



Universidade Federal de Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia

Departamento de Energia Elétrica

Matheus Silva Andrade

**METODOLOGIA ALTERNATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA
CONTINUADO PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO
EÓLICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Juiz de Fora

2017

Matheus Silva Andrade

**METODOLOGIA ALTERNATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA
CONTINUADO PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO
EÓLICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: João Alberto Passos Filho

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Andrade, Matheus S..

METODOLOGIA ALTERNATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA / Matheus Silva Andrade. – 2017.

84 f. : il.

Orientador: João Alberto Passos Filho

Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Departamento de Energia Elétrica, 2017.

1. Fluxo de potência. 2. Inserção de Geração Eólica. I. Passos Filho, João, orient. III. Título.

Matheus Silva Andrade

**METODOLOGIA ALTERNATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA
CONTINUADO PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO
EÓLICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 8 de dezembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Ricardo Mota Henriques, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Eng^a Mariana Brinati Altomar, M.Sc
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde, força e dedicação para superar minhas dificuldades.

A todos os meus familiares que sempre me incentivaram e apoiaram ao longo de todo o curso. Em especial aos meus pais, Silmara e Marcelo, que não mediram esforços me ajudando para que eu pudesse concluir esta fase da vida.

Ao professor e orientador João Alberto Passos Filho pelo incentivo e dedicação, essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos do curso de graduação pelas conversas e trocas de conhecimento.

Aos professores da Faculdade de Engenharia que contribuíram para minha formação acadêmica

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.

*"Corte sua própria lenha. Assim
ela aquecerá você duas vezes"*

Henry Ford

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia capaz de avaliar as consequências da conexão de sistemas de geração eólica num sistema de potência já existente. Realiza simulações com penetração gradual de geração de potência ativa em cada uma das barras do sistema, evidenciando assim, as melhores opções para a conexão do novo sistema de geração com a rede, levando em conta, principalmente, redução de perdas, estabilidade na tensão e limites de geração de potência reativa. Neste trabalho as simulações foram realizadas num sistema teste de confiabilidade IEEE 24 barras, podendo ser utilizado em sistemas de potência ainda maiores.

A metodologia foi dividida em três casos, diferenciando-se apenas em como é feito o balanço entre carga e geração dos geradores existentes. Gráficos de tensão nas barras e perdas totais do sistema são gerados a fim de evidenciar os pontos onde o sistema opera em condição de subtensão, sobretensão e as condições onde apresenta perdas menores e maiores que o caso base.

A metodologia proposta é baseada nos conceitos de fluxo de potência continuado e foi inteiramente desenvolvida na linguagem de programação Python.

Palavras-chave: Geração Eólica. Penetração de geração no sistema elétrico. Fluxo de potência não linear. Fluxo de potência continuado.

ABSTRACT

This paper introduces a methodology capable of evaluating the consequence of connecting wind power generation systems to an already existing power system. It performs simulations with gradual penetration of active power generation in each of the system buses, thus showing the best options for the connection of the new generation system with the network. Considering, mainly, reduction of losses, stability in voltage and reactive power generation limits. In this work, the simulations were performed in the IEEE 24 bus reliability test system and can be used in even larger power systems.

The methodology was divided in three cases. Differences between them are only in how the additional power injected will be deducted from the existing generators. Bus voltage and total losses graphs are shown in order to indicate those points where the system operates in under and overvoltage conditions and also conditions where it presents smaller and larger losses comparing with the base case.

This methodology is based on the concepts of Continuation power flow and was fully developed in the Python programming language.

Key-words: Wind power generation. Nonlinear power flow. Power flow. Continuation power flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Configuração com gerador de indução diretamente ligado à rede. Fonte: (RÜNCOS et al., 2000) | 19 |
| Figura 2 – Configuração com gerador síncrono diretamente ligado à rede. Fonte: (RÜNCOS et al., 2000) | 20 |
| Figura 3 – Configuração com gerador assíncrono duplamente alimentado. Fonte: (RÜNCOS et al., 2000) | 21 |
| Figura 4 – Processo de cálculo do fluxo de potência continuado | 29 |
| Figura 5 – Fluxograma do Fluxo de Potência Continuado | 34 |
| Figura 6 – Sistema teste IEEE 24 Barras | 36 |
| Figura 7 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 6 | 41 |
| Figura 8 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 6 | 41 |
| Figura 9 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 21 | 42 |
| Figura 10 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 21 | 42 |
| Figura 11 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 10 | 44 |
| Figura 12 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 10 | 44 |
| Figura 13 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 20 | 45 |
| Figura 14 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 20 | 45 |
| Figura 15 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 10 | 48 |
| Figura 16 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 10 | 48 |
| Figura 17 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 21 | 49 |
| Figura 18 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 21 | 49 |
| Figura 19 – Penetração de geração eólica na Barra 1 | 56 |
| Figura 20 – Penetração de geração eólica na Barra 2 | 56 |
| Figura 21 – Penetração de geração eólica na Barra 3 | 57 |
| Figura 22 – Penetração de geração eólica na Barra 4 | 57 |
| Figura 23 – Penetração de geração eólica na Barra 5 | 57 |
| Figura 24 – Penetração de geração eólica na Barra 6 | 58 |
| Figura 25 – Penetração de geração eólica na Barra 7 | 58 |
| Figura 26 – Penetração de geração eólica na Barra 8 | 58 |
| Figura 27 – Penetração de geração eólica na Barra 9 | 59 |
| Figura 28 – Penetração de geração eólica na Barra 10 | 59 |
| Figura 29 – Penetração de geração eólica na Barra 11 | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Penetração de geração eólica na Barra 12 | 60 |
| Figura 31 – Penetração de geração eólica na Barra 14 | 60 |
| Figura 32 – Penetração de geração eólica na Barra 15 | 60 |
| Figura 33 – Penetração de geração eólica na Barra 16 | 61 |
| Figura 34 – Penetração de geração eólica na Barra 17 | 61 |
| Figura 35 – Penetração de geração eólica na Barra 18 | 61 |
| Figura 36 – Penetração de geração eólica na Barra 19 | 62 |
| Figura 37 – Penetração de geração eólica na Barra 20 | 62 |
| Figura 38 – Penetração de geração eólica na Barra 21 | 62 |
| Figura 39 – Penetração de geração eólica na Barra 22 | 63 |
| Figura 40 – Penetração de geração eólica na Barra 23 | 63 |
| Figura 41 – Penetração de geração eólica na Barra 24 | 63 |
| Figura 42 – Penetração de geração eólica na Barra 1 | 64 |
| Figura 43 – Penetração de geração eólica na Barra 2 | 64 |
| Figura 44 – Penetração de geração eólica na Barra 3 | 65 |
| Figura 45 – Penetração de geração eólica na Barra 4 | 65 |
| Figura 46 – Penetração de geração eólica na Barra 5 | 65 |
| Figura 47 – Penetração de geração eólica na Barra 6 | 66 |
| Figura 48 – Penetração de geração eólica na Barra 7 | 66 |
| Figura 49 – Penetração de geração eólica na Barra 8 | 66 |
| Figura 50 – Penetração de geração eólica na Barra 9 | 67 |
| Figura 51 – Penetração de geração eólica na Barra 10 | 67 |
| Figura 52 – Penetração de geração eólica na Barra 11 | 67 |
| Figura 53 – Penetração de geração eólica na Barra 12 | 68 |
| Figura 54 – Penetração de geração eólica na Barra 13 | 68 |
| Figura 55 – Penetração de geração eólica na Barra 14 | 68 |
| Figura 56 – Penetração de geração eólica na Barra 15 | 69 |
| Figura 57 – Penetração de geração eólica na Barra 16 | 69 |
| Figura 58 – Penetração de geração eólica na Barra 17 | 69 |
| Figura 59 – Penetração de geração eólica na Barra 18 | 70 |
| Figura 60 – Penetração de geração eólica na Barra 19 | 70 |
| Figura 61 – Penetração de geração eólica na Barra 20 | 70 |
| Figura 62 – Penetração de geração eólica na Barra 21 | 71 |
| Figura 63 – Penetração de geração eólica na Barra 22 | 71 |
| Figura 64 – Penetração de geração eólica na Barra 23 | 71 |
| Figura 65 – Penetração de geração eólica na Barra 24 | 72 |
| Figura 66 – Penetração de geração eólica na Barra 1 | 73 |
| Figura 67 – Penetração de geração eólica na Barra 2 | 73 |
| Figura 68 – Penetração de geração eólica na Barra 3 | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 69 – Penetração de geração eólica na Barra 4 | 74 |
| Figura 70 – Penetração de geração eólica na Barra 5 | 74 |
| Figura 71 – Penetração de geração eólica na Barra 6 | 75 |
| Figura 72 – Penetração de geração eólica na Barra 7 | 75 |
| Figura 73 – Penetração de geração eólica na Barra 8 | 75 |
| Figura 74 – Penetração de geração eólica na Barra 9 | 76 |
| Figura 75 – Penetração de geração eólica na Barra 10 | 76 |
| Figura 76 – Penetração de geração eólica na Barra 11 | 76 |
| Figura 77 – Penetração de geração eólica na Barra 12 | 77 |
| Figura 78 – Penetração de geração eólica na Barra 13 | 77 |
| Figura 79 – Penetração de geração eólica na Barra 14 | 77 |
| Figura 80 – Penetração de geração eólica na Barra 15 | 78 |
| Figura 81 – Penetração de geração eólica na Barra 16 | 78 |
| Figura 82 – Penetração de geração eólica na Barra 17 | 78 |
| Figura 83 – Penetração de geração eólica na Barra 18 | 79 |
| Figura 84 – Penetração de geração eólica na Barra 19 | 79 |
| Figura 85 – Penetração de geração eólica na Barra 20 | 79 |
| Figura 86 – Penetração de geração eólica na Barra 21 | 80 |
| Figura 87 – Penetração de geração eólica na Barra 22 | 80 |
| Figura 88 – Penetração de geração eólica na Barra 23 | 80 |
| Figura 89 – Penetração de geração eólica na Barra 24 | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Fluxo de Potência do caso base do sistema IEEE 24 barras | 38 |
| Tabela 2 – Penetração de Geração eólica, balanço realizado somente na barra <i>slack</i> . | 40 |
| Tabela 3 – Penetração de Geração eólica, distribuição pela geração do caso base. . | 43 |
| Tabela 4 – Penetração de Geração eólica, distribuição pela capacidade das maquinas | 47 |
| Tabela 5 – Penetração de Geração eólica na Barra 10, comparação dos métodos . | 51 |
| Tabela 6 – Penetração de Geração eólica na Barra 20, comparação dos métodos . | 51 |
| Tabela 7 – Penetração de Geração eólica na Barra 21, comparação dos métodos . | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| DFIG | Doubly Fed Induction Generator |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> - Ambiente de Desenvolvimento Integrado |
| CC | Corrente Contínua |
| CA | Corrente Alternada |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|---|
| \mathbf{P} | Vetor de potência ativa |
| \mathbf{Q} | Vetor de potência reativa |
| \mathbf{P}_l | Vetor de cargas ativas atuais |
| \mathbf{Q}_l | Vetor de cargas reativas atuais |
| \mathbf{P}_{l_0} | Vetor de cargas ativas iniciais |
| \mathbf{Q}_{l_0} | Vetor de cargas reativas iniciais |
| \mathbf{P}_g | Vetor de geração ativas atuais |
| \mathbf{P}_{g_0} | Vetor de geração reativas iniciais |
| $\Delta\mathbf{P}$ | Vetor dos resíduos de potência ativa |
| $\Delta\mathbf{Q}$ | Vetor dos resíduos de potência reativa |
| $\Delta\theta$ | Vetor de incremento de ângulos |
| $\Delta\mathbf{V}$ | Vetor de incremento de tensão |
| λ | Parâmetro de continuação de carga ou geração |
| \mathbf{F}_θ | Funções do ângulo |
| \mathbf{F}_V | Funções da Tensão |
| \mathbf{F}_λ | Função parâmetro de continuação |
| $\partial\theta$ | Derivada parcial do ângulo |
| $\partial\mathbf{V}$ | Derivada parcial da tensão |
| $\partial\lambda$ | Derivada parcial do parâmetro de continuação |
| k_G | Vetor do fator de participação dos geradores |
| \mathbf{ek} | Equação adicional, necessária no fluxo de potência continuado |
| Y_{bus} | Matriz de admitância nodal |
| JAC | Matriz Jacobiana |
| $nbar$ | Número de barras do sistem |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Considerações Iniciais | 15 |
| 1.2 | Objetivos | 16 |
| 1.3 | Estrutura do Trabalho | 16 |
| 2 | GERAÇÃO EÓLICA | 18 |
| 2.1 | Considerações Iniciais | 18 |
| 2.2 | Máquinas Comumente Utilizadas | 18 |
| 2.2.1 | Geradores Assíncronos | 18 |
| 2.2.2 | Geradores Síncronos | 19 |
| 2.2.3 | Geradores Assíncronos Duplamente Alimentado | 20 |
| 2.3 | Sistemas de Transmissão | 21 |
| 2.4 | Considerações Finais | 22 |
| 3 | FLUXO DE POTÊNCIA | 23 |
| 3.1 | Considerações Iniciais | 23 |
| 3.2 | Fluxo de Potência Não Linear | 23 |
| 3.2.1 | Considerações Iniciais | 23 |
| 3.2.2 | Formulação Matemática | 24 |
| 3.3 | Fluxo de Potência Continuado | 27 |
| 3.3.1 | Considerações Iniciais | 27 |
| 3.3.2 | Formulação Matemática | 28 |
| 3.4 | Considerações Finais | 31 |
| 4 | METODOLOGIA PROPOSTA | 32 |
| 4.1 | Considerações Iniciais | 32 |
| 4.2 | Inserção de Geração Eólica | 32 |
| 4.3 | Adaptação do Fluxo de Potência Continuado | 32 |
| 4.4 | Sistema Teste IEEE 24 Barras | 35 |
| 4.5 | Considerações Finais | 37 |
| 5 | RESULTADOS | 38 |
| 5.1 | Considerações Iniciais | 38 |
| 5.2 | Absorção de geração pela barra <i>slack</i> | 39 |
| 5.3 | Absorção de geração pelos geradores caso base | 42 |
| 5.4 | Absorção de geração pela capacidade dos geradores | 46 |
| 5.5 | Considerações Finais | 50 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | CONCLUSÕES | 52 |
| 6.1 | Considerações | 52 |
| 6.2 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 52 |
| | | |
| | REFERÊNCIAS | 54 |
| | | |
| | APÊNDICE A – Gráficos adicionais caso 1 | 56 |
| | | |
| | APÊNDICE B – Gráficos adicionais caso 2 | 64 |
| | | |
| | APÊNDICE C – Gráficos adicionais caso 3 | 73 |
| | | |
| | ANEXO A – Informações das Barras e Linhas do Sistema Teste IEEE 24 | 82 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os recursos energéticos são assuntos importantíssimos do mundo atual. A qualidade de vida da população está diretamente ligada à disponibilidade destes recursos. O alto padrão de vida da sociedade dos países desenvolvidos juntamente com melhoria da qualidade de vida dos países em desenvolvimento fazem com que a demanda energética venha sempre sendo aumentada (MARTINS; GUARNIERI & PEREIRA, 2008). Assim, a busca por recursos energéticos tem sido mais acirrada e com a escassez dos recursos provenientes do petróleo, a busca por novas tecnologias vêm crescendo cada vez mais. Neste contexto, entra a geração de energia eólica, que tem diversas vantagens sobre os outros tipos de geração, como: possuir um insumo gratuito e inesgotável, requerer pouca manutenção, é uma geração de baixo custo, não há emissão de gases de Efeito Estufa entre outros (SANTOS & TORRES, 2013).

Internacionalmente, países desenvolvidos tomam a frente no desenvolvimento de tecnologias para a geração de energia eólica. É por isto que países da Europa e da América do Norte já detêm uma enorme capacidade instalada de plantas eólicas. Na Europa a capacidade instalada já supera 154 *GW* (WINDEUROPE, 2017), este valor já é maior que a capacidade instalada total de geração no Brasil segundo valor divulgado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) (ONS, 2017).

A penetração da geração eólica em alguns países do mundo já chega a marca de 36,8% na Dinamarca e 27% no caso da Irlanda (WINDEUROPE, 2017). Valores de penetração altos como estes demandam grandes estudos quanto à regulação de tensão do sistema elétrico do país.

No Brasil, a matriz energética ainda é predominantemente hidráulica e térmica, mas uma diversificação significativa vêm ocorrendo nos últimos anos. No período anterior à década de 80, o Brasil tinha sua matriz resumida em geração hidráulica e térmica. A partir da década de 80 foi inserida ao sistema a geração nuclear, pouco significativa mas importante para diversificação (MME, 2017). A partir de 2008 começa uma inserção mais significativa de geração eólica no Brasil, deste ano até os anos atuais o crescimento ocorreu de maneira exponencial, fazendo com que a participação da geração eólica chegasse a 6,7% de capacidade instalada no país, chegando a 9611 *MW* no ano de 2016 (ONS, 2017). Resultados como estes são importantíssimos para o país, fazendo com que parte da demanda de energia seja suprida por uma fonte mais limpa e de custo de geração menor.

No estudo de um projeto para a implementação de um parque ou complexo eólico, deve-se considerar, não só o potencial eólico da região mas também, quando o sistema não é isolado, como a energia gerada será escoada do local da geração. Importante certificar

que o ponto de conexão do novo parque ou complexo será capaz de absorver a potência que será gerada, bem como escolher os melhores locais para realizar a conexão. A decisão da localização pode ser estudada, em um primeiro momento, por meio do cálculo de fluxos de potência para o sistema elétrico estudado. O cálculo de fluxo de potência do sistema pode ser realizado com a adição do parque ou complexo eólico em barras candidatas, prevendo assim, o comportamento do sistema elétrico em regime permanente para tal configuração (ALTOMAR & FILHO, 2015).

1.2 Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho pode ser divididos em três partes:

- Apresentar uma metodologia capaz de simular a penetração de geração eólica em um sistema elétrico de potência. Verificando o comportamento do sistema, em regime permanente, quando a nova geração eólica é incorporada em uma das barras do sistema.
- Apresentar três métodos distintos de se compensar a potência adicionada pelo parque eólico.
- Finalmente apresentar as melhores opções de conexão do parque eólico nas barras do sistema elétrico estudado.
- Fazer todo o desenvolvimento computacional na linguagem Python.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, brevemente descritos abaixo.

O Capítulo 2 traz uma breve introdução sobre energia eólica *onshore* e *offshore*, conceitos, máquinas normalmente utilizadas, tipos de parques eólicos e sistemas de transmissão utilizados. Uma idéia básica a fim de contextualizar os desafios da inserção de parques eólicos no sistema de transmissão.

O Capítulo 3 é responsável por introduzir os conceitos utilizados para o desenvolvimento do trabalho propriamente dito. Conceitos de fluxo de potência não linear e fluxo de potência continuado serão abordados em suas seções, a fim de introduzir as idéias que são a base para o algoritmo utilizado neste trabalho.

O Capítulo 4 descreve em detalhes a metodologia proposta e estudada neste trabalho.

No Capítulo 5 é mostrado os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta. Apresenta os prós e contras ao se escolher as diversas barras do sistema para a conexão

com a geração eólica. É mostrado principalmente as melhores decisões a serem tomadas se tratando da penetração de geração eólica.

O Capítulo 6 traz uma conclusão em relação à metodologia proposta e os resultados obtidos utilizando-a, bem como uma proposta de trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

O Apêndice A mostra mais informações do sistema teste de confiabilidade IEEE 24 Barras, utilizado neste trabalho. Mais especificamente, os dados das barras e das linhas do sistema.

Finalmente, o Anexo A traz resultados gráficos obtido nas simulações que não são tão pertinentes quanto aos expostos no Capítulo 5. O sistema teste em questão tem 24 Barras e nem todas essas barras apresentam resultados relevantes quando conectadas à geração eólica. Por esta razão, os resultados gráficos extras estão no Anexo A.

2 GERAÇÃO EÓLICA

2.1 Considerações Iniciais

De maneira simplificada, vento é o deslocamento da atmosfera em relação ao globo terrestre que está em constante rotação. Centenas de anos atrás, já se sabia que a diferença no aquecimento solar nas latitudes do globo levava à uma produção de massas de ar quente nas latitudes menores e massas de ar mais frias nas regiões de maiores latitudes (COSTA, 2004). Diferenças nas densidades das massas de ar fazem com que as massas de ar quente subam até as regiões de maior latitude, e o ar frio desça para regiões tropicais, estes são chamados ventos constantes.

Assim como os ventos constantes, outros ventos como periódicos e locais são também muito úteis quando se fala em aproveitamento energético (BRITO, 2006). Os ventos presentes nos oceanos, especialmente em locais mais afastados à costa, apresentam um grande potencial devido ao ambiente marítimo não oferecer grandes restrições quanto à fluidez da massa de ar. Portanto, o aproveitamento de energia eólica *offshore* poderá oferecer quantidades maiores de potência quando comparado à uma geração no continente.

Escolher locais adequados tanto para a instalação do parque eólico quanto para sua interligação ao sistema elétrico é de extrema importância. Dificilmente o melhor local para se fazer a conexão com o sistema será o local onde haverá o melhor aproveitamento eólico, por isso, deve-se avaliar os dois problemas juntos a fim de se encontrar a melhor solução.

2.2 Máquinas Comumente Utilizadas

Sistemas de geração eólica de grande porte podem utilizar diversas configurações e tipos de máquinas geradoras. Nesta seção será abordada os diferentes tipos de máquinas, juntamente com a configuração em que são utilizadas.

2.2.1 Geradores Assíncronos

Uma possível configuração de aerogeradores é utilizar gerador assíncrono ou de indução. Nesta configuração o eixo da turbina (aerogerador) é conectado ao eixo da máquina geradora através de uma caixa de engrenagens, permitindo que o gerador e a turbina tenham velocidades diferentes, Figura 1, cada um em sua faixa ótima (SLOOTWEG et al., 2001). Existem também configurações diferentes, onde os geradores de indução são conectados à rede através de conversores, podem ou não ter caixas de engrenagens e podem inclusive ter ímãs permanentes no lugar da gaiola de esquilo (RÜNCOS et al., 2000).

O escorregamento da máquina varia muito pouco com a variação do vento, fazendo com que a máquina tenha praticamente velocidade constante. Importante salientar que a configuração tradicional com máquinas de indução (sem conversor) não possui controle

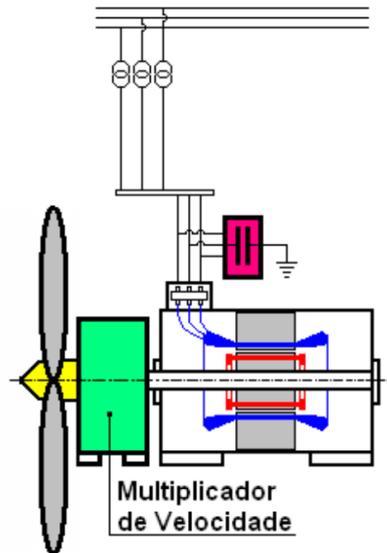


Figura 1 – Configuração com gerador de indução diretamente ligado à rede. Fonte: (RÜNCOS et al., 2000)

de potência reativa, sendo necessário normalmente um banco de capacitores na saída da máquina, que injetem, pelo menos, a potência reativa demandada pelo rotor gaiola de esquilo (SLOOTWEG et al., 2001).

2.2.2 Geradores Síncronos

Outra configuração usada em sistemas de geração eólica é a utilização de geradores síncronos. Nesta configuração, o eixo da turbina (aerogerador) é normalmente conectado ao rotor da máquina através de uma caixa de engrenagens. Assim como no gerador de indução, isto é feito para que ambos trabalhem em velocidades diferentes. O estator da máquina síncrona pode ser conectado à rede elétrica diretamente ou através de um conversor, no caso da ligação direta, a máquina será de velocidade constante, Figura 2, visto que o rotor estará acoplado à frequência elétrica da rede (SLOOTWEG et al., 2001). No caso de velocidade constante, o controle de passo das pás deve trabalhar de modo a não deixar com que a velocidade caia, mesmo que a potência gerada seja reduzida. Caso a ligação seja através de um conversor, a velocidade da máquina poderá variar, assim o conversor CA-CC-CA, fará a conversão das frequências.

Geradores síncronos também necessitam de alimentação em corrente contínua para o enrolamento de campo, esta corrente contínua pode ser proveniente de retificadores conectados à própria rede elétrica em que o estator está conectado. Geradores síncronos, ao contrário dos geradores de indução, têm a capacidade de controlar a potência reativa gerada através da variação da corrente nos enrolamentos de campo. Com esta característica, o gerador contribui na regulação de tensão do sistema elétrico.

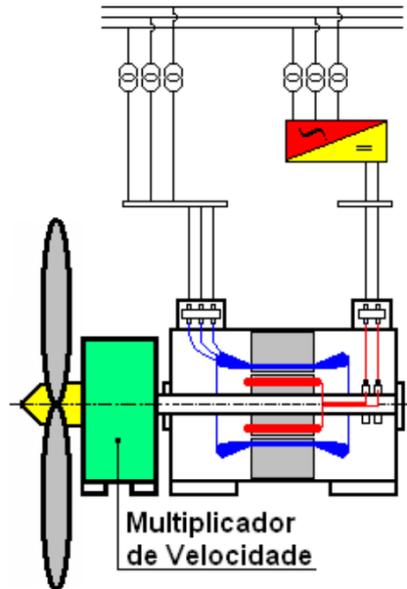


Figura 2 – Configuração com gerador síncrono diretamente ligado à rede. Fonte: (RÜNCOS et al., 2000)

2.2.3 Geradores Assíncronos Duplamente Alimentado

O gerador assíncrono duplamente alimentado, conhecido também como *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG), é uma outra solução muito utilizada em sistemas de geração eólica (SLOOTWEG et al., 2001). Esta configuração faz conexão direta de seu estator com a rede elétrica e diferentemente do gerador de indução com gaiola de esquilo, esta máquina possui enrolamentos trifásicos em seu rotor, estes enrolamentos são conectados também à rede através de um conversor CA-CC-CA que tem a capacidade de controlar a potência ativa e reativa, Figura 3. É chamado de duplamente alimentado pois a potência é drenada tanto pelo estator, cerca de $2/3$, quanto pelo rotor, $1/3$.

