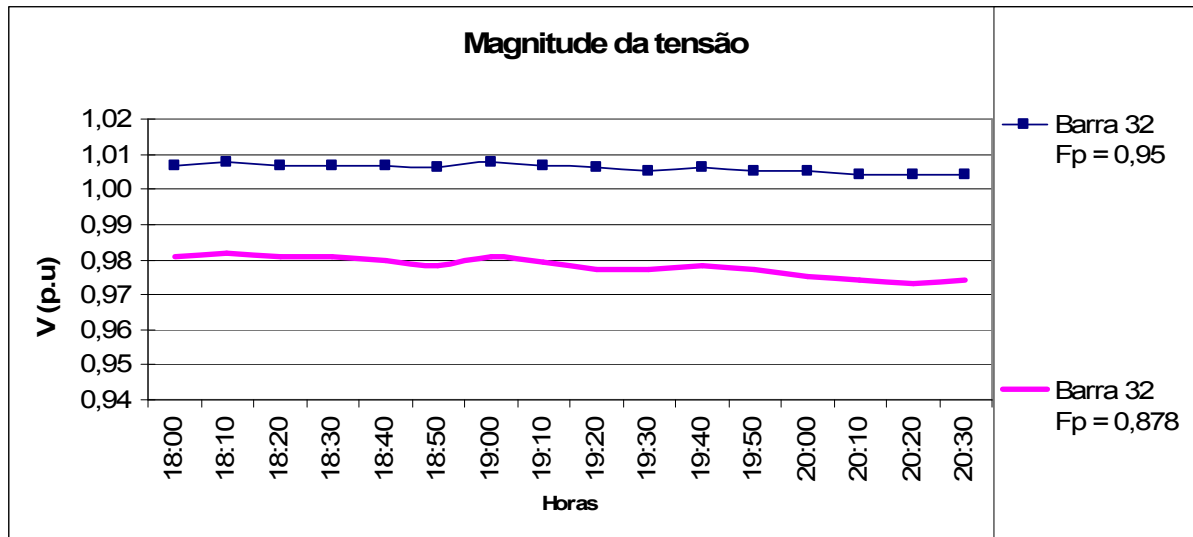


Figura 4.24 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada - 2° Semestre

As tensões tendem a diminuir no período de carga pesada. Logo, o fator de potência deve ser maior para garantir que as tensões estejam acima de 0,95 p.u.

Caso semelhante ocorre com as curvas de tensão do barramento N° 36 da figura 4.25, em relação às curvas da figura 4.24.

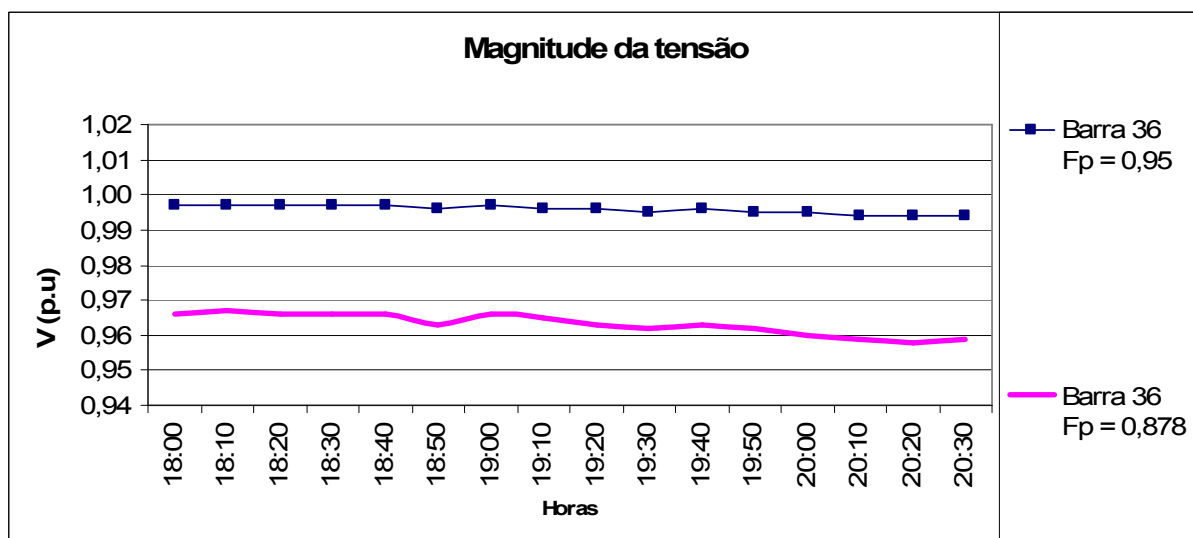


Figura 4.25 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 2° Semestre

#### 4.4.2.2.3 PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO

A figura 4.26 mostra as curvas de perdas ativas do sistema elétrico para o segundo semestre no horário de carga leve. Como os ventos são maiores, as potências geradas são elevadas. Assim, as perdas ativas são maiores em relação ao horário de carga leve no primeiro semestre.

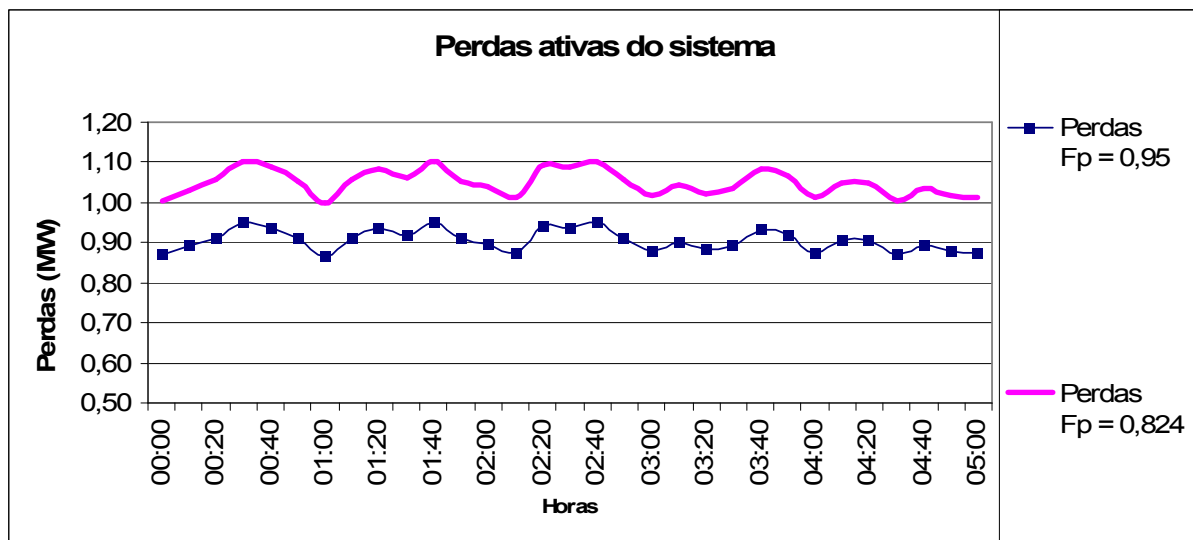


Figura 4.26 – Perdas ativas do sistema – Carga Leve - 2º Semestre

Analogamente, as curvas da figura 4.27 têm o mesmo comportamento das curvas da figura 4.26. Na qual as perdas são maiores para o horário de carga pesada em relação ao horário de carga leve. Semelhante ao primeiro semestre.

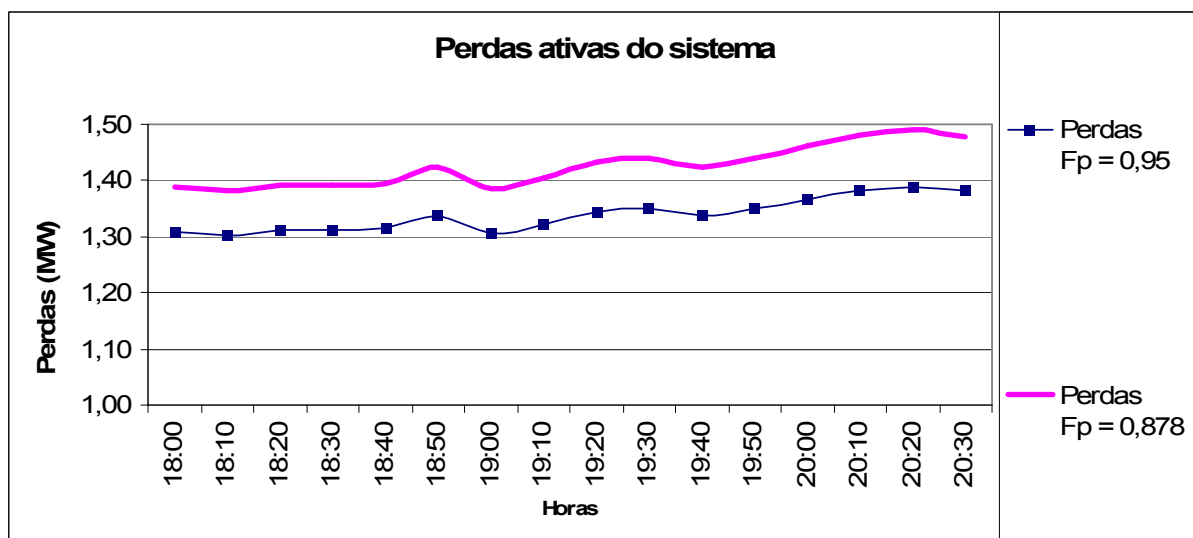


Figura 4.27 – Perdas ativas do sistema – Carga Pesada - 2º Semestre

A figura 4.28 mostra as curvas das perdas reativas do sistema elétrico para segundo semestre, no horário de carga leve.

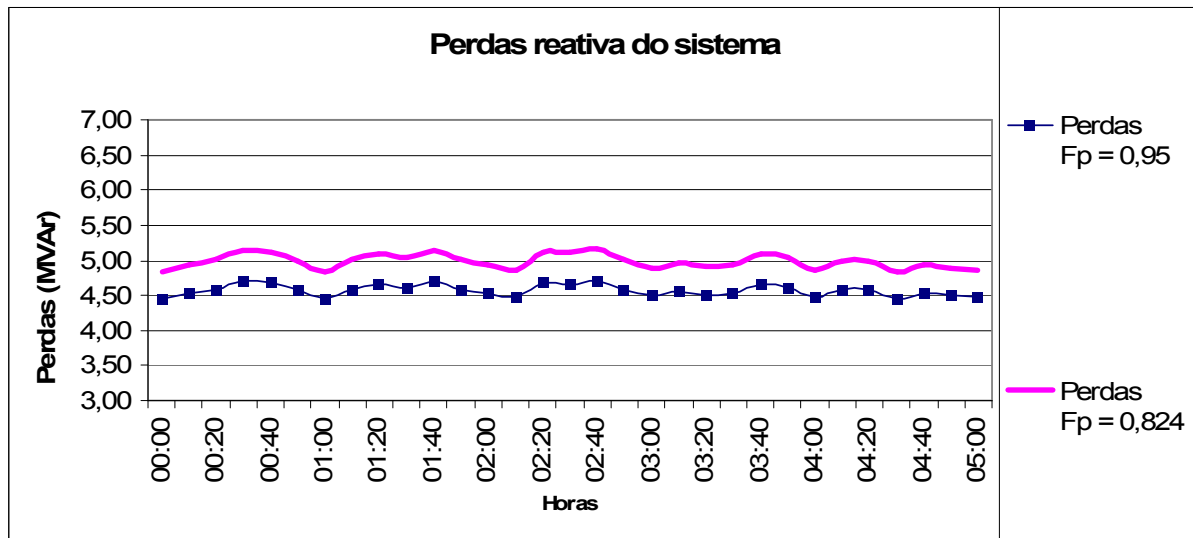


Figura 4.28 – Perdas reativas do sistema – Carga Leve - 2° Semestre

As curvas mostram que o fator de potência influencia nas perdas reativas. No horário de carga pesada, as perdas são maiores em relação ao horário de carga leve, e o segundo semestre é caracterizado por haver perdas reativas maiores em relação ao primeiro semestre.

As conclusões obtidas nas curvas das figuras 4.28 são aplicadas as curvas da figura 4.29.

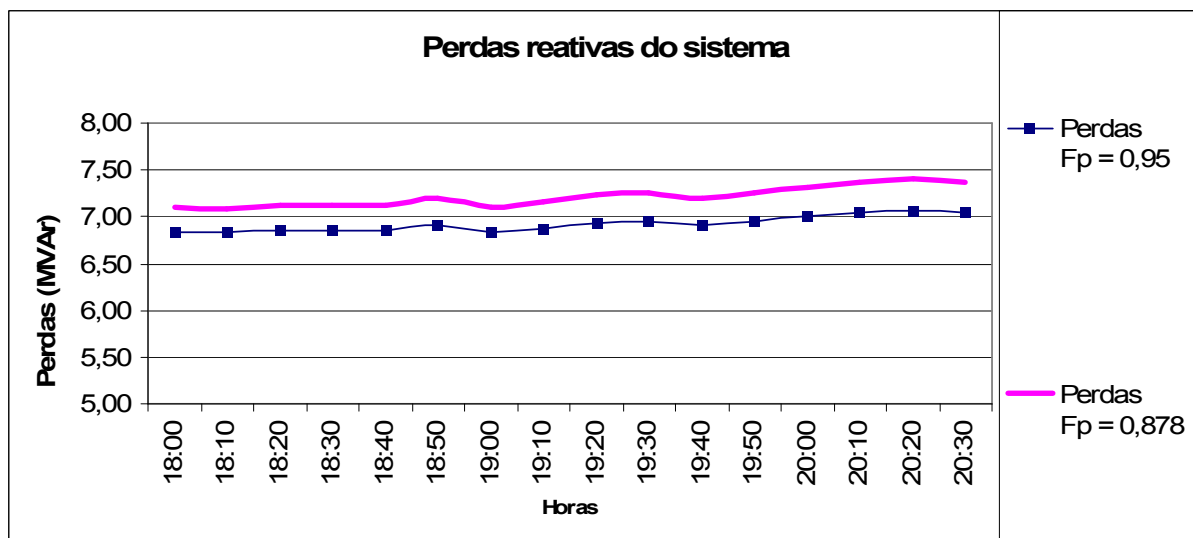


Figura 4.29 – Perdas reativas do sistema – Carga Pesada - 2° Semestre

#### 4.5 MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O equacionamento do modelo PQs da máquina de indução tipo gaiola de esquilo é mais completo devido à influência do escorregamento em relação ao modelo PQ.

O escorregamento da máquina de indução modifica os parâmetros que no modelo anterior eram considerados constantes, por exemplo, a resistência do rotor da máquina de indução.

Agora, a impedância  $z$  da máquina de indução varia com o escorregamento, modificando o valor das potências ativas e reativas. Para os estudos com este modelo, a geração eólico-elétrica está localizada nas barras N° 32 e N° 36, como no modelo anterior.

#### 4.5.1 CASO BASE

O caso base é semelhante ao modelo anterior. O fluxo de carga é calculado no sistema elétrico real, no qual as barras N° 32 e N° 36 são barras do tipo PQ sem geração eólico-elétrica.

##### 4.5.1.1 CARGA LEVE

Os resultados no fluxo de carga no caso base no horário de carga leve são apresentados na tabela 4.3.

Resultados Obtidos	Simbologia	Valores	Unidade
Potência Aparente na barra N° 01	$S = P + jQ$	59,20 + j13,77	MVA
Tensão na Barra N° 32	V	1,034<-2,855°	p.u
Tensão na Barra N° 36	V	1,028<-3,019°	p.u
Perdas no Sistema	$S = P + jQ$	0,599 +j3,841	MVA

Tabela 4.3 – Resultados do caso base – Carga leve – modelo PQs

##### 4.5.1.2 CARGA PESADA

No caso de carga pesada, analogamente ao caso de carga leve, são obtidos os seguintes resultados do fluxo de carga na tabela 4.4:

Resultados Obtidos	Simbologia	Valores	Unidade
Potência Aparente na barra N°01	$S = P + jQ$	78,72 + j23,48	MVA
Tensão na Barra N° 32	V	1,018<-5,055°	p.u
Tensão na Barra N° 36	V	1,010<-5,759°	p.u
Perdas no Sistema de 40 barras	$S = P + jQ$	1,329 +j7,251	MVA

Tabela 4.4 – Resultados do caso base – carga pesada – modelo PQs

#### 4.5.2 RESULTADOS DO MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O equacionamento do modelo PQs da máquina de indução, deduzido no capítulo III mostra que, para cada valor de potência ativa, existe um banco de capacitores que mantém o fator de potência constante em um valor estabelecido. Logo, é obtida uma curva característica para diversos fatores de potência, mostrando a quantidade de reativos absorvidos no parque eólico-elétrico de 6,0 MW.



Figura 4.30 – Curva de potência ativa da máquina de indução – Modelo PQs

A figura 4.31 mostra as curvas de potência reativa absorvidas para diversos fatores de potência. É observado que entre as diferentes curvas plotadas, quanto maior o fator de potência, menor é o consumo de reativos absorvidos em função da velocidade dos ventos.

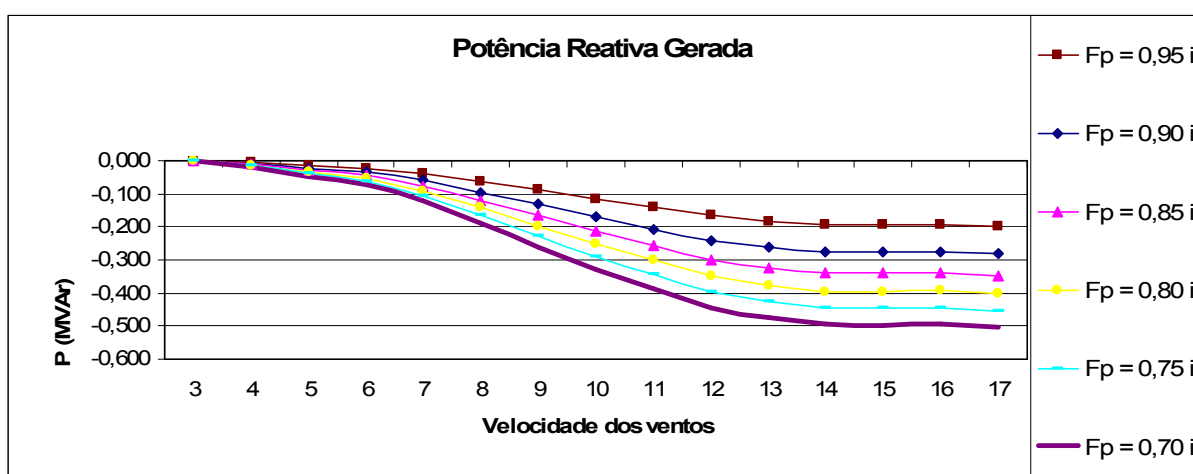


Figura 4.31 – Curva de potência Reativa da máquina de indução - Modelo PQs

Para valores menores que 3,0 m/s, as potências reativas absorvidas são diferentes de zero. À medida que a velocidade aumenta, as curvas de potência reativa do



parque eólico-elétrico tendem a zero para velocidades de ventos próximos a 3m/s. Em seguida, ocorre o aumento da potência reativa.

#### 4.5.2.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO SEMESTRE

São apresentadas as curvas de potência ativa, reativa, tensões nas barras de geração eólico-elétrica, perdas ativas e reativas no sistema elétrico.

##### 4.5.2.1.1 POTÊNCIAS GERADAS

A figura 4.32 mostra as curvas de potências ativas e reativas na barra Nº 32 no horário de carga leve.

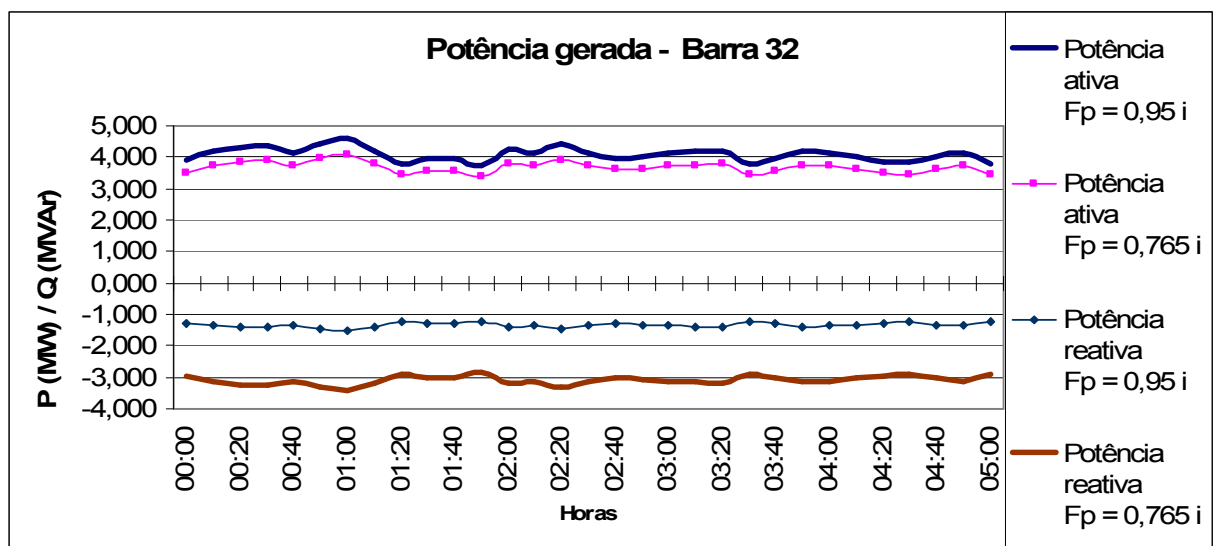


Figura 4.32 – Potências geradas na barra 32 – Carga Leve - 1º Semestre

As potências ativas estão diferentes, devido à variação do valor do fator de potência. Para altos valores do fator de potência, a tensão na barra tende a ser mais elevada, causando assim, potências ativas mais elevadas.

No modelo PQs da máquina de indução o fator de potência mínimo para operação do sistema foi de 0,765 indutivo. Este valor faz com que os valores das tensões não sejam inferiores a 0,95 p.u., mostrando a necessidade de elevar o fator de potência.

Também é observado no modelo PQs que quanto maior o fator de potência, menos reativos do sistema elétrico o parque eólico-elétrico importa do sistema elétrico.

As observações citadas para as curvas da figura 4.32 são aplicadas às curvas mostradas na figura 4.33.

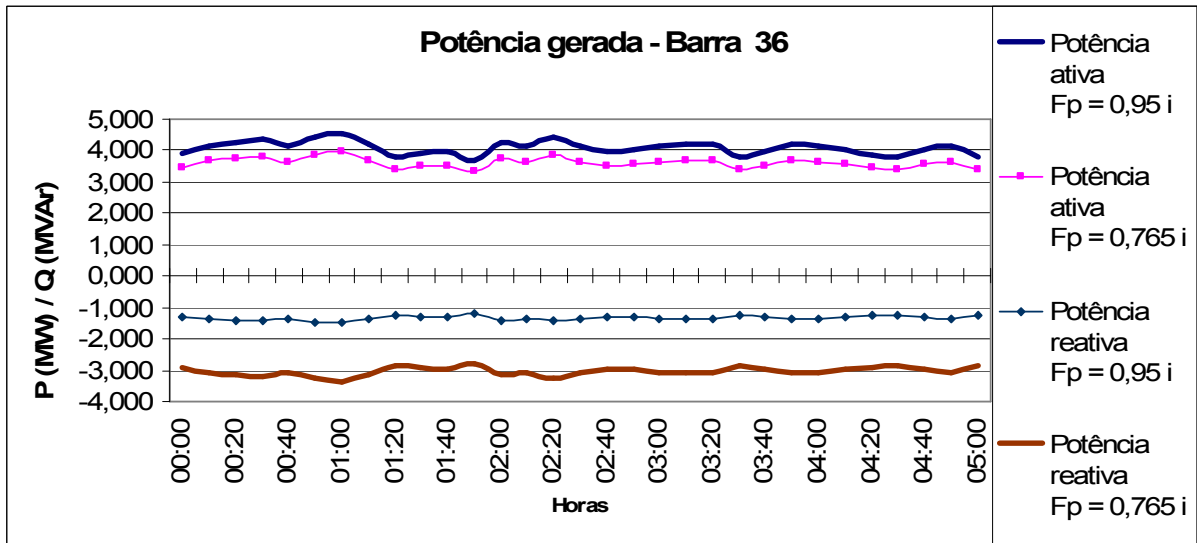


Figura 4.33 – Potências geradas na barra 36 – Carga Leve - 1° Semestre

É observado que as potências ativas e reativas são influenciadas com a variação do fator de potência. No horário de carga pesada, as potências reativas importadas do sistema elétrico são maiores para baixos valores do fator de potência, como é apresentado na figura 4.34.

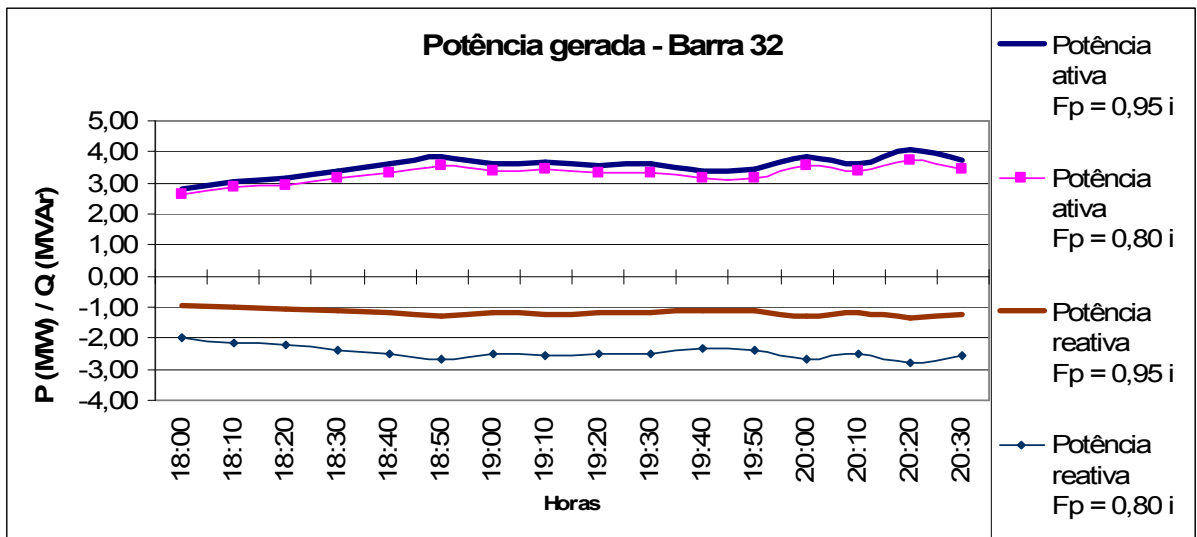


Figura 4.34 – Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada - 1° Semestre

As curvas da figura 4.35 são análogas às curvas da figura 4.34, em que há influência do fator de potência nas potências ativas e reativas mostram valores menores quando o fator de potência está baixo.

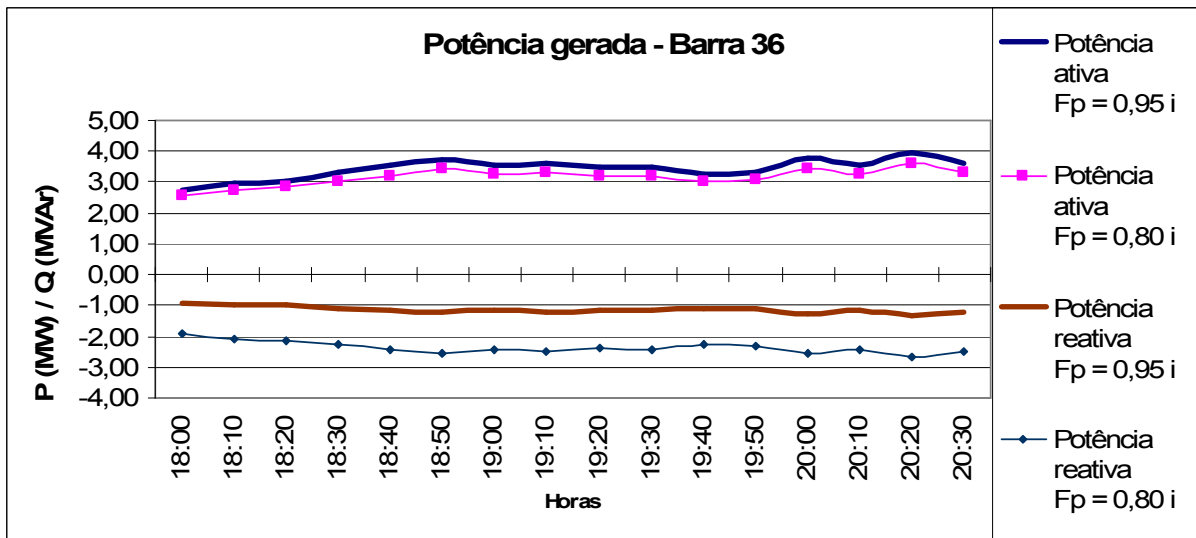


Figura 4.35 – Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada - 1° Semestre

4.5.2.1.2 MAGNITUDE DAS TENSÕES

A figura 4.36 mostra as curvas de tensão para dois valores do fator de potência.

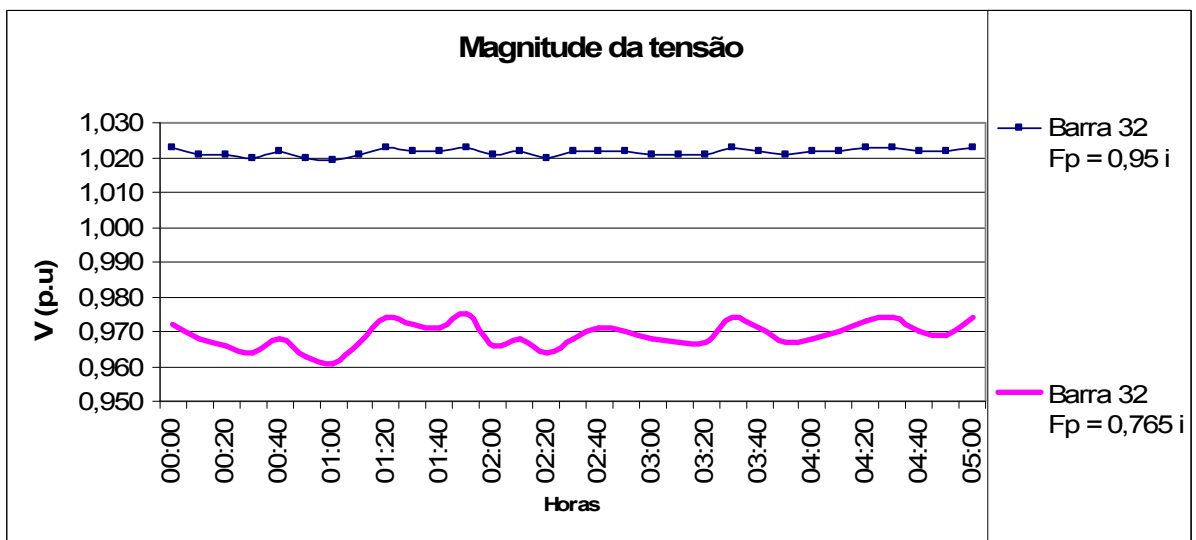


Figura 4.36 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve - 1° Semestre

A curva da tensão com o fator de potência 0,95 indutivo é mais elevada em relação à curva de tensão com o fator de potência 0,80 indutivo, como também a curva não possui grandes variações em torno do seu valor eficaz.

As mesmas observações citadas para as curvas da figura 4.36, são também aplicadas às curvas da figura 4.37.

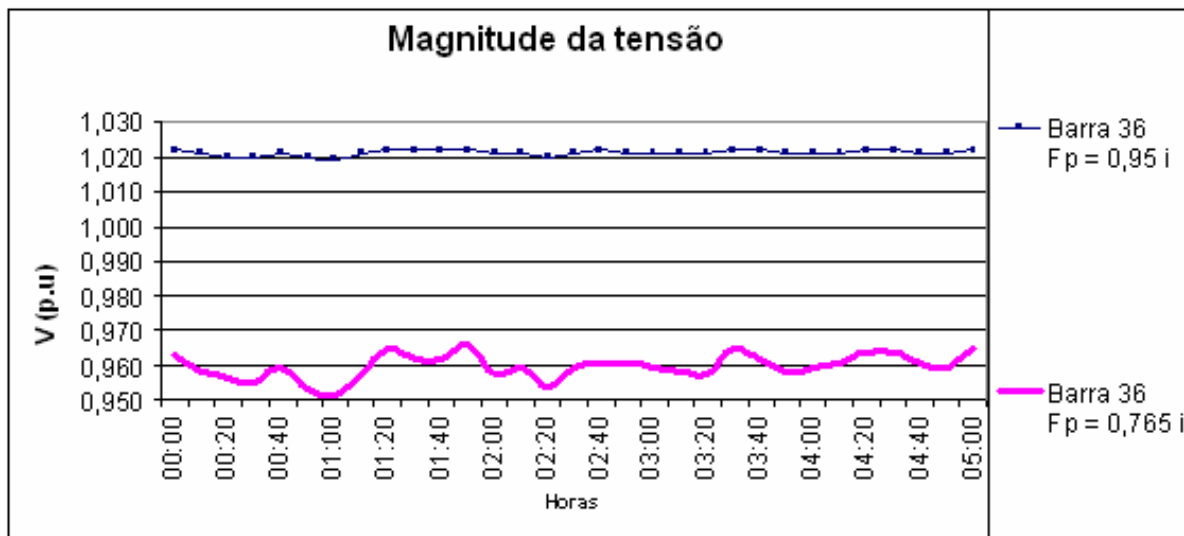


Figura 4.37 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 1° Semestre

A figura 4.38 mostra que no horário de carga pesada, comparado com o horário de carga leve é observado que a magnitude das tensões é menor em relação ao período de carga leve.

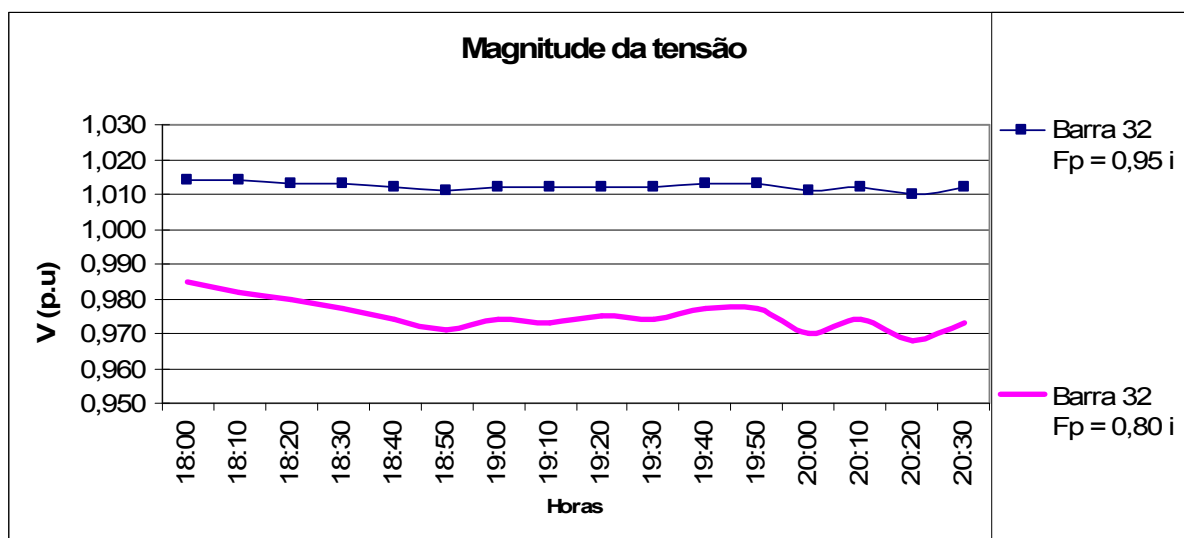


Figura 4.38 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada - 1° Semestre

Ainda comparando-se com o período de carga leve, as curvas de tensão nas barras onde estão localizadas as usinas eólio-elétricas com o fator de potência 0,95 indutivo, possuem poucas variações em relação às curvas com o valor menor do fator de potência.

As mesmas observações citadas para as curvas da figura 4.38, são também aplicadas às curvas da figura 4.39.

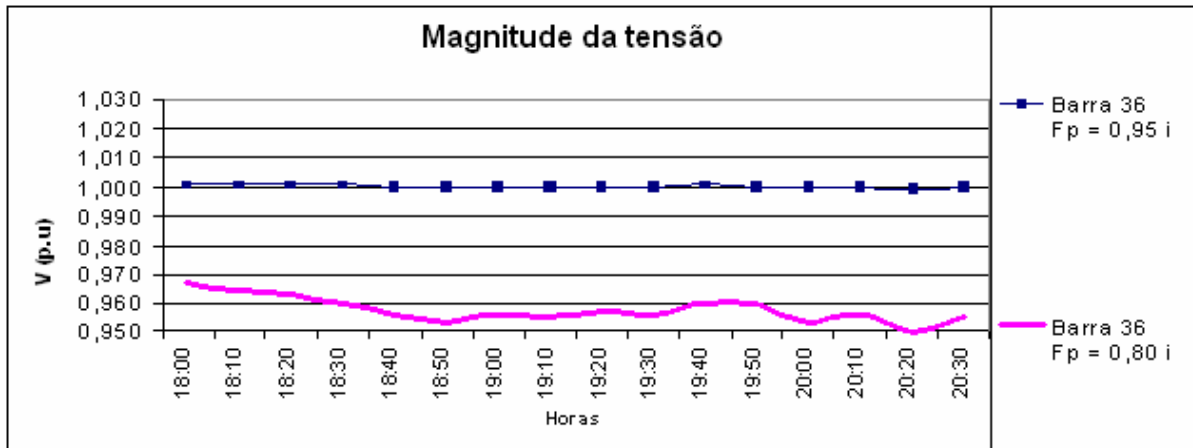


Figura 4.39 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada - 1° Semestre

**4.5.2.1.3 PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO**

As perdas ativas do sistema elétrico no horário de carga leve são apresentadas na figura 4.40. Para a curva com o fator de potência 0,95 indutivo, as perdas ativas são menores em relação à curva com o fator de potência 0,765 indutivo.

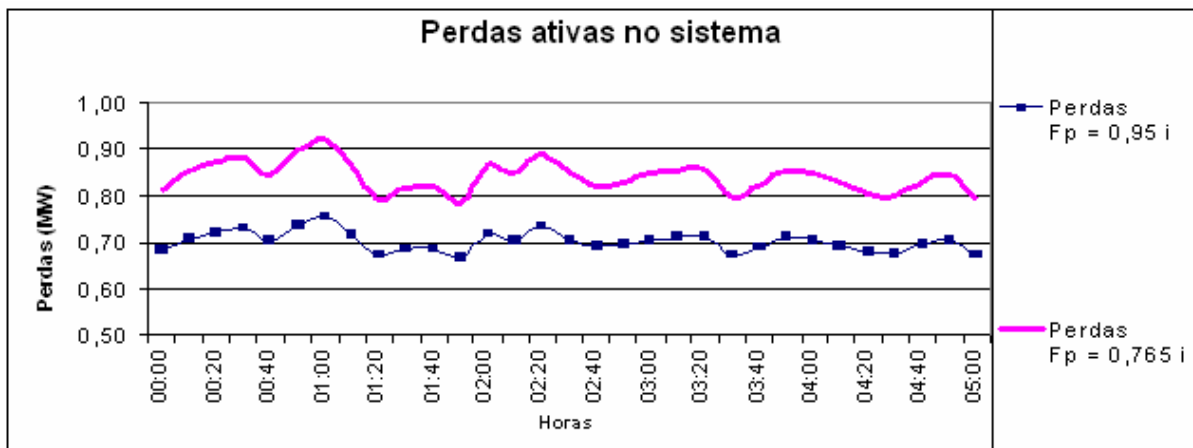


Figura 4.40 – Perdas ativas do sistema – Carga Leve - 1° Semestre

A figura 4.41 apresenta as curvas das perdas ativas no horário de carga pesada.

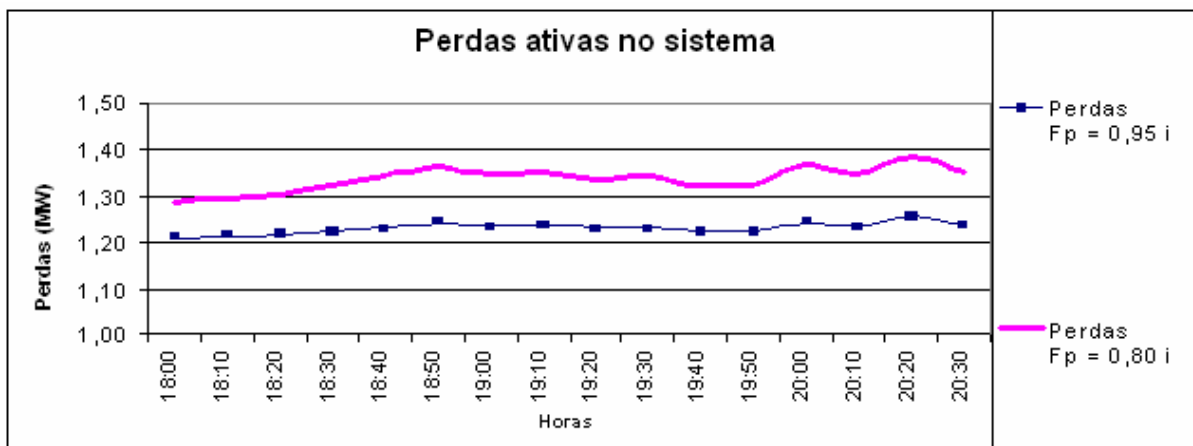


Figura 4.41 – Perdas ativas do sistema – Carga Pesada - 1° Semestre

As perdas no horário de carga pesada são maiores em relação ao horário de carga leve.

A figura 4.42 apresenta as curvas das perdas reativas no horário de carga leve. Estas perdas são maiores para baixos valores do fator de potência, pois há um maior consumo de reativos nas barras onde estão localizados os parques eólico-elétricos.

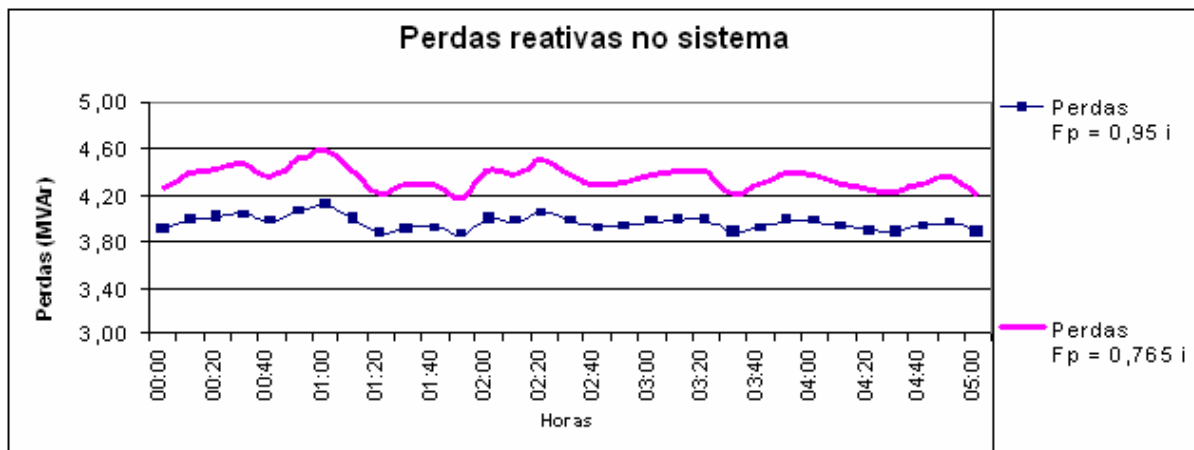


Figura 4.42 – Perdas reativas do sistema – Carga Leve - 1° Semestre

As curvas da figura 4.43, mostram as perdas reativas no horário de carga pesada. É observado que as perdas reativas do sistema elétrico, no horário de carga pesada, são maiores em relação ao horário de carga leve, como também o fator de potência influencia as perdas reativas, em que quanto maior for o fator de potência, menor são as perdas reativas.

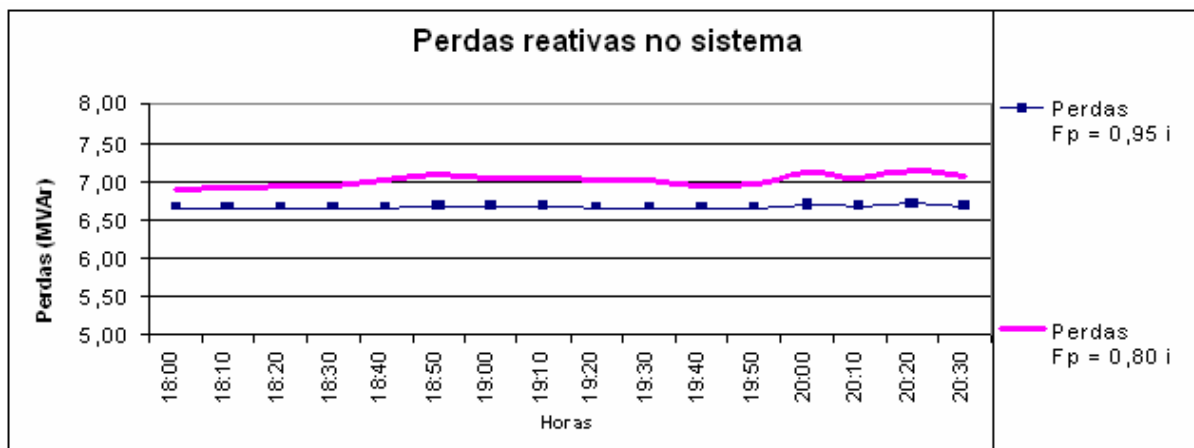


Figura 4.43 – Perdas reativas do sistema – Carga Pesada - 1° Semestre

As curvas da figura 4.44 mostram a variação das perdas ativas e reativas em função da potência gerada pelo parque eólico-elétrico para este sistema elétrico.

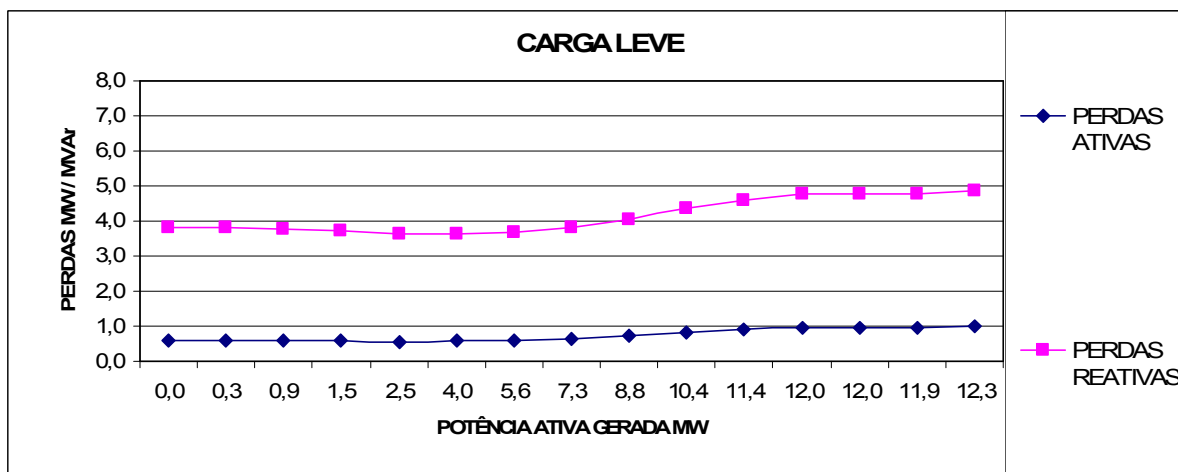


Figura 4.44 – Curva de perdas do sistema – Carga Leve

É observado que para o horário de carga leve, as perdas são elevadas devido às altas potências geradas, em função da velocidade dos ventos, conforme mostram as curvas da figura 3.1 e 3.2.

As mesmas observações citadas para as curvas da figura 4.44 são também aplicadas às curvas da figura 4.45.

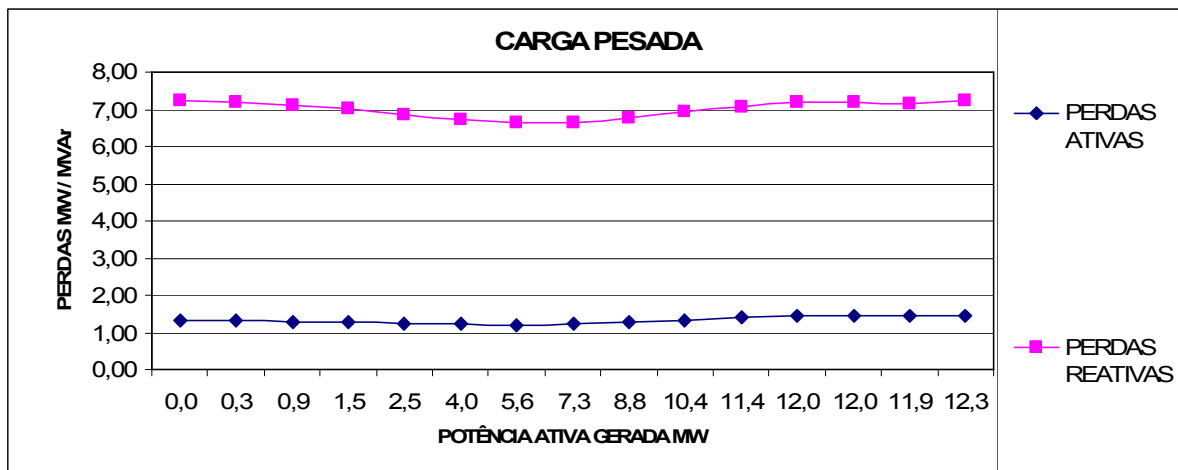


Figura 4.45 – Curva de perdas do sistema – Carga Pesada

#### 4.5.2.2 RESULTADOS DO SEGUNDO SEMESTRE

Neste tópico são mostrados os resultados do fluxo de carga no segundo semestre. Como no primeiro semestre, foi aplicada a mesma metodologia de apresentação dos resultados mostrados: potências geradas, magnitude da tensão na barra de geração eólico-elétrica, as perdas do sistema elétrico e as curvas do escorregamento da máquina de indução.

#### 4.5.2.2.1 POTÊNCIAS GERADAS

A figura 4.46 mostra as curvas de potências ativas e reativas, obtidas do modelo PQs da máquina de indução.