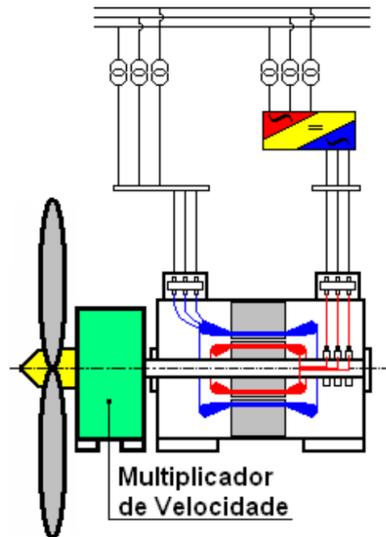


Figura 3 – Configuração com gerador assíncrono duplamente alimentado. Fonte: (RÜNCOS et al., 2000)

2.3 Sistemas de Transmissão

A geração eólica apresenta uma grande dificuldade assim como a geração hidráulica, que é o fato de as plantas de geração não serem próximas aos centros de carga. Quando se fala em geração eólica *offshore*, esta dificuldade é agravada ainda mais, pois as distâncias da costa até a geração são grandes, podendo chegar a dezenas de quilômetros. Usinas termelétricas por sua vez, não costumam passar por estes problemas pois são instaladas em locais próximos aos centros de carga.

Devido a essas dificuldades, estudos e simulações são fundamentais para que o escoamento da energia seja feito da melhor maneira possível. Em parques eólicos *offshore*, onde a distância dos geradores até a costa é elevada, é necessário linhas de transmissão, que têm seus cabos submersos e podem ser em corrente alternada ou corrente contínua. Segundo (PERVEEN; KISHOR & MOHANTY, 2014), quando a geração é maior que 500 MW e a distância dos geradores até o continente é maior que 50 km a transmissão em alta tensão e corrente contínua se torna mais viável. Isso acontece pois os cabos submersos exercem um efeito capacitivo que na transmissão em corrente alternada se torna um grande problema.

Usualmente, quando são projetados aerogeradores *offshore*, a quantidade de geradores não é pequena, isso ocorre pois não é viável extrair toda a potência desejada de apenas um aerogerador. Com diversas máquinas no mar, é necessária uma rede coletora, normalmente em média tensão, para que a energia gerada seja entregue à uma subestação (PERVEEN; KISHOR & MOHANTY, 2014). Esta subestação, ainda em alto mar, é responsável por elevar a tensão e enviar a energia gerada até uma outra subestação no continente.

A penetração da geração eólica em grande escala nos sistemas de transmissão, pode

acarretar um grande problema no controle de tensão caso apenas as usinas tradicionais tiverem a responsabilidade de controlar a tensão. Estudos elétricos são essenciais para que os parques eólicos, inclusive *offshore*, passem a contribuir no controle do sistema.

A metodologia proposta neste trabalho mostra um estudo focado nas consequências de se conectar um parque eólico à uma subestação já existente de um sistema teste.

2.4 Considerações Finais

Este capítulo descreveu muito simplificadaamente alguns conceitos sobre a origem dos ventos, máquinas elétricas normalmente utilizadas nos aerogeradores eólicos, sistemas de transmissão e dificuldades encontradas no ponto de conexão com o sistema elétrico de potência.

As características de cada tipo de máquina e os sistemas de transmissão são as razões para a utilização da metodologia proposta no Capítulo 4.

3 FLUXO DE POTÊNCIA

3.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão teórica resumida sobre fluxo de potência não linear e fluxo de potência continuado.

O problema do fluxo de potência consiste em determinar o estado da rede e distribuição dos fluxos. Mais precisamente, determinar tensões e fases nas barras de um sistema bem como potências ativas e reativas geradas em todas as barras e fluxo de potência ativa e reativa em cada uma das linhas deste sistema, tudo isso para uma determinada condição, chamada de ponto de operação (MONTICELLI, 1983). O problema do fluxo de carga, ou fluxo de potência, parte do pressuposto em que o sistema encontra-se em regime permanente, ou seja, não está suscetível à transitórios.

O método mais tradicional de resolução de fluxo de carga é o método de Newton, que consiste em partir de um estado inicial da rede, que pode ser *flat start* ou fluxo de potência linear (explicados na seção seguinte) (ALTOMAR & FILHO, 2015), e através de um método iterativo o algoritmo se aproxima cada vez mais da solução correta. Quando uma determinada tolerância é alcançada o algoritmo fornece o estado da rede para determinado ponto de operação definido pelo usuário.

O fluxo de potência continuado é um método de se avaliar como a rede se comporta quando há uma elevação de carga do sistema. Consiste na resolução de sucessivos fluxos de carga não linear, aumentando-se percentualmente o valor das cargas nas barras de todo o sistema para que seja evidenciado o ponto de maior fragilidade, que terá sua tensão reduzida chegando a um ponto crítico (AJJARAPU & CHRISTY, 1992). Num sistema real, quando o ponto crítico é atingido, o sistema passa a operar num quadro de instabilidade.

3.2 Fluxo de Potência Não Linear

3.2.1 Considerações Iniciais

O fluxo de potência ou fluxo de carga não linear é um processo que consiste em determinar o estado da rede. Consiste em determinar tensões em módulo e fase bem como os fluxos nas linhas de transmissão. Para tanto, é necessário um algoritmo que de posse das informações do sistema, consiga determinar o estado da rede. O algoritmo, utiliza o método de Newton para que com, sucessivas aproximações, encontre os valores ideais de tensão em módulo e fase. Este método necessita de uma solução como ponto de partida, esta solução pode ser *flat start*, fluxo CC ou outra estimativa inicial (ALTOMAR & FILHO, 2015).

O ponto de partida *flat start* consiste em iniciar o algoritmo com valores de ângulos

nas barras em 0 grau e tensões nas barras de 1 pu. Nestas condições, o sistema terá, provavelmente, mais trabalho computacional pois a solução inicial encontra-se distante dos valores reais. Outra possibilidade é o fluxo CC onde a solução inicial é obtida através de um outro algoritmo mais simples chamado de Fluxo de Carga CC, que utiliza equações lineares e aproximadas para a resolução do problema. Neste caso o ponto de partida do fluxo de carga não linear, encontra-se muito mais perto do valor real, requerendo um esforço computacional menor para se chegar na resposta correta.

3.2.2 Formulação Matemática

O fluxo de potência não linear inicia-se com a determinação da matriz de admitância nodal (Y_{bus}), esta matriz carrega todas as informações das linhas do Sistema Elétrico de Potência (SEP). A matriz Y_{bus} deve ser uma matriz quadrada de dimensão n_{bar} (número de barras do sistema). Para a determinação dos elementos da matriz, utiliza-se duas equações, uma para elementos da diagonal principal, (3.1), e outra para elementos fora da diagonal principal, (3.2). É importante frisar que a matriz de admitância nodal é, em geral, simétrica e para um sistema de tamanho real espera-se que essa matriz seja esparsa, ou seja, tenha muitos elementos nulos, pois os elementos fora da diagonal principal são diferentes de zero somente caso haja uma linha entre as barras k e m (MONTICELLI, 1983).

$$Y_{kk} = jb_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{sh} + a_{km}^2 y_{km}) \quad (3.1)$$

$$Y_{km} = -a_{km} e^{-j\phi_{km}} y_{km} \quad (3.2)$$

Onde:

b_k^{sh} : susceptância shunt conectado à barra k

b_{km} : susceptância equivalente da linha km

a_{km} : relação de transformação do transformador entre as barras k e m

y_{km} : admitância entre as barras k e m

ϕ_{km} : ângulo de defasagem do transformador defasador

Calculada a matriz Y_{bus} , pode-se então dividi-la em parte real e parte imaginária, (3.3). A parte real será a matriz de condutância nodal (G), e a parte imaginária será a matriz de susceptância nodal (B).

$$Y = G + j \cdot B \quad (3.3)$$

A resolução do problema de fluxo de potência baseia-se no equilíbrio de potências nas barras do sistema. Basicamente, é realizado um somatório das potências geradas,

demandadas e exportadas/importadas em cada barra e caso a soma seja zero em todas as barras o problema estará resolvido (3.4).

$$\mathbf{Pg} + \mathbf{Pl} + \sum Fluxos = 0 \quad (3.4)$$

Os valores de Pg e Pl são determinados de acordo com o sistema em estudo. Valores de Pg bem como Pl deverão ser conhecidos visto que representam as gerações e carga em cada uma das barra do sistema. Resta então determinar os fluxos em cada uma das linhas. Por exemplo: numa barra em que não há geração, o somatório se resumirá em $Pl + \sum Fluxos = 0$, ou seja, toda a carga será suprida com energia importada de outras barras. O somatório dos fluxos deverá ser igual à carga demandada nesta barra.

As potências ativa e reativa numa linha estão em função da diferença de tensão em módulo e fase das barras adjacentes, por esta razão, deve-se determinar estes valores em todas as barras para que os fluxos sejam adequados e respeitem a condição de balanço dos fluxos para todas as barras. Desta forma as (3.5) e (3.6) descrevem o fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente, em linhas e transformadores de uma barra k para uma barra m .

$$P_{km} = (a_{km}V_k)^2 g_{km} - (a_{km}V_k)V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - (a_{km}V_k)V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (3.5)$$

$$Q_{km} = -(a_{km}V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (a_{km}V_k)V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - (a_{km}V_k)V_m g_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (3.6)$$

Onde:

P_{km} : Potência ativa que flui da barra k para barra m

Q_{km} : Potência reativa que flui da barra k para barra m

V_k : Módulo da tensão na barra k

g_{km} : Condutância entre as barras k e m

b_{km} : Suceptância entre as barras k e m

a_{km} : Relação de transformação do transformador entre as barras k e m

θ_{km} : Diferença angular entre as barras k e m , mesmo que $\theta_k - \theta_m$

ϕ_{km} : Defasagem proporcionada pelo transformador defasador

Calculadas as potências ativa e reativa que flui em todas as linhas do sistema, o processo de resolução do fluxo de carga via o método de Newton determina que sejam calculados os resíduos de potências ativa para barras do tipo PQ e PV, (3.7) e reativa somente

para as barras PQ (3.8) para determinar os balanço de carga nas barras (MONTICELLI, 1983).

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{P}_g - \mathbf{P}_l - \mathbf{P}_k \quad (3.7)$$

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_g - \mathbf{Q}_l - \mathbf{P}_k \quad (3.8)$$

De posse dos resíduos, primeiramente verifica-se se todos eles são menores que uma tolerância previamente definida. Caso sejam menores que a tolerância, os valores dos módulos e fases das tensões nas barras estão adequados. Caso sejam maiores, será necessário o cálculo de novas tensões para que o balanço de potência nas barras seja igual ou muito próximo a zero. O processo de Newton inicia-se obtendo-se a matriz Jacobiana, esta matriz possui elementos que são as derivadas parciais das equações de fluxos nas linhas. A matriz jacobiana pode ser subdividida em submatrizes H, N, M e L, (3.9).

$$JAC = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta \mathbf{P})}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta \mathbf{P})}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta \mathbf{Q})}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta \mathbf{Q})}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Os elementos das submatrizes H, N, M e L são descritos nas equações de (3.10) a (3.17).

$$H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.10)$$

$$H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -V_k^2 b_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.11)$$

$$N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.12)$$

$$N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.13)$$

$$M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.14)$$

$$M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.15)$$

$$L_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.16)$$

$$L_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = -V_k b_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.17)$$

Obtida a matriz jacobiana do sistema é possível então resolver o sistema que informará o incremento de módulo e fase das tensões em cada uma das barras do sistema. Em (3.18) é ilustrado como é montada as equações para se obter as variáveis $\Delta\theta$ e ΔV .

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta \mathbf{P})}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta \mathbf{P})}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta \mathbf{Q})}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta \mathbf{Q})}{\partial V} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Logo, invertendo-se a matriz jacobiana e multiplicando-a pelo vetor de resíduos é possível obter os vetores de incremento de tensão e ângulo nas barras, (3.19).

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta \mathbf{P})}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta \mathbf{P})}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta \mathbf{Q})}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta \mathbf{Q})}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

De posse dos vetores de incremento de tensão e ângulo, basta somá-los aos valores iniciais de \mathbf{V} e θ . Os novos vetores de \mathbf{V} e θ serão usados no cálculo dos novos fluxos nas linhas, e então todo o processo se repete.

A cada iteração os valores de \mathbf{V} e θ se aproximam cada vez mais do valor exato, assim, a condição de parada do sistema do método de Newton (balanço de fluxo nas barras) tende a ser atendida.

3.3 Fluxo de Potência Continuado

3.3.1 Considerações Iniciais

Quando se pretende resolver um problema de fluxo de potência, as cargas nas barras do sistema são consideradas geralmente constantes e a simulação considera o sistema em regime permanente. Porém, em situações reais, o sistema pode sofrer variações de carga por grandes ou pequenos períodos de tempo (AJJARAPU & CHRISTY, 1992).

A função do fluxo de potência continuado é simular uma condição em que as cargas do sistema são mais elevadas do que a prevista, a fim de avaliar o afundamento de tensão em todas as barras do sistema bem como verificar quais são as barras críticas do sistema elétrico de potência em estudo (AJJARAPU & CHRISTY, 1992).

3.3.2 Formulação Matemática

A processo de resolução de um problema de fluxo de potência continuado consiste num processo iterativo onde existem dois passos principais, sendo o primeiro passo a predição e o segundo a correção (FERREIRA & COSTA, 2004). Este processo é necessário pois no instante em que a tensão em uma barra atinge seu ponto crítico, a matriz jacobiana do problema de fluxo de carga torna-se singular, impedindo com que o processo convirja para uma solução.

Para tanto, define-se um parâmetro de carga λ , que representará a adição de carga no sistema. O Parâmetro λ , será zero para o caso base do sistema onde não haverá acréscimo de carga e será máximo no ponto crítico do sistema (KUNDUR; BALU & LAUBY, 1994), mostrado em (3.20).

$$0 < \lambda < \lambda_{max} \quad (3.20)$$

Sendo $\mathbf{P}\mathbf{l}$ e $\mathbf{Q}\mathbf{l}$ o vetor de cargas ativas e reativas num sistema de i barras, esses vetores devem ser atualizados a cada vez em que um incremento de carga for realizado. Os vetores $\mathbf{P}\mathbf{l}_0$ e $\mathbf{Q}\mathbf{l}_0$ representam as cargas ativas e reativas para o caso base do problema de fluxo de carga. As equações (3.21a) e (3.21b) mostram como deve ser feito o incremento das cargas. Estas equações consideram que o fator de potência das cargas se mantenha o mesmo do caso base.

$$Pl = Pl_0 \times (1 + \lambda) \quad (3.21a)$$

$$Ql = Ql_0 \times (1 + \lambda) \quad (3.21b)$$

Da mesma maneira em que as cargas nas barras PQ do sistema são incrementadas, a geração de potência ativa e reativa deverá acompanhar este crescimento. Caso nenhum ajuste seja feito com relação à potência gerada, toda a potência acrescentada pela carga será suprida pela barra *slack*. Uma outra maneira mais adequada de solucionar este problema é distribuindo a geração faltante entre todos os geradores do sistema, cada um com seu fator de participação baseado na geração do caso base ou capacidade de geração das máquinas. A equação (3.22) sugere as novas gerações de acordo com o aumento de carga λ .

$$\mathbf{P}\mathbf{g} = \mathbf{P}\mathbf{g}_0 \cdot (1 + \lambda \cdot k_G) \quad (3.22)$$

A Figura 4 ilustra o básico do método de fluxo de potência continuado, onde no eixo das abscissas está a carga total do sistema e no eixo das ordenadas está a tensão em uma determinada barra do sistema. Ao se resolver o caso base do fluxo de carga não

linear obtém-se uma solução base. Esta solução fornece dados de tensão, em módulo e fase, para todas as barras do sistema. Calculando-se o vetor tangente (3.23) da solução base é possível estimar um novo ponto de partida para o cálculo de um outro fluxo de carga, desta vez para uma carga maior em todas as barras PQ do sistema.

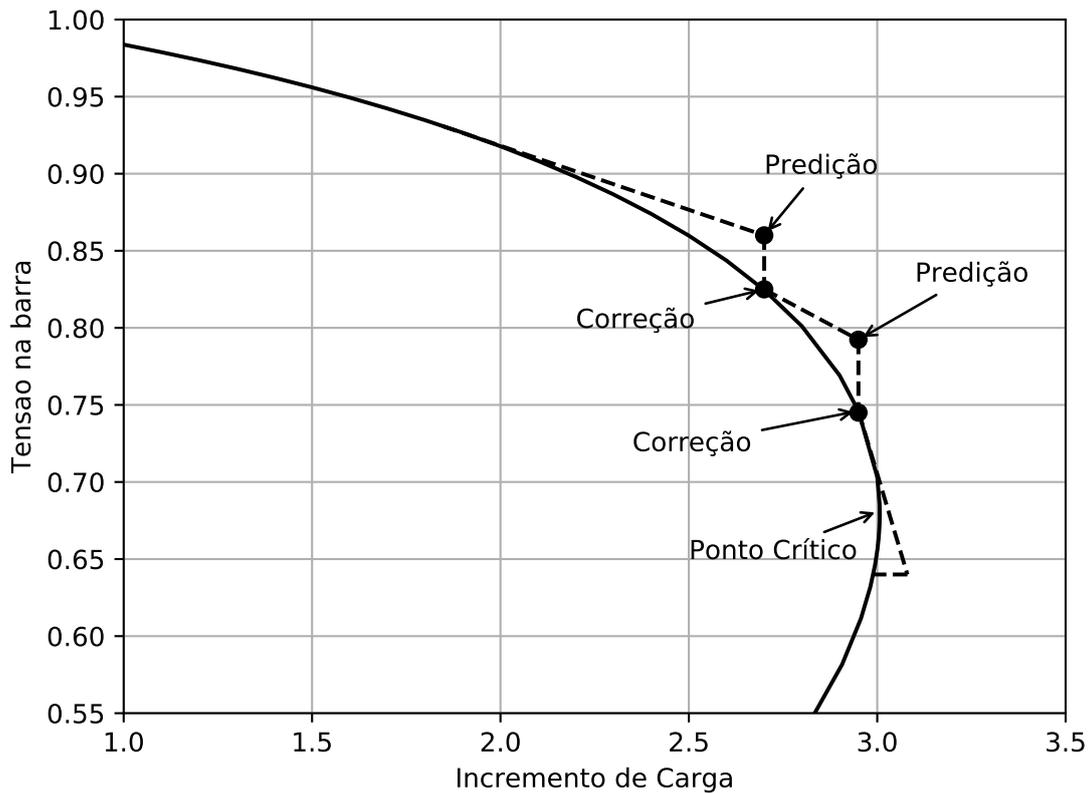


Figura 4 – Processo de cálculo do fluxo de potência continuado

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_\theta & \mathbf{F}_V & \mathbf{F}_\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \partial\theta \\ \partial\mathbf{V} \\ \partial\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.23)$$

Ao se inserir uma nova variável no sistema, parâmetro de continuação λ , o sistema passa a ter mais variáveis do que equações. Para se resolver este problema, uma nova equação é necessária. A nova equação \mathbf{e}_k tem todos seus valores nulos, com exceção do último, fazendo com que o elemento $\partial\lambda$ tenha seu valor definido pelo número encontrado após a igualdade (3.24), escrito como *passo*. O valor da variável passo deve ser escolhido de acordo com as necessidades do estudo, pois este valor determinará o quanto maior será a

carga adicionada para o problema seguinte.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_\theta & \mathbf{F}_\mathbf{V} & \mathbf{F}_\lambda \\ & \mathbf{ek} & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \partial\theta \\ \partial\mathbf{V} \\ \partial\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ passo \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Os vetores \mathbf{F}_θ e $\mathbf{F}_\mathbf{V}$ representam exatamente a matriz jacobiana utilizada no fluxo de potência convencional. Já o vetor \mathbf{F}_λ representa as cargas ativa e reativa do sistema. A equação (3.25), mostra exatamente como se obter o vetor tangente para se estimar o próximo ponto de operação do sistema.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta\mathbf{P})}{\partial\theta} & \frac{\partial(\Delta\mathbf{P})}{\partial\mathbf{V}} & -\mathbf{P}\mathbf{l}_0 \\ \frac{\partial(\Delta\mathbf{Q})}{\partial\theta} & \frac{\partial(\Delta\mathbf{Q})}{\partial\mathbf{V}} & -\mathbf{Q}\mathbf{l}_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \partial\theta \\ \partial\mathbf{V} \\ \partial\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ passo \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Encontrados os valores de $\partial\theta$ e $\partial\mathbf{V}$, deve-se somar estes valores aos ângulos e tensões obtidos como solução do sistema anterior. Os novos valores de ângulo e tensão serão usados no processo de correção.

$$\begin{bmatrix} \theta^* \\ \mathbf{V}^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{V} \\ \lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

O processo de correção utilizará os valores encontrados no processo de predição e encontrará uma solução correta para os novos valores de carga.

O novo fluxo de potência, agora com uma carga maior, convergirá caso esteja longe suficiente do ponto crítico. Caso haja convergência, o processo se repete normalmente, porém caso o sistema não convirja, é necessário rever o incremento de carga no sistema, diminuindo-o. Quando o incremento de carga for infinitesimal e o sistema não convergir, é sinal de que o alguma barra do sistema está muito próxima de atingir seu ponto crítico. A fim de determinar as características do sistema nas condições instáveis, é necessário uma mudança no algoritmo.

No momento em que o sistema chegar bem próximo do ponto crítico é necessário que o parâmetro de continuação que antes era carga, mude para tensão. Desta maneira, o vetor ek terá seu elemento unitário fazendo referência à barra crítica do sistema, fazendo com que a tensão nesta barra seja o novo parâmetro de continuação (3.27).

$$ek = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Após resolver o problema do fluxo de carga utilizando como parâmetro de continuação a tensão em uma das barras, o sistema passa para seu estado de instabilidade, onde mesmo reduzindo a carga, a tensão na barra crítica continua a cair. A fim de determinar o perfil de tensão para o ponto crítico, utiliza-se novamente a carga como parâmetro de continuação, porém dessa vez reduzindo-a. A maneira adequada de se continuar o processo definindo um *passo* negativo, sendo assim, o λ será negativo.

3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma revisão teórica acerca dos principais conceitos do problema de fluxo de potência não linear, como balanço de potência nas barras, algoritmo de Newton e processo iterativo para a resolução do problema. Mostrou também os mais importantes conceitos acerca de fluxo de potência continuado, os passos de predição e correção, ponto crítico do sistema e região de instabilidade.

Esta revisão é essencial para o entendimento do capítulo subsequente.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Considerações Iniciais

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se em grande parte num fluxo de potência continuado, porém diferentemente deste em que existe um parâmetro de carga que aumenta a carga do sistema ao longo de seu processo, a metodologia em questão propõe que haja um parâmetro de geração, também chamado de λ , que estará aumentando a geração em determinada barra do sistema, simulando uma penetração de geração eólica na barra.

Esta metodologia tem a função de estudar um sistema já em funcionamento para verificar sua estabilidade de tensão e redução de perdas do sistema quando novas gerações são acopladas em suas barras.

O algoritmo foi todo desenvolvido na linguagem Python (ROSSUM, 1995) com o auxílio da IDE (Integrated Development Environment) Spyder.

4.2 Inserção de Geração Eólica

Como exposto no Capítulo 2, a geração eólica vem crescendo de maneira exponencial. Para tanto, é extremamente importante o estudo de estabilidade de tensão num sistema de potência quando esta nova geração é inserida

Neste trabalho, haverá então, uma simulação de penetração de energia eólica em cada uma das barras do sistema sendo que esta penetração acontecerá em uma barra por vez. A finalidade desta metodologia é apenas incrementar a geração nas barras a fim de determinar o ponto crítico do sistema e suas fragilidades.

Sabe-se que um aerogerador deve ser instalado em áreas onde os ventos proporcionem uma geração considerável, neste estudo este não foi um aspecto considerado, visto que o estudo foi realizado para todas as barras do sistema, independente de sua localização e potencial de geração eólica.

Outra consideração importante a ser feita é que gerações eólicas têm grandes variações de potência em função das velocidades dos ventos, mas neste trabalho esta questão não tem grande importância pois a finalidade foi levar o sistema ao limite, mesmo sabendo que as potências consideradas nas gerações sejam irreais.

4.3 Adaptação do Fluxo de Potência Continuado

Explicado no Capítulo anterior, o fluxo de potência continuado, visa expor os pontos de operação críticos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), ou seja, carregar o sistema até o ponto em que ele opere em situação de instabilidade. Neste trabalho

o objetivo final é o mesmo, levar o sistema ao limite, porém desta vez, ao invés de se aumentar a carga, ocorrerá aumento da geração em uma barra.