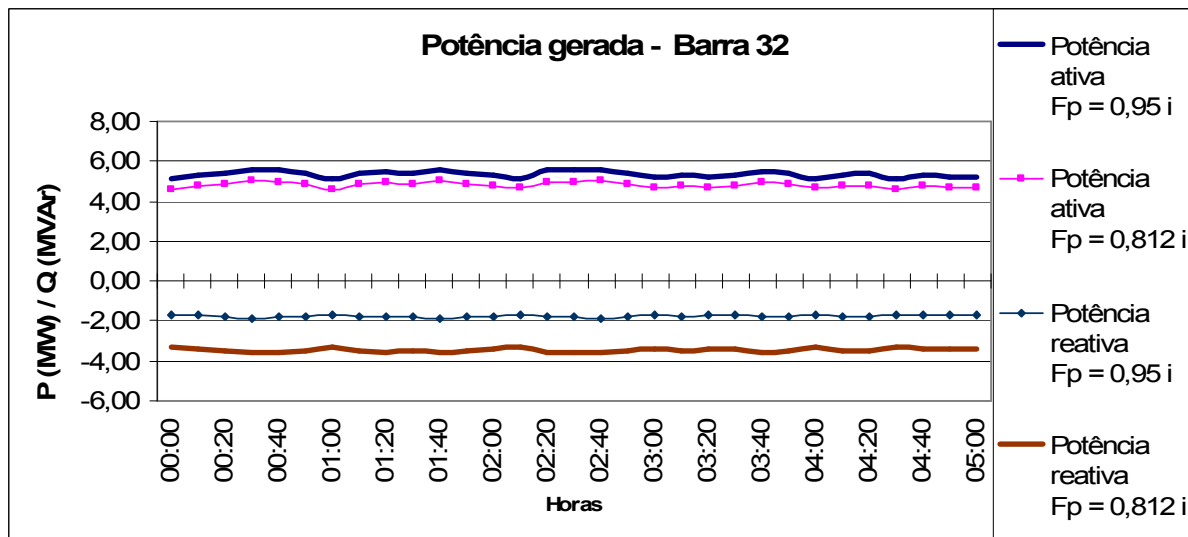


Figura 4.46 – Potências geradas na barra 32 – Carga Leve - 2° Semestre

As potências ativas e reativas geradas no parque eólico-elétrico no horário de carga leve para o segundo semestre são maiores em relação aos resultados obtidos para no mesmo horário no primeiro semestre, como mostra a figura 4.32.

As curvas da figura 4.47 mostram as mesmas conclusões obtidas nas curvas da figura 4.46.

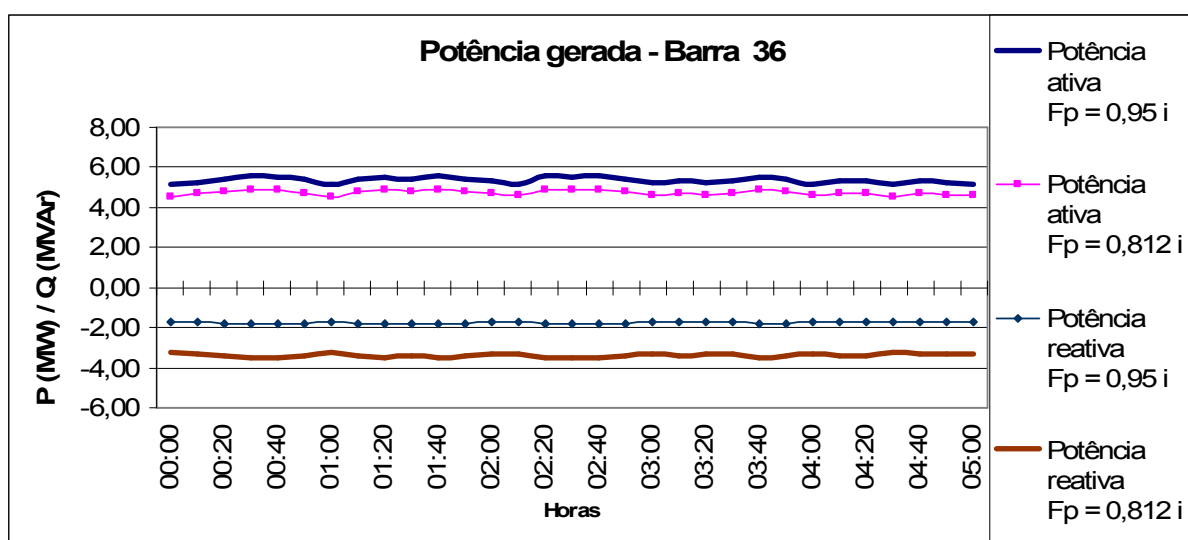


Figura 4.47 – Potências geradas na barra 36 – Carga Leve - 2° Semestre



O fator de potência mínimo para operação do sistema elétrico no segundo semestre no horário de carga leve foi de 0,812 indutivo.

Comparado com o os resultados do primeiro semestre para este mesmo horário, o fator de potência mínimo foi de 0,765 indutivo, como mostra na figura 4.32. Este resultado aponta que foram solicitados mais reativos do sistema elétrico.

A figura 4.48 apresenta as curvas de potências ativas e reativas no segundo semestre no horário de carga pesada. É observado que o fator de potência mínimo para operação do sistema elétrico foi 0,865 indutivo.

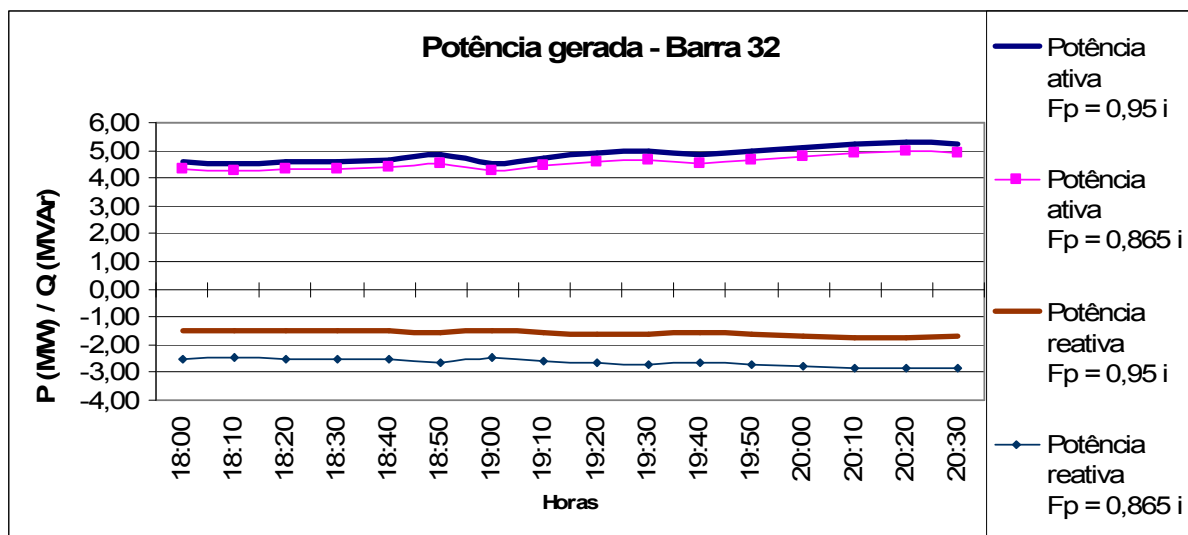


Figura 4.48 – Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada - 2º Semestre

Em comparação com o primeiro semestre para o mesmo horário, o fator de potência mínimo foi de 0,80 indutivo. Assim, é comprovado que no segundo para o horário de carga pesada foram solicitados mais reativos.

São observados os mesmos resultados para as curvas da figura 4.49, como explicado nas curvas da figura 4.48.

No horário de carga pesada, as potências ativas e reativas são maiores em relação ao horário de carga leve, devido às altas velocidades dos ventos.

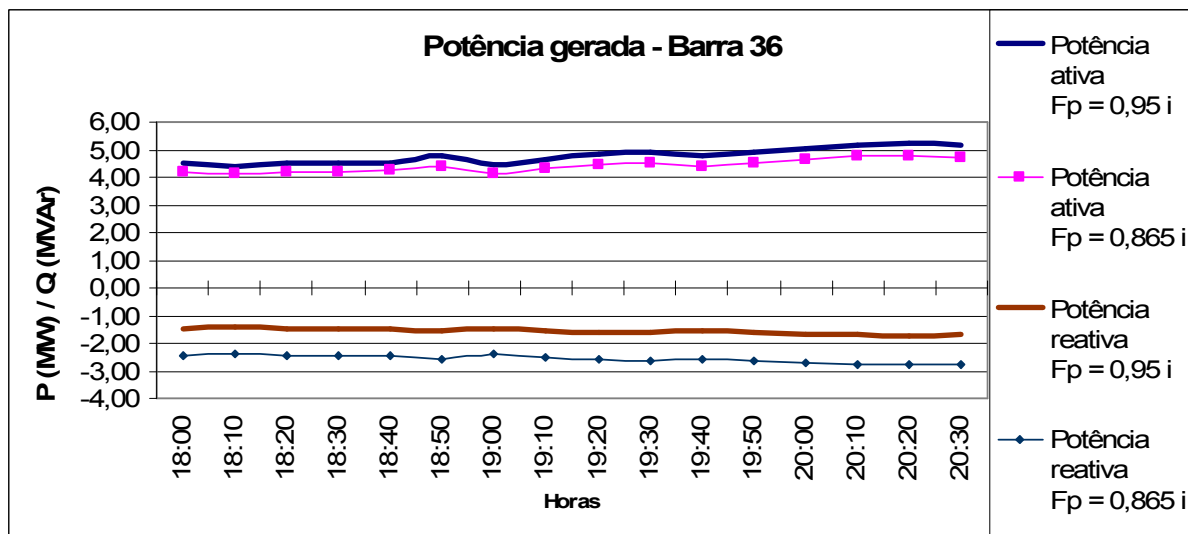


Figura 4.49 – Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada - 2° Semestre

#### 4.5.2.2.2 MAGNITUDE DAS TENSÕES

As curvas de tensões da figura 4.50 mostram que, no horário de carga leve com o fator de potência 0.95 indutivo, as tensões estão menores em relação ao resultado das tensões do primeiro semestre deste mesmo modelo.

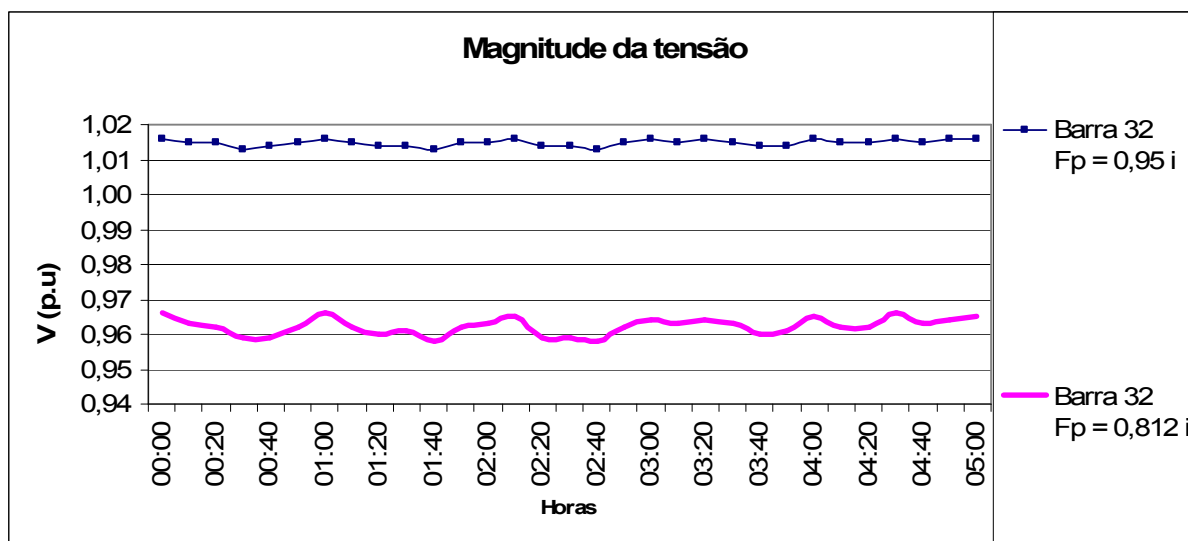


Figura 4.50 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve - 2° Semestre

Analogamente, as curvas mostradas na figura 4.50 têm resultados similares às curvas da figura 4.51.

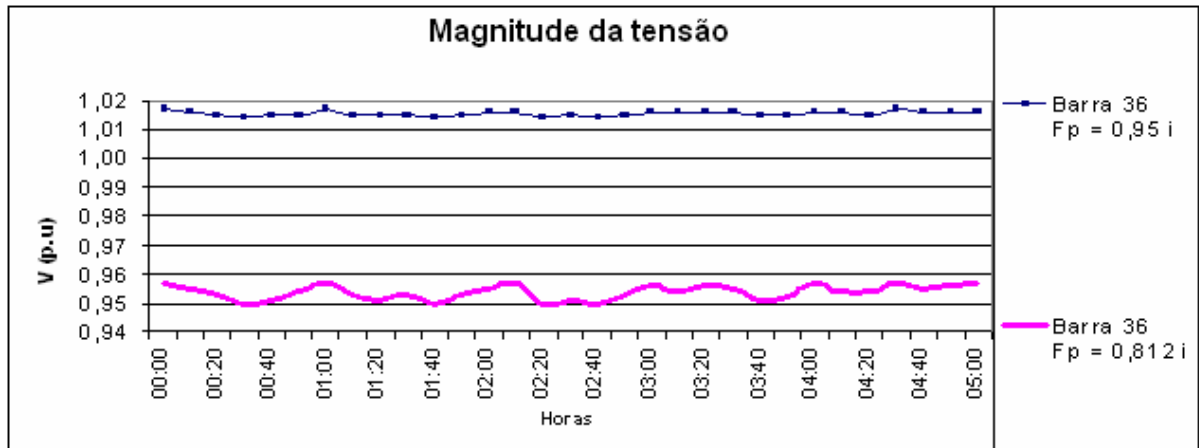


Figura 4.51 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 2° Semestre

As curvas da figura 4.52 apresentam as curvas de tensões no horário de carga pesada.

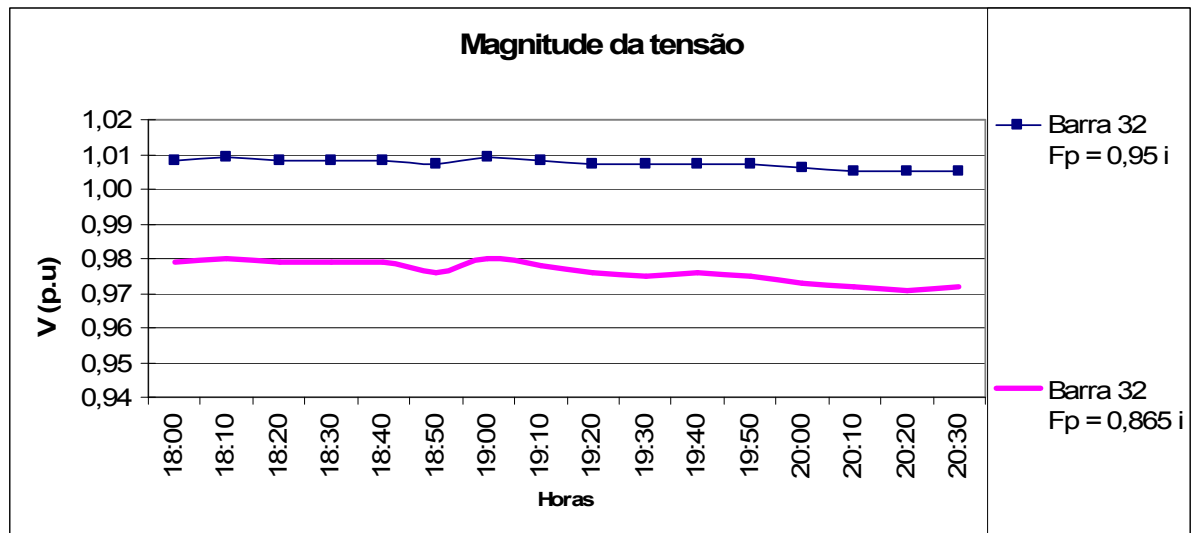


Figura 4.52 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada - 2° Semestre

O resultados mostram que neste horário os valores obtidos são menores em relação ao horário de carga leve. As curvas de tensões com o fator de potência 0,95 indutivo são mais constantes, onde há pouca variação dos valores em torno do valor eficaz, em relação à curva com o fator de potência 0,865 indutivo.

O mesmo ocorre com as curvas da figura 4.53, onde os resultados obtidos nestas curvas são semelhantes aos resultados mostrados na figura 4.52.

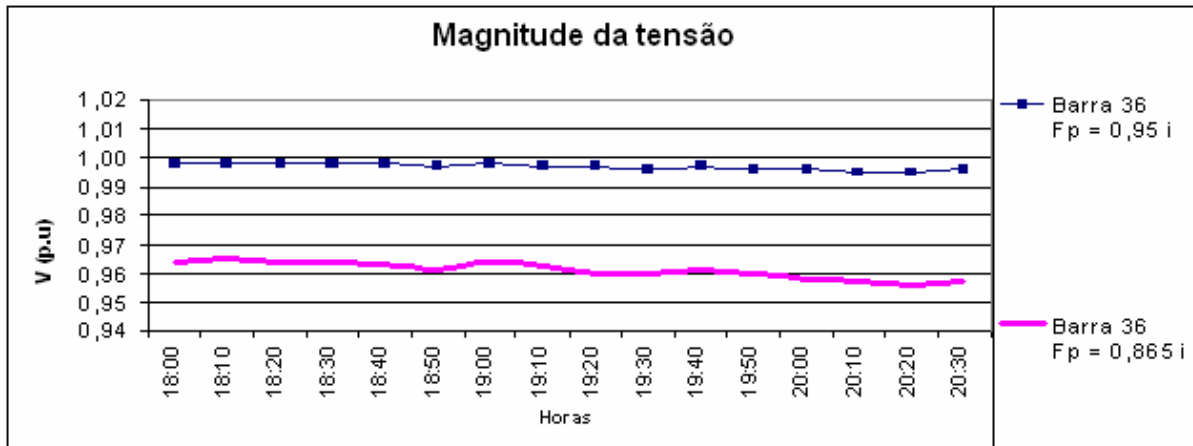


Figura 4.53 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada - 2° Semestre

### 4.5.2.2.3 PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO

As curvas de perdas ativas mostradas na figura 4.54 são análogas às perdas ativas no primeiro semestre.

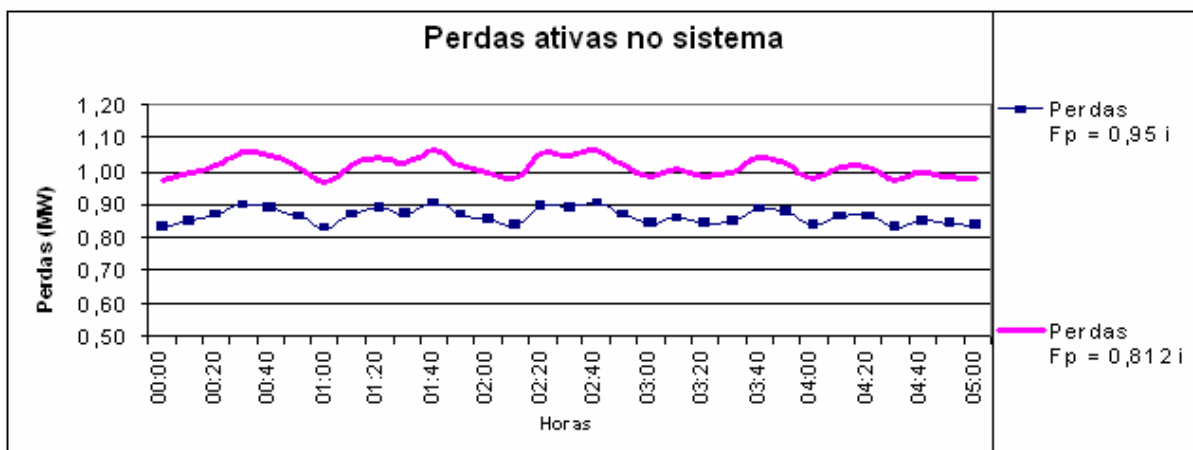


Figura 4.54 – Perdas ativas do sistema – Carga Leve - 2° Semestre

O mesmo ocorre com as curvas da figura 4.55.

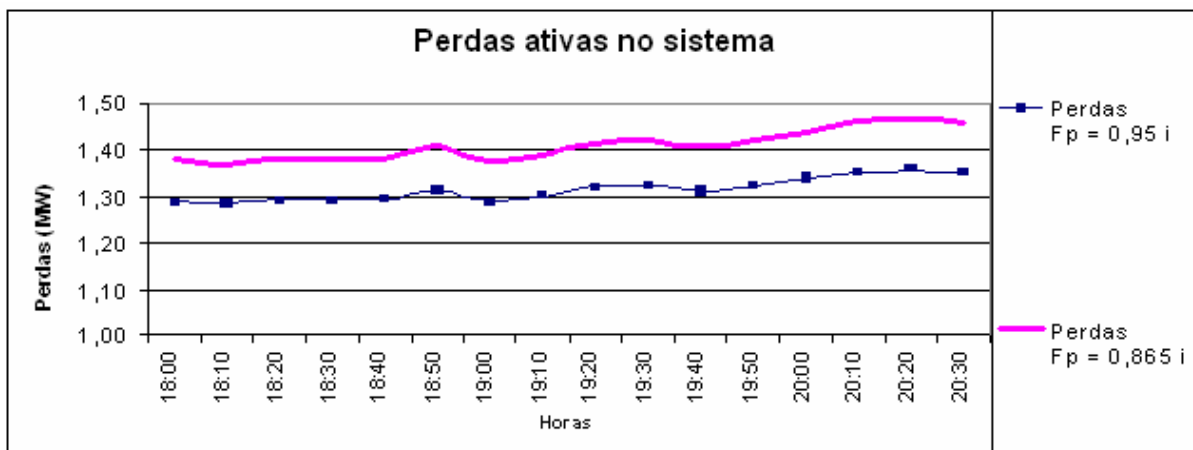


Figura 4.55 – Perdas ativas do sistema – Carga Pesada - 2° Semestre

Os resultados obtidos nas curvas de perdas reativas, conforme figura 4.56, são similares aos resultados obtidos nas curvas da figura 4.54.

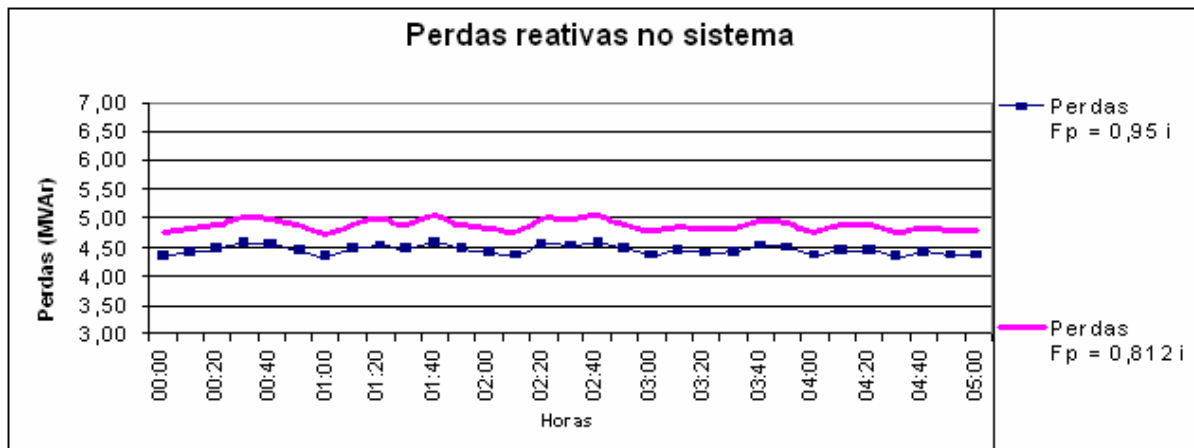


Figura 4.56 – Perdas reativas do sistema – Carga Leve - 2º Semestre

Também é observado que o fator de potência influencia nos resultados das perdas reativas, como também as perdas ativas, e os resultados do primeiro semestre.

O mesmo é observado na figura 4.57, onde as perdas reativas são maiores para o segundo semestre em relação ao primeiro semestre.

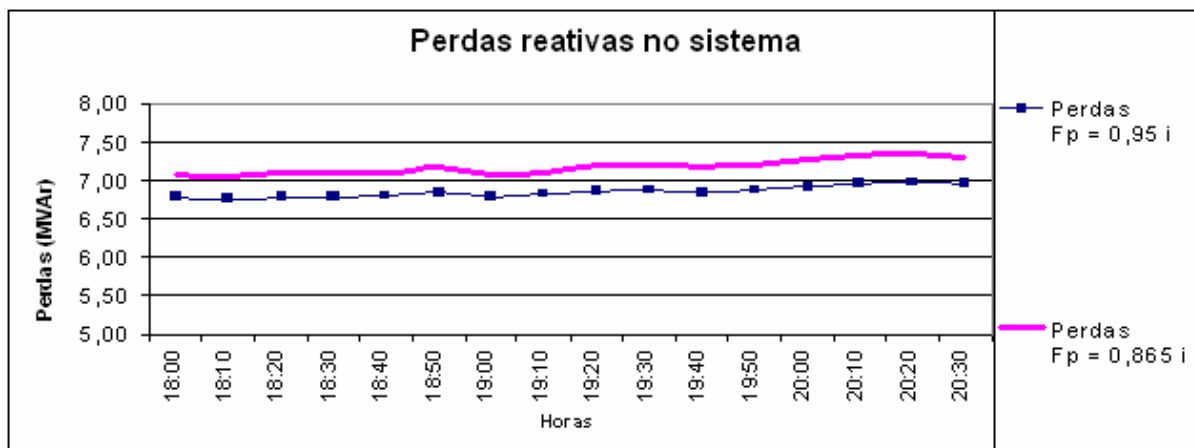


Figura 4.57 – Perdas reativas do sistema – Carga Pesada - 2º Semestre

#### 4.6 COMPARATIVO DOS MODELOS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Os modelos da máquina de indução foram apresentados isoladamente, isto é, sem que houvesse comparações entre os resultados, e, mesmo que fossem realizadas as comparações entre os modelos, as conclusões seriam apresentadas erroneamente.