O procedimento proposto será análogo ao do fluxo de potência continuado. Primeiramente deve-se efetuar um fluxo de potência para o caso base, caso em que não há geração extra no sistema. Feito isso, deve-se estabelecer um parâmetro de geração para então ser calculado o vetor tangente do caso base, mostrado em (4.1).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_\theta & \mathbf{F}_\mathbf{V} & \mathbf{F}_{\lambda_G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \partial\theta \\ \partial\mathbf{V} \\ \partial\lambda_G \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4.1)$$

O próximo passo é o de predição, que usará os valores de tensão em módulo e fase e geração obtidos no vetor tangente e somá-los aos valores de tensão anteriores (4.2). No fluxo de carga continuado tradicional, a variável $d\lambda$ correspondia ao incremento de carga em todas as barras, em função de $d\lambda$ calculava-se também as novas gerações. Nesta metodologia o parâmetro de continuação, $d\lambda_G$, atua apenas nos geradores, aumentando o gerador eólico, conforme a equação (4.3) e reduzindo os outros geradores (4.4). Importante salientar que neste equacionamento, a variável k_G representa os fatores de participação de cada gerador, para que seja reduzida a potência proporcionalmente.

$$\begin{bmatrix} \theta^* \\ \mathbf{V}^* \\ \lambda_G^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{V} \\ \lambda_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda_G \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$Pg = Pg_0 + \lambda_G \quad (4.3)$$

$$\mathbf{P}g = \mathbf{P}g_0 - \lambda_G \cdot k_G \quad (4.4)$$

Um novo fluxo de potência deve ser então executado a fim de corrigir os valores obtidos na predição e encontrar valores exatos para a nova condição do sistema. Desta forma, obtém-se os novos valores tensão em módulo e fase em cada uma das barras bem como os fluxos de potência nas linhas. O fluxograma da Figura 5, mostra exatamente os procedimentos adotados neste trabalho.

Este procedimento é repetido até que o fluxo de potência executado após uma predição não convirja. Desta forma é necessário diminuir o passo e realizar uma nova predição com o passo menor. Este procedimento é executado até que fluxo de potência volte a convergir. O processo é interrompido quando o passo utilizado no processo de predição seja menor que uma tolerância definida, neste caso, a tolerância é de 1 W de

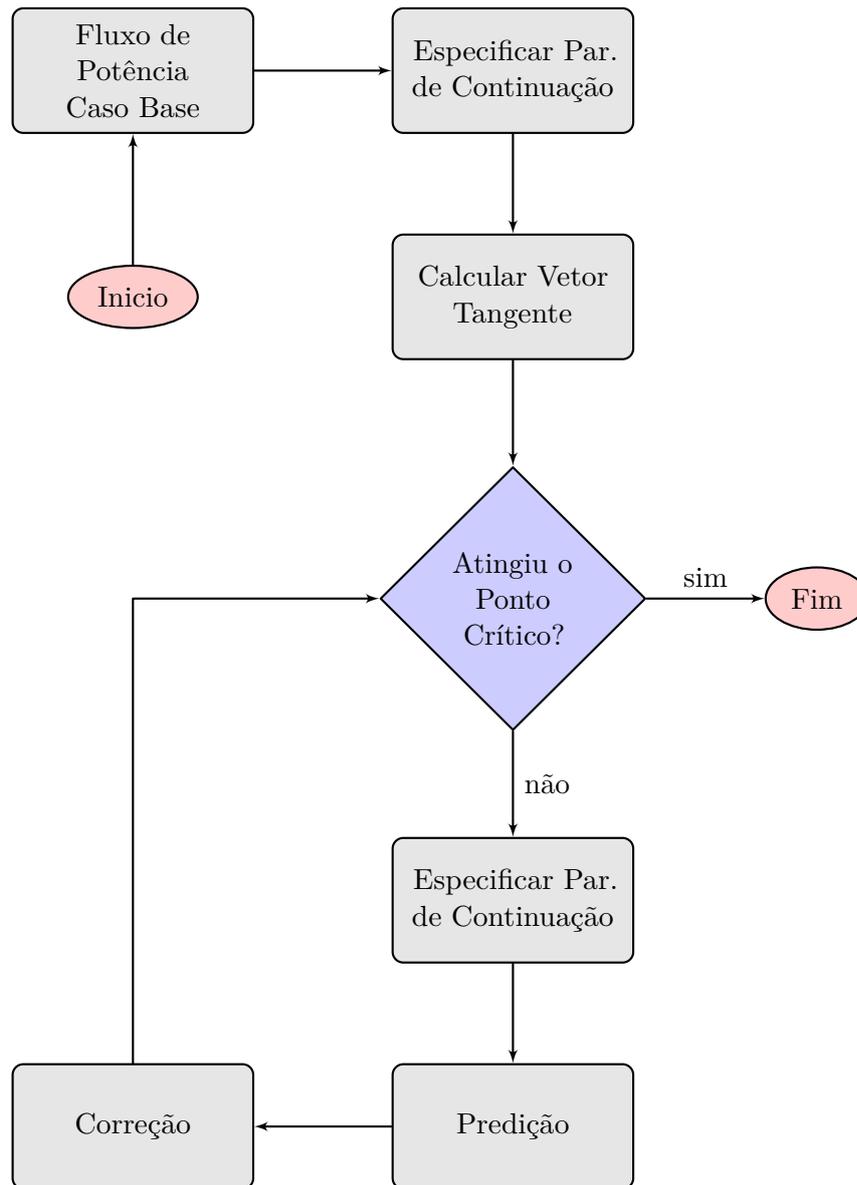


Figura 5 – Fluxograma do Fluxo de Potência Continuado

passo. Diferentemente do fluxo de potência continuado, nesta metodologia, não é feito um estudo para a região de instabilidade do sistema, ou seja, ao chegar no ponto crítico, o algoritmo é finalizado.

Nesta modelagem, à medida em que a penetração de geração em uma barra aumenta, algo deve ser feito para que não haja uma geração demasiada. Duas são as opções para este problema: reduzir a geração dos outros geradores ou aumentar a carga do sistema. Nesta metodologia assumiu-se que a carga do sistema é fixa e que o sistema já operava normalmente. Então, uma redução da potência gerada nos outros geradores deve ser feita para manter a potência total gerada constante.

Ainda nesta linha, duas opções podem ser escolhidas: reduzir a potência de todos

os geradores à medida em que a penetração aumenta, ou deixar que somente a barra *slack* reduza sua geração. O primeiro caso reduz-se a geração proporcionalmente aos fatores de participação das máquinas, ou seja, verifica-se a geração de cada máquina no caso base e a redução é feita proporcionalmente a essa geração ou ainda como opção a redução pode ser feita baseando-se nos fatores de capacidade de geração de cada máquina. Já no segundo caso toda a geração adicional é abatida da geração da barra *slack*, sendo assim, a barra *slack* pode facilmente ter sua geração anulada.

Esta metodologia tem a função de explicitar as diferenças entre as três opções descritas anteriormente. Os casos em que a geração é reduzida em todas as máquinas tendem a apresentar resultados mais positivos devido ao equilíbrio maior nos fluxos de potência. Nas simulações em que somente a barra *slack* reduz a geração, o mais sensato e real seria interromper o algoritmo assim que a geração nesta barra fosse anulada, porém, para verificar os limites do sistema, foco deste trabalho, a barra *slack* teve sua geração reduzida, tornando-a negativa. Desta forma, a barra *slack* torna-se uma carga de potência ativa, sobrecarregando ainda mais o sistema naquela região.

4.4 Sistema Teste IEEE 24 Barras

O objetivo deste trabalho é propor um método que determine os melhores locais para a conexão de um sistema de geração eólica num determinado sistema de potência.

Espera-se que este algoritmo funcione para qualquer que seja o sistema de potência, bastando informar os dados das linhas e das barras já presentes no sistema bem como as barras de interesse em adicionar geração.

A critério de testes e verificação da metodologia, foi escolhido o sistema teste IEEE 24 Barras, que tem seu diagrama mostrado na Figura 6. Este sistema será, então, a base para os resultados obtidos no próximo capítulo.

Mais informações deste sistema teste podem ser encontradas no Anexo A.

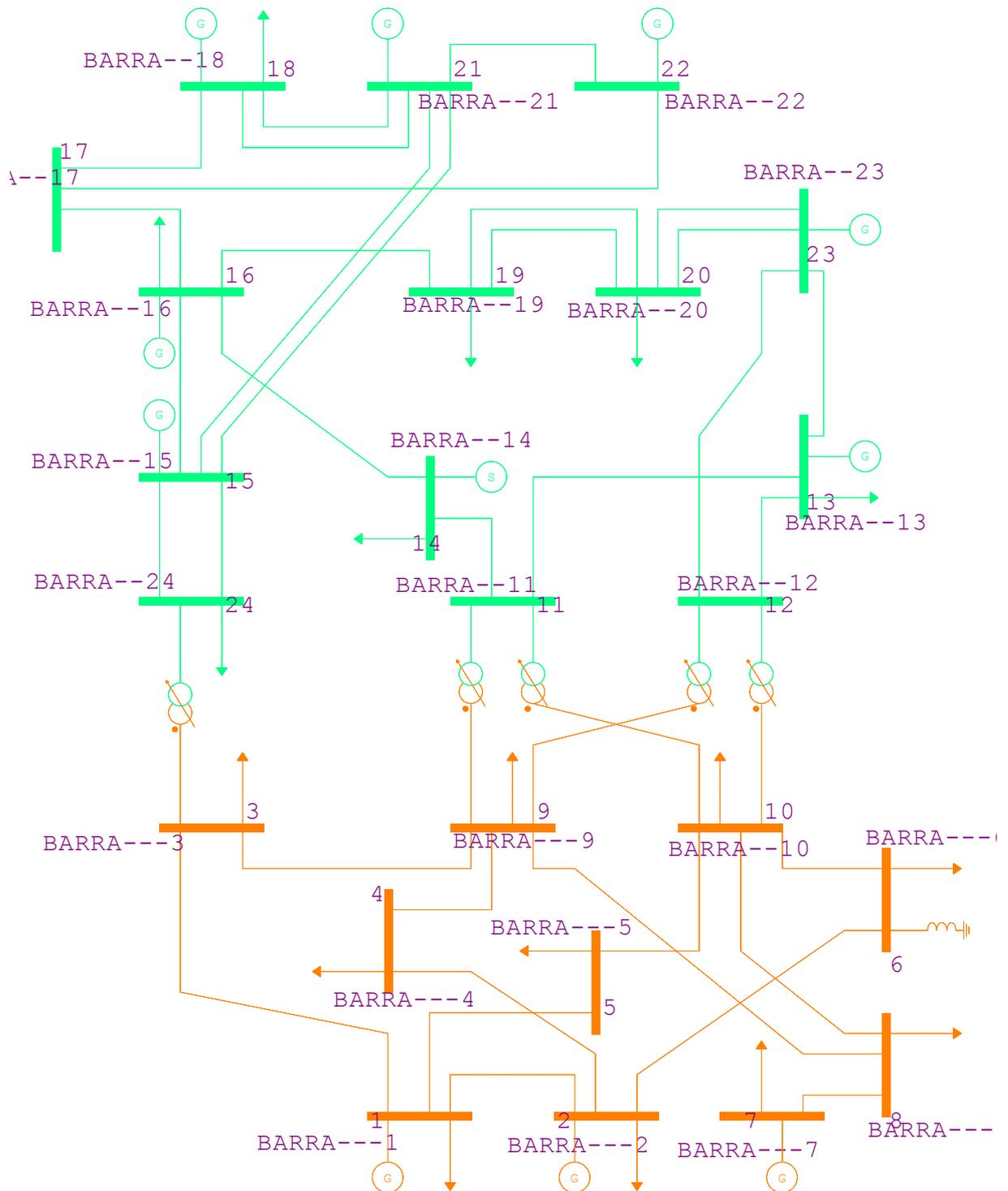


Figura 6 – Sistema teste IEEE 24 Barras

4.5 Considerações Finais

Este capítulo propôs uma metodologia que se assemelha a um fluxo de potência continuado, porém, ao invés de incremento de carga há incremento de geração. Foram apresentados também, as 3 metodologias propostas que se diferenciam por como penetração de geração adicional será reduzida pelos outros geradores. O Capítulo a seguir apresenta todos os resultados possíveis para cada um dos métodos.

5 RESULTADOS

5.1 Considerações Iniciais

Como descrito no capítulo anterior as simulações propostas neste trabalho seguem 3 linhas distintas. Sendo a primeira a situação em que o incremento de geração é absorvido apenas na barra *slack*, a segunda em que o incremento de geração é absorvido reduzindo-se a geração dos outros geradores proporcionalmente à geração no caso base e a terceira em que o incremento de geração será absorvido reduzindo-se a geração dos outros geradores proporcionalmente à capacidade de geração das máquinas.

As seções seguintes mostram os resultados para cada caso proposto e posteriormente é realizado um comparativo entre os resultados de cada metodologia. A critério de comparação, a Tabela 1 ilustra os principais resultados do fluxo de potência para o caso base do sistema IEEE 24 barras.

Tabela 1 – Fluxo de Potência do caso base do sistema IEEE 24 barras

| Barra | Tensão | | Geração | | Carga | |
|-------|---------|---------|-------------------------|---------------|-----------|---------------|
| | Mod[pu] | Fase[°] | Ativa[MW] | Reativa[Mvar] | Ativa[MW] | Reativa[Mvar] |
| 1 | 1.035 | -20.30 | 172 | 26.2 | 108 | 22 |
| 2 | 1.035 | -20.39 | 172 | 17.6 | 97 | 20 |
| 3 | 0.984 | -18.50 | 0 | 0 | 180 | 37 |
| 4 | 0.997 | -22.70 | 0 | 0 | 74 | 15 |
| 5 | 1.017 | -22.97 | 0 | 0 | 71 | 14 |
| 6 | 1.010 | -25.43 | 0 | 0 | 136 | 28 |
| 7 | 1.025 | -20.39 | 240 | 53.5 | 125 | 25 |
| 8 | 0.992 | -24.10 | 0 | 0 | 171 | 35 |
| 9 | 1.000 | -20.43 | 0 | 0 | 175 | 36 |
| 10 | 1.025 | -22.48 | 0 | 0 | 195 | 40 |
| 11 | 0.990 | -15.15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1.003 | -14.51 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 1.020 | -13.00 | 187.4 | 133.5 | 265 | 54 |
| 14 | 0.980 | -10.74 | 0 | -27.9 | 194 | 39 |
| 15 | 1.014 | -1.44 | 215 | -10.6 | 317 | 64 |
| 16 | 1.017 | -2.56 | 155 | 44.4 | 100 | 20 |
| 17 | 1.039 | 1.92 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 1.050 | 3.28 | 400 | 138.7 | 333 | 68 |
| 19 | 1.023 | -4.08 | 0 | 0 | 181 | 37 |
| 20 | 1.038 | -3.47 | 0 | 0 | 128 | 26 |
| 21 | 1.050 | 4.10 | 400 | 106.9 | 0 | 0 |
| 22 | 1.050 | 9.75 | 300 | -29.5 | 0 | 0 |
| 23 | 1.050 | -2.43 | 660 | 135.4 | 0 | 0 |
| 24 | 0.981 | -7.72 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | Perdas Totais: 51.32 MW | | | |

5.2 Absorção de geração pela barra *slack*

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos quando se utilizou a metodologia em que a penetração de geração eólica em alguma barra fosse absorvida apenas da barra *slack*. Nesta situação o algoritmo executou o fluxo de potência do caso base do sistema e a partir daí, foi incrementado uma geração de 20 *MW* e novamente um fluxo de potência executado e registrado os valores obtidos. O incremento de geração de 20 *MW* ocorreu até o momento em que o fluxo de potência não convergisse. Neste momento o incremento é reduzido pela metade e então o processo continua. Este procedimento foi repetido até que o sistema parasse de convergir para um incremento de 1 *W* de potência. Ao atingir esta condição foi determinado que o sistema chegou em seu limite.

Para o caso base do sistema teste IEEE 24 barras é importante frisar que a geração de potência na barra *slack* foi de 187 *MW*. Como dito anteriormente, neste método, somente a barra de referência absorverá a geração adicional, portanto, quando a geração adicional atingir cerca de 187 *MW*, a barra de referência terá sua geração anulada. Mesmo anulando a geração na barra *slack*, o algoritmo continua e torna a geração na barra de referência negativa, fazendo com que o sistema enxergue uma carga adicional naquele ponto. Este procedimento foi feito a fim de estressar o sistema ao máximo a fim de explicitar seu ponto de fragilidade, mesmo que esta circunstância seja irreal. Neste método, a penetração de geração na barra de referência se torna inviável devido a ela mesma absorver a geração excedente.

Com base nos resultados obtidos em todas as soluções dos fluxos de potência foi possível construir a Tabela 2, ela explicita principalmente as reduções ou aumentos de perdas normalizados pelo caso base para as diversas porcentagens de penetração da geração eólica. Cada linha da tabela representa a barra em que a penetração de geração eólica ocorreu e as quatro últimas colunas da tabela mostram: as perdas mínimas, qual foi a penetração em que a perda mínima ocorreu, o máximo carregamento até que o sistema atingisse a condição de instabilidade e qual foi a barra crítica.

A Figura 7 mostra a tensão na barra crítica e a evolução de perdas em função da penetração da geração eólica na barra 6. Esta condição é a condição em que ocorreu a maior redução de perdas comparado com o caso base. Da Tabela 2 é possível observar, pela linha destacada, que as perdas podem chegar a 94% das perdas no caso base quando a penetração é de 140 *MW*. Neste mesmo caso é possível verificar que a penetração máxima de geração na barra 6 é de 649.9 *MW* sem violar os limites de injeção de potência reativa pelos geradores. Como alertado anteriormente, certamente por volta de 187 *MW*, a geração da barra *slack* se tornará negativa.

A Figura 8 mostra o comportamento da tensão em todas as barras do sistema para os diversos níveis de penetração de geração na barra 6. Importante salientar que a

Tabela 2 – Penetração de Geração eólica, balanço realizado somente na barra *slack*.

| Barra | Porcentagem de penetração eólica | | | | | | Perdas Mínimas | | Máx. Penetração | |
|-------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|-----------------|----------|
| | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Perdas [%] | Ger. [MW] | [MW] | B. Crít. |
| | Perdas em relação caso base [%] | | | | | | | | | |
| 1 | 106 | 125 | – | – | – | – | 99 | 10 | 550.9 | 11 |
| 2 | 106 | 125 | – | – | – | – | 99 | 10 | 551.3 | 11 |
| 3 | 106 | 124 | – | – | – | – | 100 | 0 | 546.5 | 14 |
| 4 | 99 | 115 | 195 | – | – | – | 97 | 70 | 609.9 | 9 |
| 5 | 99 | 113 | 181 | – | – | – | 98 | 70 | 619.9 | 10 |
| 6 | 94 | 99 | 145 | – | – | – | 94 | 140 | 649.9 | 10 |
| 7 | 114 | 159 | – | – | – | – | 99 | 10 | 365.2 | 8 |
| 8 | 98 | 116 | – | – | – | – | 97 | 80 | 538.1 | 8 |
| 9 | 99 | 100 | 117 | – | – | – | 98 | 120 | 709.9 | 11 |
| 10 | 96 | 97 | 109 | – | – | – | 96 | 200 | 749.9 | 11 |
| 11 | 99 | 100 | 111 | – | – | – | 99 | 140 | 649.9 | 6 |
| 12 | 99 | 100 | 112 | – | – | – | 99 | 120 | 649.9 | 6 |
| 13 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 14 | 105 | 115 | – | – | – | – | 100 | 0 | 450.9 | 6 |
| 15 | 117 | 141 | – | – | – | – | 100 | 0 | 300.0 | 6 |
| 16 | 116 | 137 | – | – | – | – | 100 | 0 | 389.3 | 14 |
| 17 | 122 | 154 | – | – | – | – | 100 | 0 | 355.4 | 14 |
| 18 | 124 | 158 | – | – | – | – | 100 | 0 | 353.7 | 14 |
| 19 | 113 | 133 | – | – | – | – | 100 | 0 | 372.5 | 6 |
| 20 | 114 | 133 | – | – | – | – | 100 | 0 | 359.9 | 6 |
| 21 | 125 | 159 | – | – | – | – | 100 | 0 | 355.0 | 14 |
| 22 | 132 | 178 | – | – | – | – | 100 | 0 | 351.2 | 17 |
| 23 | 115 | 134 | – | – | – | – | 100 | 0 | 349.9 | 6 |
| 24 | 111 | 130 | – | – | – | – | 100 | 0 | 385.0 | 14 |

definição de barra crítica não está na barra com a menor tensão e sim na barra em que o valor dV do vetor tangente for maior no momento de máxima geração.

Por outro lado, quando observa-se a Figura 9 fica evidente que neste caso, penetração na barra 21, não há redução de perdas e sim um aumento, como mostra a linha destacada na Tabela 2. Este aumento é significativo, mostrando que a penetração de geração eólica nesta barra não é muito favorável quando se analisa as perdas do sistema como um todo. Nesta mesma figura, é possível observar que a barra crítica é a barra 14, inicialmente do tipo PV, excede seu limite de injeção de potência reativa, perdendo a capacidade de regular tensão.

O comportamento de tensão de todas as barras para a penetração na barra 21 é mostrada na Figura 10. Estes comportamentos de tensão, com pequenos degraus, são em função da mudança de barras do tipo PV para PQ quando os limites de injeção de potência reativa são atingidos.

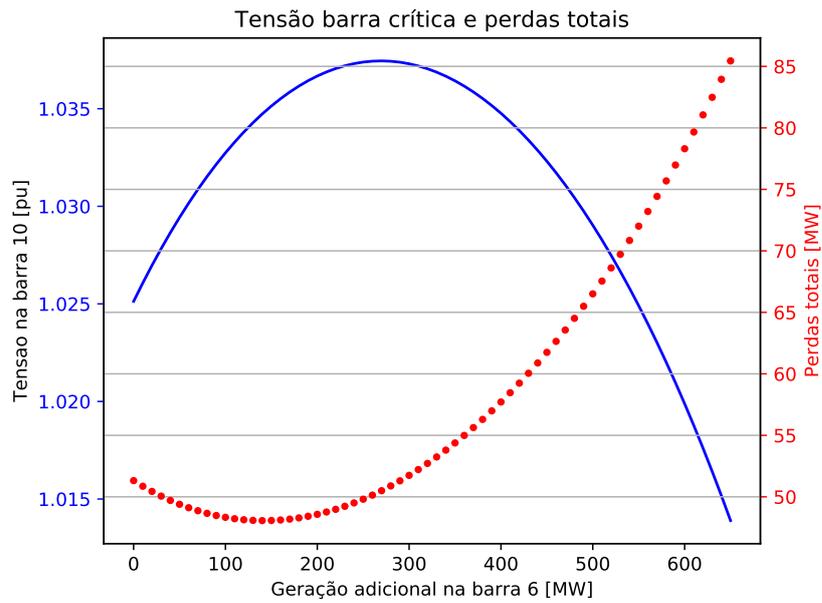


Figura 7 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 6

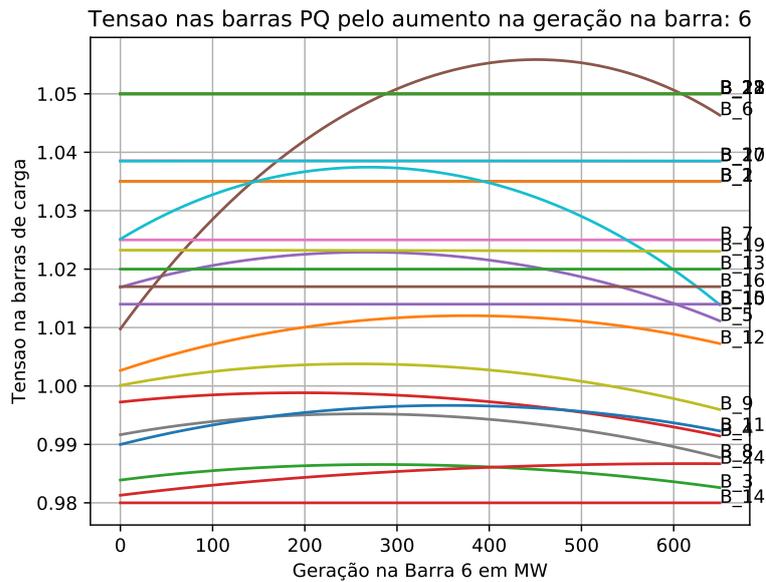


Figura 8 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 6

Os gráficos com perfis de tensão de todas as barras para a penetração em todas as barras e evolução de perdas encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

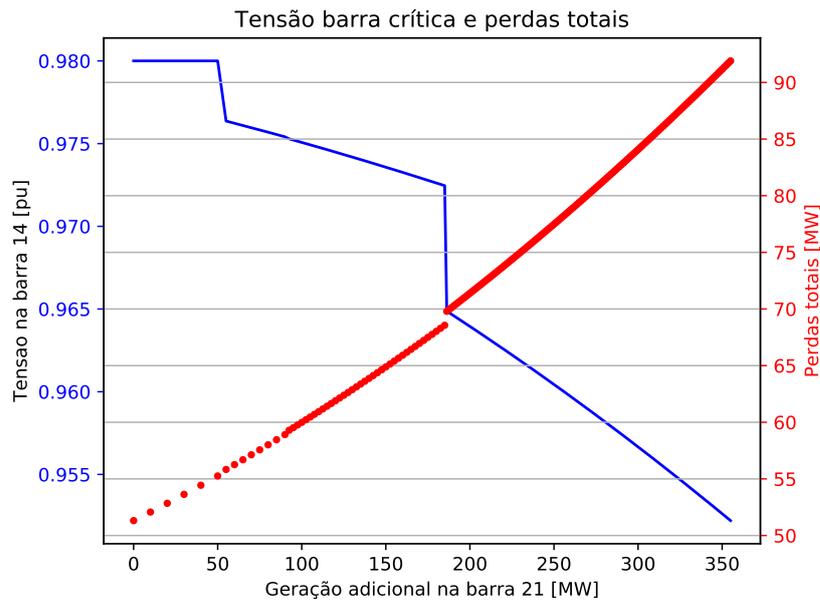


Figura 9 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 21

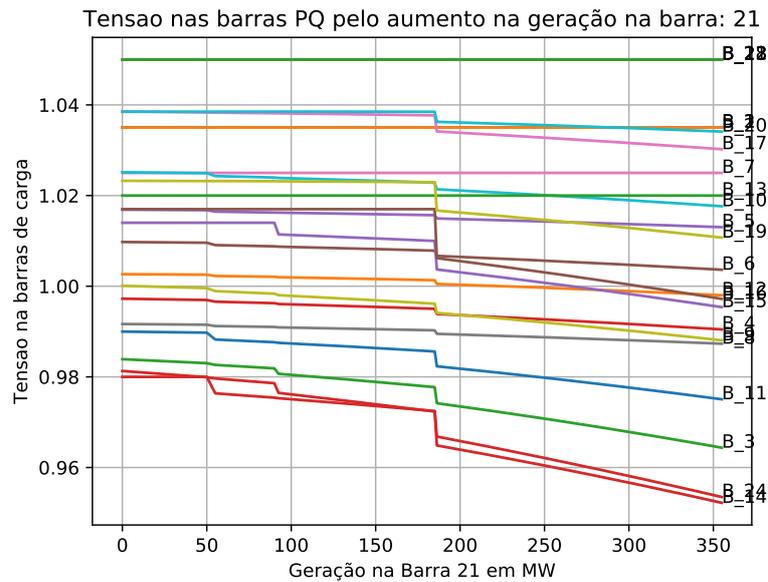


Figura 10 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 21

5.3 Absorção de geração pelos geradores caso base

Nesta seção é mostrado os resultados obtidos quando se utilizou a metodologia em que a penetração de geração eólica em alguma barra fosse absorvida por todos os geradores, com fator de participação proporcional ao montante gerado por cada gerador no caso base. O algoritmo proposto funciona incrementando carga da mesma maneira que o caso anterior, iniciando em 20 MW e tendo sua parada quando o incremento atinge 1 W.