Pois, para ambos os modelos, existe a correção do fator de potência, e qualquer resultado que os modelos apresentem são modificados pelo controle de correção do fator de potência.

Para que a comparação entre os modelos da máquina de indução seja realizada de forma correta, é considerado um valor fixo do banco de capacitores para ambos os modelos, durante os horários de carga leve e de carga pesada, tanto no primeiro, como no segundo semestre.

Assim, com este parâmetro fixo, é possível mostrar a diferença entre os resultados apresentados. Para efeito de comparação, foi considerado o valor de um banco de capacitores fixo de 1,0 MVAR, para cada barra onde está localizada a geração eólio-elétrica.

#### **4.6.1 PRIMEIRO SEMESTRE – CARGA LEVE**

A tabela 4.5 mostra os resultados do fluxo de carga, utilizando o modelo PQ da máquina de indução no primeiro semestre, no horário de carga leve, considerando o valor fixo do banco de capacitores.

MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO PRIMEIRO SEMESTRE - CARGA LEVE								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
00:00	1,000	0,995	3,927	3,927	-2,107	-2,091	0,716	3,898
00:10	1,000	0,997	4,204	4,204	-2,127	-2,114	0,741	3,974
00:20	1,000	0,997	4,326	4,326	-2,136	-2,124	0,753	4,010
00:30	1,001	0,997	4,406	4,406	-2,142	-2,130	0,762	4,035
00:40	1,000	0,996	4,162	4,162	-2,124	-2,110	0,737	3,962
00:50	1,001	0,998	4,475	4,475	-2,147	-2,136	0,769	4,057
01:00	1,001	0,998	4,630	4,630	-2,160	-2,150	0,786	4,109
01:10	1,000	0,997	4,258	4,258	-2,131	-2,118	0,747	3,990
01:20	0,999	0,995	3,809	3,809	-2,098	-2,082	0,705	3,868
01:30	1,000	0,996	3,965	3,965	-2,109	-2,094	0,719	3,908
01:40	1,000	0,996	3,976	3,976	-2,110	-2,095	0,720	3,911
01:50	0,999	0,995	3,734	3,734	-2,093	-2,076	0,699	3,850
02:00	1,000	0,997	4,284	4,284	-2,133	-2,120	0,749	3,998
02:10	1,000	0,996	4,173	4,173	-2,125	-2,111	0,738	3,965
02:20	1,001	0,998	4,453	4,453	-2,146	-2,135	0,767	4,050
02:30	1,000	0,996	4,167	4,167	-2,124	-2,111	0,738	3,963
02:40	1,000	0,996	4,015	4,015	-2,113	-2,098	0,723	3,921
02:50	1,000	0,996	4,059	4,059	-2,116	-2,102	0,727	3,933
03:00	1,000	0,996	4,178	4,178	-2,125	-2,111	0,739	3,966
03:10	1,000	0,997	4,226	4,226	-2,129	-2,115	0,743	3,980
03:20	1,000	0,997	4,242	4,242	-2,130	-2,117	0,745	3,985
03:30	0,999	0,995	3,831	3,831	-2,100	-2,084	0,707	3,874
03:40	1,000	0,996	4,004	4,004	-2,112	-2,097	0,722	3,918
03:50	1,000	0,997	4,220	4,220	-2,128	-2,115	0,743	3,979
04:00	1,000	0,996	4,173	4,173	-2,125	-2,111	0,738	3,965
04:10	1,000	0,996	4,043	4,043	-2,115	-2,100	0,726	3,929
04:20	1,000	0,995	3,888	3,888	-2,104	-2,088	0,712	3,888
04:30	0,999	0,995	3,843	3,843	-2,101	-2,084	0,708	3,877
04:40	1,000	0,996	4,048	4,048	-2,115	-2,101	0,726	3,930
04:50	1,000	0,996	4,157	4,157	-2,123	-2,110	0,737	3,960
05:00	0,999	0,995	3,831	3,831	-2,100	-2,084	0,707	3,874

Tabela 4.5 – Modelo PQ - Primeiro Semestre - Carga Leve

A tabela 4.6 mostra os resultados do fluxo de carga, utilizando o modelo PQs da máquina de indução no primeiro semestre, no horário de carga leve, considerando o mesmo valor fixo do banco de capacitores para o modelo PQ da máquina de indução.

<b>MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO PRIMEIRO SEMESTRE - CARGA LEVE</b>								
<b>Horários</b>	<b>Tensões na barra 32 (p.u)</b>	<b>Tensões na barra 36 (p.u)</b>	<b>Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)</b>	<b>Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)</b>	<b>Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)</b>	<b>Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)</b>	<b>Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)</b>	<b>Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)</b>
00:00	0,996	0,990	3,731	3,731	-2,210	-2,193	0,711	3,882
00:10	0,995	0,991	3,994	3,994	-2,255	-2,240	0,736	3,957
00:20	0,995	0,991	4,110	4,110	-2,275	-2,262	0,749	3,993
00:30	0,995	0,991	4,185	4,185	-2,289	-2,276	0,757	4,017
00:40	0,995	0,991	3,954	3,954	-2,248	-2,233	0,732	3,945
00:50	0,995	0,991	4,250	4,250	-2,301	-2,288	0,764	4,039
01:00	0,995	0,991	4,398	4,397	-2,329	-2,317	0,781	4,090
01:10	0,995	0,991	4,045	4,045	-2,264	-2,249	0,742	3,972
01:20	0,996	0,990	3,619	3,619	-2,192	-2,174	0,701	3,853
01:30	0,996	0,990	3,767	3,767	-2,216	-2,200	0,714	3,892
01:40	0,996	0,990	3,778	3,778	-2,218	-2,202	0,715	3,895
01:50	0,996	0,990	3,548	3,548	-2,181	-2,163	0,695	3,836
02:00	0,995	0,991	4,070	4,070	-2,268	-2,254	0,744	3,980
02:10	0,995	0,991	3,964	3,964	-2,250	-2,235	0,733	3,948
02:20	0,995	0,991	4,230	4,230	-2,298	-2,284	0,762	4,032
02:30	0,995	0,991	3,959	3,959	-2,249	-2,234	0,733	3,947
02:40	0,996	0,990	3,815	3,815	-2,224	-2,208	0,719	3,905
02:50	0,996	0,991	3,856	3,856	-2,231	-2,215	0,723	3,917
03:00	0,995	0,991	3,969	3,969	-2,250	-2,236	0,734	3,950
03:10	0,995	0,991	4,014	4,014	-2,258	-2,244	0,738	3,963
03:20	0,995	0,991	4,030	4,029	-2,261	-2,247	0,740	3,968
03:30	0,996	0,990	3,640	3,640	-2,195	-2,178	0,702	3,859
03:40	0,996	0,990	3,804	3,804	-2,222	-2,206	0,718	3,902
03:50	0,995	0,991	4,009	4,009	-2,258	-2,243	0,738	3,962
04:00	0,995	0,991	3,964	3,964	-2,250	-2,235	0,733	3,948
04:10	0,996	0,991	3,841	3,841	-2,228	-2,213	0,721	3,912
04:20	0,996	0,990	3,694	3,694	-2,204	-2,187	0,707	3,872
04:30	0,996	0,990	3,651	3,651	-2,197	-2,180	0,703	3,861
04:40	0,996	0,991	3,846	3,846	-2,229	-2,214	0,722	3,914
04:50	0,995	0,991	3,949	3,949	-2,247	-2,232	0,732	3,944
05:00	0,996	0,990	3,640	3,640	-2,195	-2,178	0,702	3,859

Tabela 4.6 – Modelo PQs - Primeiro Semestre - Carga Leve

A figura 4.58 apresenta o comparativo das perdas, para o pior caso, no primeiro semestre, no qual foi visto pelas tabelas 4.5 e 4.6 que a pior situação ocorre à 01:00.



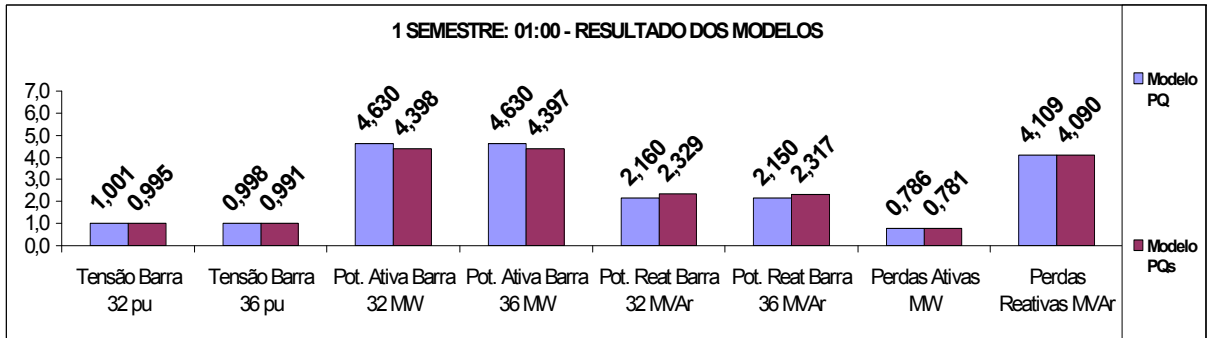


Figura 4.58 – Comparativo dos modelos PQ e PQs - 1° Semestre – 01:00

A figura 4.59 apresenta a diferença dos resultados mostrados na figura 4.58.

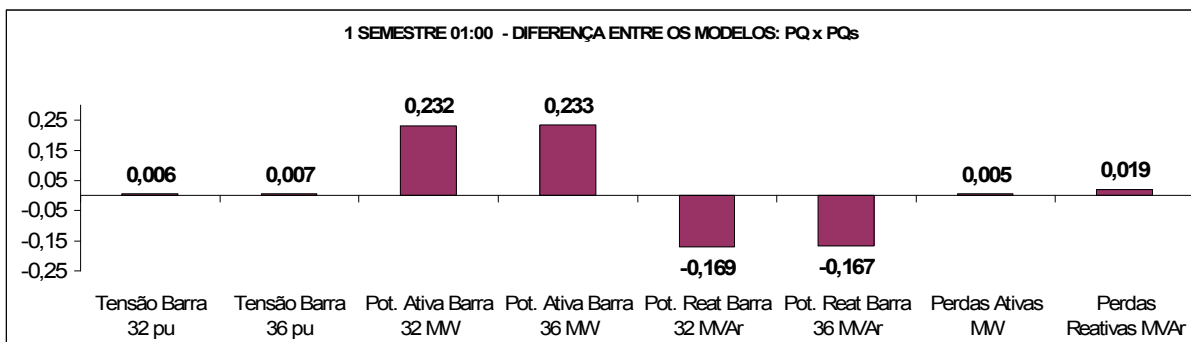


Figura 4.59 – Diferença entre os modelos PQ e PQs - 1° Semestre – 01:00

Foi visto que as potências ativas geradas no modelo PQ da máquina de indução foram maiores em relação ao modelo PQs, porque no modelo PQ da máquina de indução foi considerada a simplificação do circuito equivalente da máquina e desconsideradas as perdas internas do gerador de indução no equacionamento. Por sua vez, no modelo PQs da máquina de indução, foram consideradas as perdas internas da máquina, como também a influência do escorregamento.

No caso da potência reativa da máquina de indução, foi observado que no modelo PQs foram solicitados mais reativos do sistema elétrico em relação ao modelo PQ, pois no modelo PQs o valor da reatância indutiva é maior, conforme é mostrado no circuito equivalente completo, como também esta reatância depende do escorregamento da máquina, influenciando assim em uma máquina que realmente solicita mais reativos do sistema elétrico.

No período de carga leve, no primeiro semestre, é observado que as perdas ativas do sistema elétrico em ambos os modelos são praticamente as mesmas, na qual a diferença é 5,0 kW, mostrando que para o sistema elétrico as perdas ativas

independem do modelo utilizado. A diferença entre as perdas reativas em ambos os modelos é também praticamente nula, na qual a diferença é de 19 kVAr.

O mesmo é observado para as tensões, nas quais as variações são percebidas a partir da terceira casa decimal.

#### 4.6.2 PRIMEIRO SEMESTRE – CARGA PESADA

A tabela 4.7 apresenta os resultados do obtidos no modelo PQ da máquina de indução no horário de carga pesada, para o primeiro semestre.

<b>MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO PRIMEIRO SEMESTRE - CARGA PESADA</b>								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
18:00	0,984	0,967	2,880	2,880	-1,992	-1,927	1,246	6,545
18:10	0,985	0,969	3,118	3,118	-2,008	-1,945	1,249	6,536
18:20	0,986	0,969	3,208	3,208	-2,014	-1,952	1,250	6,534
18:30	0,987	0,971	3,462	3,462	-2,031	-1,973	1,256	6,535
18:40	0,988	0,972	3,706	3,706	-2,049	-1,993	1,263	6,544
18:50	0,989	0,974	3,949	3,949	-2,067	-2,014	1,273	6,560
19:00	0,988	0,972	3,740	3,740	-2,052	-1,996	1,264	6,546
19:10	0,988	0,973	3,797	3,797	-2,056	-2,001	1,267	6,549
19:20	0,988	0,972	3,659	3,659	-2,046	-1,989	1,262	6,542
19:30	0,988	0,972	3,700	3,700	-2,049	-1,992	1,263	6,544
19:40	0,987	0,971	3,456	3,456	-2,031	-1,972	1,255	6,535
19:50	0,987	0,971	3,505	3,505	-2,034	-1,976	1,257	6,536
20:00	0,989	0,974	3,982	3,982	-2,070	-2,016	1,274	6,563
20:10	0,988	0,972	3,740	3,740	-2,052	-1,996	1,264	6,546
20:20	0,989	0,975	4,188	4,188	-2,086	-2,035	1,284	6,583
20:30	0,988	0,973	3,825	3,825	-2,058	-2,003	1,268	6,551

Tabela 4.7 – Modelo PQ - Primeiro Semestre - Carga Pesada

A tabela 4.8 apresenta os resultados do obtidos no modelo PQs da máquina de indução no horário de carga pesada, para o primeiro semestre.

MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO PRIMEIRO SEMESTRE - CARGA PESADA								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
18:00	0,982	0,964	2,736	2,736	-2,022	-1,961	1,251	6,570
18:10	0,983	0,965	2,962	2,962	-2,053	-1,995	1,254	6,564
18:20	0,983	0,966	3,048	3,048	-2,065	-2,008	1,256	6,563
18:30	0,983	0,966	3,289	3,289	-2,101	-2,047	1,262	6,567
18:40	0,984	0,967	3,521	3,521	-2,138	-2,086	1,270	6,579
18:50	0,984	0,968	3,751	3,751	-2,176	-2,127	1,281	6,598
19:00	0,984	0,967	3,553	3,553	-2,143	-2,092	1,271	6,581
19:10	0,984	0,967	3,608	3,608	-2,152	-2,101	1,274	6,585
19:20	0,984	0,967	3,477	3,477	-2,131	-2,078	1,268	6,576
19:30	0,984	0,967	3,515	3,515	-2,137	-2,085	1,270	6,578
19:40	0,983	0,966	3,283	3,283	-2,100	-2,046	1,262	6,567
19:50	0,984	0,967	3,330	3,330	-2,107	-2,053	1,263	6,569
20:00	0,984	0,968	3,783	3,783	-2,182	-2,133	1,282	6,601
20:10	0,984	0,967	3,553	3,553	-2,143	-2,092	1,271	6,581
20:20	0,984	0,968	3,979	3,978	-2,217	-2,170	1,293	6,625
20:30	0,984	0,967	3,635	3,634	-2,157	-2,106	1,275	6,587

Tabela 4.8 – Modelo PQs - Primeiro Semestre - Carga Pesada

A figura 4.60 apresenta o comparativo dos modelos para o primeiro semestre, no horário de carga pesada.

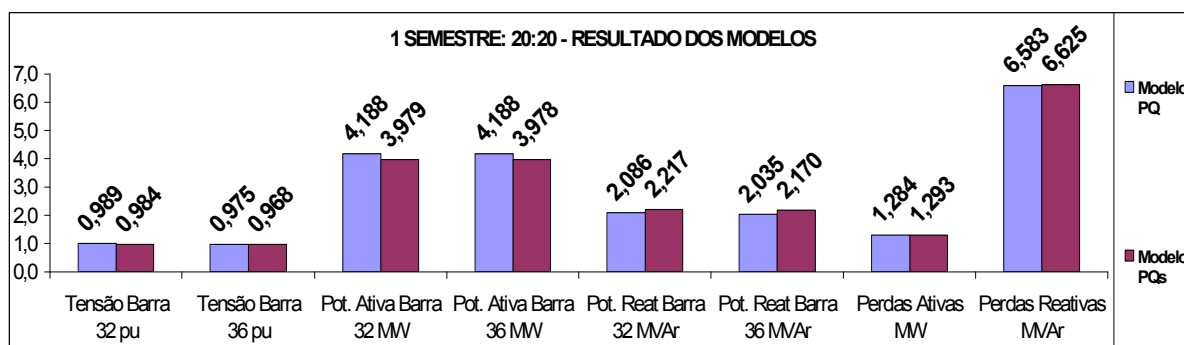


Figura 4.60 – Comparativo dos modelos PQ e PQs - 1º Semestre – 20:20

No horário de carga pesada, para o primeiro semestre é caracterizado por haver ventos com menores velocidades. Assim, as diferenças obtidas entre os modelos tendem a ser menores, como mostram as figuras 4.59 e 4.61.

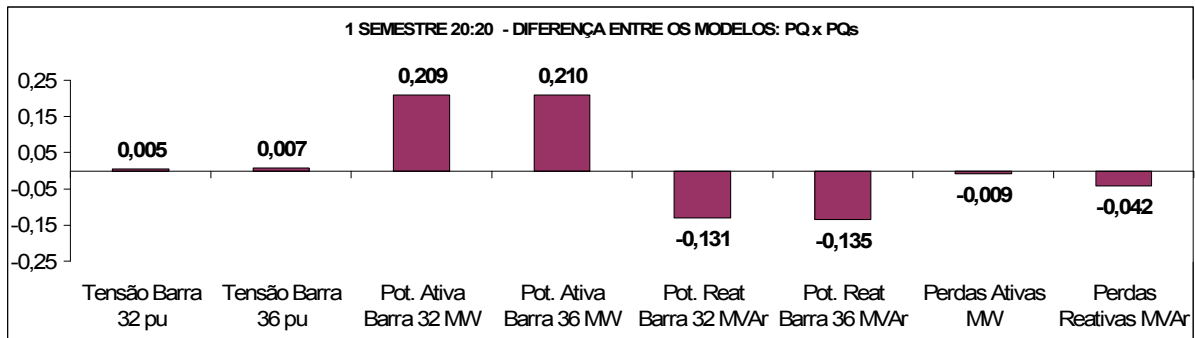


Figura 4.61 – Diferença entre os modelos PQ e PQs - 1º Semestre – 20:20

A diferença observada das potências ativas entre os dois modelos está em torno de 210 kW, enquanto a diferença na potência reativa entre os dois modelos está em torno de 130 kVAr.

As tensões e as perdas ficaram dentro de uma faixa de diferença baixa, com as respectivas ordens de grandeza,  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$ .

#### 4.6.3 SEGUNDO SEMESTRE – CARGA LEVE

A tabela 4.9 apresenta os resultados do modelo PQ da máquina de indução no horário de carga leve, para o segundo semestre.

<b>MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO SEGUNDO SEMESTRE – CARGA LEVE</b>								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
00:00	1,002	1,000	5,238	5,238	-2,210	-2,204	0,861	4,338
00:10	1,002	1,000	5,386	5,386	-2,223	-2,218	0,881	4,400
00:20	1,002	1,001	5,514	5,514	-2,234	-2,230	0,899	4,456
00:30	1,002	1,001	5,739	5,739	-2,254	-2,252	0,932	4,559
00:40	1,002	1,001	5,678	5,678	-2,249	-2,246	0,923	4,531
00:50	1,002	1,001	5,493	5,493	-2,232	-2,228	0,896	4,447
01:00	1,002	1,000	5,227	5,227	-2,209	-2,203	0,859	4,333
01:10	1,002	1,001	5,518	5,518	-2,234	-2,231	0,900	4,458
01:20	1,002	1,001	5,660	5,660	-2,247	-2,245	0,921	4,523
01:30	1,002	1,001	5,550	5,550	-2,237	-2,234	0,904	4,472
01:40	1,002	1,001	5,747	5,747	-2,255	-2,253	0,933	4,563
01:50	1,002	1,001	5,510	5,510	-2,234	-2,230	0,898	4,454
02:00	1,002	1,000	5,418	5,418	-2,225	-2,221	0,886	4,414
02:10	1,002	1,000	5,277	5,277	-2,213	-2,208	0,866	4,354
02:20	1,002	1,001	5,695	5,695	-2,250	-2,248	0,926	4,539
02:30	1,002	1,001	5,675	5,675	-2,248	-2,246	0,923	4,530
02:40	1,002	1,001	5,752	5,752	-2,255	-2,253	0,934	4,566
02:50	1,002	1,001	5,514	5,514	-2,234	-2,230	0,899	4,456
03:00	1,002	1,000	5,319	5,319	-2,217	-2,212	0,872	4,371
03:10	1,002	1,000	5,454	5,454	-2,229	-2,225	0,891	4,430
03:20	1,002	1,000	5,338	5,338	-2,218	-2,214	0,874	4,380
03:30	1,002	1,000	5,395	5,395	-2,223	-2,219	0,882	4,404
03:40	1,002	1,001	5,648	5,648	-2,246	-2,243	0,919	4,517
03:50	1,002	1,001	5,569	5,569	-2,239	-2,236	0,907	4,481
04:00	1,002	1,000	5,277	5,277	-2,213	-2,208	0,866	4,354
04:10	1,002	1,001	5,476	5,476	-2,231	-2,227	0,894	4,439
04:20	1,002	1,001	5,484	5,484	-2,231	-2,228	0,895	4,443
04:30	1,002	1,000	5,238	5,238	-2,210	-2,204	0,861	4,338
04:40	1,002	1,000	5,395	5,395	-2,223	-2,219	0,882	4,404
04:50	1,002	1,000	5,318	5,318	-2,217	-2,212	0,872	4,371
05:00	1,002	1,000	5,282	5,282	-2,214	-2,208	0,867	4,356

Tabela 4.9 – Modelo PQ - Segundo Semestre - Carga Leve

A tabela 4.10 apresenta os resultados do modelo PQs da máquina de indução no horário de carga leve, para o segundo semestre.

MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO SEGUNDO SEMESTRE - CARGA LEVE								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
00:00	0,993	0,990	4,972	4,971	-2,447	-2,438	0,857	4,319
00:10	0,993	0,990	5,111	5,111	-2,478	-2,470	0,878	4,382
00:20	0,992	0,989	5,231	5,231	-2,505	-2,498	0,896	4,439
00:30	0,991	0,989	5,443	5,442	-2,555	-2,549	0,930	4,544
00:40	0,992	0,989	5,386	5,385	-2,542	-2,535	0,921	4,515
00:50	0,992	0,989	5,211	5,211	-2,501	-2,493	0,893	4,429
01:00	0,993	0,990	4,961	4,961	-2,445	-2,436	0,856	4,314
01:10	0,992	0,989	5,235	5,235	-2,506	-2,499	0,897	4,440
01:20	0,992	0,989	5,369	5,369	-2,538	-2,531	0,918	4,506
01:30	0,992	0,989	5,265	5,265	-2,513	-2,506	0,901	4,455
01:40	0,991	0,989	5,450	5,450	-2,557	-2,550	0,932	4,547
01:50	0,992	0,989	5,227	5,227	-2,505	-2,497	0,896	4,437
02:00	0,993	0,990	5,141	5,141	-2,485	-2,477	0,882	4,396
02:10	0,993	0,990	5,008	5,008	-2,455	-2,447	0,862	4,335
02:20	0,992	0,989	5,402	5,402	-2,545	-2,539	0,924	4,523
02:30	0,992	0,989	5,383	5,383	-2,541	-2,534	0,920	4,513
02:40	0,991	0,989	5,455	5,454	-2,558	-2,552	0,932	4,550
02:50	0,992	0,989	5,231	5,231	-2,505	-2,498	0,896	4,439
03:00	0,993	0,990	5,048	5,047	-2,464	-2,455	0,868	4,353
03:10	0,993	0,989	5,175	5,175	-2,493	-2,485	0,887	4,412
03:20	0,993	0,990	5,066	5,066	-2,468	-2,460	0,871	4,361
03:30	0,993	0,990	5,120	5,119	-2,480	-2,472	0,879	4,386
03:40	0,992	0,989	5,357	5,357	-2,535	-2,528	0,916	4,500
03:50	0,992	0,989	5,283	5,283	-2,517	-2,510	0,904	4,464
04:00	0,993	0,990	5,008	5,008	-2,455	-2,447	0,862	4,335
04:10	0,992	0,989	5,195	5,195	-2,497	-2,489	0,891	4,422
04:20	0,992	0,989	5,204	5,203	-2,499	-2,491	0,892	4,425
04:30	0,993	0,990	4,971	4,971	-2,447	-2,438	0,857	4,319
04:40	0,993	0,990	5,120	5,119	-2,480	-2,472	0,879	4,386
04:50	0,993	0,990	5,047	5,047	-2,464	-2,455	0,868	4,353
05:00	0,993	0,990	5,013	5,013	-2,456	-2,448	0,863	4,338

Tabela 4.10 – Modelo PQs- Segundo Semestre - Carga Leve

A figura 4.62 apresenta o comparativo dos modelos para o segundo semestre, no horário de carga leve.

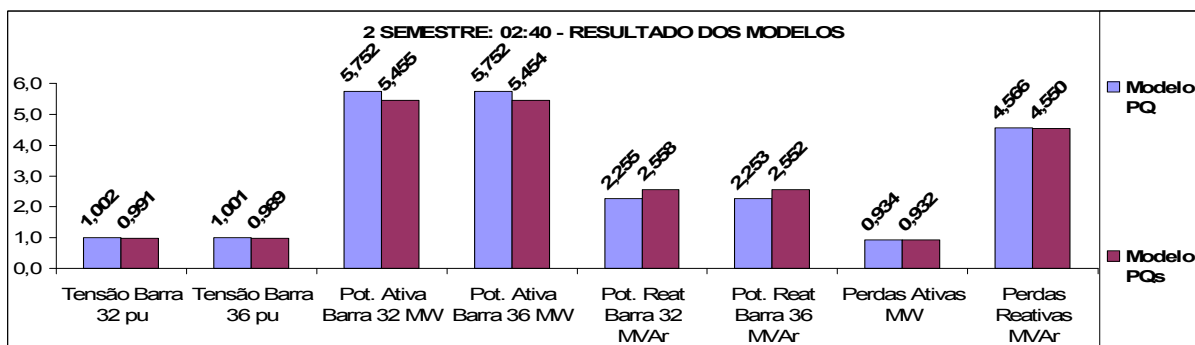


Figura 4.62 – Comparativo dos modelos PQ e PQs - 2° Semestre – 02:40

A figura 4.63 apresenta a diferença entre os modelos para o segundo semestre, no horário de carga leve.

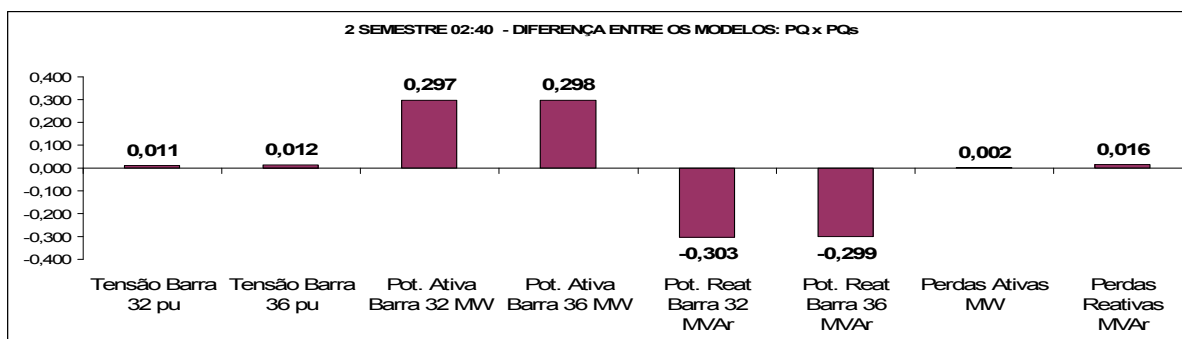


Figura 4.63 – Diferença entre os modelos PQ e PQs - 2° Semestre – 02:40

É observado que as potências ativas geradas no modelo PQ são maiores, em relação ao modelo PQs, sendo o mesmo visto nas potências reativas absorvidas do sistema elétrico.

As mesmas conclusões também são obtidas no primeiro semestre, porém, os valores das diferenças entre os modelos estão maiores no segundo semestre.

As perdas do sistema elétrico, como também as tensões no modelo PQ estão ligeiramente maiores, em relação às perdas do modelo PQs, entretanto, para trabalhos relacionados a engenharia esta diferença é desprezível.

#### 4.6.4 SEGUNDO SEMESTRE – CARGA PESADA

A tabela 4.11 apresenta os resultados do modelo PQ da máquina de indução no horário de carga pesada, para o segundo semestre.

MODELO PQ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO SEGUNDO SEMESTRE - CARGA PESADA								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
18:00	0,991	0,978	4,745	4,745	-2,131	-2,086	1,320	6,665
18:10	0,990	0,977	4,666	4,666	-2,125	-2,078	1,314	6,651
18:20	0,991	0,978	4,777	4,777	-2,134	-2,089	1,322	6,671
18:30	0,991	0,978	4,777	4,777	-2,134	-2,089	1,322	6,671
18:40	0,991	0,978	4,810	4,810	-2,137	-2,092	1,324	6,677
18:50	0,991	0,979	5,033	5,033	-2,156	-2,113	1,342	6,722
19:00	0,991	0,977	4,714	4,714	-2,129	-2,083	1,317	6,659
19:10	0,991	0,978	4,888	4,888	-2,144	-2,099	1,330	6,692
19:20	0,991	0,979	5,113	5,113	-2,163	-2,121	1,349	6,740
19:30	0,991	0,979	5,174	5,174	-2,169	-2,127	1,354	6,754
19:40	0,991	0,979	5,027	5,027	-2,156	-2,113	1,342	6,721
19:50	0,991	0,979	5,174	5,174	-2,169	-2,127	1,354	6,754
20:00	0,992	0,980	5,333	5,333	-2,183	-2,143	1,369	6,793
20:10	0,992	0,980	5,480	5,480	-2,197	-2,158	1,383	6,832
20:20	0,992	0,980	5,542	5,542	-2,203	-2,164	1,389	6,849
20:30	0,992	0,980	5,459	5,459	-2,195	-2,156	1,381	6,826

Tabela 4.11 – Modelo PQ - Segundo Semestre - Carga Pesada

A tabela 4.12 apresenta os resultados do modelo PQs da máquina de indução no horário de carga pesada, para o segundo semestre.

MODELO PQs DA MÁQUINA DE INDUÇÃO SEGUNDO SEMESTRE - CARGA PESADA								
Horários	Tensões na barra 32 (p.u)	Tensões na barra 36 (p.u)	Potência Ativa Gerada na barra 32 (MW)	Potência Ativa Gerada na barra 36 (MW)	Potência Reativa Gerada na barra 32 (MVar)	Potência Reativa Gerada na barra 36 (MVar)	Perdas Ativas do Sistema Elétrico (MW)	Perdas Reativas do Sistema Elétrico (MVar)
18:00	0,983	0,968	4,506	4,505	-2,318	-2,278	1,331	6,716
18:10	0,983	0,968	4,431	4,431	-2,303	-2,262	1,325	6,701
18:20	0,983	0,968	4,536	4,535	-2,324	-2,284	1,333	6,723
18:30	0,983	0,968	4,536	4,535	-2,324	-2,284	1,333	6,723
18:40	0,983	0,968	4,567	4,566	-2,331	-2,291	1,336	6,730
18:50	0,983	0,968	4,777	4,776	-2,375	-2,338	1,355	6,780
19:00	0,983	0,968	4,476	4,475	-2,312	-2,271	1,328	6,710
19:10	0,983	0,968	4,641	4,640	-2,346	-2,307	1,343	6,747
19:20	0,982	0,968	4,853	4,852	-2,392	-2,355	1,363	6,800
19:30	0,982	0,968	4,910	4,909	-2,405	-2,368	1,369	6,816
19:40	0,983	0,968	4,771	4,771	-2,374	-2,336	1,355	6,779
19:50	0,982	0,968	4,910	4,909	-2,405	-2,368	1,369	6,816
20:00	0,982	0,968	5,061	5,059	-2,439	-2,404	1,384	6,859
20:10	0,981	0,968	5,199	5,197	-2,471	-2,437	1,400	6,902
20:20	0,981	0,967	5,257	5,255	-2,484	-2,452	1,407	6,921
20:30	0,981	0,968	5,178	5,177	-2,466	-2,432	1,398	6,896

Tabela 4.12 – Modelo PQs - Segundo Semestre - Carga Pesada



A figura 4.64 apresenta o comparativo dos modelos para o segundo semestre, no horário de carga pesada.

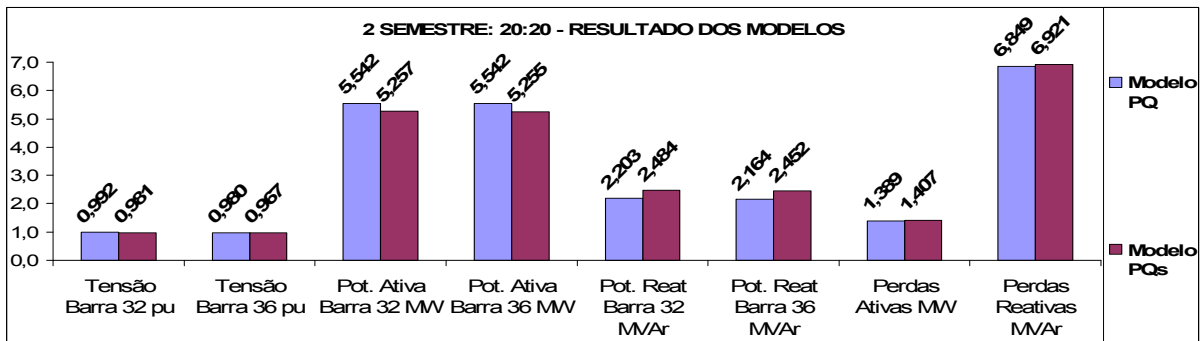


Figura 4.64 – Comparativo dos modelos PQ e PQs - 2º Semestre – 20:20

As mesmas conclusões do primeiro semestre, no horário de carga pesada, são aplicadas ao segundo semestre, no horário de carga pesada, como: tensões e potências reativas maiores para o modelo PQ, em relação ao modelo PQs da máquina de indução.

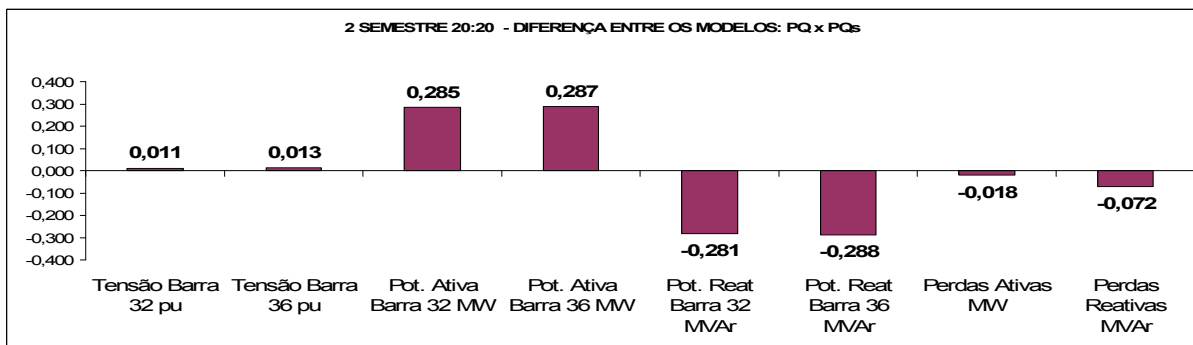


Figura 4.65 – Diferença entre os modelos PQ e PQs - 2º Semestre – 20:20

#### 4.7 MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR SÍNCRONO

O equacionamento do modelo simplificado do gerador síncrono, mostrado no capítulo anterior, mostra o comportamento do sistema elétrico com usinas eólio-elétricas.

Neste modelo são simuladas três situações. Na primeira situação a máquina trabalha com o fator de potência unitário, utilizando barras do tipo PQ para usinas eólio-elétricas, enquanto na segunda, a máquina trabalha com o fator de potência variável, na qual é utilizada a barra do tipo PV para as usinas eólio-elétricas.

Nesta situação a tensão das barras é especificada no valor próximo a tensão obtida na situação da barra do tipo PQ para que o sistema elétrico não ultrapasse o limite

de superior de tensão, que é 1,05 p.u. Na terceira situação, a barra PQ é simulada com um transformador com o “tape” variável, regulando a tensão com o fator de potência unitário.

#### 4.7.1 CASO BASE

No caso base, como nos modelos citados anteriormente, o fluxo de carga é calculado no sistema elétrico, na qual as barras N° 32 e N° 36 são barras do tipo PQ sem geração eólico-elétrica.

##### 4.7.1.1 CARGA LEVE

O caso de carga leve é a mesma situação dos modelos anteriores, em que os resultados do fluxo de carga são mostrados na tabela 4.13.

Resultados Obtidos	Simbologia	Valores	Unidade
Potência Aparente na barra N° 01	$S = P + jQ$	59,20 + j13,77	MVA
Tensão na Barra N° 32	V	1,034<-2,855°	p.u
Tensão na Barra N° 36	V	1,028<-3,019°	p.u
Perdas no Sistema	$S = P + jQ$	0,599 +j3,841	MVA

Tabela 4.13 – Resultados do caso base – Carga leve

Como o sistema não mudou para o caso base, isto é, não existe geração eólico-elétrica, os valores são os mesmos, como foi apresentado no modelo PQ da máquina de indução.

##### 4.7.1.2 CARGA PESADA

O mesmo pode ser observado na situação de carga pesada, na qual são obtidos os seguintes resultados na tabela 4.14.

Resultados Obtidos	Simbologia	Valores	Unidade
Potência Aparente na barra N° 01	$S = P + jQ$	78,72 + j23,48	MVA
Tensão na Barra N° 32	V	1,018<-5,055°	p.u
Tensão na Barra N° 36	V	1,010<-5,759°	p.u
Perdas no Sistema de 40 barras	$S = P + jQ$	1,329 +j7,251	MVA

Tabela 4.14 – Resultados do caso base – Carga pesada

#### 4.7.2 RESULTADOS DO MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR SÍNCRONO

O equacionamento deste modelo, deduzido no capítulo III, mostra que para cada valor de potência ativa, e com um fator de potência conhecido, existe um valor de potência reativa correspondente. Logo, é obtida a curva característica para cada fator de potência, mostrando a quantidade de reativo consumido ou fornecido por um gerador eólico-elétrico de 500 kW.

A figura 4.66 mostra as curvas de potência reativa consumida ou fornecida para diversos fatores de potência, assim também, como é obtida através da equação 3.28.

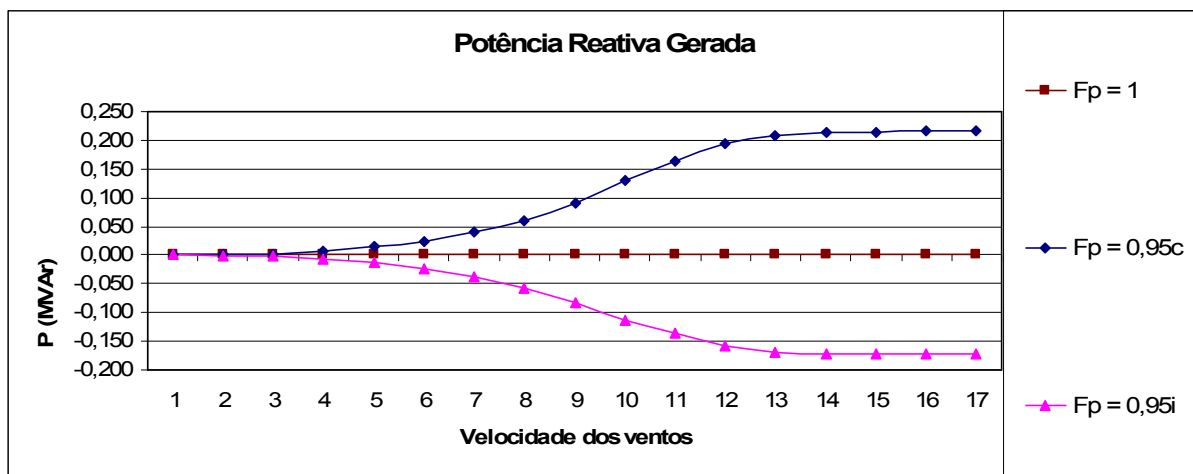


Figura 4.66 – Curva de potência Reativa – Gerador Síncrono de 500 kW

O valor positivo mostra o gerador eólico-elétrico exportando reativos para o sistema elétrico, enquanto o valor negativo, mostra o gerador importando reativos do sistema elétrico, similar aos modelos apresentados da máquina de indução.

##### 4.7.2.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO SEMESTRE

Baseado nas curvas de carga dos ventos, mostradas nas figura 3.1 e 3.2, aplicando à curva de potência traçada na figura 4.65, é mostrado os perfis de potências geradas nos horários de carga leve e carga pesada.

###### 4.7.2.1.1 POTÊNCIAS GERADAS

A figura 4.67 mostra o comportamento das curvas de potências ativas e reativas do gerador síncrono na barra N° 32, no horário de carga leve.

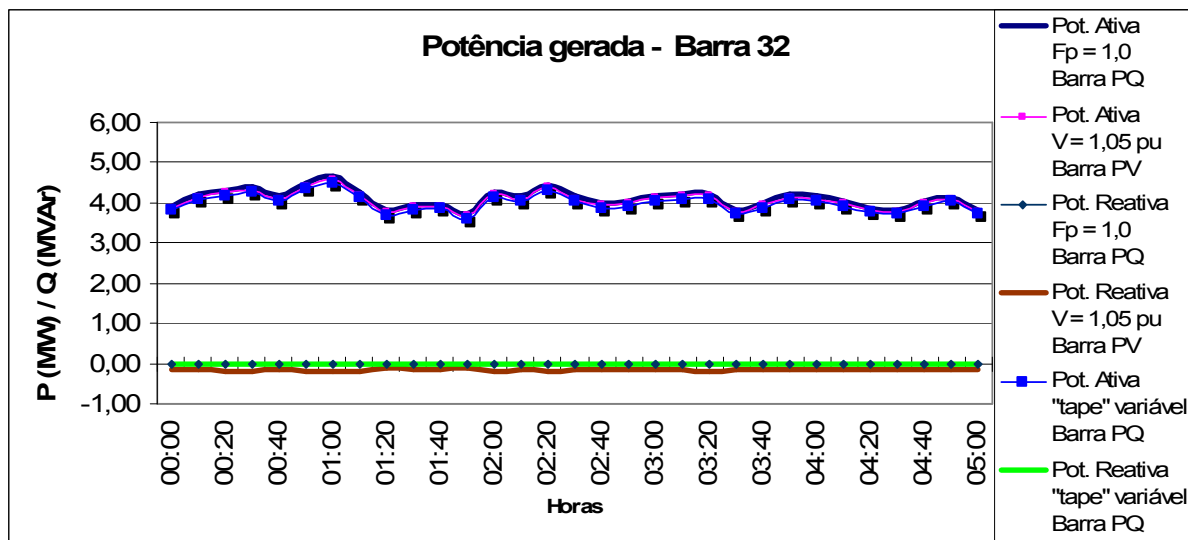


Figura 4.67 – Potências geradas na barra 32 – Carga Leve - 1° Semestre

Para a situação de carga leve, são traçadas três curvas da potência ativa. Uma simulando uma barra do tipo PQ, com o fator de potência unitário, uma com a barra do tipo PQ com um “tape” regulando a tensão, e outra simulando uma barra do tipo PV, com a tensão especificada em 1,05 pu.

A potência ativa permanece praticamente constante nas simulações realizadas. É notado também que os valores das potências reativas são diferentes, porque, quando é utilizado o fluxo de carga, implementando a barra PV, a tensão é forçada a ficar em 1,05 pu, sendo necessária a absorção de reativos do sistema elétrico para reduzir a tensão para o valor estabelecido.

Enquanto com a regulação de tensão, utilizando o transformador com o “tape” variável, o fator de potência permanece unitário, sendo a potência reativa é nula.

A figura 4.68 mostra o comportamento das curvas de potências ativas e reativas do gerador síncrono na barra Nº 36, no horário de carga leve.

As observações feitas para as curvas da barra Nº 32, também são aplicadas a estas curvas.

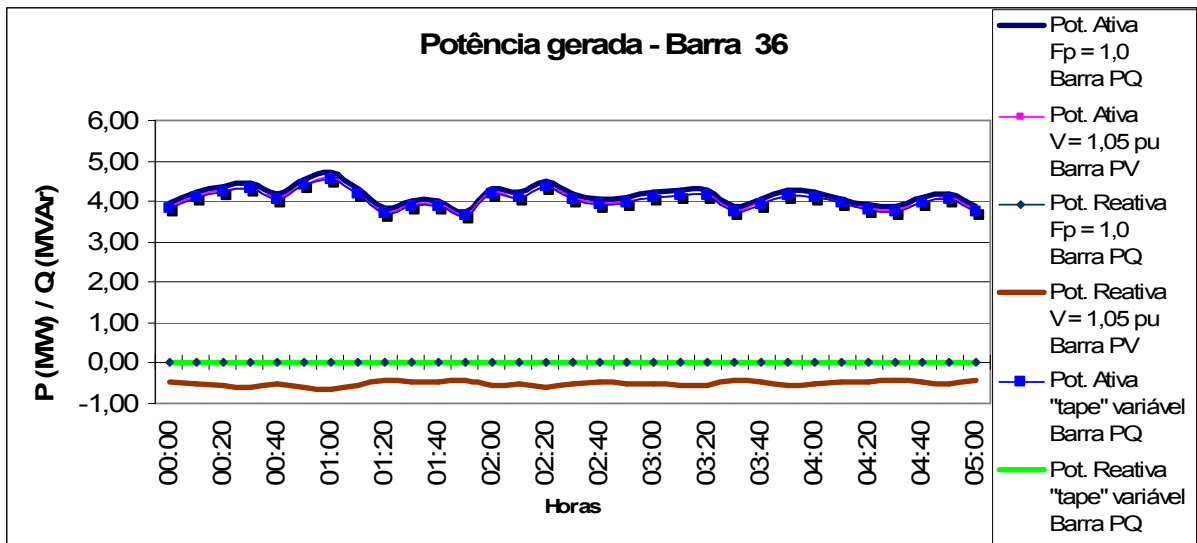


Figura 4.68 – Potências geradas na barra 36 – Carga Leve - 1° Semestre

A figura 4.69 mostra o comportamento das curvas de potências ativas e reativas do gerador síncrono, no horário de carga pesada.

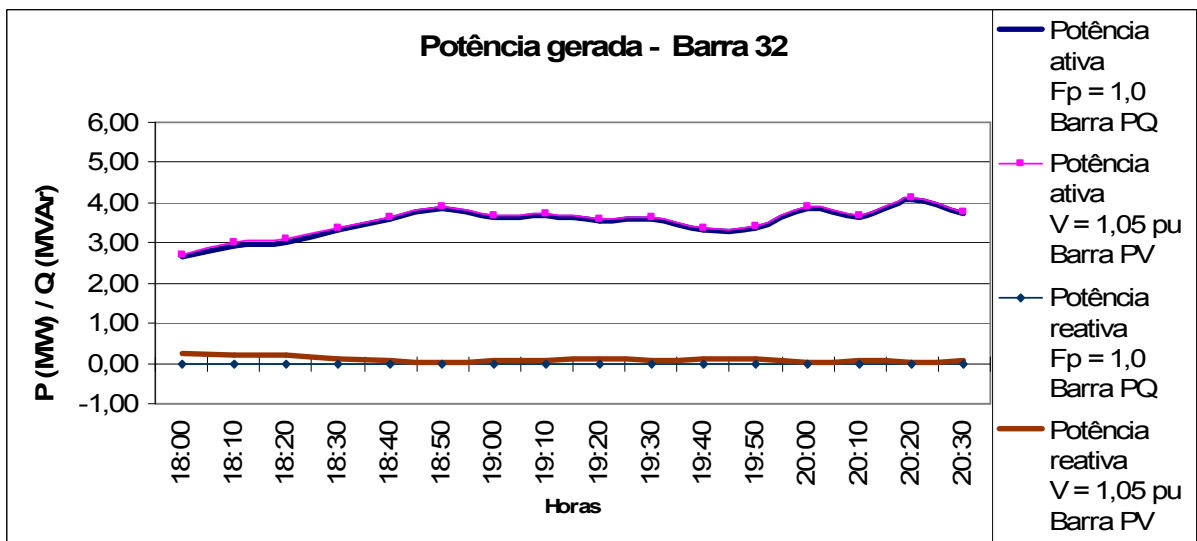


Figura 4.69 – Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada - 1° Semestre

Este horário é caracterizado pelas tensões serem menores em relação ao horário de carga leve, logo quando é utilizada a barra do tipo PV, é necessária a injeção de reativos no sistema elétrico. Entretanto, quando é utilizada a barra do tipo PQ, com o fator de potência unitário, os reativos são nulos. É observado também que as potências ativas permaneceram inalteradas para ambas as simulações.

As curvas da figura 4.70 mostram o comportamento semelhante às curvas da figura 4.69.

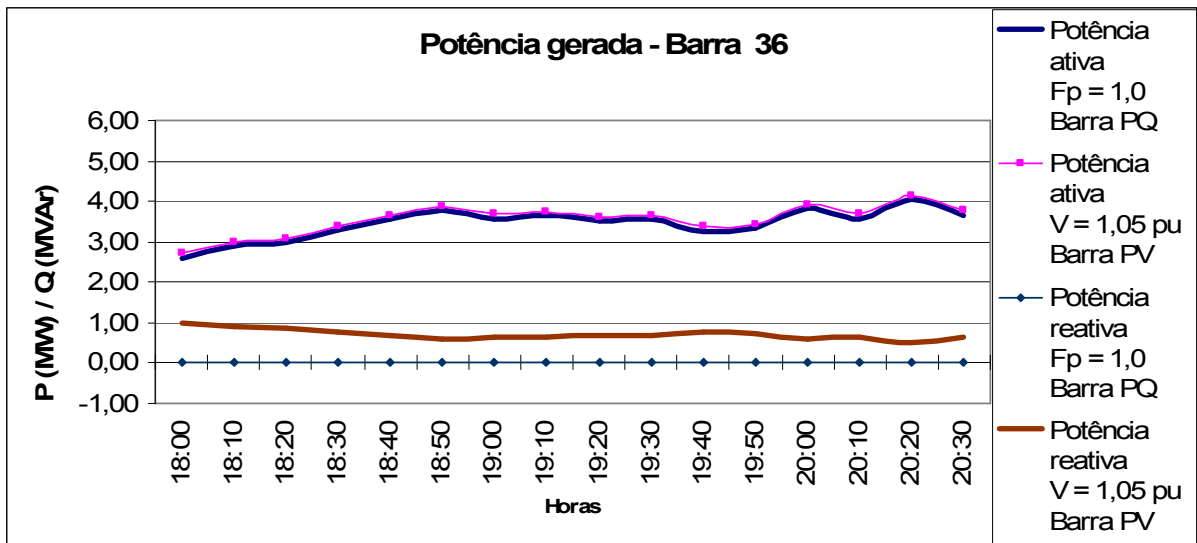


Figura 4.70 – Potências geradas na barra 36 – Carga a Pesada - 1° Semestre

#### 4.7.2.1.2 MAGNITUDE DAS TENSÕES

As curvas da figura 4.71 mostram a variação da tensão na barra N° 32, no horário de carga leve. É observado que a implementação utilizando a barra do tipo PQ mostra tensões acima do valor máximo permitido para a operação do sistema elétrico. Com a utilização da barra do tipo PV, as tensões estão em 1,05 pu, valor pré-estabelecido, na qual, para que esta tensão fique dentro da faixa de operação, é necessária a absorção de reativos do sistema elétrico, como mostram as figuras 4.67 e 4.68. Para a simulação com a barra do tipo PQ com controle do “tape”, foi visto que as tensões ficaram na faixa de operação do sistema de distribuição, sendo que a máquina trabalhou com o fator de potência unitário.