Este caso em que a penetração da geração eólica é absorvida por todas as barras é

uma situação mais próxima da realidade e pelo fato do sistema ter todos os geradores com geração reduzida, torna o sistema mais equilibrado e permite que a penetração de geração seja maior.

Tabela 3 – Penetração de Geração eólica, distribuição pela geração do caso base.

| Barra | Porcentagem de penetração eólica | | | | | | Perdas Mínimas | | Máx. Penetração | |
|-------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|-----------------|----------|
| | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Perdas [%] | Ger. [MW] | [MW] | B. Crít. |
| | Perdas em relação caso base [%] | | | | | | | | | |
| 1 | 93 | 97 | 142 | – | – | – | 92 | 160 | 794.9 | 5 |
| 2 | 93 | 97 | 143 | – | – | – | 93 | 160 | 764.9 | 8 |
| 3 | 93 | 94 | 116 | 174 | – | – | 92 | 200 | 919.9 | 6 |
| 4 | 86 | 88 | 135 | – | – | – | 86 | 200 | 709.9 | 6 |
| 5 | 87 | 85 | 119 | 207 | – | – | 85 | 230 | 859.9 | 5 |
| 6 | 81 | 73 | 90 | 160 | – | – | 73 | 310 | 909.9 | 10 |
| 7 | 102 | 135 | – | – | – | – | 97 | 60 | 360 | 6 |
| 8 | 85 | 86 | 142 | – | – | – | 83 | 200 | 779.9 | 8 |
| 9 | 86 | 76 | 67 | 74 | 96 | 142 | 67 | 600 | 1429.9 | 3 |
| 10 | 84 | 72 | 59 | 60 | 78 | 116 | 58 | 680 | 1519.9 | 3 |
| 11 | 86 | 75 | 62 | 60 | 70 | 94 | 59 | 760 | 1675.0 | 6 |
| 12 | 87 | 77 | 66 | 68 | 84 | 117 | 65 | 670 | 1489.9 | 6 |
| 13 | 89 | 82 | 76 | 84 | 106 | 146 | 75 | 550 | 1530.0 | 10 |
| 14 | 92 | 88 | 88 | 101 | 128 | – | 86 | 420 | 1389.9 | 6 |
| 15 | 104 | 111 | 131 | 164 | – | – | 100 | 0 | 1123.7 | 16 |
| 16 | 102 | 106 | 120 | 140 | 168 | – | 100 | 0 | 1257.5 | 19 |
| 17 | 107 | 117 | 145 | 181 | 229 | – | 100 | 0 | 1164.0 | 16 |
| 18 | 112 | 129 | 171 | – | – | – | 100 | 0 | 785.0 | 17 |
| 19 | 100 | 102 | 112 | 132 | 160 | – | 99 | 90 | 1309.9 | 6 |
| 20 | 101 | 103 | 116 | 139 | – | – | 100 | 40 | 1050.0 | 6 |
| 21 | 113 | 131 | 174 | 232 | – | – | 100 | 0 | 882.5 | 16 |
| 22 | 121 | 149 | – | – | – | – | 100 | 0 | 372.0 | 17 |
| 23 | 105 | 113 | 140 | – | – | – | 100 | 0 | 614.9 | 6 |
| 24 | 96 | 97 | 118 | – | – | – | 96 | 170 | 630.5 | 3 |

Com base nos resultados obtidos de todas as soluções dos fluxos de potência para todas as barras, foi possível construir a Tabela 3, com destaque para as barras em que apresentaram a maior redução de perda e o pior caso em que houve um aumento de perdas. Nesta metodologia, no melhor dos casos, em que a penetração aconteceu na barra 10, as perdas chegaram a 58% do caso base quando a penetração chegou a 680 MW.

Ainda com a penetração na barra 10, foi possível verificar que a penetração máxima foi de 1519.9 MW e a barra crítica, barra em que a taxa de variação de tensão no ponto máximo foi maior, foi a barra 3. Estes dados podem ser observados na Figura 11.

O comportamento de tensão de todas as barras para a penetração na barra 10 é mostrada na Figura 12.

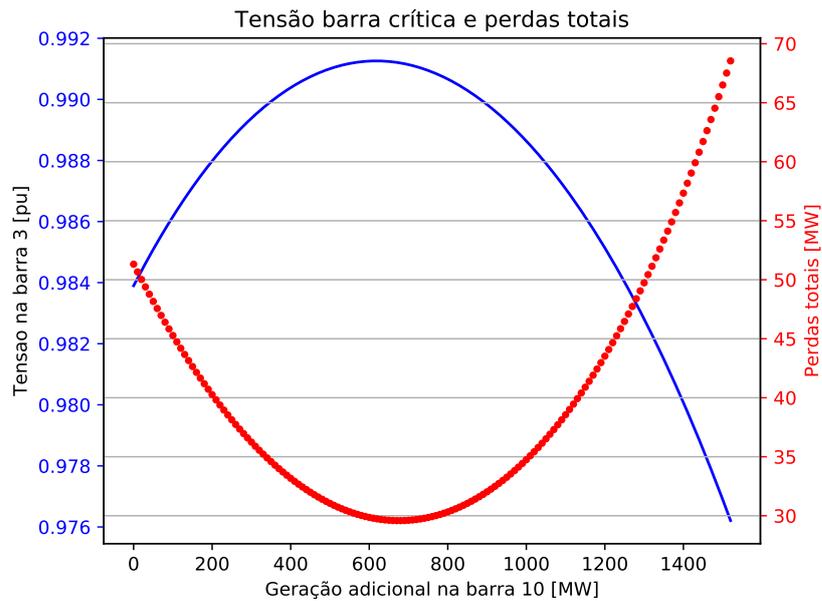


Figura 11 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 10

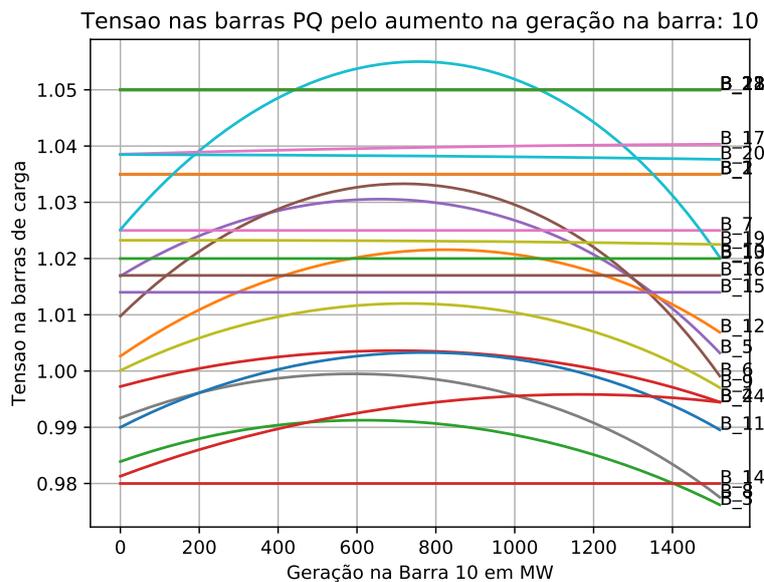


Figura 12 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 10

Ainda na Tabela 3, está destacado a linha referente à penetração na barra 20. Neste caso, a penetração não é vantajosa quando se verifica a redução de perdas, que não acontece em patamar nenhum de penetração. A Figura 13 mostra a evolução de perdas do sistema quando a penetração de geração ocorre na barra 20, importante salientar que a curva em vermelho, tem seu ponto de mínimo no seu ponto inicial, mostrando que a menor perda ocorre no caso base.

A Figura 14 ainda mostra o perfil de tensão em todas as barras do sistema. É

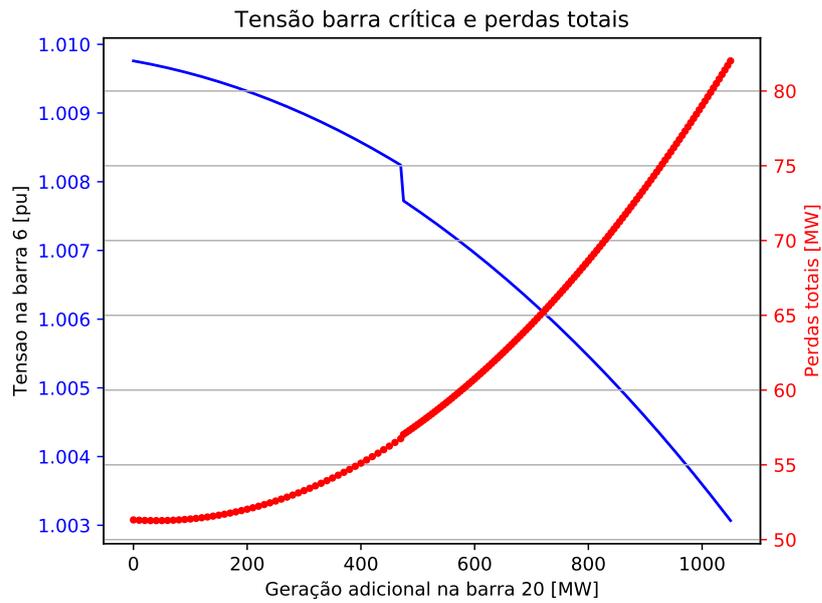


Figura 13 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 20

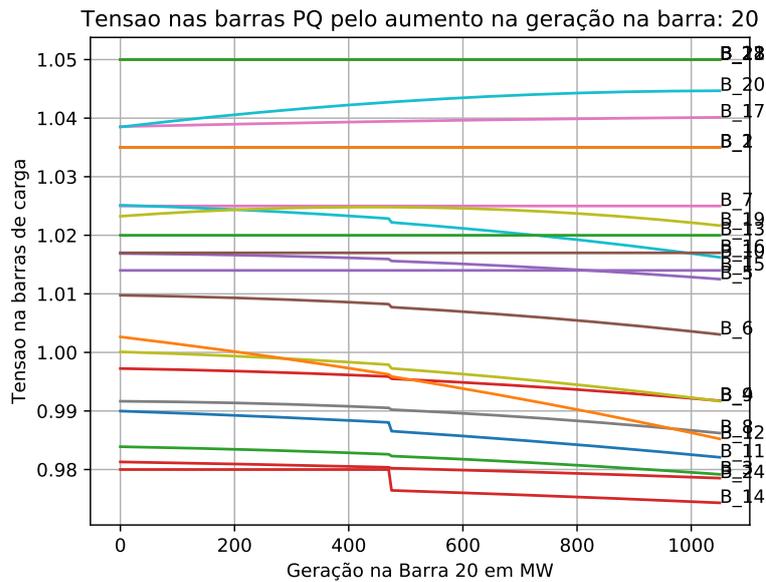


Figura 14 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 20

importante evidenciar que a barra que apresenta a maior taxa de variação no ponto de máxima penetração é a barra 6, sendo assim, esta é a barra crítica deste caso.

Os gráficos com perfis de tensão de todas as barras para a penetração em todas as barras e evolução de perdas encontram-se no Apêndice B deste trabalho.

5.4 Absorção de geração pela capacidade dos geradores

Nesta seção é mostrado os resultados obtidos quando se utilizou a metodologia em que a penetração de geração eólica em alguma barra fosse absorvida por todos os geradores, com fator de participação proporcional à capacidade de geração das máquinas. A capacidade de geração das máquinas (GRIGG et al., 1999) proporciona um fator de participação um pouco diferente mas com resultados próximos ao caso em que a distribuição é realizada pelo caso base. Isto ocorre pois a maioria das máquinas geradoras já trabalhavam próximas de suas capacidades máximas no caso base fazendo com que o fator de participação não fosse muito diferente.

O algoritmo proposto funciona sempre da mesma maneira incrementando carga de 20 *MW* em 20 *MW* e reduzindo o incremento quando o fluxo de potência divergir e tendo sua parada quando o incremento atinge 1 *W*.

Este caso em que a penetração da geração eólica é absorvida por todos os geradores levando em conta a capacidade das máquinas é uma situação tão real quanto a mostrada na seção anterior. Este método também tem uma redução de geração equilibrada ao longo das barras, permitindo que uma grande quantidade de potência ativa seja inserida numa determinada barra.

Com base nos resultados obtidos de todas as soluções dos fluxos de potência para todas as barras, foi possível construir a Tabela 4, com destaque para as barras que apresentaram a maior redução de perda e o pior caso em que houve um aumento de perdas.

A Figura 15 mostra o comportamento da tensão e evolução de perdas quando a penetração ocorre na barra 10. Pode-se verificar que a curva em vermelho inicia-se numa queda considerável, mostrando que a redução de perdas é bastante significativa. Seu ponto de mínimo ocorre em 660 *MW* quando as perdas chegam a 62% das perdas do caso base. Ainda na barra 10, percebe-se que a máxima penetração é de 1549.9 *MW* isto é mais que a metade de todas as cargas do sistema.

Avaliando-se a barra crítica neste caso, verificou-se que a barra crítica é a barra 7, devido à sua alta taxa de variação de tensão no ponto de máxima penetração. A barra 7 é uma barra de geração e é capaz de fornecer potência reativa e regular sua tensão até que a penetração na barra 10 atinja aproximadamente 1400 *MW*, a partir daí as máquinas ficam limitadas em fornecer potência reativa e a sua tensão começa a despencar.

A Figura 16 mostra o comportamento da tensão em todas as barras do sistema, quando a penetração de geração ocorre na barra 10.

Outro caso destacado é quando a penetração de geração ocorre na barra 21. Neste ponto não há em nenhum momento um caso em que as perdas sejam reduzidas quando comparadas ao caso base. Nesta situação o ponto de máxima penetração ocorre em 765

Tabela 4 – Penetração de Geração eólica, distribuição pela capacidade das máquinas

| Barra | Porcentagem de penetração eólica | | | | | | Perdas Mínimas | | Máx. Penetração | |
|-------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|-----------------|----------|
| | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Perdas [%] | Ger. [MW] | [MW] | B. Crít. |
| | Perdas em relação caso base [%] | | | | | | | | | |
| 1 | 94 | 100 | 149 | – | – | – | 94 | 140 | 784.9 | 5 |
| 2 | 94 | 100 | 150 | – | – | – | 94 | 140 | 714.9 | 7 |
| 3 | 95 | 97 | 124 | 187 | – | – | 94 | 170 | 919.9 | 8 |
| 4 | 88 | 91 | 141 | – | – | – | 88 | 180 | 709.9 | 8 |
| 5 | 88 | 88 | 125 | 219 | – | – | 87 | 210 | 859.9 | 5 |
| 6 | 82 | 76 | 95 | 167 | – | – | 76 | 300 | 919.9 | 10 |
| 7 | 103 | 137 | – | – | – | – | 98 | 50 | 360 | 6 |
| 8 | 86 | 87 | 139 | – | – | – | 84 | 200 | 799.9 | 8 |
| 9 | 87 | 79 | 70 | 78 | 101 | – | 71 | 580 | 1419.9 | 7 |
| 10 | 85 | 74 | 63 | 65 | 83 | 123 | 62 | 660 | 1549.9 | 7 |
| 11 | 88 | 78 | 66 | 65 | 76 | 99 | 64 | 740 | 1439.9 | 6 |
| 12 | 88 | 79 | 70 | 72 | 87 | – | 69 | 660 | 1359.9 | 8 |
| 13 | 90 | 83 | 78 | 83 | 102 | 139 | 78 | 570 | 1552.5 | 7 |
| 14 | 93 | 90 | 94 | 111 | 141 | – | 90 | 350 | 1219.9 | 6 |
| 15 | 106 | 114 | 141 | 179 | – | – | 100 | 0 | 932.5 | 16 |
| 16 | 104 | 110 | 128 | 154 | – | – | 100 | 0 | 1025.0 | 19 |
| 17 | 109 | 120 | 154 | 198 | – | – | 100 | 0 | 992.5 | 16 |
| 18 | 113 | 132 | 179 | – | – | – | 100 | 0 | 757.5 | 16 |
| 19 | 101 | 105 | 120 | 144 | – | – | 100 | 0 | 1042.5 | 6 |
| 20 | 102 | 106 | 123 | 149 | – | – | 100 | 0 | 884.9 | 6 |
| 21 | 114 | 134 | 182 | – | – | – | 100 | 0 | 765.0 | 16 |
| 22 | 122 | 152 | – | – | – | – | 100 | 0 | 369.8 | 17 |
| 23 | 106 | 115 | – | – | – | – | 100 | 0 | 569.9 | 6 |
| 24 | 98 | 101 | 126 | 188 | – | – | 98 | 130 | 892.5 | 3 |

MW e a barra crítica é a barra 16.

A Figura 17 ilustra o perfil de tensão da barra 16 bem como a evolução das perdas do sistema. Nota-se que a curva de perdas é crescente em todo momento, evidenciando que o ponto de menor perdas é o caso base. Nesta situação a penetração nesta barra não é interessante do ponto de vista das perdas.

A Figura 18 mostra os perfil de tensão de todas as barras do sistema para o caso em que a penetração ocorre na barra 21.

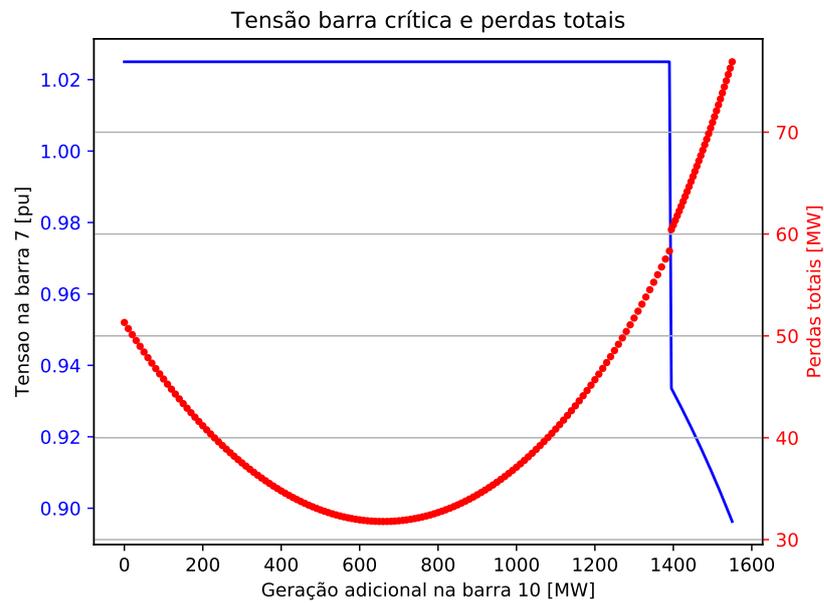


Figura 15 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 10

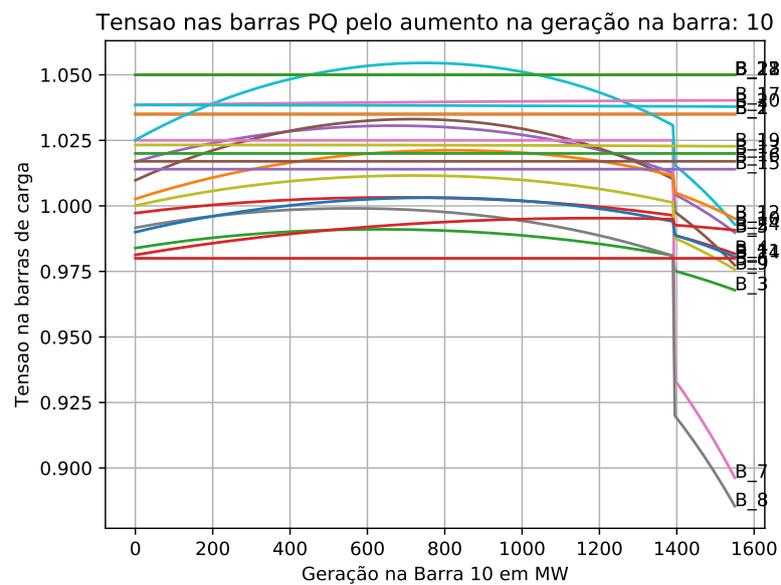


Figura 16 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 10

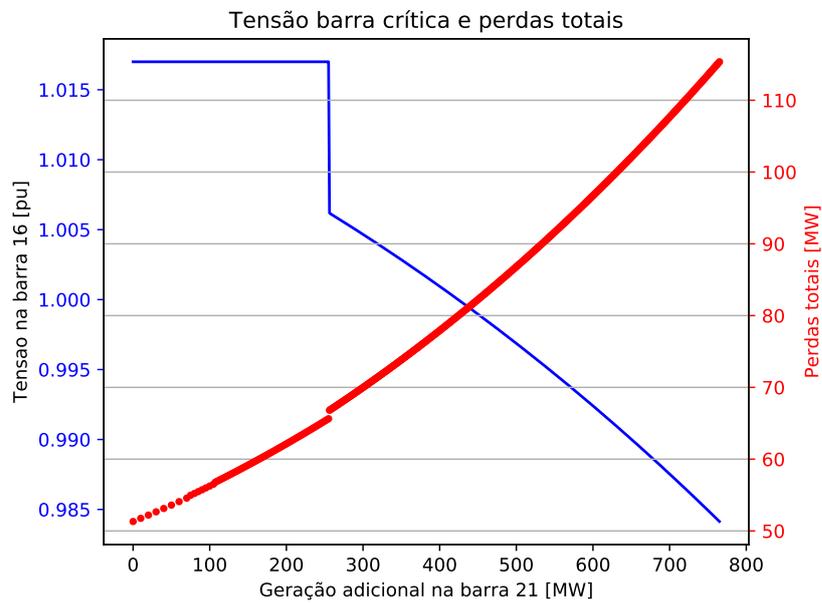


Figura 17 – Tensão na barra crítica e evolução de perdas para penetração na barra 21

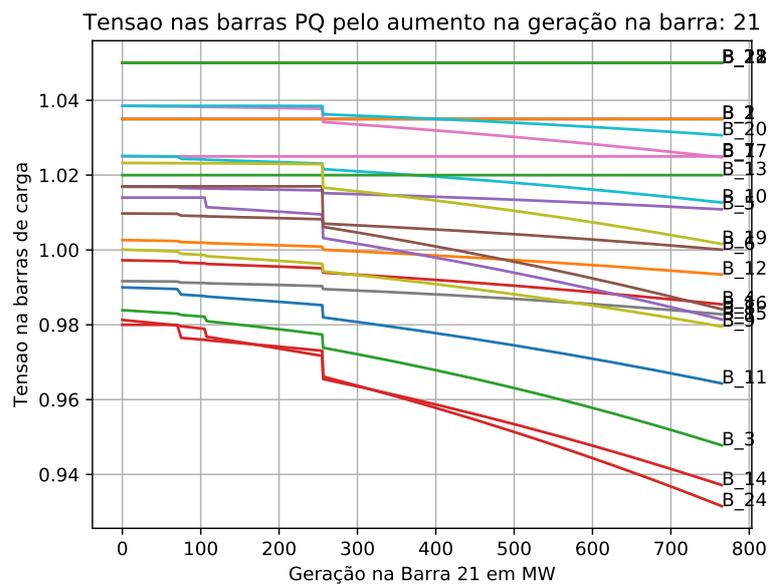


Figura 18 – Comportamento da tensão nas barras do sistema para penetração na barra 21

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o desempenho da penetração de geração eólica em determinadas barras de um sistema elétrico de potência. Cada seção deste capítulo mostrou os resultados obtidos para os diferentes métodos propostos.