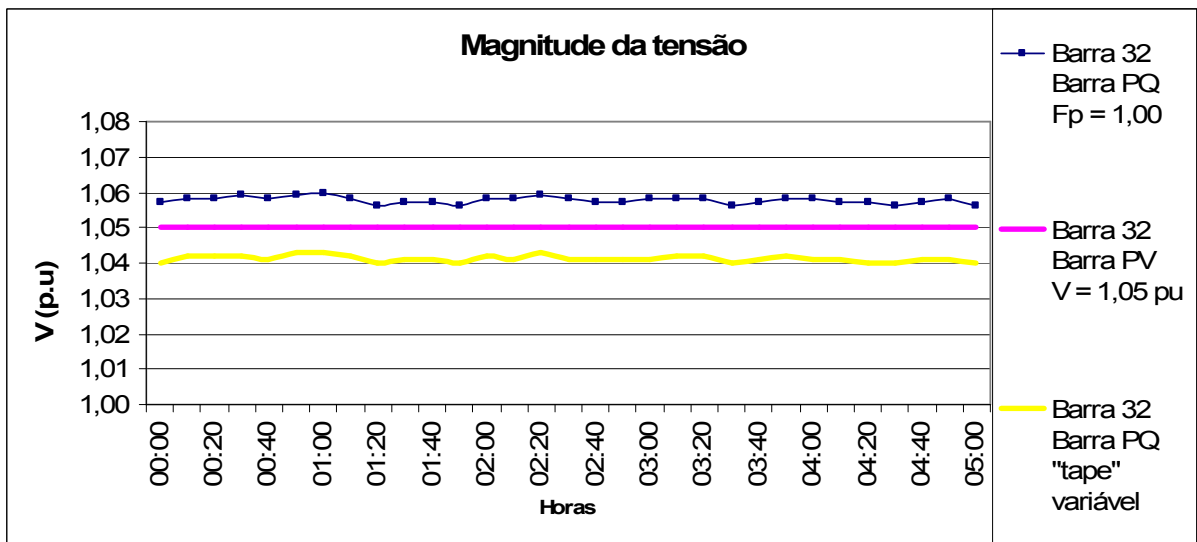


Figura 4.71 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve - 1° Semestre

Analogamente, as curvas da figura 4.72 mostram o mesmo comportamento das curvas correspondentes à figura 4.71.

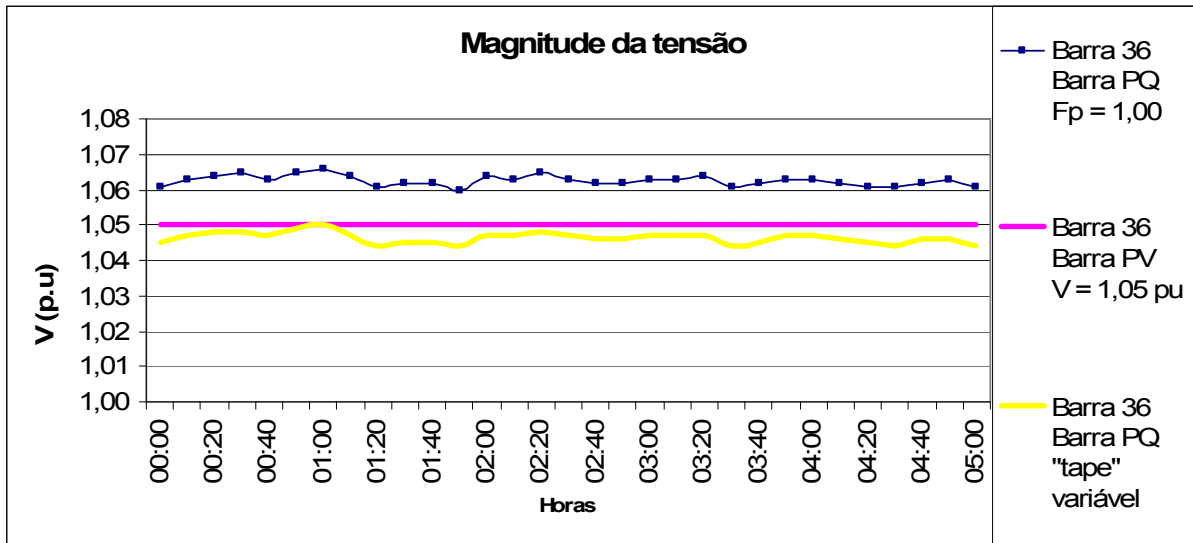


Figura 4.72 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 1° Semestre

A figura 4.73 apresenta as curvas da magnitude de tensão no horário de carga pesada. Neste horário é caracterizado por haver tensões menores em relação ao horário de carga leve. Nesta situação, as tensões simuladas com a barra do tipo PQ, estão abaixo do limite superior, estando dentro da faixa de operação do sistema elétrico, mostrando que a operação com a barra PQ para este período é a melhor opção.

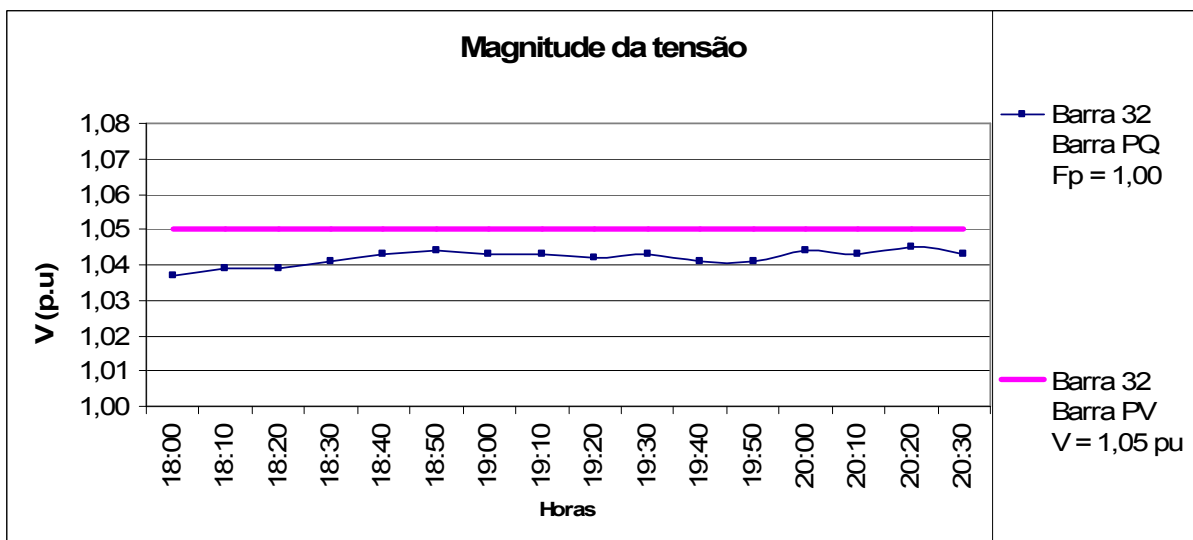


Figura 4.73 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada - 1° Semestre

Na situação simulada com a barra do tipo PV, as tensões estão em 1,05 pu, valor pré-estabelecido, na qual, para esta situação foi necessária a injeção de reativos do

gerador síncrono para o sistema elétrico, isto é, trabalhando com o fator de potência capacitivo.

As curvas da figura 4.74 são similares às curvas da figura 4.73. Logo, as mesmas conclusões são explanadas.

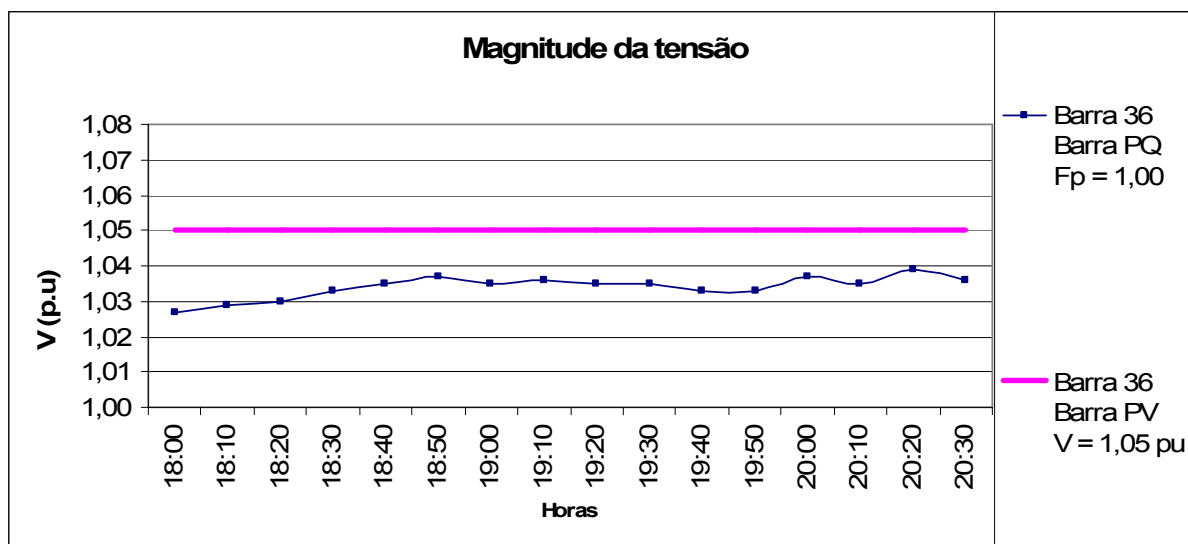


Figura 4.74 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada - 1° Semestre

#### 4.7.2.1.3 PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO

As perdas no sistema elétrico são apresentadas nas figuras 4.75, 4.76, 7.77 e 4.78. O gerador síncrono apresenta resultados em algumas situações diferenciadas dos modelos utilizando máquinas de indução, devido à capacidade de injeção de reativos no sistema elétrico.

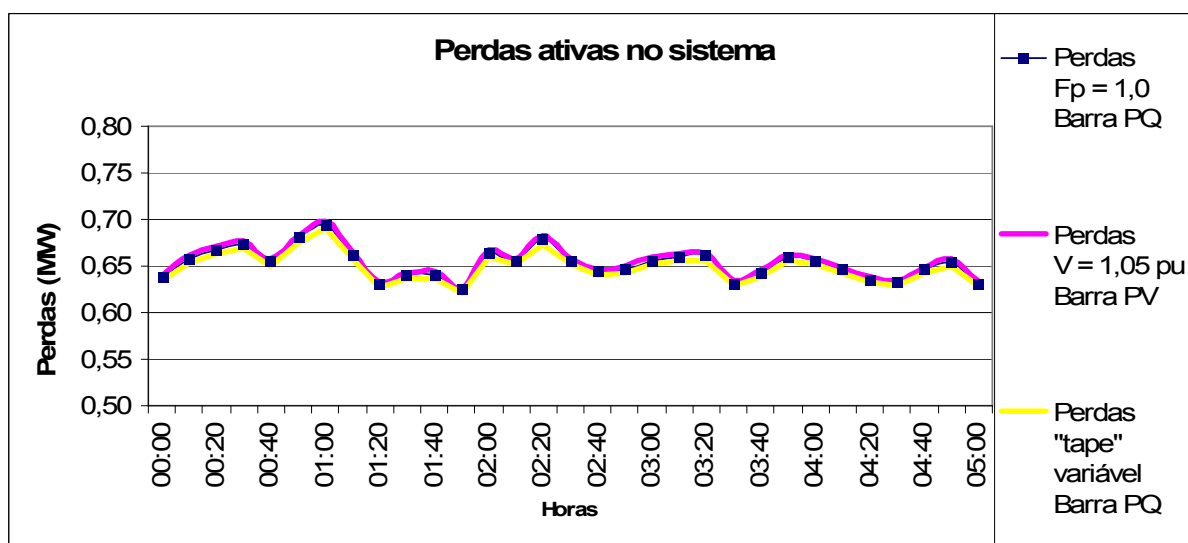


Figura 4.75 – Perdas ativas do sistema – Carga Leve - 1° Semestre



As perdas ativas do sistema elétrico são mostradas nas curvas da figura 4.75. As três simulações mostram que as curvas são praticamente as mesmas, não havendo divergências para as perdas ativas do sistema elétrico entre as simulações com a barra do tipo PQ, e com a barra do tipo PV.

Como as tensões estão com valores muito próximos, tanto na simulação com a barra do tipo PQ, como na simulação com a barra do tipo PV, os valores das perdas estão próximos. A explicação das perdas serem próximas é porque as potências ativas e reativas do gerador síncrono são praticamente as mesmas para as duas situações. Logo, não há grandes variações que mostrem divergências entre as curvas de perdas ativas e reativas.

As curvas da figura 4.76 mostram as perdas ativas do sistema elétrico para o horário de carga pesada. Neste horário, também é observado que não há divergência entre as curvas, como no horário de carga leve.

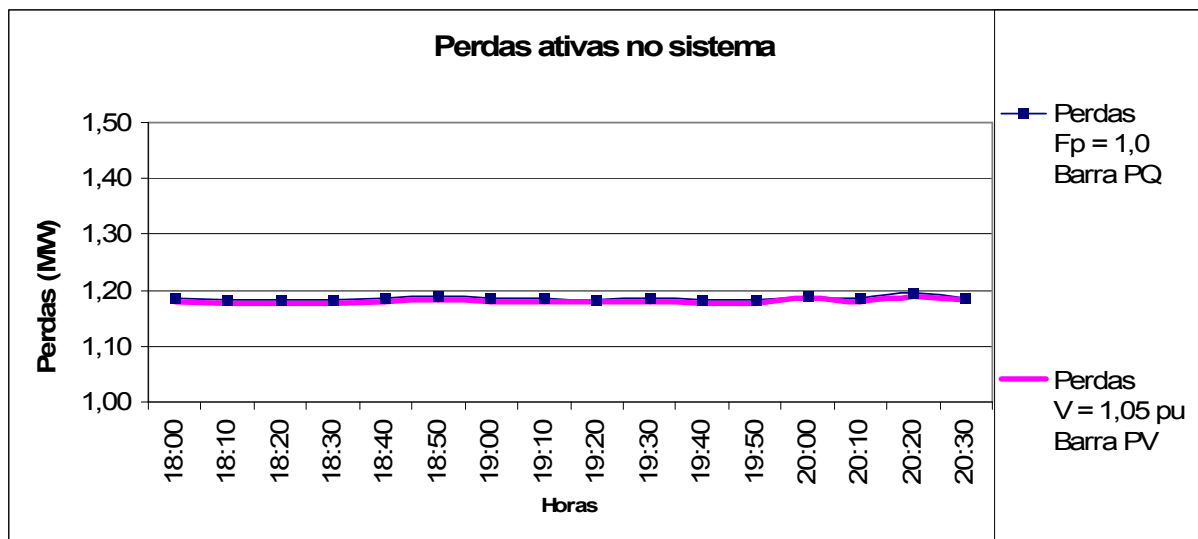


Figura 4.76 – Perdas ativas do sistema – Carga Pesada - 1° Semestre

A figura 4.77 mostra as curvas de perdas reativas para o horário de carga leve, no primeiro semestre. Apesar da simulação com a barra do tipo PV mostrar que houve consumo de reativos do sistema elétrico, enquanto na simulação com a barra do tipo PQ não houve nem consumo, nem injeção de reativos do sistema elétrico, a variação é imperceptível entre as três simulações, em se tratando das perdas reativas do sistema elétrico.

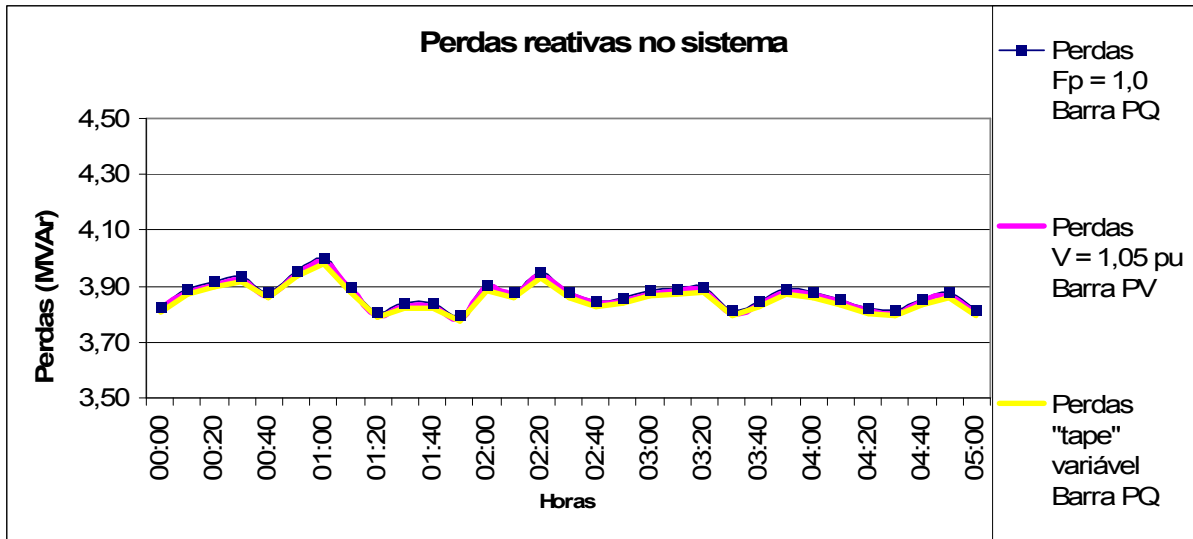


Figura 4.77 – Perdas reativas do sistema – Carga Leve - 1° Semestre

A figura 4.78 mostra as curvas de perdas reativas do sistema elétrico, no horário de carga pesada, no primeiro semestre. As observações feitas para o caso de carga leve são também observadas para o caso de carga pesada, levando em consideração que no caso de carga pesada houve a injeção de potência reativa no sistema elétrico com a barra do tipo PV. No entanto, a injeção foi pequena o suficiente, não influenciando nas perdas reativas do sistema elétrico.

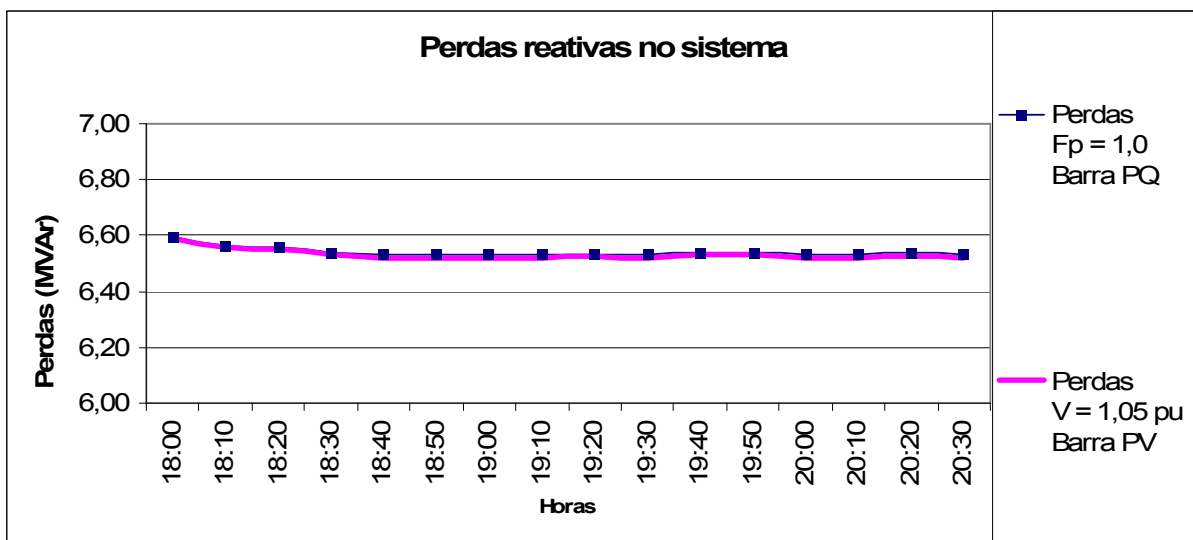


Figura 4.78 – Perdas reativas do sistema – Carga Pesada - 1° Semestre

#### 4.7.2.1.4 FAIXA DE OPERAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

O gerador síncrono, simulado em uma barra do tipo PV, opera no sistema elétrico injetando ou absorvendo potência reativa para garantir a tensão na barra em um valor pré-estabelecido, na qual, a máquina está limitada pelo fator de potência.

Quando este valor é ultrapassado, o gerador não tem como fornecer ou absorver a quantidade de reativos para manter a tensão fixa na barra. A partir deste momento, a tensão na barra irá flutuar como se esta barra fosse uma barra do tipo PQ.

As figuras abaixo mostram a faixa no qual o gerador síncrono pode operar em função da potência ativa gerada. Quanto maior for a potência ativa, maior será a quantidade de reativos que o gerador poderá fornecer em função do seu fator de potência, quer seja indutivo, quer seja capacitivo.

É observado que no primeiro semestre, no horário de carga leve, a potência reativa calculada no fluxo de carga, simulada em uma barra do tipo PV, está dentro da faixa de operação, mostrando que o gerador síncrono consegue manter a tensão na barra em 1,05 pu, conforme é mostrado na figura 4.79.

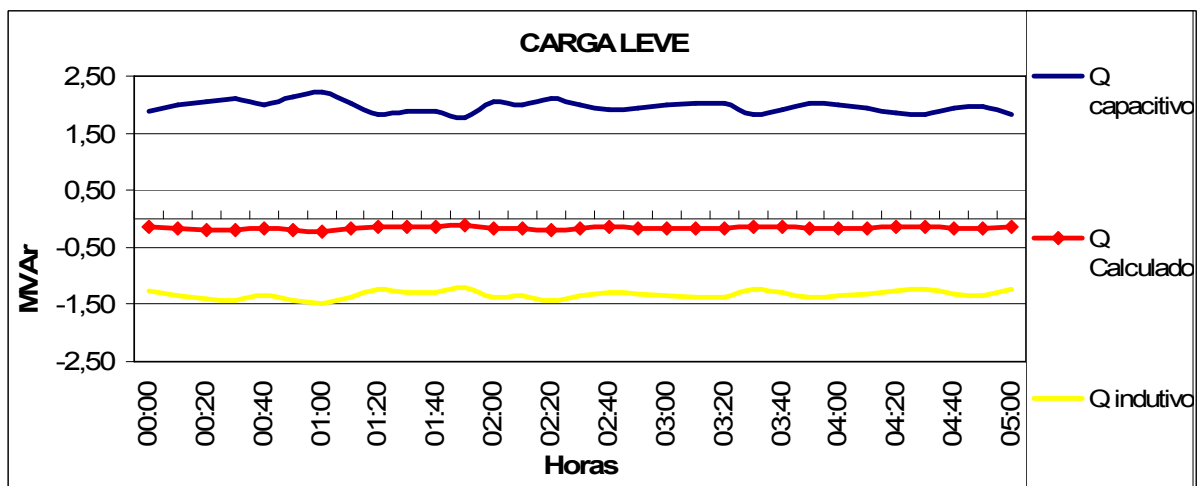


Figura 4.79 – Faixa de operação de reativos – 1º Semestre – Carga Leve

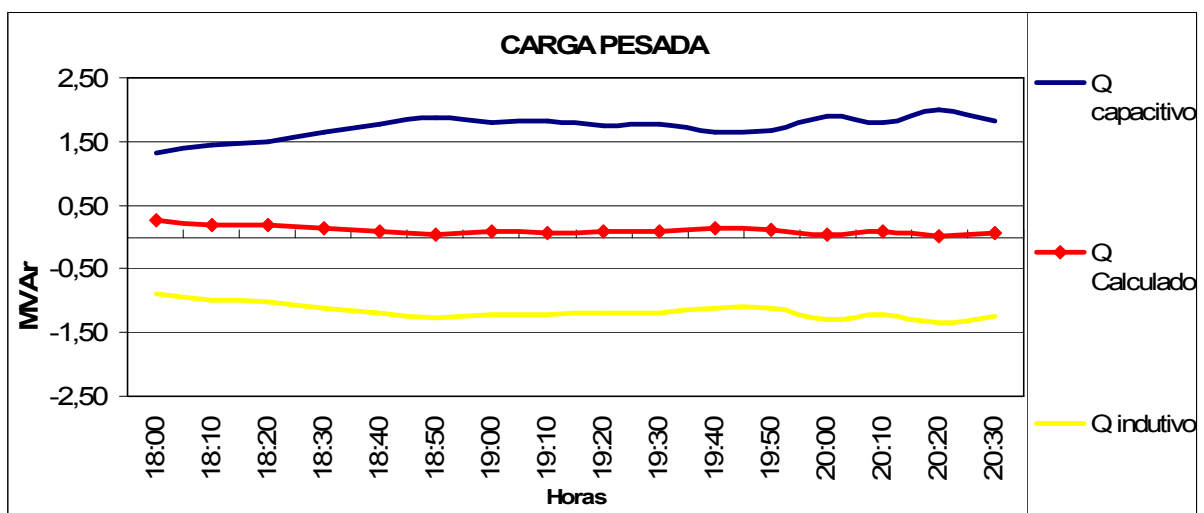


Figura 4.80 – Faixa de operação de reativos – 1º Semestre – Carga Pesada

O mesmo é observado no horário de carga pesada, no primeiro semestre, no qual o valor da potência reativa está dentro da faixa de operação da máquina. Assim, a tensão também é mantida fixa em 1,05 pu, conforme figura 4.80.