A Seção 5.2 apresentou os resultados de um sistema em que a penetração de geração eólica é compensada apenas na barra *slack*. Este caso é factível até que a geração na barra *slack* seja anulada, ou seja, permite uma penetração de cerca de 187 MW em alguma outra barra do sistema que não a *slack*. Este método apresenta um desempenho ruim quanto à redução de perdas, isto é devido ao fato de se estar aumentando a potência gerada em um ponto e retirando de outro, ou até mesmo adicionando carga conforme apresentado na Seção 5.2. Desta forma, as linhas próximas a esses dois pontos são muito sobrecarregadas aumentando o nível de perdas do sistema. Neste método, o melhor caso estudado permite uma redução de perdas de 6% do caso base.

Já na Seção 5.3 a metodologia utilizada incrementa a geração em uma barra e compensa esta geração em todos os outros geradores proporcionalmente às gerações no caso base. Desta forma, ao contrário do caso anterior, a penetração de geração pode avançar muito mais visto que a geração da barra *slack* é reduzida vagarosamente juntamente com outros geradores. O desempenho deste método é, para a penetração na maioria das barras, vantajoso, pois acaba por reduzir as perdas totais do sistema. Este método apresentou uma redução de até 42% nas perdas do sistema quando a penetração ocorre na barra 10.

Os resultados apresentados na seção 5.4 são bastante semelhantes ao da seção 5.3 pois apresentam algoritmos muito parecidos. A diferença está no fator de participação dos geradores, fator que apontará a redução de geração dos geradores a medida em que a penetração aumenta. Neste método consegue-se uma redução de perdas de até 38%, valor não muito distante do método anterior.

Esperava-se que a tensão nas barras do sistema tivesse um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4 do fluxo de potência continuado. Porém, nesta metodologia, os limites de geração de potência reativa sempre são atingidos em bastante geradores (ABRANTES, 2016), impossibilitando uma penetração maior de geração eólica.

A Tabela 5 mostra, a critério de comparação, o desempenho da penetração de geração na barra 10 que tem um desempenho bom nos 3 métodos. Já as Tabelas 6 e 7 ilustram a comparação da penetração eólica nas barras 20 e 21, respectivamente. Porém, desta vez, o desempenho é insatisfatório pelos três métodos.

Tabela 5 – Penetração de Geração eólica na Barra 10, comparação dos métodos

| Método | Porcentagem de penetração eólica | | | | | | Perdas Mínimas | | Máx. Penetração | |
|--------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|-----------------|----------|
| | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Perdas [%] | Ger. [MW] | [MW] | B. Crít. |
| | Perdas em relação caso base [%] | | | | | | | | | |
| 1 | 96 | 97 | 109 | – | – | – | 96 | 200 | 749.9 | 11 |
| 2 | 84 | 72 | 59 | 60 | 78 | 116 | 58 | 680 | 1519.9 | 3 |
| 3 | 85 | 74 | 63 | 65 | 83 | 123 | 62 | 660 | 1549.9 | 7 |

Tabela 6 – Penetração de Geração eólica na Barra 20, comparação dos métodos

| Método | Porcentagem de penetração eólica | | | | | | Perdas Mínimas | | Máx. Penetração | |
|--------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|-----------------|----------|
| | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Perdas [%] | Ger. [MW] | [MW] | B. Crít. |
| | Perdas em relação caso base [%] | | | | | | | | | |
| 1 | 114 | 133 | – | – | – | – | 100 | 0 | 359.9 | 6 |
| 2 | 101 | 103 | 116 | 139 | – | – | 100 | 40 | 1050.0 | 6 |
| 3 | 102 | 106 | 123 | 149 | – | – | 100 | 0 | 884.9 | 6 |

Tabela 7 – Penetração de Geração eólica na Barra 21, comparação dos métodos

| Método | Porcentagem de penetração eólica | | | | | | Perdas Mínimas | | Máx. Penetração | |
|--------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|-----------------|----------|
| | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Perdas [%] | Ger. [MW] | [MW] | B. Crít. |
| | Perdas em relação caso base [%] | | | | | | | | | |
| 1 | 125 | 159 | – | – | – | – | 100 | 0 | 355.0 | 14 |
| 2 | 113 | 131 | 174 | 232 | – | – | 100 | 0 | 882.5 | 16 |
| 3 | 114 | 134 | 182 | – | – | – | 100 | 0 | 765.0 | 16 |

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações

O presente trabalho apresentou um método de se avaliar a penetração de geração eólica num sistema de potência. Propôs ainda, três maneiras diferentes de se reduzir a potência gerada excedente dos outros geradores.

O primeiro caso, visto na Seção 5.2, tem sua particularidade de que é a redução de potência apenas na barra *slack*, caso mais simples e que torna o trabalho do operador do sistema mais simples. Porém, na realidade, este caso fica limitado numa penetração de aproximadamente 187 MW que é a geração da barra *slack* e apresenta resultados piores.

No segundo e terceiro caso, Seções 5.3 e 5.4, apresentam resultados mais positivos. O fato da redução da geração ocorrer gradualmente em todos os outros geradores promove um sistema mais equilibrado quando comparado ao método anterior, estressando menos algumas linhas do sistema e conseqüentemente reduzindo perdas.

Em todos os métodos, os resultados mostram que a redução de perdas não ocorre para a penetração em todas as barras nem para todos os valores de penetração. É importante destacar que, de maneira geral, os melhores casos acontecem quando a penetração ocorre em barras do interior do sistema IEEE 24 barras, normalmente barras do tipo PQ que quando se tornam geradores, reduzem o fluxo de potência em certas linhas do sistema, reduzindo as perdas. As barras 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam bons resultados para todos os métodos propostos.

Estudos nesta linha devem ser levados em conta no projeto de instalação de um parque ou complexo eólico. Do ponto de vista do sistema elétrico, a inserção de geração eólica pode ser excelente pois pode reduzir bastante perdas ativas. Mas podem também ser um grande problema caso a decisão da conexão seja num ponto desfavorável, necessitando assim, projetos de melhorias na configuração das linhas de transmissão do sistema elétrico.

Todos os resultados, gráficos e tabelas, foram produtos de um algoritmo na linguagem Python. Criado da estaca zero, primeiramente foi capaz de solucionar problemas de fluxo de carga não linear. Com alguns *upgrades* passou a solucionar também os problemas de fluxo de potência continuado. E com pequenas adaptações foi possível implementar a metodologia foco deste trabalho.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados deste trabalho foram obtidos através de um algoritmo adaptado de um algoritmo de fluxo de potência continuado, porém ainda não haviam sido implementadas restrições de fluxos nas linhas o que pode se tornar um problema em casos mais reais.

Testes em sistemas de potência reais atuais também não foram executados. Os seguintes pontos podem ser reforçados para trabalhos futuros.

- Implementar os limites de fluxo de potência nas linhas
- Utilizar o método em casos reais
- Encontrar uma maneira mais real de encontrar fatores de participação
- Verificar a possibilidade de penetração em mais de uma barra por vez

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, A. L. Bifurcações induzidas por limites no contexto de estabilidade de tensão. *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:10.11606/D.18.2016.tde-31082016-113911*, 2016.
- AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 416–423, Feb 1992. ISSN 0885-8950.
- ALTOMAR, M. B.; FILHO, J. A. P. Assessment of solar generation power plants through sequential newton power flow solutions along the weekly load curve. *The XI Latin-american Congress Electricity Generation And Transmission - Clagtee 2015 "Bioenergy For Electricity Generation And Ecological Issues In Power Plants"*, 2015.
- ANAREDE, C. *Manual do Usuário*. CEPEL, 2015. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/programas-computacionais/menu/anarede-analise-de-redes-eletricas.htm>>.
- BRITO, S. de S. Energia eólica: princípios e aplicações. *Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito*, 2006.
- COSTA, P. A. da S. Atlas do potencial eólico para portugal continental. *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa*, 2004.
- FERREIRA, C. A.; COSTA, V. M. d. Controle de tensão no fluxo de potência continuado: modelagens e efeitos na estabilidade de tensão. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 15, n. 4, p. 459–466, 2004.
- GRIGG, C. et al. The ieee reliability test system-1996. a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 1010–1020, 1999.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. *Power system stability and control*. : McGraw-hill New York, 1994.
- MARTINS, F.; GUARNIERI, R.; PEREIRA, E. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.
- MME, M. D. M. E. E. Capacidade instalada de geração elétrica brasil e mundo (2016). Departamento de Informações e Estudos Energéticos DIE/SPE/MME, 2017.
- MONTICELLI, A. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. E. Blucher, 1983. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=b_qAkgEACAAJ>.
- ONS, O. N. do S. E. *CAPACIDADE INSTALADA NO SIN - 2016 / 2021*. 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>.
- PERVEEN, R.; KISHOR, N.; MOHANTY, S. R. Off-shore wind farm development: Present status and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 780 – 792, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006849>>.

ROSSUM, G. *Python Reference Manual*. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, 1995.

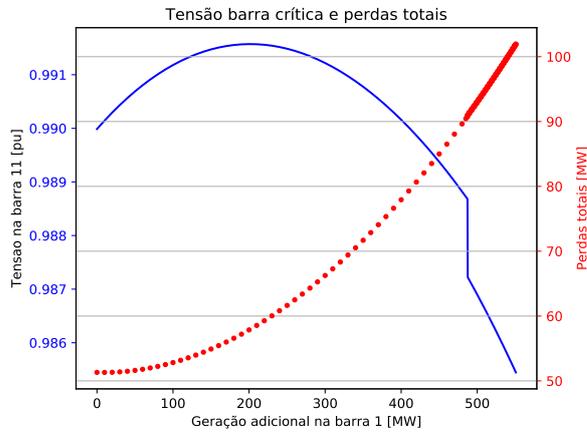
RÜNCOS, F. et al. Geração de energia eólica—tecnologias atuais e futuras. 2000.

SANTOS, J.; TORRES, E. Evolução da energia eólica na bahia no âmbito da matriz energética brasileira. 2013.

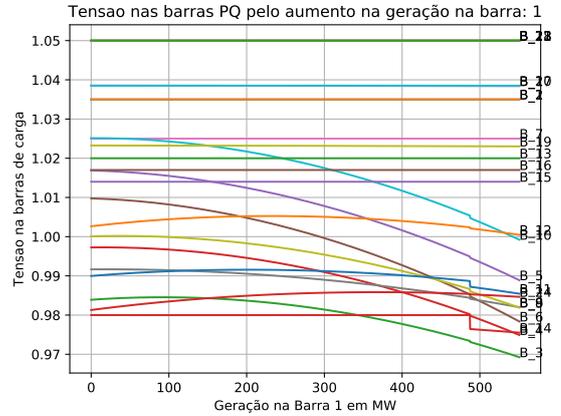
SLOOTWEG, J. G. et al. Voltage control methods with grid connected wind turbines: A tutorial review. *Wind Engineering*, v. 25, n. 6, p. 353–365, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1260/030952401760217157>>.

WINDEUROPE. 2016 european statistics. Wind in Power, 2017.