#### 4.7.2.2 RESULTADOS DO SEGUNDO SEMESTRE

Como nos modelos anteriores, o segundo semestre é caracterizado por existirem maiores velocidades de ventos, resultando em maiores potências ativas e reativas, interferindo assim em todos os resultados.

##### 4.7.2.2.1 POTÊNCIAS GERADAS

As curvas obtidas na figura 4.81, comparadas com os resultados do primeiro semestre mostrado na figura 4.67, mostram que no segundo semestre as potências ativas são mais elevadas, como ocorre nos modelamentos anteriormente citados.

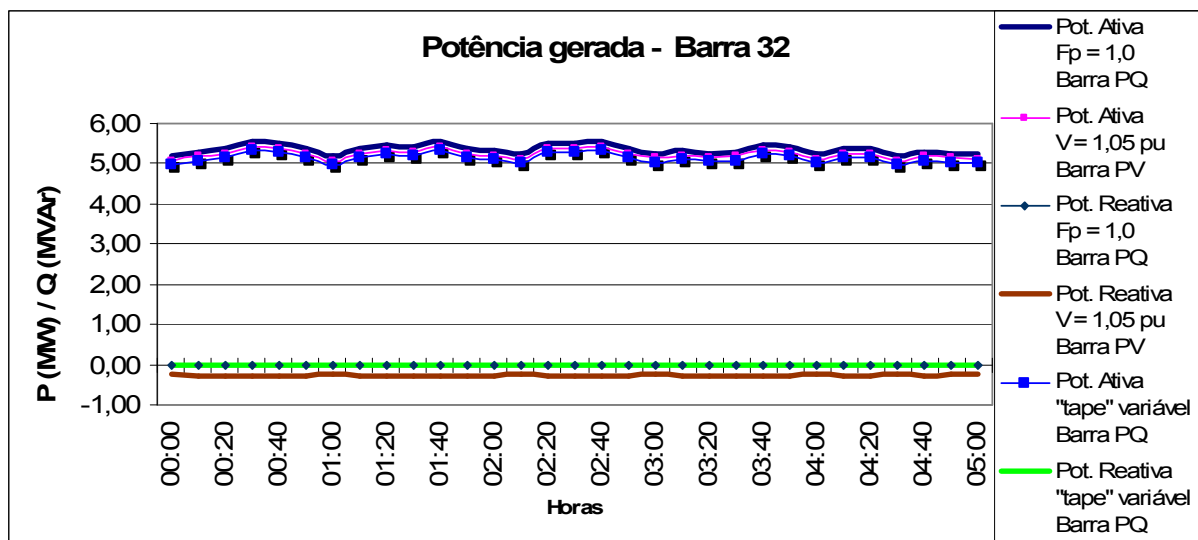


Figura 4.81 – Potências geradas na barra 32 – Carga Leve - 2° Semestre

Os valores obtidos na curva acima mostram que as potências ativas geradas são praticamente as mesmas nas três simulações, conforme mostra a figura 4.82.

Para as potências reativas, é observada uma pequena variação apenas no modelo simulado com a barra do tipo PV.

As curvas de potência ativa mostram uma pequena variação entre as simulações, como também é observado nas potências reativas, mostrando uma variação de

quase 1,0 MVA<sub>r</sub> entre as simulações com a barra do tipo PQ e a simulação com a barra do tipo PV.

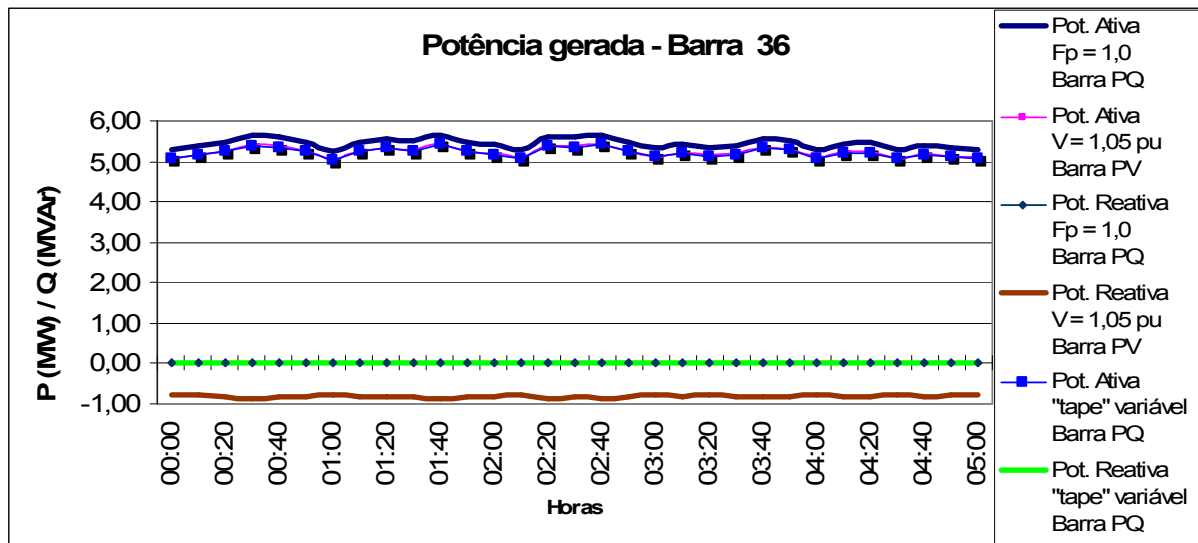


Figura 4.82 – Potências geradas na barra 36 – Carga Leve - 2<sup>o</sup> Semestre

As curvas obtidas na figura 4.83 mostram que os resultados das potências ativas são elevados em relação ao primeiro semestre, como é observado nos modelos utilizando a máquina de indução.

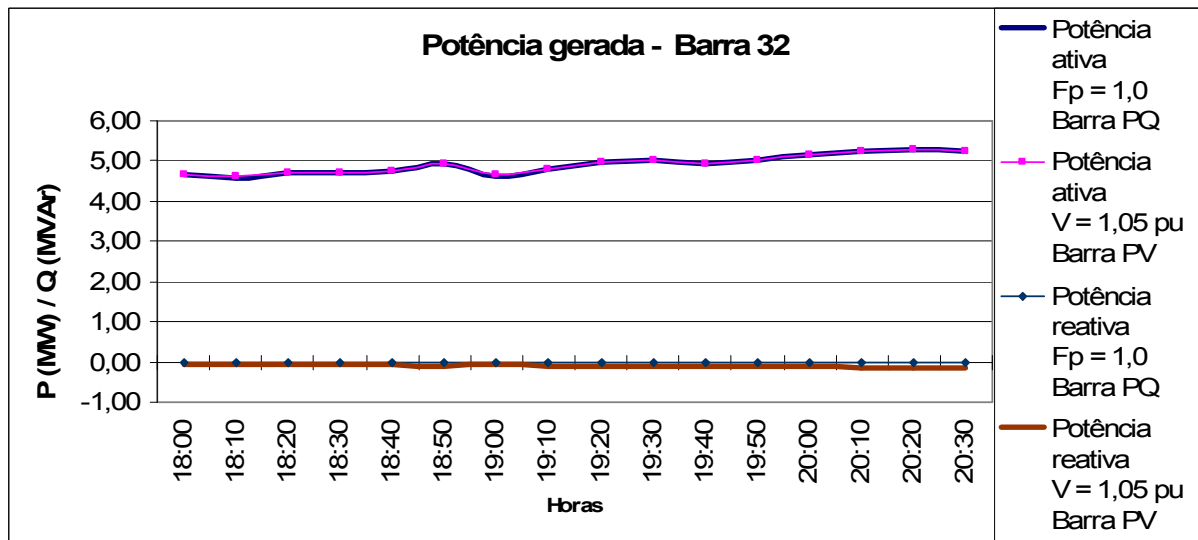


Figura 4.83 – Potências geradas na barra 32 – Carga Pesada - 2<sup>o</sup> Semestre

Como no horário de carga leve, as potências ativas estão muito próximas, mostrando que praticamente não há variações. Entretanto, para as potências reativas, há uma pequena variação para a correção da tensão em 1,05 pu na simulação com a barra do tipo PV.

A figura 4.84 mostra que houve a injeção de potência reativa para garantir as tensões em 1,05 pu. A injeção de reativos ocorre devido às tensões na barra N<sup>o</sup> 36 serem menores em relação às tensões da barra N<sup>o</sup> 32, mostrando assim, que as tensões estão abaixo de 1,05 pu na simulação com a barra do tipo PQ.

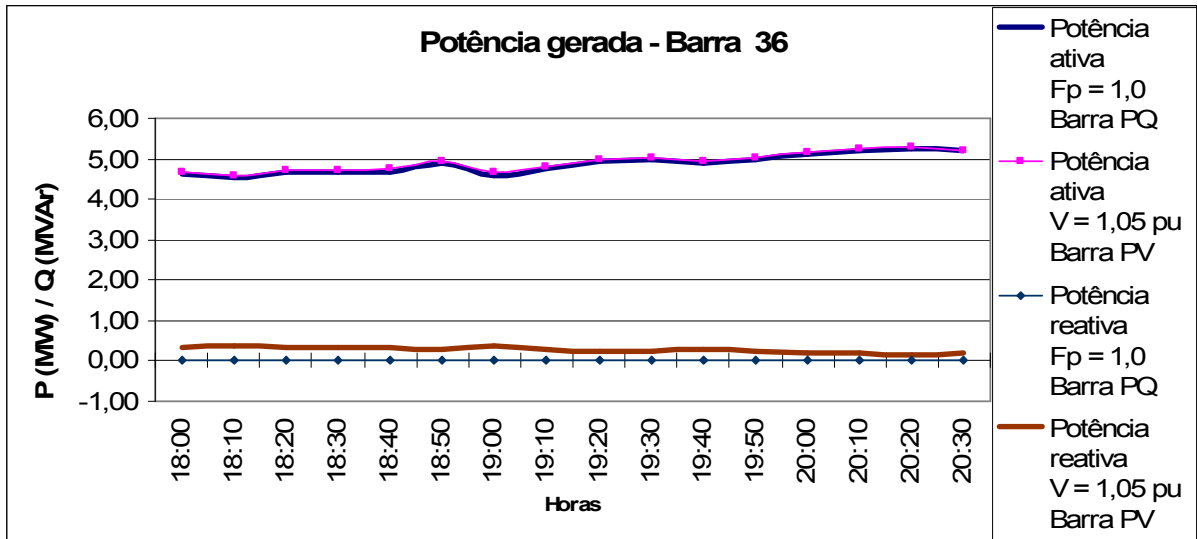


Figura 4.84 – Potências geradas na barra 36 – Carga Pesada - 2<sup>o</sup> Semestre

#### 4.7.2.2.2 MAGNITUDE DAS TENSÕES

As curvas da figura 4.85 mostram a magnitude das tensões para as três simulações.

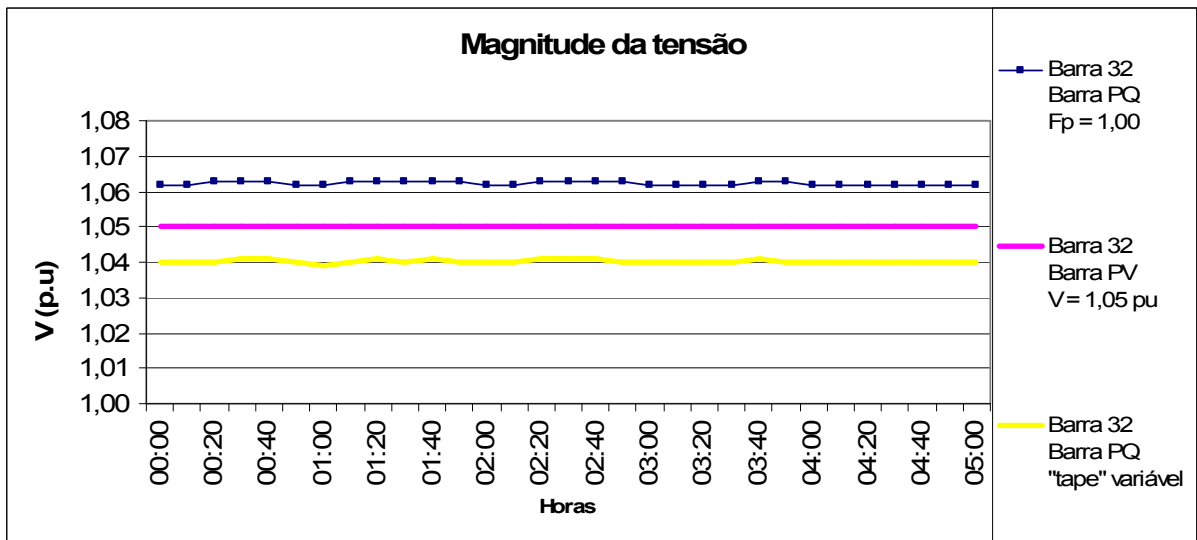


Figura 4.85 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Leve - 2<sup>o</sup> Semestre

Comparando com o primeiro semestre, mostrado na figura 4.71, a magnitude das tensões no segundo semestre estão elevadas em relação ao primeiro semestre. Também é observado que a simulação com a barra do tipo PQ está com tensões mais elevada em relação à simulação com a barra do tipo PV, havendo a

necessidade de absorver reativos do sistema elétrico para a redução das tensões, conforme figura 4.81. Entretanto, quando é implementado um transformador com o “tape” variável, as tensões da simulação utilizando a barra do tipo PQ ficam abaixo de 1,05 pu, com o fator de potência unitário.

As curvas da figura 4.86 mostram a magnitude das tensões para o segundo semestre, nas quais, as conclusões feitas para as curvas da figura 4.85 são também aplicadas a esta situação.

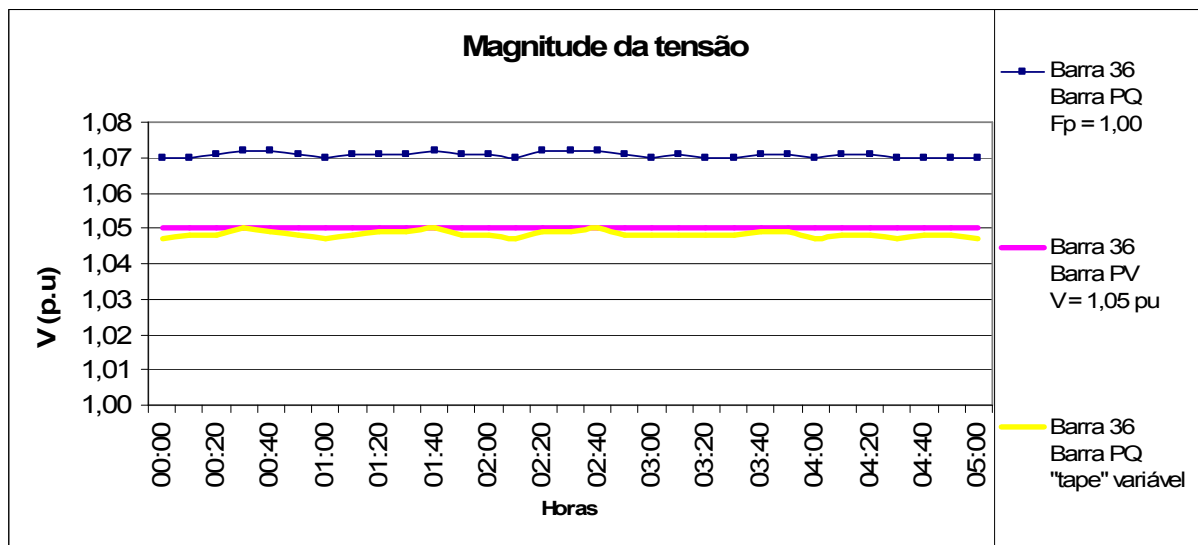


Figura 4.86 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Leve - 2° Semestre

As curvas da figura 4.87 mostram o comportamento das tensões na barra N<sup>o</sup> 32.

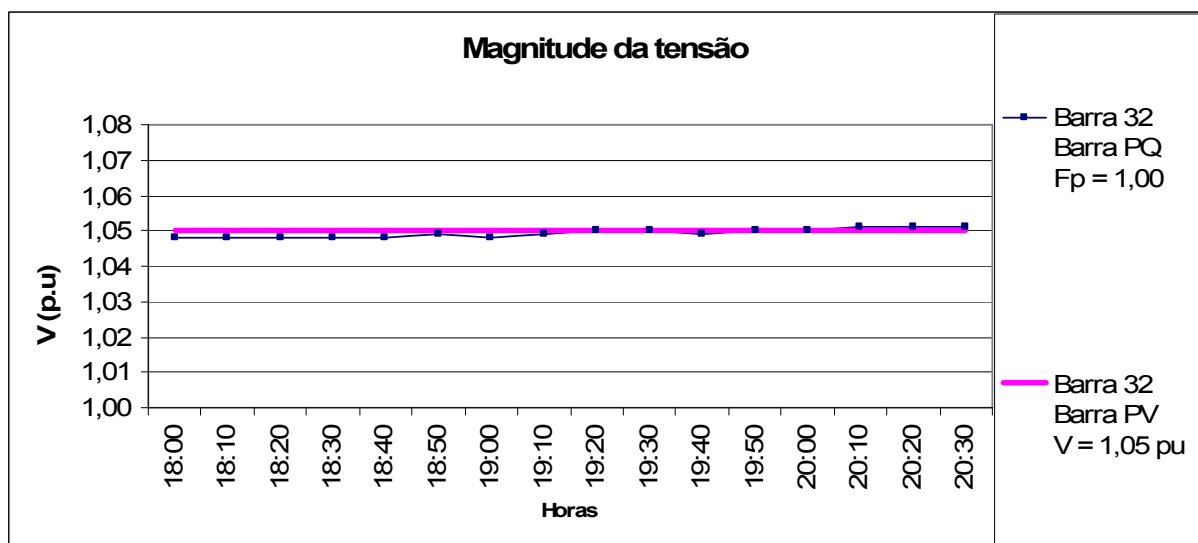


Figura 4.87 – Magnitude da tensão na Barra 32 – Carga Pesada - 2° Semestre

É observado que a magnitude das tensões são praticamente as mesmas para as duas simulações, tanto para barra do tipo PQ, como para barra do tipo PV, justificando pequenas variações observadas nas potências ativas e reativas, conforme figura 4.83.

Assim, para este período não foi necessário a implementação do transformador com o “tape” regulável.

As curvas da figura 4.88 mostram o comportamento das tensões na barra de geração eólico-elétrica.

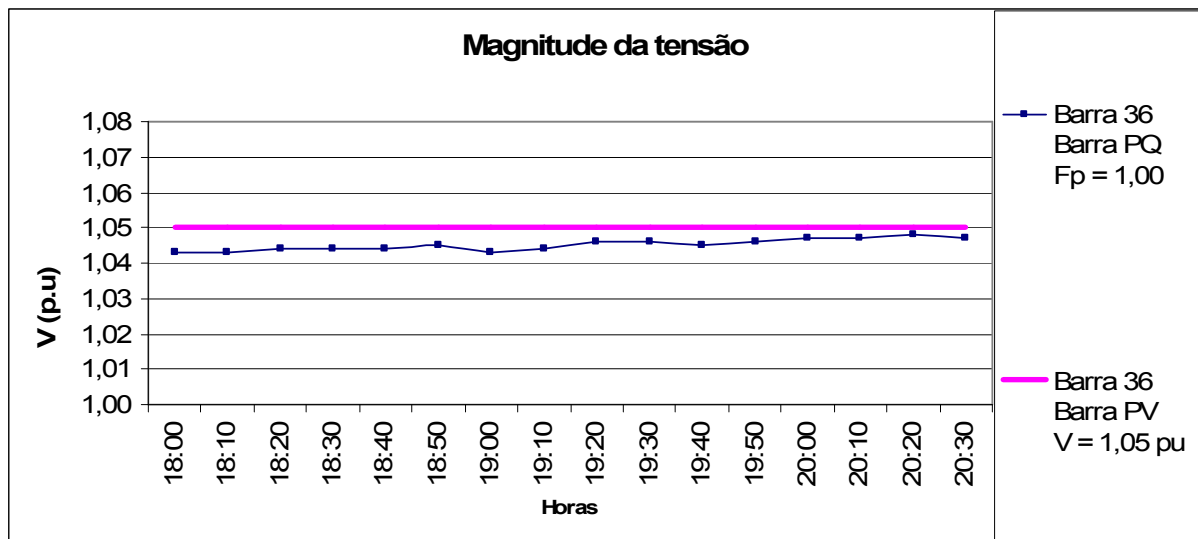


Figura 4.88 – Magnitude da tensão na Barra 36 – Carga Pesada - 2° Semestre

É observado que as tensões no horário de carga pesada são menores, em relação ao horário de carga leve, como também é observado que houve a injeção de reativos no sistema elétrico, elevando a magnitude das tensões, conforme figura 4.84.

#### 4.7.2.2.3 PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO

As curvas da figura 4.89 mostram as perdas ativas do sistema elétrico no horário de carga leve, no qual pode ser notado que as perdas ativas são praticamente as mesmas, para as três simulações com a geração eólico-elétrica.



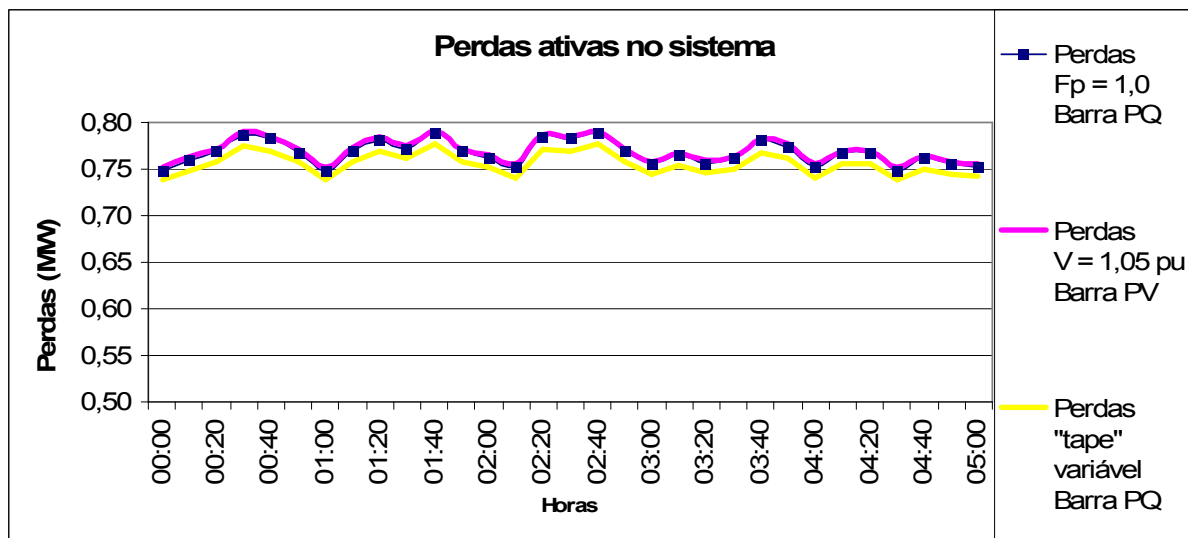


Figura 4.89 – Perdas ativas do sistema – Carga Leve - 2° Semestre

Os resultados das perdas reativas mostradas na figura 4.89, no horário de carga leve, são similares aos resultados apresentados para as curvas da figura 4.90, no horário de carga pesada, pois a pequena variação na potência reativa, como nas tensões fazem com que os resultados obtidos sejam praticamente os mesmos.

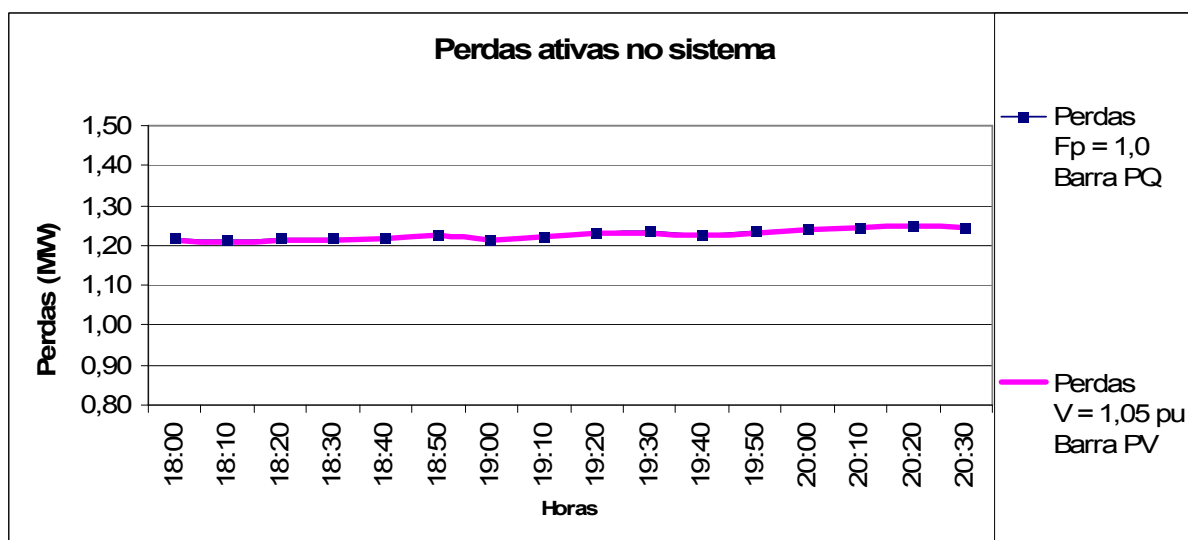


Figura 4.90 – Perdas ativas do sistema – Carga Pesada - 2° Semestre

As curvas da figura 4.91 mostram as perdas reativas do sistema elétrico, no horário de carga leve.