APÊNDICE A – Gráficos adicionais caso 1

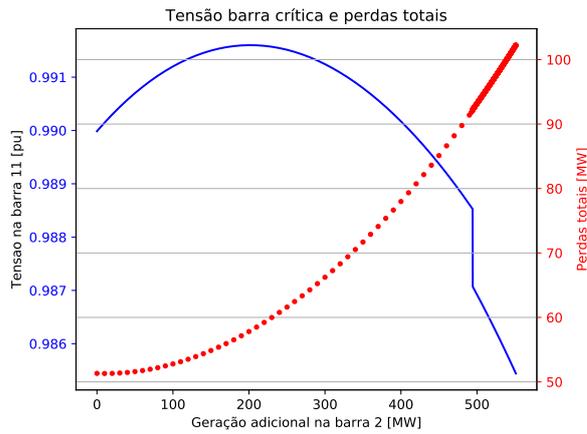


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

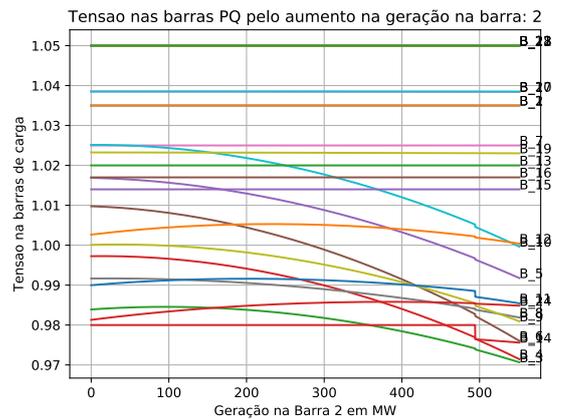


(b) Tensão nas barras

Figura 19 – Penetração de geração eólica na Barra 1

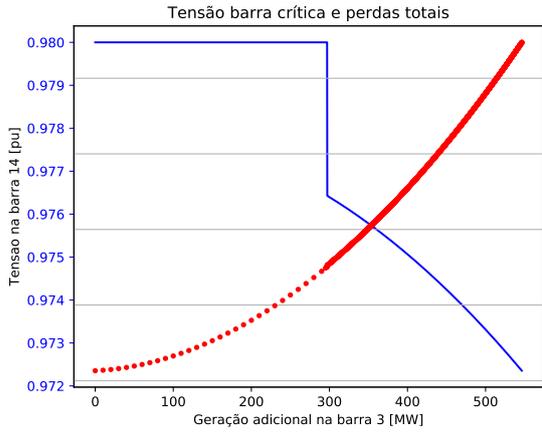


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

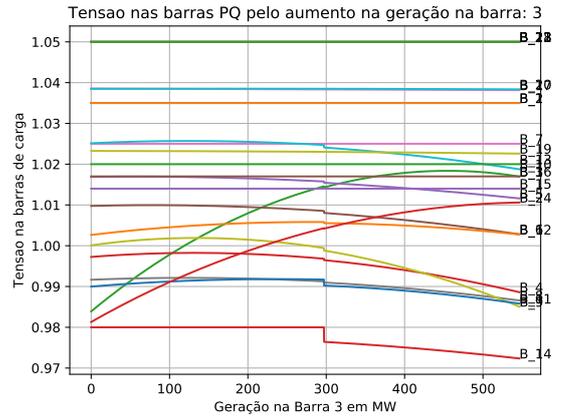


(b) Tensão nas barras

Figura 20 – Penetração de geração eólica na Barra 2

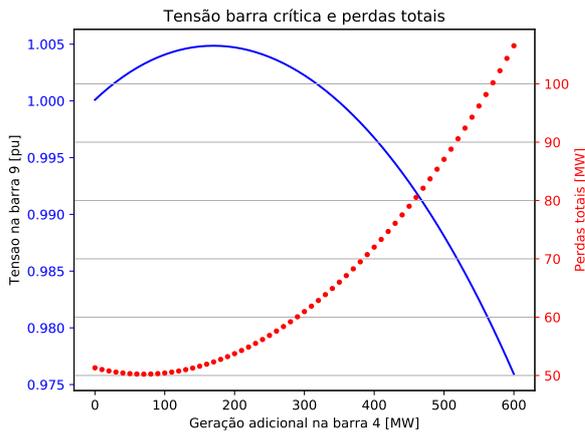


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

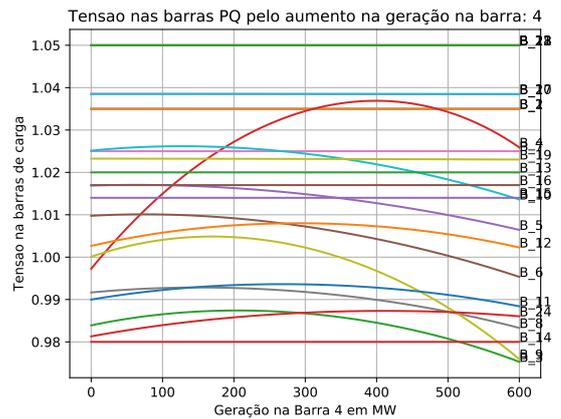


(b) Tensão nas barras

Figura 21 – Penetração de geração eólica na Barra 3

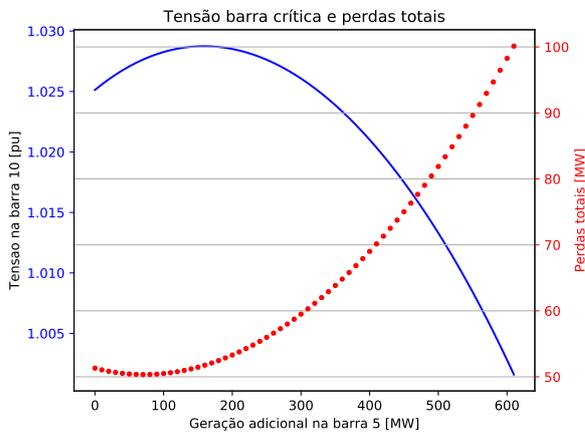


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

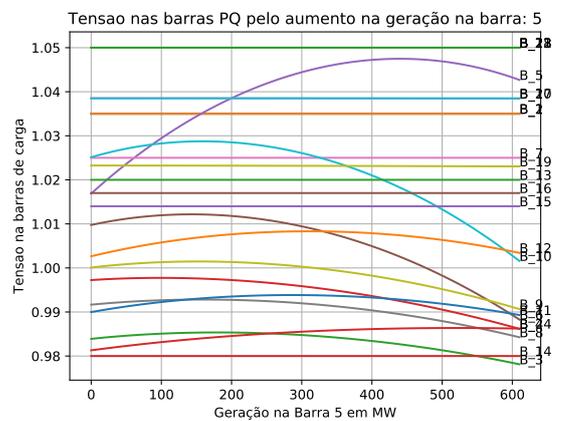


(b) Tensão nas barras

Figura 22 – Penetração de geração eólica na Barra 4

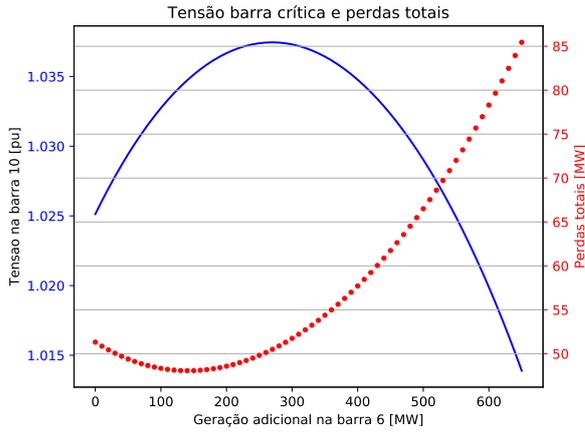


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

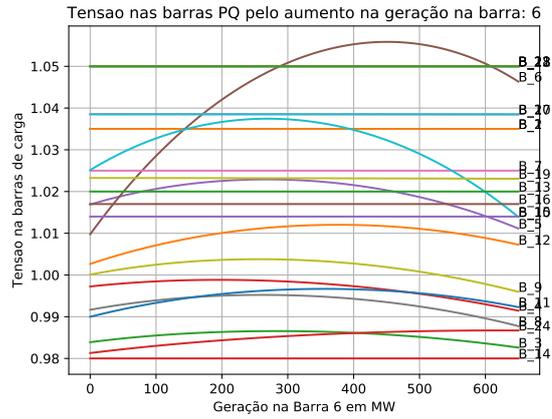


(b) Tensão nas barras

Figura 23 – Penetração de geração eólica na Barra 5

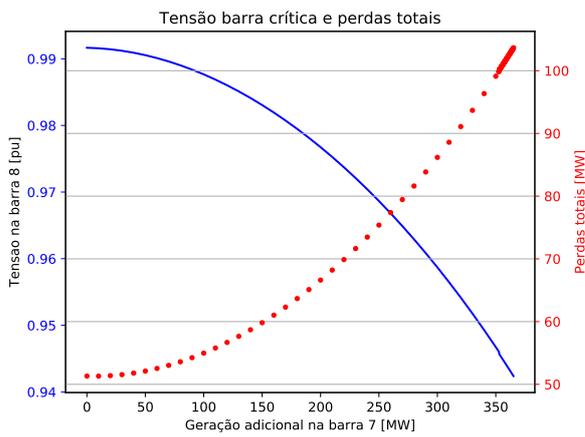


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

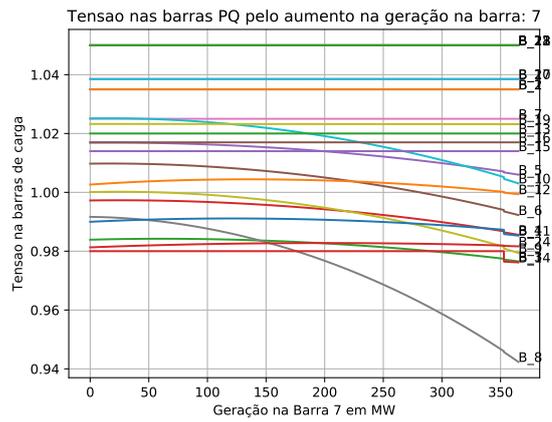


(b) Tensão nas barras

Figura 24 – Penetração de geração eólica na Barra 6

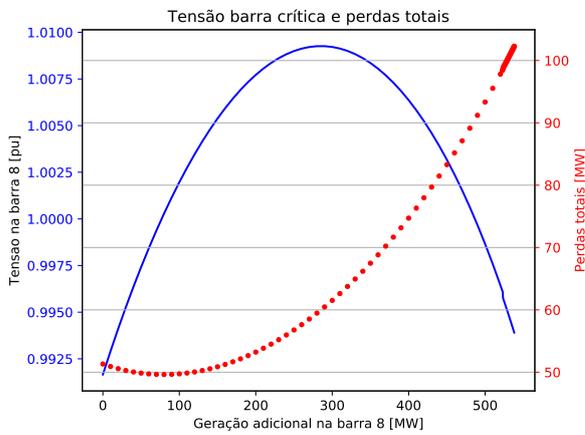


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

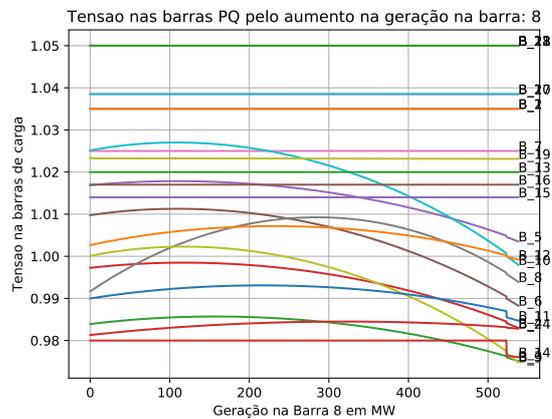


(b) Tensão nas barras

Figura 25 – Penetração de geração eólica na Barra 7

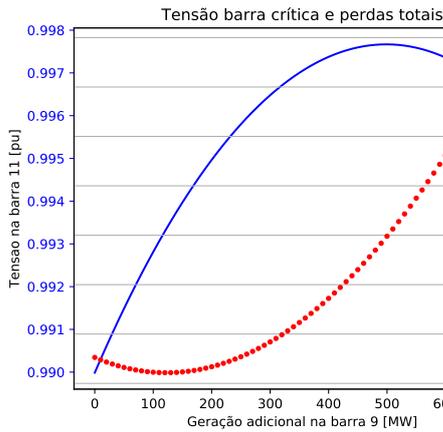


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

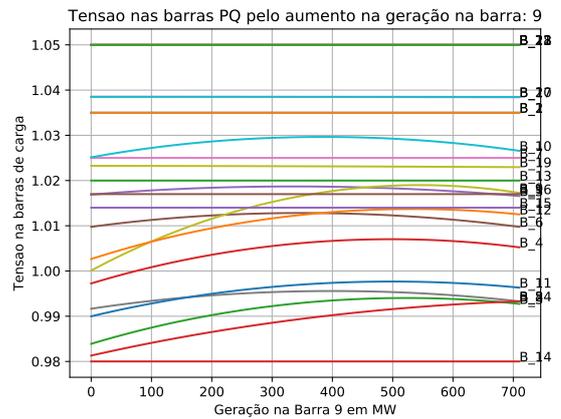


(b) Tensão nas barras

Figura 26 – Penetração de geração eólica na Barra 8

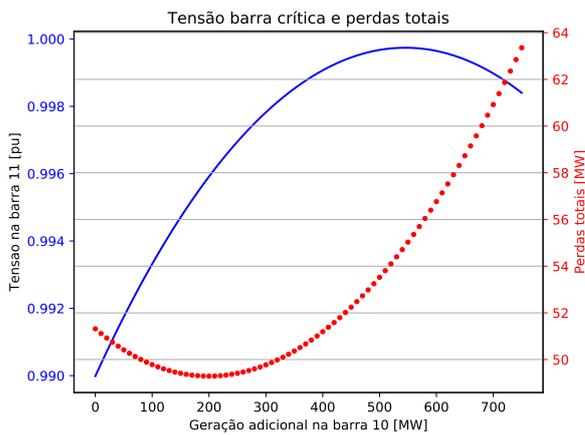


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

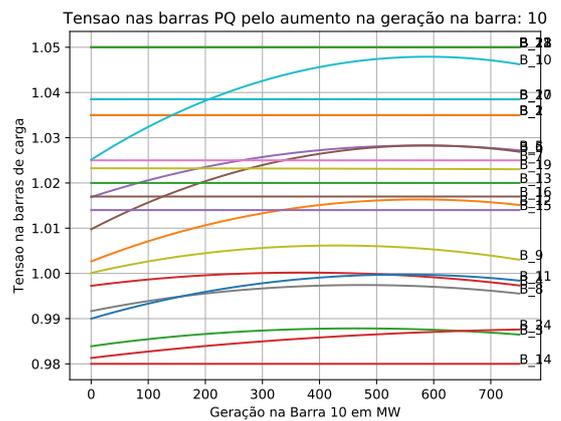


(b) Tensão nas barras

Figura 27 – Penetração de geração eólica na Barra 9

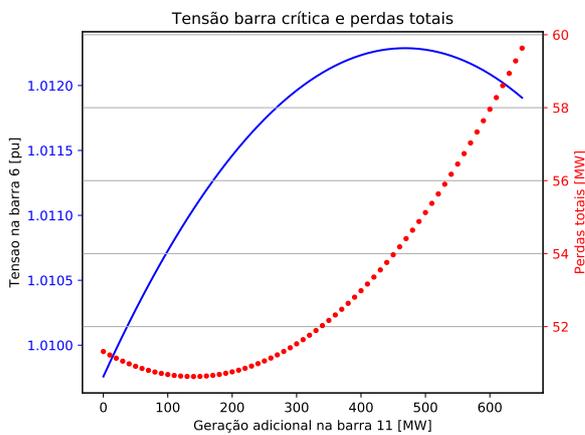


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

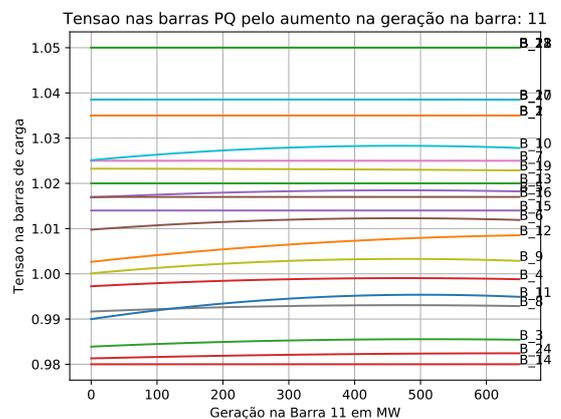


(b) Tensão nas barras

Figura 28 – Penetração de geração eólica na Barra 10

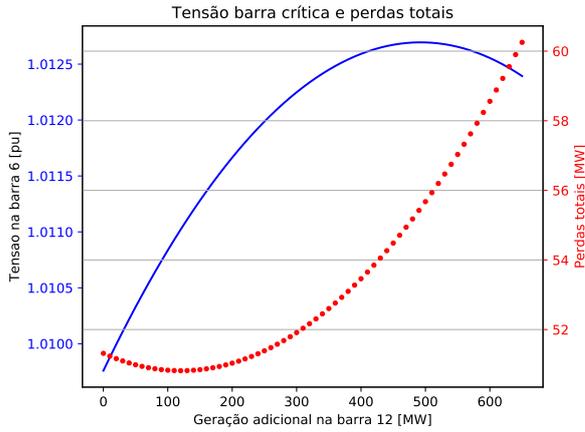


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

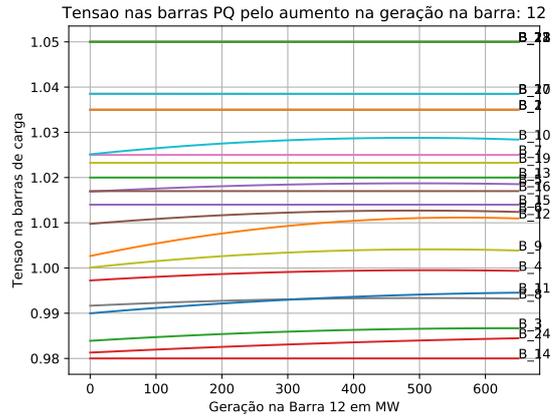


(b) Tensão nas barras

Figura 29 – Penetração de geração eólica na Barra 11

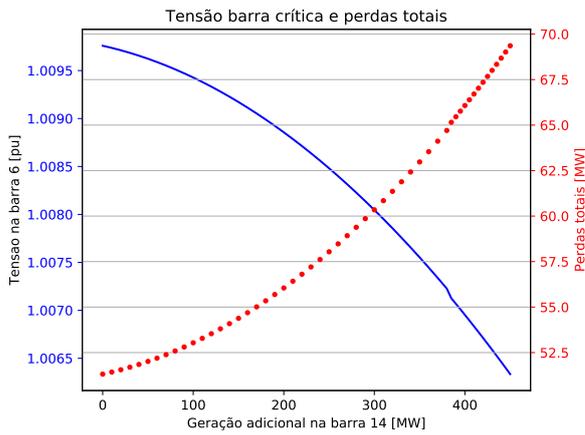


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

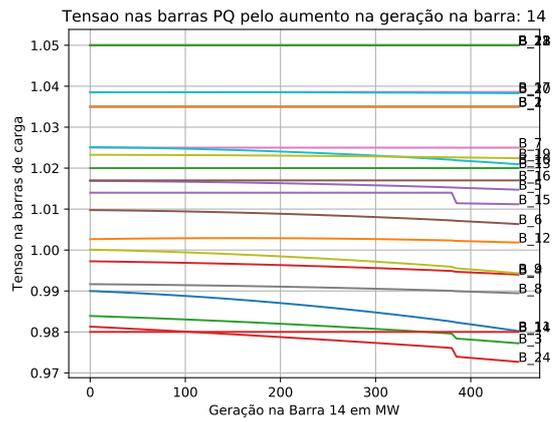


(b) Tensão nas barras

Figura 30 – Penetração de geração eólica na Barra 12

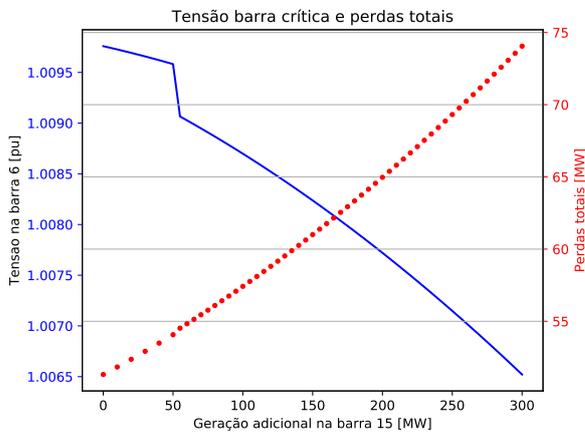


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

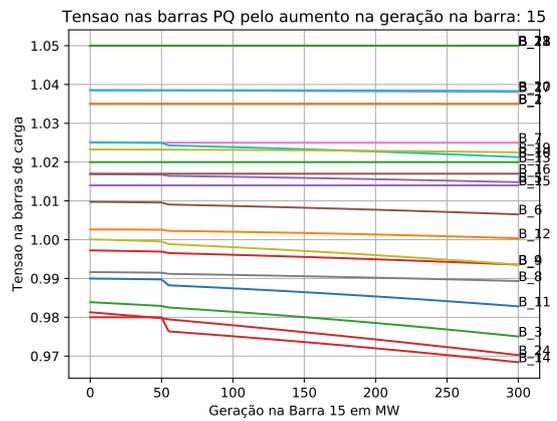


(b) Tensão nas barras

Figura 31 – Penetração de geração eólica na Barra 14

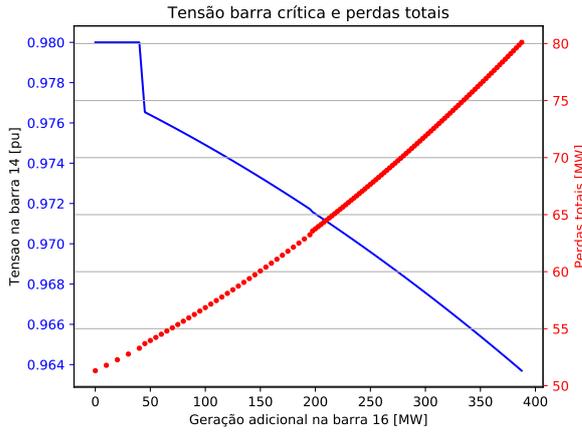


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

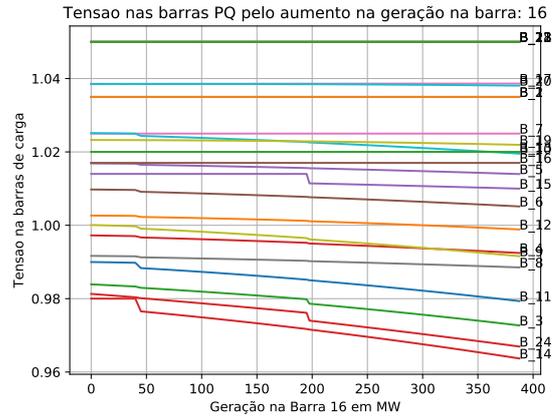


(b) Tensão nas barras

Figura 32 – Penetração de geração eólica na Barra 15

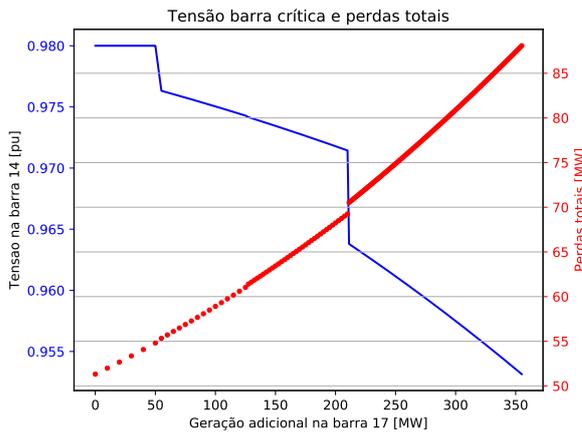


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

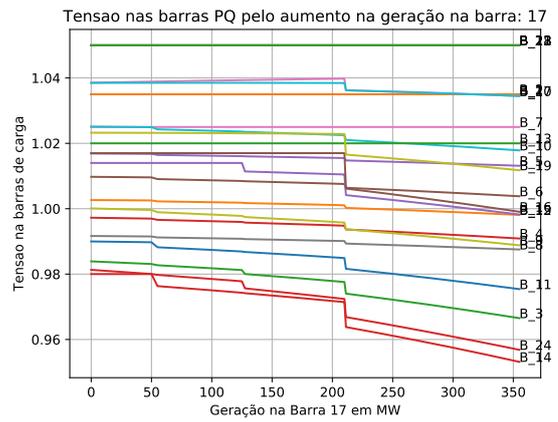


(b) Tensão nas barras

Figura 33 – Penetração de geração eólica na Barra 16

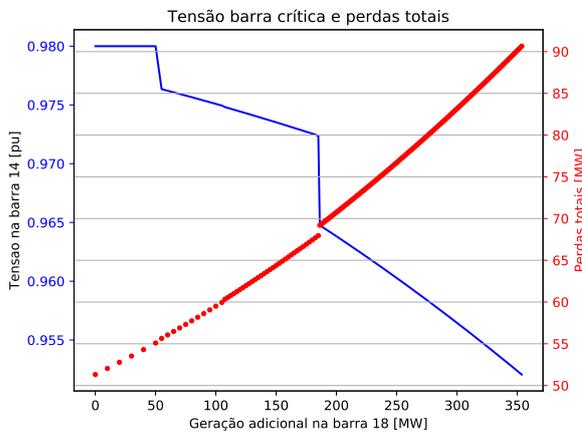


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

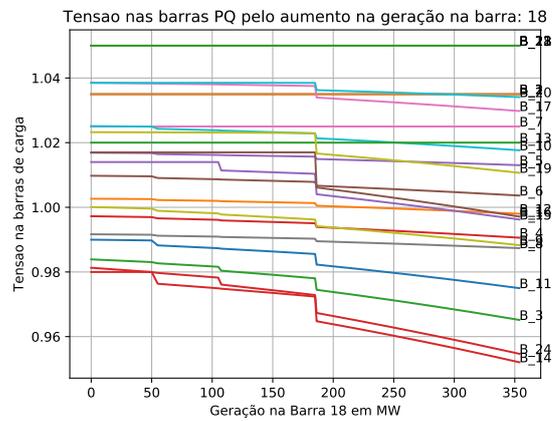


(b) Tensão nas barras

Figura 34 – Penetração de geração eólica na Barra 17

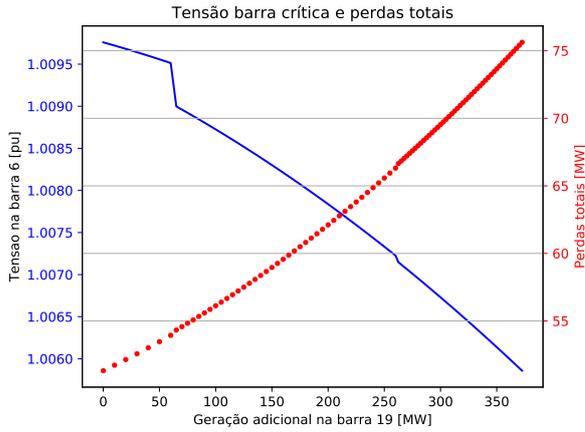


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

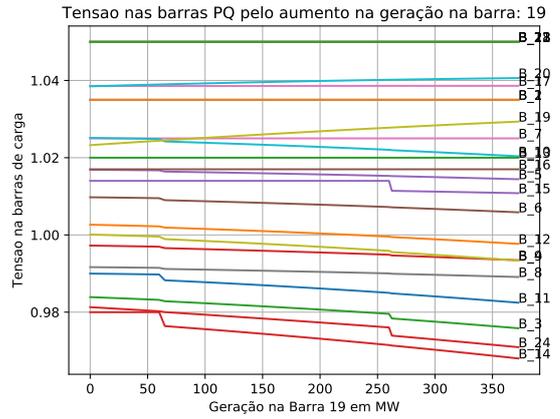


(b) Tensão nas barras

Figura 35 – Penetração de geração eólica na Barra 18

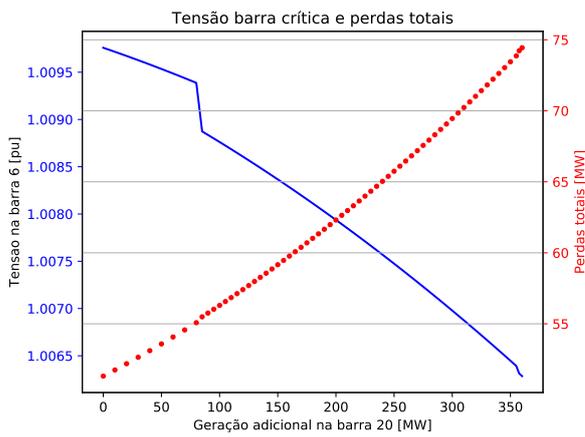


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

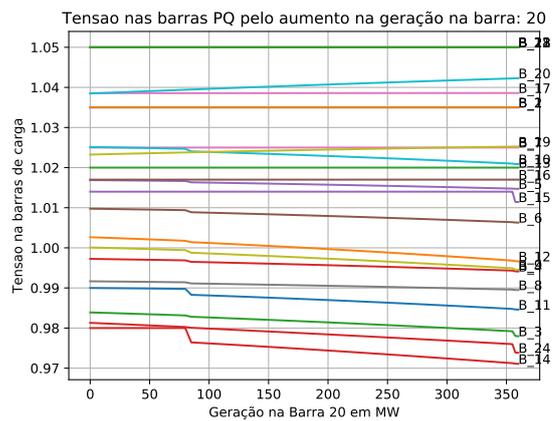


(b) Tensão nas barras

Figura 36 – Penetração de geração eólica na Barra 19

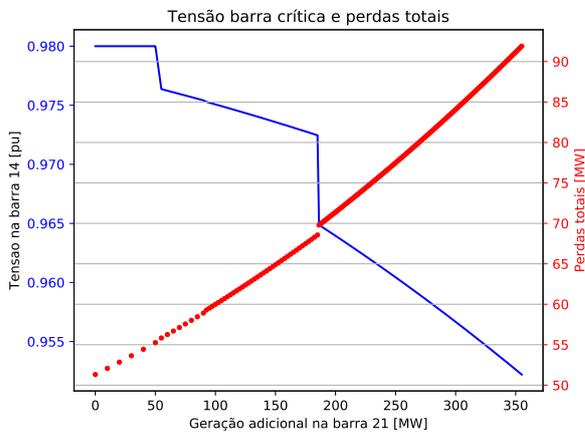


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

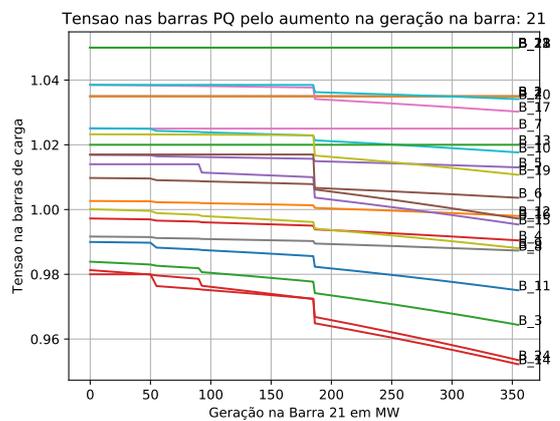


(b) Tensão nas barras

Figura 37 – Penetração de geração eólica na Barra 20

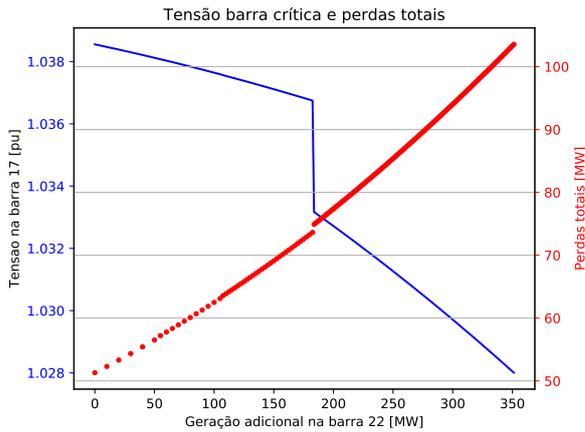


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

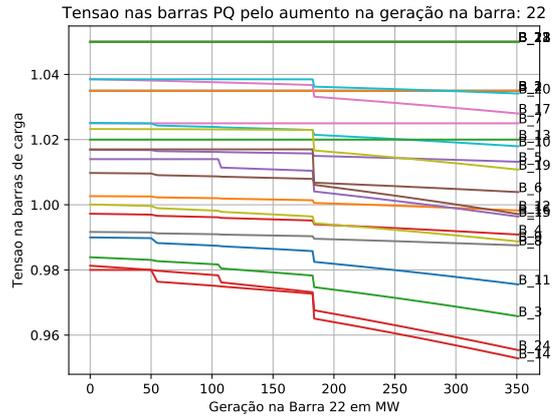


(b) Tensão nas barras

Figura 38 – Penetração de geração eólica na Barra 21

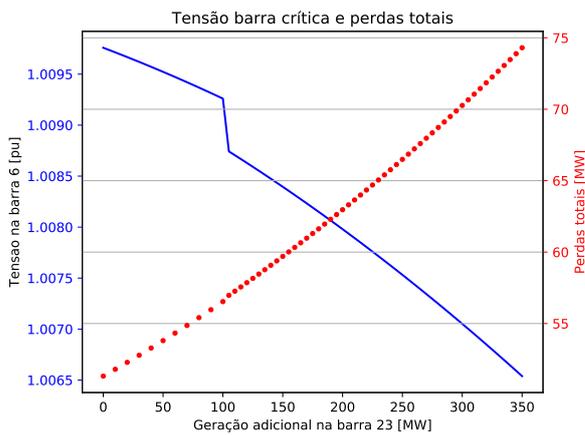


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

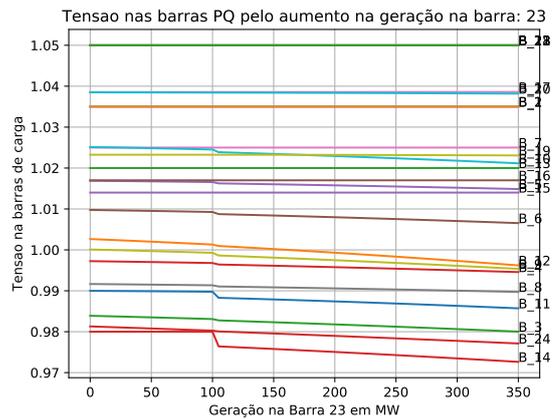


(b) Tensão nas barras

Figura 39 – Penetração de geração eólica na Barra 22

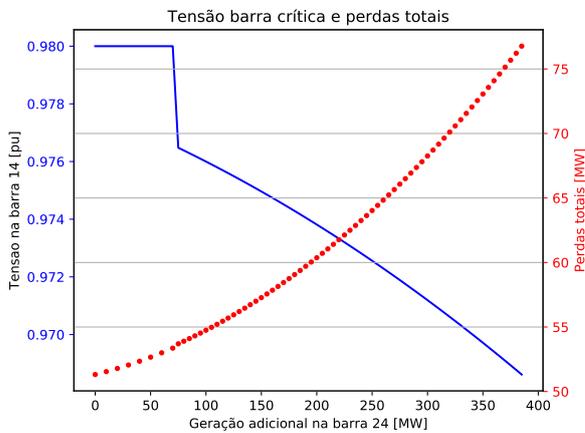


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

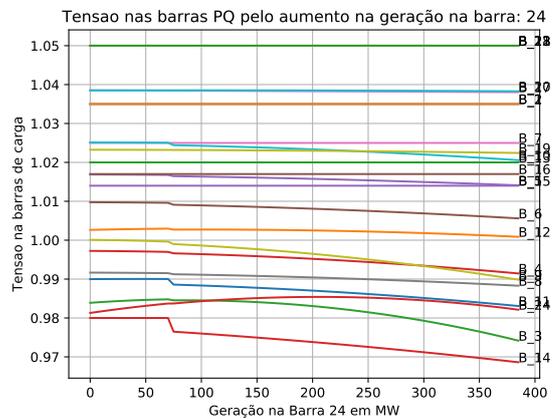


(b) Tensão nas barras

Figura 40 – Penetração de geração eólica na Barra 23



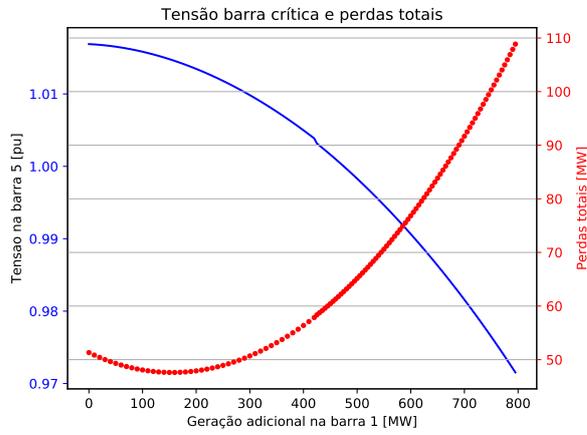
(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas



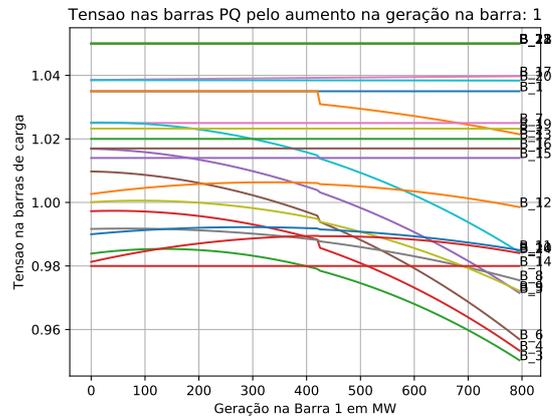
(b) Tensão nas barras

Figura 41 – Penetração de geração eólica na Barra 24

APÊNDICE B – Gráficos adicionais caso 2

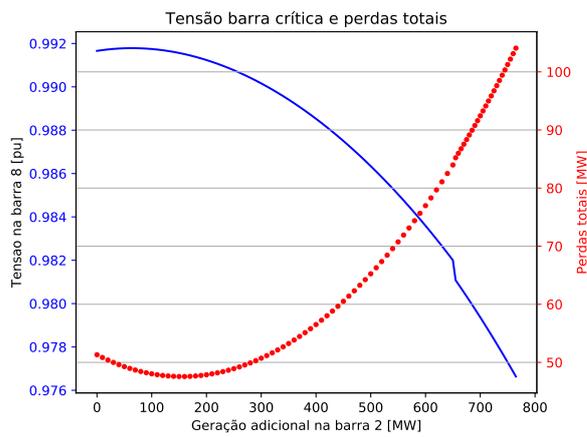


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

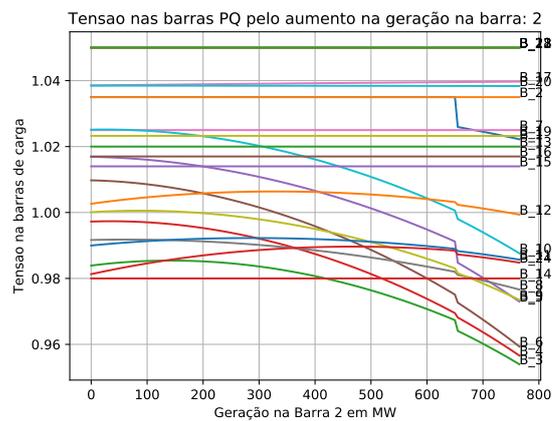


(b) Tensão nas barras

Figura 42 – Penetração de geração eólica na Barra 1

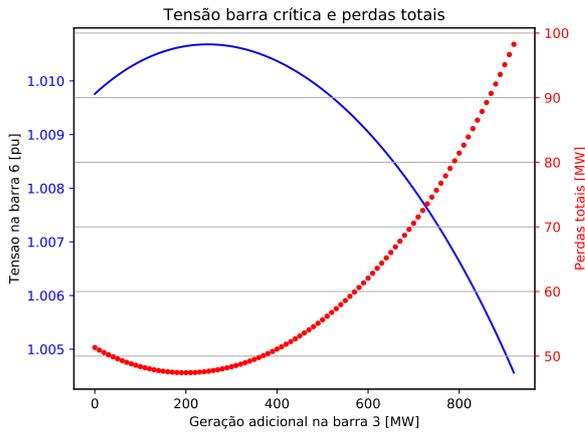


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

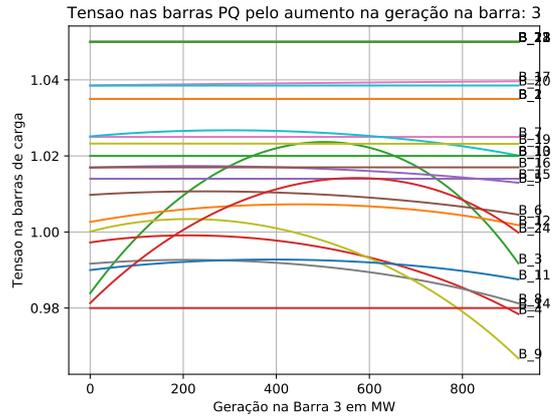


(b) Tensão nas barras

Figura 43 – Penetração de geração eólica na Barra 2

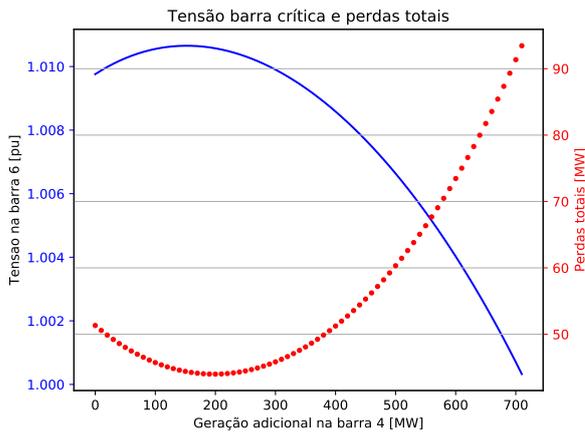


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

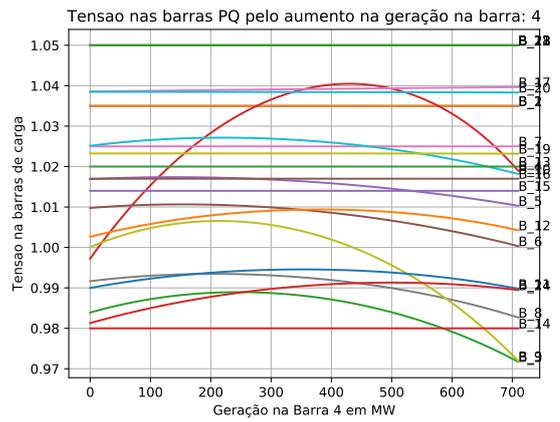


(b) Tensão nas barras

Figura 44 – Penetração de geração eólica na Barra 3

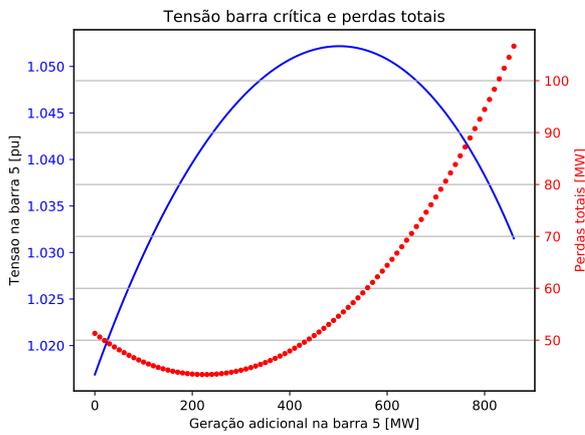


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

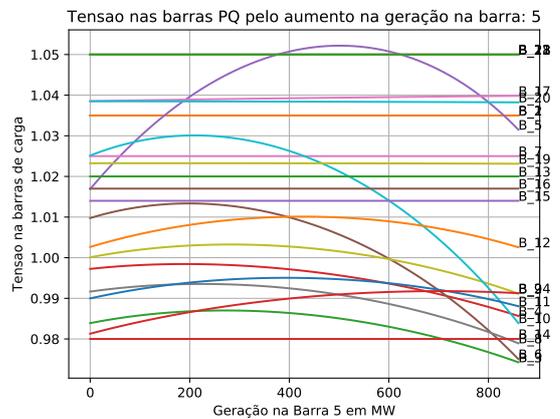


(b) Tensão nas barras

Figura 45 – Penetração de geração eólica na Barra 4

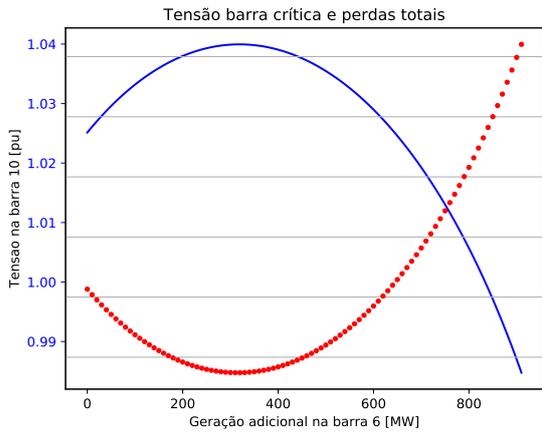


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

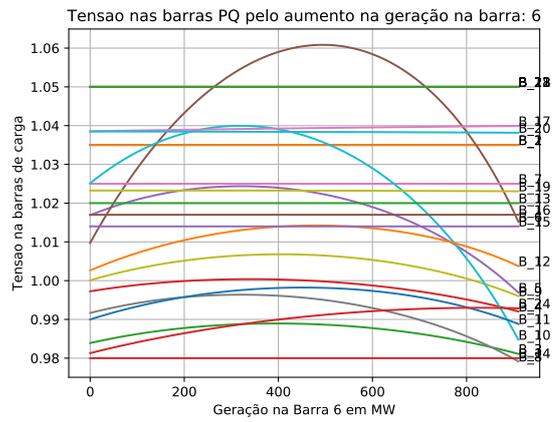


(b) Tensão nas barras

Figura 46 – Penetração de geração eólica na Barra 5

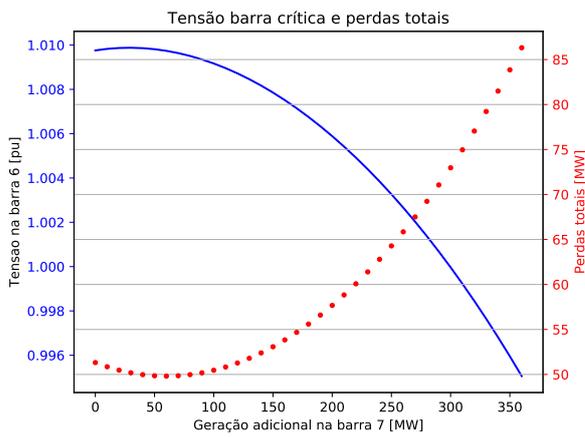


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

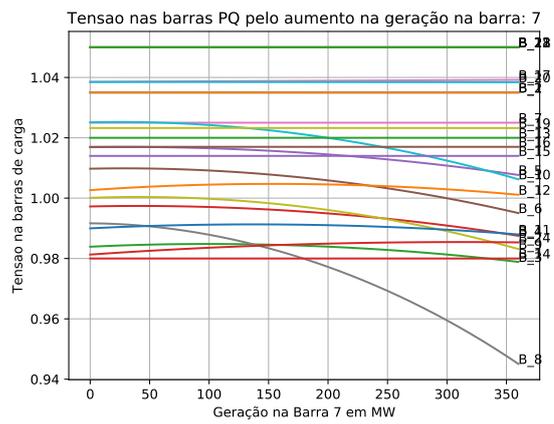


(b) Tensão nas barras

Figura 47 – Penetração de geração eólica na Barra 6

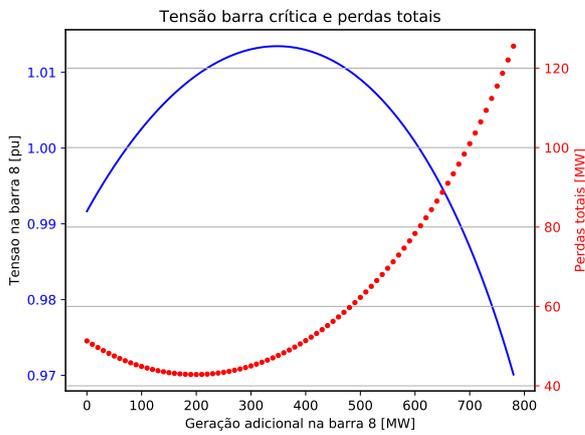


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

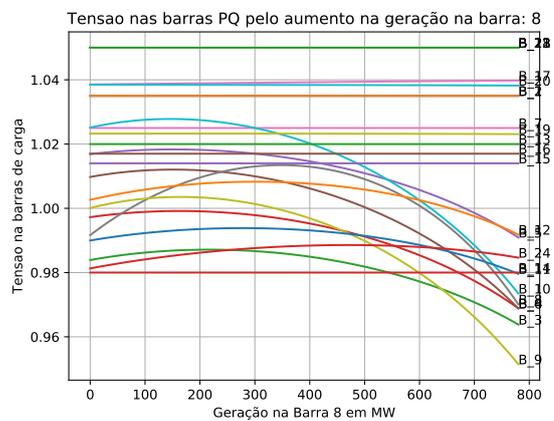


(b) Tensão nas barras

Figura 48 – Penetração de geração eólica na Barra 7

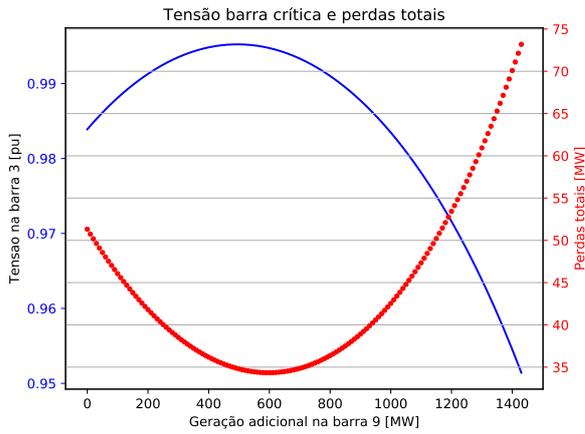


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

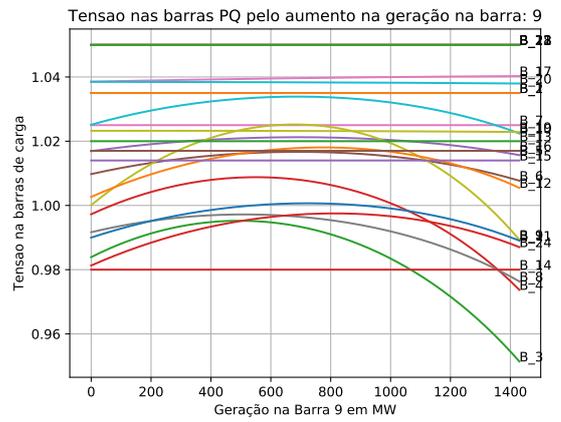


(b) Tensão nas barras

Figura 49 – Penetração de geração eólica na Barra 8

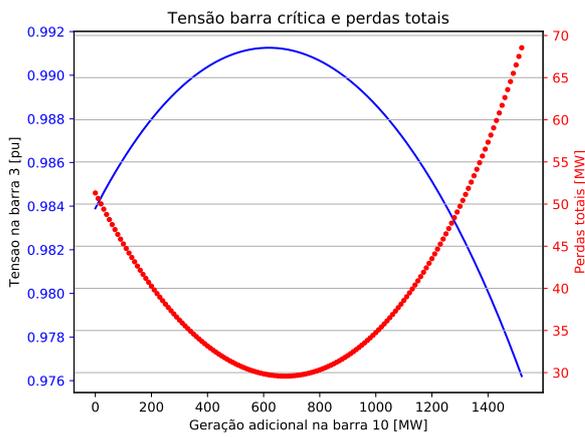


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

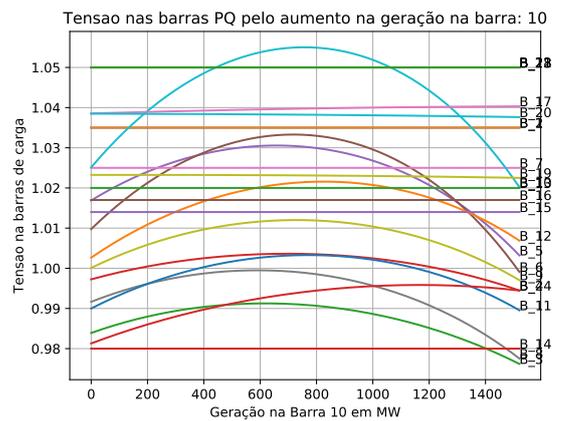


(b) Tensão nas barras

Figura 50 – Penetração de geração eólica na Barra 9

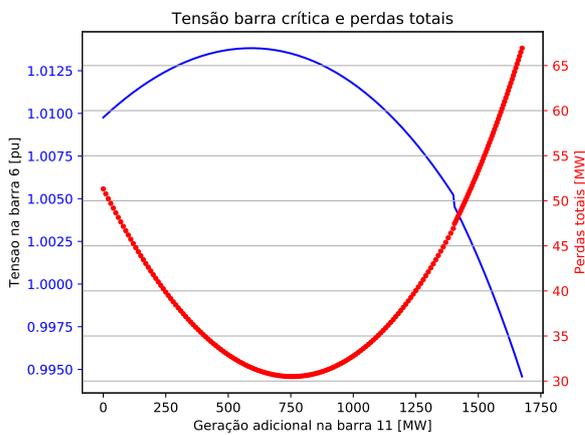


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

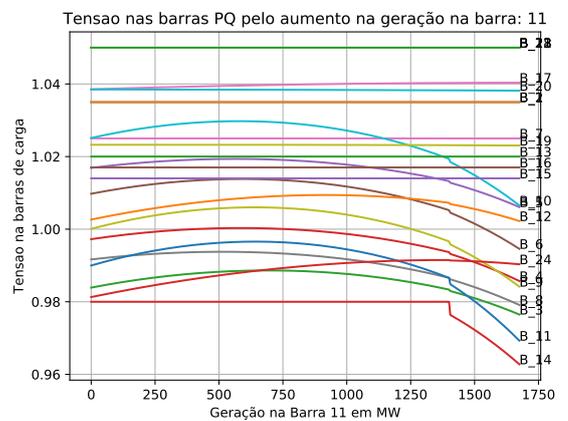


(b) Tensão nas barras

Figura 51 – Penetração de geração eólica na Barra 10

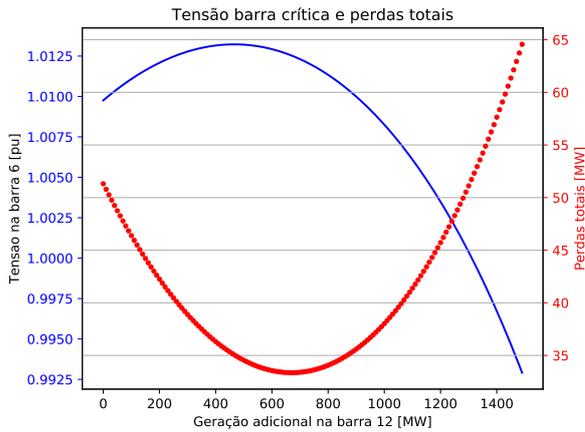


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

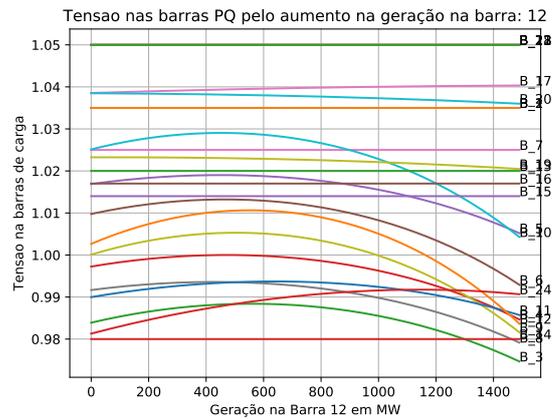


(b) Tensão nas barras

Figura 52 – Penetração de geração eólica na Barra 11

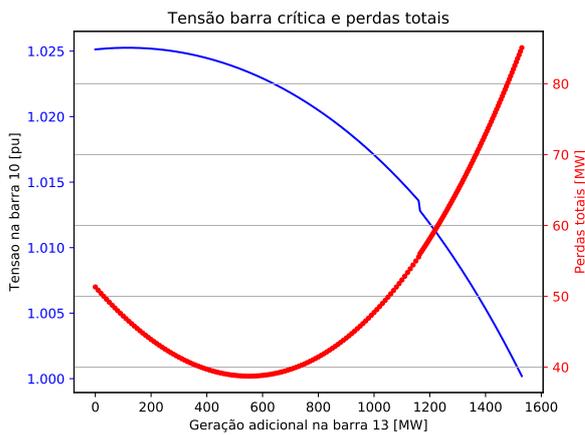


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

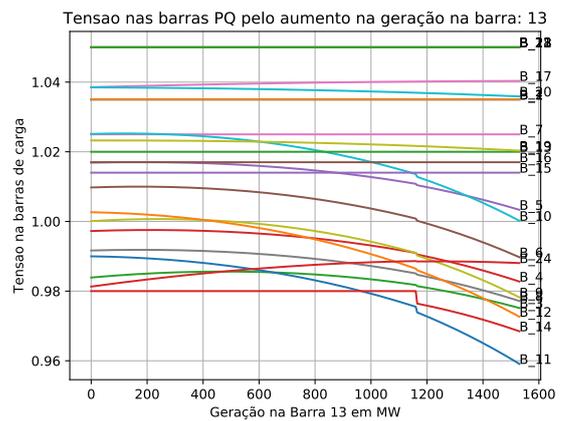


(b) Tensão nas barras

Figura 53 – Penetração de geração eólica na Barra 12

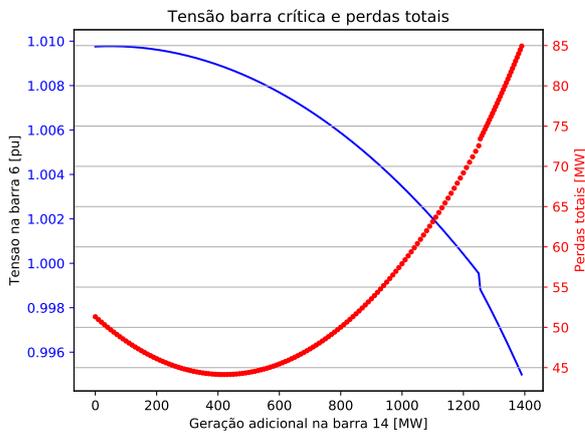


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

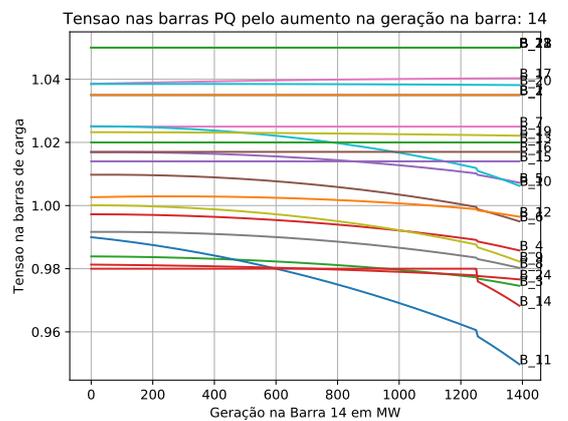


(b) Tensão nas barras

Figura 54 – Penetração de geração eólica na Barra 13

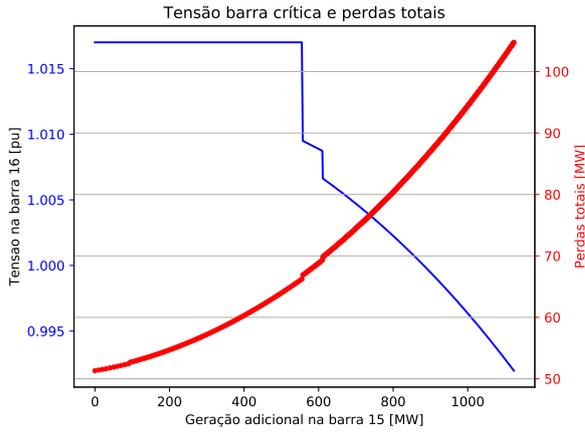


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

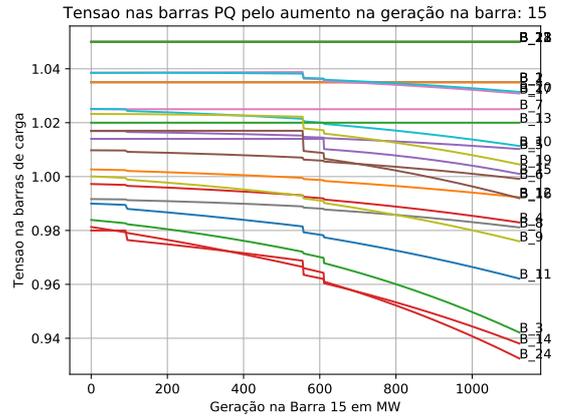


(b) Tensão nas barras

Figura 55 – Penetração de geração eólica na Barra 14

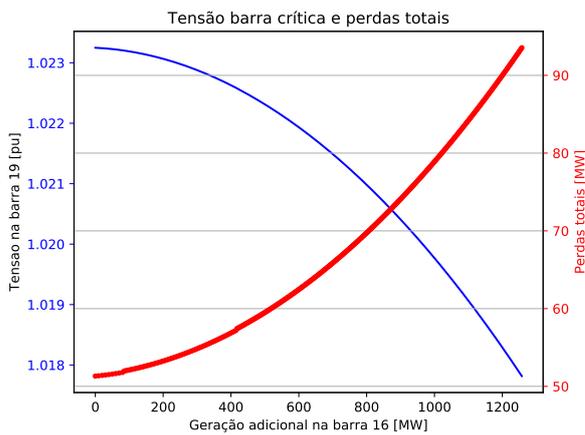


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

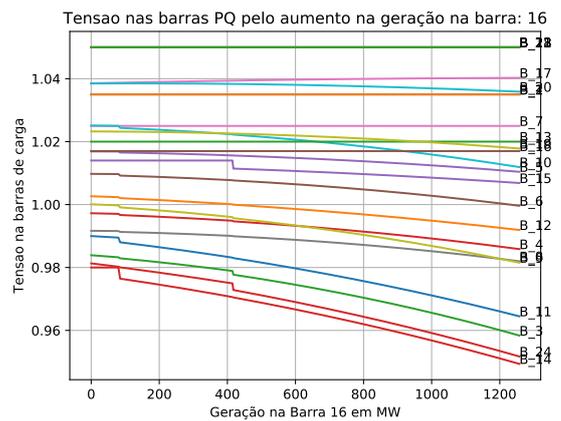


(b) Tensão nas barras

Figura 56 – Penetração de geração eólica na Barra 15

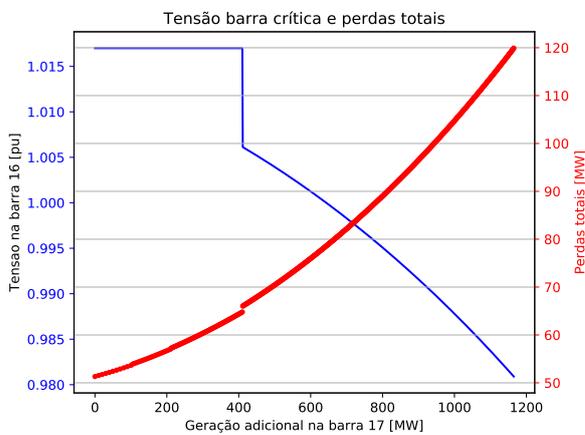