É observado que as perdas são praticamente as mesmas para ambas as simulações, tanto para as simulações com a barra do tipo PQ, quanto para a simulação com a barra do tipo PV.

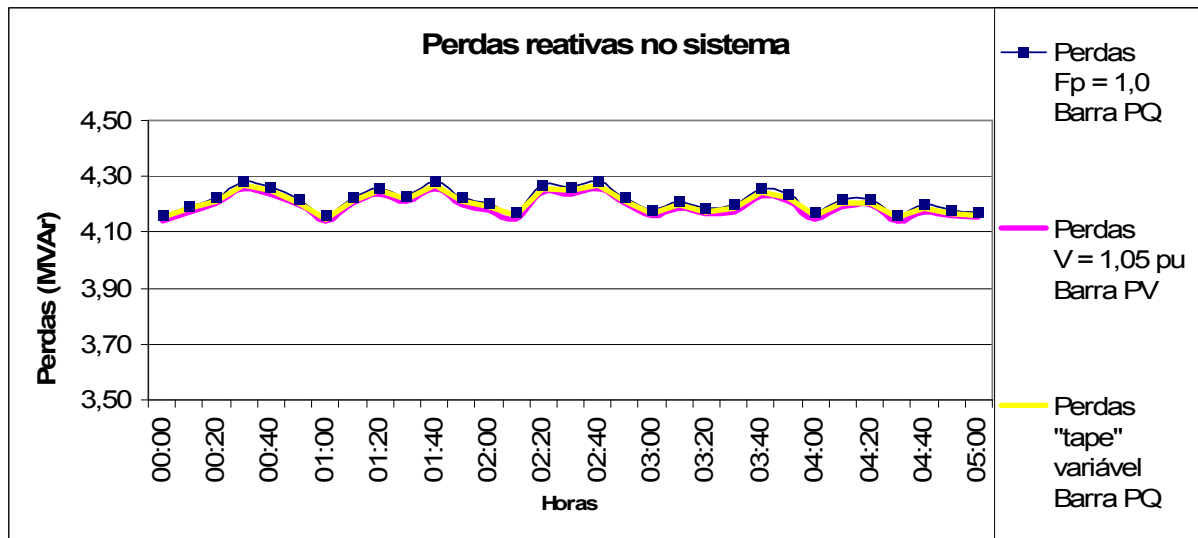


Figura 4.91 – Perdas reativas do sistema – Carga Leve - 2° Semestre

As curvas da figuras 4.92 mostram que não há diferenças visíveis entre as duas simulações, tanto utilizando a barra do tipo PQ, como a barra do tipo PV.

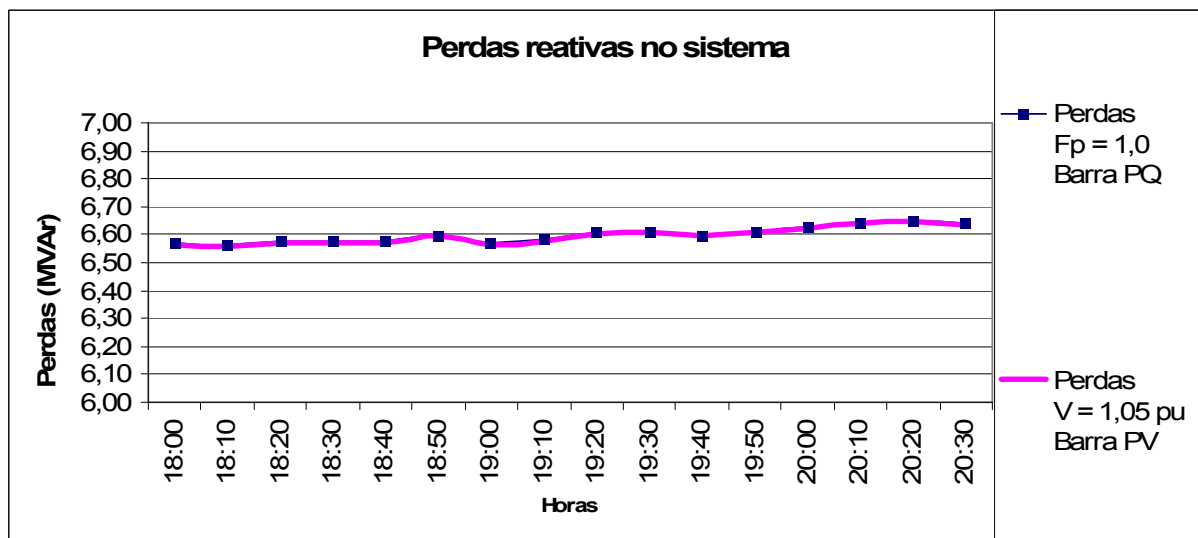


Figura 4.92 – Perdas reativas do sistema – Carga Pesada - 2° Semestre

#### 4.7.2.2.4 FAIXA DE OPERAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

Como no primeiro semestre, o gerador síncrono deve operar dentro da faixa do fator de potência estabelecido pelo fabricante. Pois sempre que este limite for violado a tensão irá variar como em uma barra do tipo PQ.

Como no segundo semestre os ventos são maiores, as potências ativas também são maiores. Conseqüentemente, a faixa de operação do gerador síncrono é maior, como é mostrado nas figuras abaixo.

Assim como no primeiro semestre, para que o gerador síncrono opere com a tensão especificada em 1,05 pu, esta máquina deve estar dentro da faixa de operação de reativos, conforme figura 4.93. A potência reativa calculada do fluxo de carga mostra que neste período não foram ultrapassados os limites de reativos da máquina.

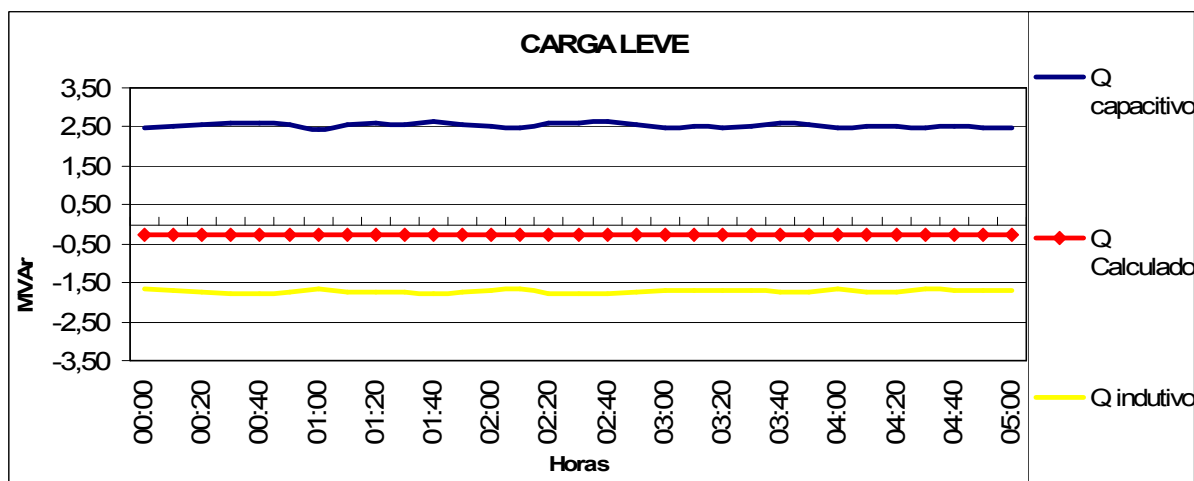


Figura 4.93 – Faixa de operação de reativos – 2º Semestre – Carga Leve

As mesmas observações consideradas para as curvas da figura 4.93 são também aplicadas às curvas no horário de carga pesada, conforme figura 4.94.

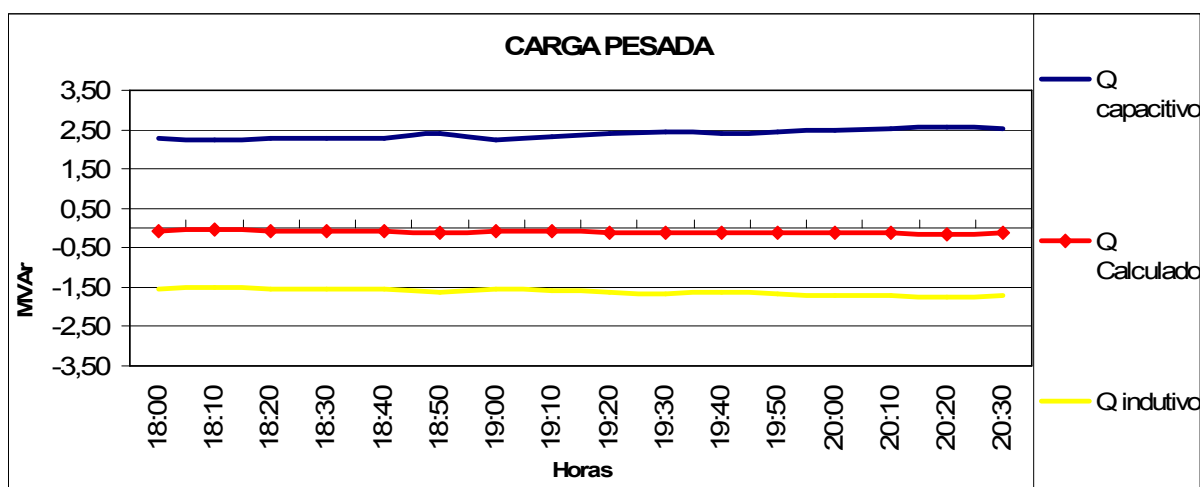


Figura 4.94 – Faixa de operação de reativos – 2º Semestre – Carga Pesada

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSÕES**

Neste trabalho foram modeladas e implementadas metodologias de análise de sistemas de potência, direcionadas a sistemas de geração distribuída. Foram apresentados e validados dois modelos matemáticos de geradores de indução e um modelo matemático do gerador síncrono, nos quais, o desenvolvimento destes modelos representa a geração eólico-elétrica em regime permanente.

A proposta deste trabalho foi mostrar como o sistema de distribuição se comporta em regime permanente, com variações das potências ativas e reativas dos geradores eólico-elétricos, em função da velocidade dos ventos. Assim, foi visto o comportamento das curvas, as tensões nas barras onde estão localizados os parques eólicos, as perdas no sistema com geração e sem geração eólico-elétrica, obtendo conclusões sobre o tipo de gerador, o tipo de carga e o comportamento do sistema elétrico.

Para cada situação proposta, foram mostradas as curvas, nas quais podem ser observadas as seguintes conclusões:

- ✓ É observado que a velocidade dos ventos no horário de carga leve é maior em relação ao horário de carga pesada. Logo, as potências ativas e reativas geradas são maiores nestes horários, independente do modelo empregado;
- ✓ Também é observado que a velocidade dos ventos, no segundo semestre do ano, é maior em relação ao primeiro semestre do ano. Então, as potências ativas e reativas geradas são maiores neste período, independente do modelo empregado;
- ✓ No horário de carga pesada, as tensões são menores em relação ao horário de carga leve. Conseqüentemente, as perdas do sistema elétrico são maiores no horário de carga pesada;

- ✓ O modelo PQ da máquina de indução, apesar de ser um modelo simplificado, apresentou bons resultados, como:
  - ⇒ Magnitude da tensão próxima a 1,00 pu,
  - ⇒ Potência ativas geradas na faixa de 4,00 à 6,00 MW,
  - ⇒ Perdas do sistema próximas à situação do caso base.
  
- ✓ O modelo PQs foi desenvolvido a partir do circuito equivalente completo da máquina de indução, na qual os cálculos levam em consideração o efeito do escorregamento. Seus resultados também ficaram na faixa esperada, como no modelo PQ.
  
- ✓ Comparativamente o modelo PQs mostrou diferenças em relação ao modelo PQ. As variações são as seguintes:
  - ⇒ Potências ativas e reativas da máquina – Foi observado uma diferença entre os dois modelos de 0,3 MW a menos para o modelo PQs e 0,3 MVAR a mais para o modelo PQs, considerando uma potência nominal da usina eólio-elétrica de 12 MW, equivalente a 2,5 %.

Do ponto de vista da engenharia, tanto para a previsão e da operação do sistema elétrico, quanto para o dimensionamento do sistema elétrico, essas variações são significativas, pois os resultados retratam um sistema com uma geração eólio-elétrica de apenas 12 MW, enquanto a matriz energética é constituída por 95 GW. Os valores obtidos das variações dos modelos PQ e PQs tornam-se grandes quando a geração tende a aumentar, mostrando assim a sua relevância.

- ✓ O modelo simplificado do gerador síncrono apresentou bons resultados, mostrando a viabilidade do uso de simulações de usinas eólio-elétricas utilizando a barras do tipo PQ, simulando uma barra com o controle do fator de potência. Foi mostrada a viabilidade da operação de uma máquina síncrona, implementada em uma barra do tipo PQ com um controle do “tape” para regulação de tensão, sem o comprometimento do fator de potência unitário. Em todas as simulações com a máquina síncrona os valores das

tensões ficaram dentro da faixa esperada, como também as potências ativas, potências reativas e as perdas do sistema elétrico.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No sentido de dar continuidade e possibilitar a melhoria dos trabalhos desenvolvidos a partir desta dissertação, são apresentadas as seguintes sugestões para os trabalhos futuros:

- ✓ Pesquisar novos modelamentos da máquina de indução, aplicados à geração eólico-elétrica, implementando um modelo da máquina de indução com dupla alimentação para o cálculo das potências ativas e reativas;
- ✓ Pesquisar novos modelamentos da máquina síncrona, aplicados à geração eólico-elétrica, implementando um modelo da máquina síncrona com magneto permanente para o cálculo das potências ativas e reativas;
- ✓ Implementação do controle do ângulo de pás, complementando modelos de geradores eólico-elétricos;
- ✓ Implementação de novos modelos de geradores eólico-elétricos para aplicação em fluxo de carga trifásico;
- ✓ Projetar e implementar novos modelos de fontes não convencionais de geração de energia elétrica (fotovoltaica, biomassa, sistemas híbridos), para aplicação em programas de fluxo de carga em regime permanente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AGOSTINI, M. N., **“Nova Filosofia para o Projeto de Softwares para Sistemas de Energia Elétrica Usando Modelagem Orientada a Objetos”**. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- AKHMATOV, V., **“Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power”**, Tese de doutorado, Technical University of Denmark, 2003.
- AMARANTE, O.A.C., **“Estado do Ceará: Atlas do Potencial Eólico, Ceará, Brasil”**, 2001.
- AMERONGEN, ROBERT A. M. VAN, **“A General – Purpose of the Fast Decoupled Load Flow”**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- BORGES, CARMEN L. T., COUTINHO, ÁLVARO L. G. A., FALCÃO, DJALMA M., **“Solução do Fluxo de Potência em Ambiente Vetorial Usando o Método do Gradiente Bi-Conjugado Estabilizado”**, XI Congresso Brasileiro de Automática - Anais vol 1, São Paulo, 02-06, Set. 1996.
- CAVALCANTI, J. A., MELO, P. A., PINTO, M. S. L., BEZERRA, P., **“Planejamento da Expansão de Redes Elétricas com Alto Grau de Penetração de Energia Eólica”**, VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, Brasil, Out. 2005.
- CRESESB, **“Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito”**, Energia Eólica: Princípios e Aplicações, CEPEL, Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acessado em: 29 janeiro de 2003.

CIGRÉ TASK FORCE 38.01.10, “**Modeling new forms of generation and storage**”, Relatório Técnico, 2001.

CIGRÉ Working group 37.23, “**Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system**”, Relatório Técnico, 1998.

ELETROBRÁS, Disponível em: <[www.eletrabras.gov.br](http://www.eletrabras.gov.br)>

EÓLICA, Disponível em: <[www.eolica.com.br](http://www.eolica.com.br)>

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION, “**Record Growth for Global Wind Power in 2002**”, Relatório Técnico, European Wind Energy Association, 2003.

FEIJÓO, A. E., CIDRÁS, J., “**Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis**”, Proceedings of the IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, nº 1, pp. 110-115, 2000.

GALLARDO, J. A. M., “**Impacto de Geradores Síncronos no Desempenho de Regime Permanente de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**”, Campinas. Dissertação de Mestrado. DSCE – FEE – UNICAMP, 2005.

GIPE, P., “**Wind Energy Comes of Age**”, Estados Unidos da América, John Wiles & Sons, 1995.

HUBBI, W., “**Effects of Neglecting Resistance in XB and BX Load-Flow Methods**”, IEEE Proceedings C, vol. 138, nº 5, pp.452-456, 1991.

HURLEY, J.D., BIZE, L.N. E MUMMERT, C.R., “**The adverse effects of excitation system VAR and power factor controllers**”, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 14, Issue: 4, Pages: 1636 – 1645, Dec. 1999.

JENKINS, N., ALLAN, R., CROSSLEY, P., KIRSCHEN, D. E STRBAC, G., “**Embedded generation**”, Ed. The Institution of Electrical Engineer, London, United Kindgdom, 2000.



JOHNSON, G. L., **“Wind Energy Systems”**, Electronic Edition, Manhattan, KS, USA, 2001.

MME, **Ministério das Minas e Energia**, Disponível em: <[www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)>

MONTICELLI, ALCIR JOSÉ, **“Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”**, Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1983.

MONTICELLI, A. J. E A.GARCIA, **“Introdução a sistemas de energia Elétrica”**, Editora da Unicamp, São Paulo, Brasil, 2000.

MOURA, A. P., LIMA, S. P., BASTOS, M. S. S., **“Modified Newton-Raphson Method with Constant Tangents and with Wind Farm Model”**, XXVI CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Guarapari – ES, Brasil, Out. 2005.

MOURA, A. P., FILGUEIRAS, A. R., BASTOS, M. S. S., LIMA, S. P., **“Qualidade de Tensão em uma Subestação Conectada com um Parque Eólico”**, VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Belém – PA, Brasil, Ago. 2005.

RANGEL, R. D., FERRAZ, J. C. R., GOMES JR, S., HENRIQUE, R. M., **“Modelagem de Geração Eólica em Programas de Fluxo de Potência em Análise de Estabilidade Eletromecânica”**, VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, Brasil, Out. 2005.

SALLES, M. B. C., FREITAS W., MORELATO, A., **“Análise dinâmica de geradores eólicos conectados diretamente em sistemas de distribuição”**, Fifth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, São Pedro, 2003.

STOTT, B., ALSAÇ O., **“Fast Decoupled Load Flow”**. In.: IEEE Transactions on Power Applications and Systems, New York. P. 859-869., 1974

TAYLOR, C. W., PRICE, W. W., ROGERS, G. J., SRINIVASAN, K., CONCORDIALIA, C., PAL, M. K., BESS, K. C., KUNDER, P., AGRAWAL, B. L., LUINI, J. F., VAAHEDI, E., JOHNSON, B, K., **“Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No 3, Aug. 1995

WOBLEN WINDPOWER, Disponível em: <[www.wobben.com.br](http://www.wobben.com.br)>

## BIBLIOGRAFIA

- AGOSTINI, M. N., DECKER, I. C., SILVA, A. S., **“Desenvolvimento e Implementação de uma Base Computacional Orientada a Objetos para Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica”**. CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA (13.: Set: Florianópolis, SC). Anais. Florianópolis. P. 1850-1856., Set. 2000.
- ALAN, R. N., ARRUDA, C., **“Transformers and MVAR Violations in the Fast Decoupled Load Flow”**, Proceedings of the IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 101, pp. 3328-3332, 1982.
- ARAUJO, L. R., PEREIRA, J. L. R., **“Solução de Redes Elétricas de Grande Porte, Usando Programação Orientada a Objetos”**. CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA (13.: Set : Florianópolis, SC). Anais. Florianópolis. P. 604-609, Set. 2000.
- ARAUJO, L. R., GARCIA, P. A. N., PEREIRA, J. L. R., et. Al, **“Modelagem Orientada a Objetos Aplicada na Solução de Programas de Distribuição”**. CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, Natal, Set. 2002.
- BARACHO, FRANCISCO RICARDO A. C., **“Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência”**, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 1992.
- BECKER, D., FALK, H., GILLERMAN, J., et al., **“Standards-Based Approach Integrates Utility Applications”**. IEEE Computer Applications in Power, New York, v. 13, n. 4, p. 13-20. Oct. 2000.
- BILLINTON, R., SACHDEVA, S. S., **“Power Flow Solution with Optimal Reactive Flow”**, Archiv fur Elektrotechnik, vol. 48, no 4, 1972.

- CARPENTIER, J. M., “**Application of Newton’s Methods to Load Flow Problems**”, Power Systems Computer Conference, London, 1963.
- CHANG, S. K., BRANDWAJN, V., “**Adjusted Solutions in fast Decoupled Load Flow**”, Proceedings of the IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, nº 2, pp. 726-733, 1982.
- DORNELLAS, CARLOS R. R.; FALCÃO, DJALMA M.; BOMFIM, ANTÔNIO L. B., “**Otimização do Despacho de Reativos Utilizando Algoritmos Genético**”, XI Congresso Brasileiro de Automática - Anais vol 1, São Paulo, 02-06 Set. 1996.
- ELGERD, OLLE INGERMAR – “**Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**”, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1976.
- EL-SAKED, M. Z., DESSOUKY, M. M., MAHMOUD, G. A., RASHED, W.I., “**Load Reprerentation for Steady-state Voltage Stability Studies**”, Egypt, Suez Canal University, Electrical Power Systems Research 43 p187-195, 1997.
- FINARDI E. C., “**Planejamento da Operação Hidrotérmica Utilizando Processamento de Alto Desempenho**”, Florianópolis. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, UFSC 1999.
- FOLEY, M., BOSE, A., “**Object-Oriented Online Network Analysis**”, IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 10, n. 1, p. 125-132, 1995.
- FONSECA, L. G. S., DECKER, I. C., “**Iterative Algorithm for Critical Energy Determination in Transient Stability of Power System, Proceedings of the IFAC Symposium Planning & Operation in Electric Energy Systems**”, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, pp. 483 – 489, 1985.
- IBA, KENJI – “**Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm**”, IEEE Trans. on Power Systems, pp. 685-692, vol. 9, no. 02, May 1994.

- LA SCALA, M., et al., **“A Qualitative Approach to the Transient Stability Analysis”**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, no 4, pp. 1996-2002, 1996.
- LOSI, A., RUSSO, M., **“An Object Oriented Approach to Load Flow in Distribution Systems”**, In: 2000 IEEE PES SUMMER MEETING (July : Seattle). Proceedings. Seattle, 2000.
- MANZONI, A., SILVA, A. S., DECKER, I. C., **“Power Systems Dynamics Simulation Using Object-Oriented Programming”**, IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 14, n. 1 (Feb.), p. 249-255, 1999.
- MONTICELLI, A., GARCIA, A., SAAVEDRA, O. R., **“Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testing”**, Proceedings of the IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, n° 4, pp. 1425-1431, 1990.
- NEYER, A. F., WU, F. F., IMHOF, K., **“Object-Oriented Programming for Flexible Software: Example of a Load Flow”**, IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 5, n. 3 (Aug.), p. 689-696, 1990.
- PANDIT, S., SOMAN, S. A., KHAPARDE, S. A., **“Design of Generic Direct Sparse Linear System Solver in C++ for Power System Analysis”**, IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 16, n. 4 (Nov.), p. 647-652, 2001.
- ROLIN, JACQUELINE G., GIACOMELLI, JOSÉ E., MACHADO, LUIZ J. B., **“Validação de um Sistema Especialista para Controle de Tensão Através de um Simulador de Sistemas de Potência”**, Anais do 3<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Vitória – ES, Set. 1997.
- SALLES, A. C. N., **“Metodologias de Análise de Risco para Avaliação Financeira de Projetos de Geração Eólica”**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

- SALLES, M. B. C., FREITAS, W., MORELATO, A., **“Análise dinâmica de geradores eólicos conectados diretamente em sistemas de distribuição”**, Fifth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, São Pedro, 2003.
- SEINFRA, **“Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará”**, Fortaleza: SEINFRA, 2000.
- SILVA, S.R., PINHEIRO, E. L. R., CARDOSO, E. N., SILVA, K. F., SANTANA, E. C., CHECCUCCI, G. S., FRANCO, J. J. J. P., BRITO, J. A. S., **“Análise da Integração de Usinas Eólicas na Rede Elétrica”**, II CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Salvador, BA, Brasil, Novembro, pp. 209-214, 2003.
- SILVA, T. M. V., **“Impacto de Usinas Eólio-Elétricas em um Sistema de Subtransmissão-Distribuição em Regime Permanente”**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2003.
- STOTT, B., **“Decoupled Newton Load Flow”**, IEEE Trans. on Power App. and Systems, pp. 1955-1959, vol. 91, Sept. /Oct., 1972.
- STOTT, B., ALSAC, O., **“Optimal Load Flow With Steady State Security”**, IEEE Trans. On Power App. and Systems, pp. 745-751, vol. 93, May, 1974.
- STROUSTRUP, B., **“The C++ Programming Language”**. 3. ed. Reading: Addison-Wesley, 1997.
- TERRA, L. D. B., **“A Global Methodology for Reactive Power Management and Voltage Control in Power Systems”**, Tese de Doutorado, Imperial Colleye, London University, Aug. 1989.

VINCENS, R. A. L. **“Fluxo de Potência Otimizado, Usando o Modelo Desacoplado, Programação Não-Linear e Técnicas de Esparsidade”**, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 1979.

ZOLLENKOPF, K., **“Bi-Factorization - Basic Computational Algorithm and Programming Techniques”**. In: Large Sparse Sets of Linear Equations, edited by J. K. Reid, Academic Press., 1971.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)