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

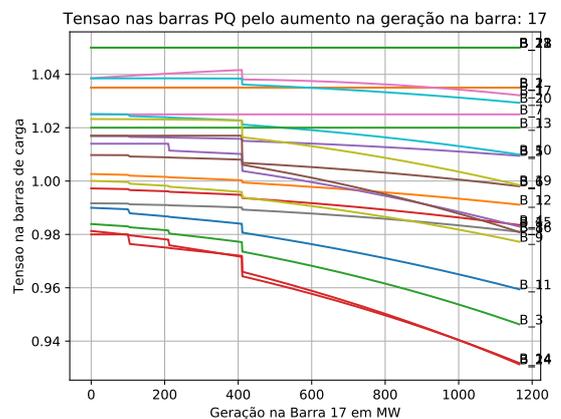


(b) Tensão nas barras

Figura 57 – Penetração de geração eólica na Barra 16

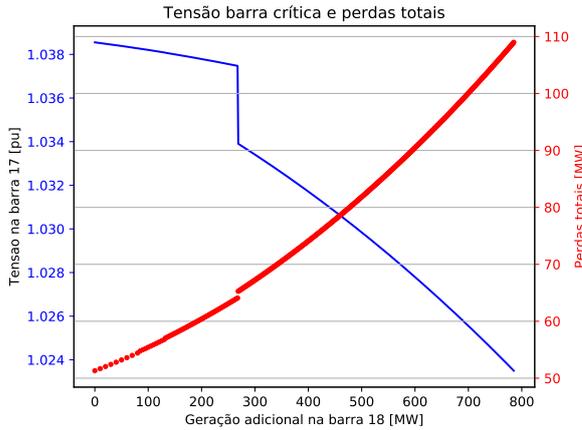


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

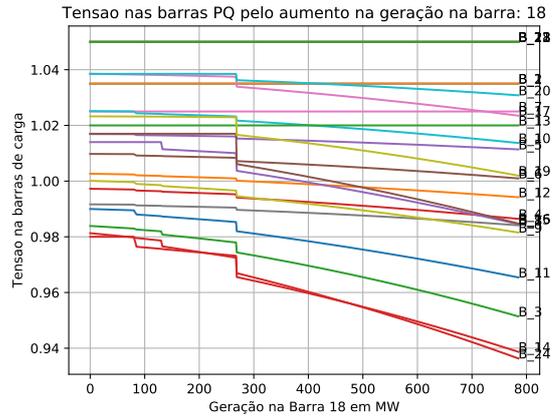


(b) Tensão nas barras

Figura 58 – Penetração de geração eólica na Barra 17

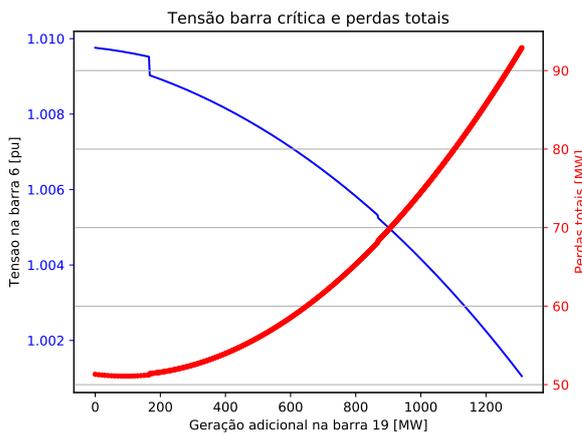


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

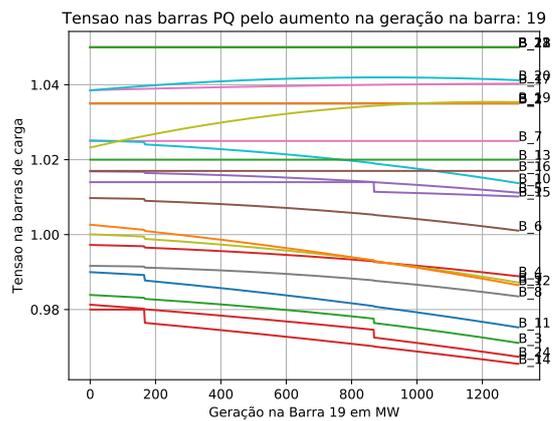


(b) Tensão nas barras

Figura 59 – Penetração de geração eólica na Barra 18

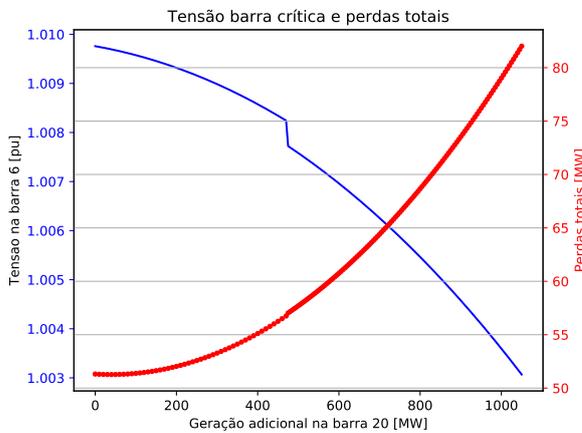


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

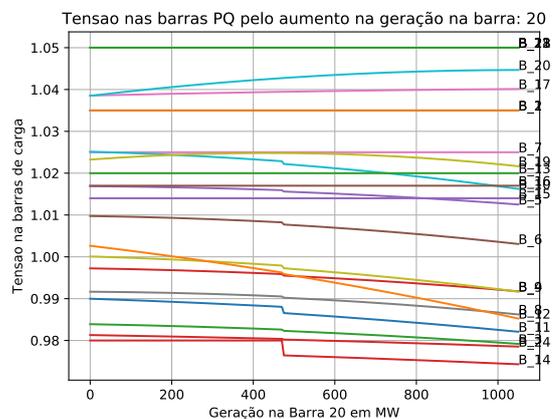


(b) Tensão nas barras

Figura 60 – Penetração de geração eólica na Barra 19

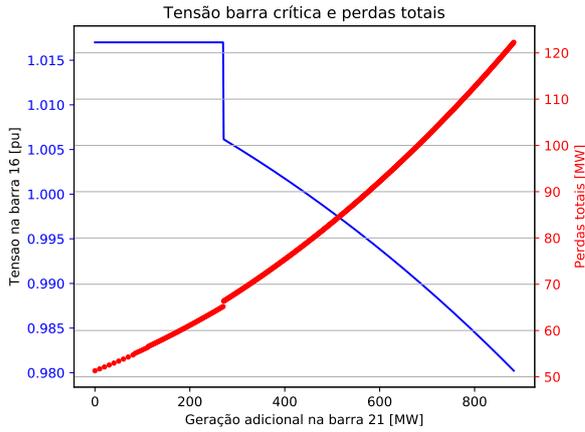


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

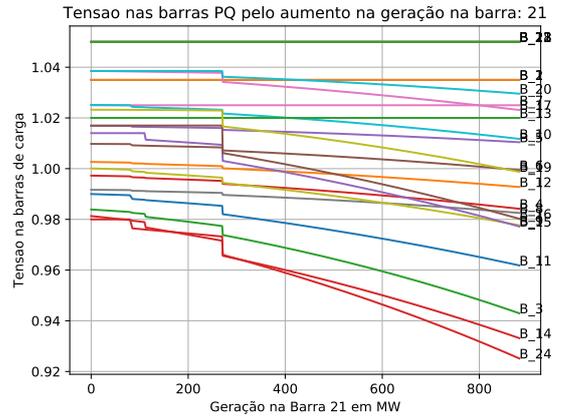


(b) Tensão nas barras

Figura 61 – Penetração de geração eólica na Barra 20

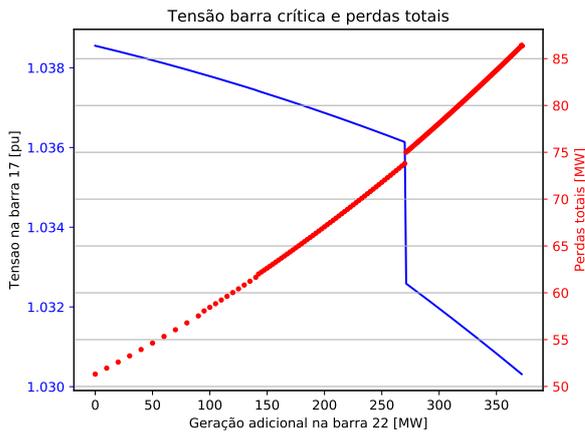


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

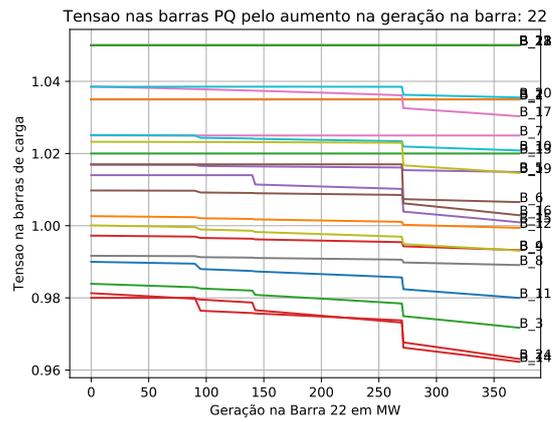


(b) Tensão nas barras

Figura 62 – Penetração de geração eólica na Barra 21

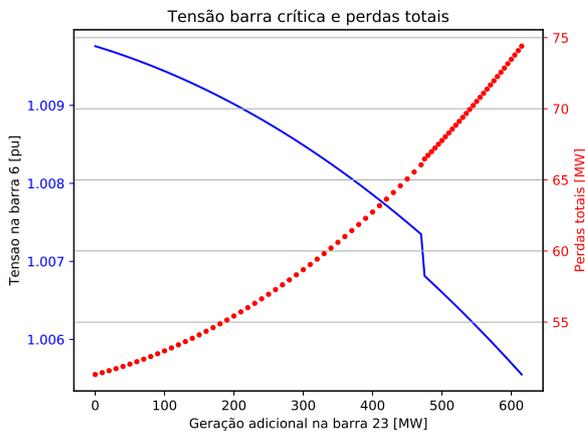


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

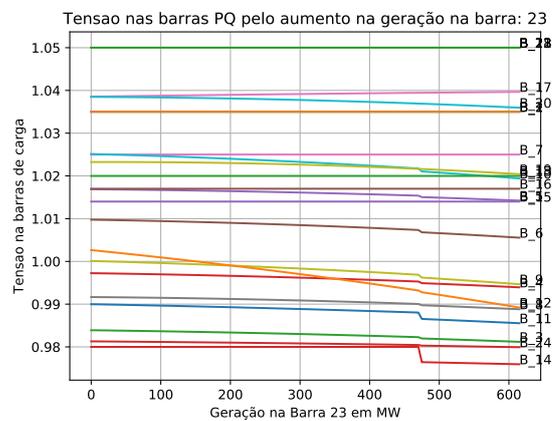


(b) Tensão nas barras

Figura 63 – Penetração de geração eólica na Barra 22

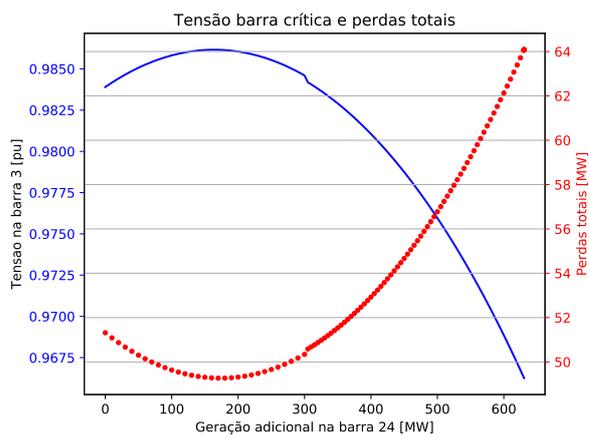


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

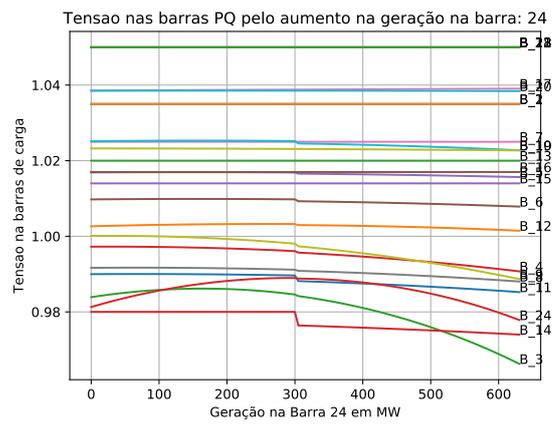


(b) Tensão nas barras

Figura 64 – Penetração de geração eólica na Barra 23



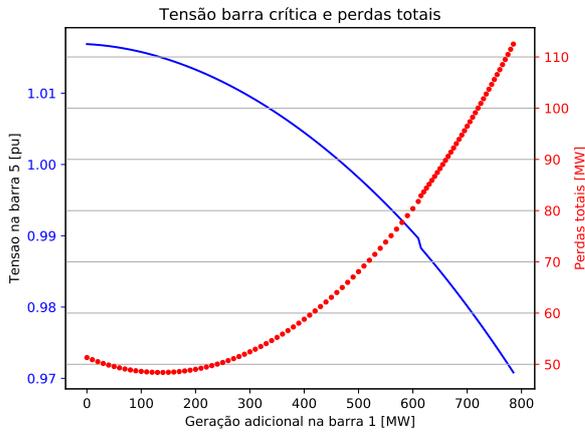
(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas



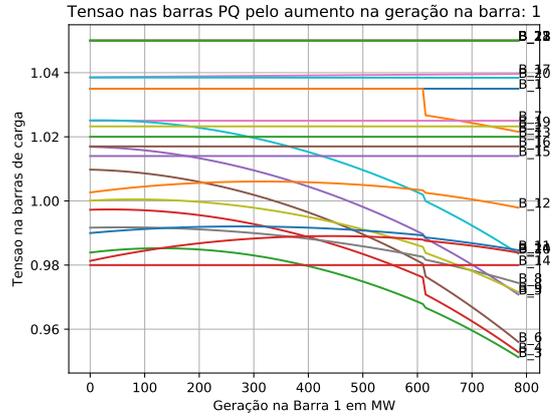
(b) Tensão nas barras

Figura 65 – Penetração de geração eólica na Barra 24

APÊNDICE C – Gráficos adicionais caso 3

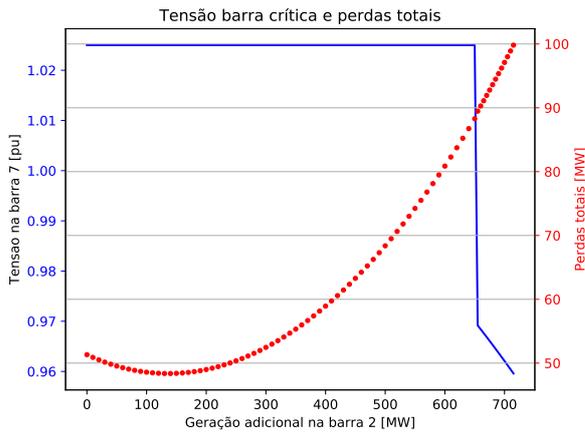


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

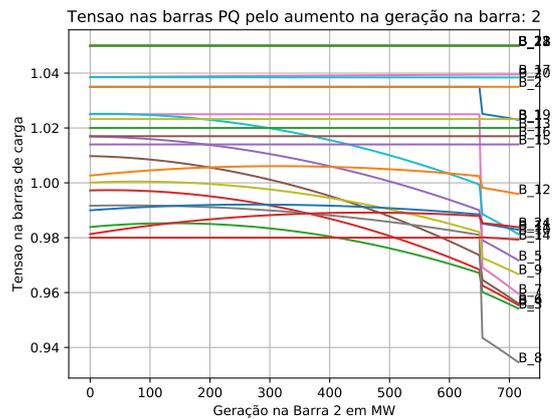


(b) Tensão nas barras

Figura 66 – Penetração de geração eólica na Barra 1

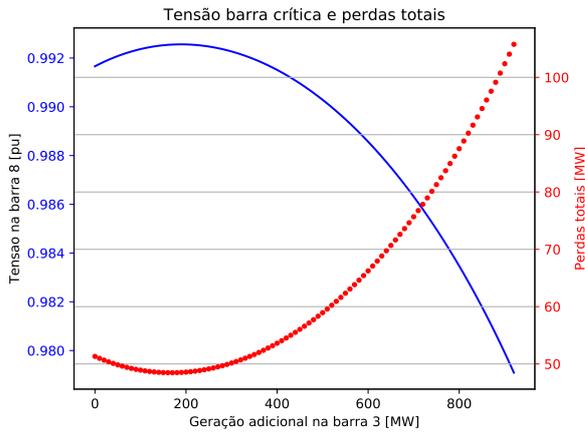


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

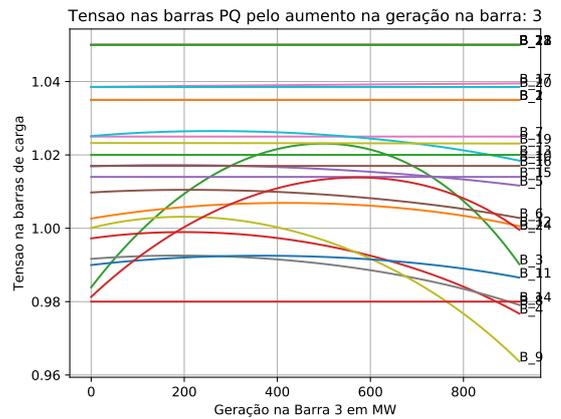


(b) Tensão nas barras

Figura 67 – Penetração de geração eólica na Barra 2

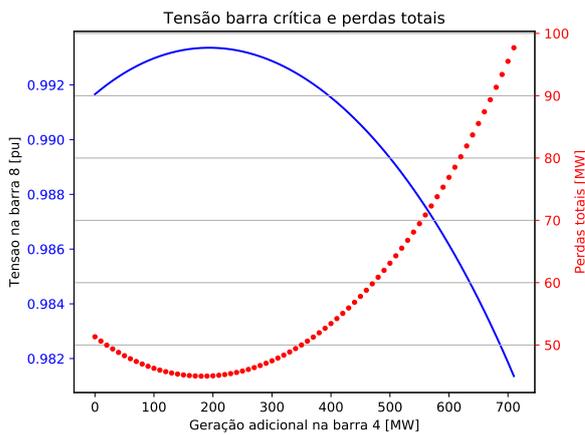


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

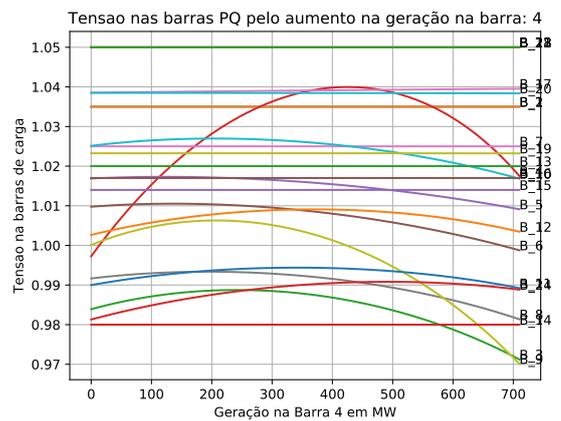


(b) Tensão nas barras

Figura 68 – Penetração de geração eólica na Barra 3

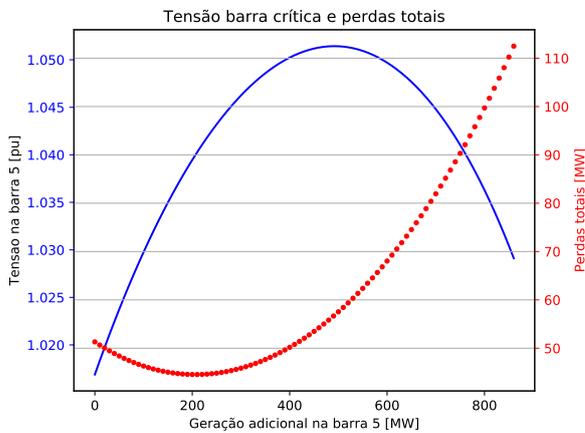


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

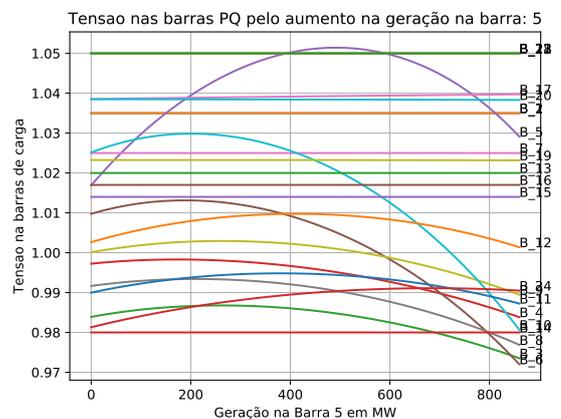


(b) Tensão nas barras

Figura 69 – Penetração de geração eólica na Barra 4

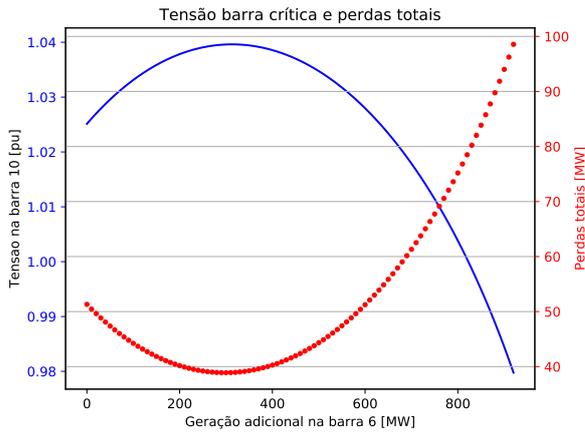


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

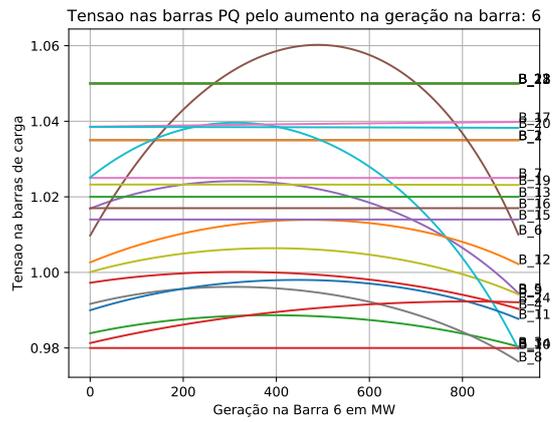


(b) Tensão nas barras

Figura 70 – Penetração de geração eólica na Barra 5

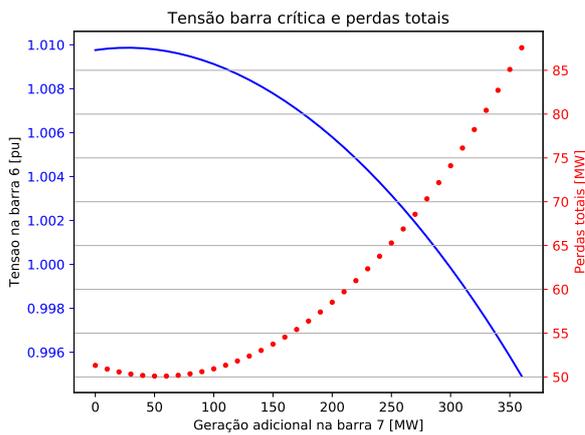


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

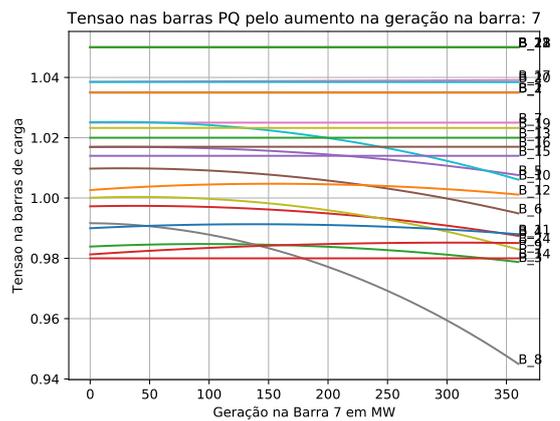


(b) Tensão nas barras

Figura 71 – Penetração de geração eólica na Barra 6

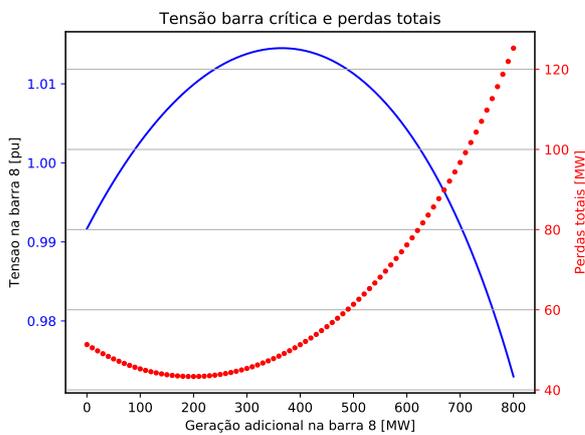


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

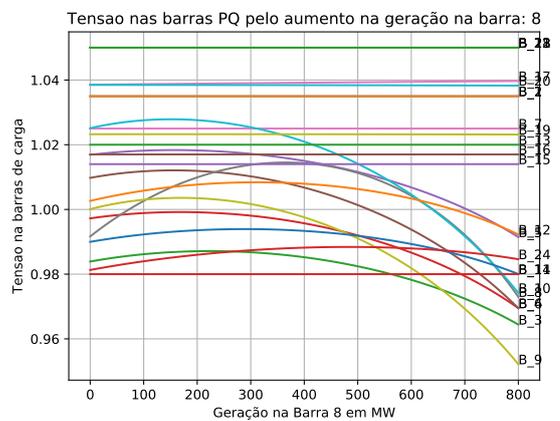


(b) Tensão nas barras

Figura 72 – Penetração de geração eólica na Barra 7

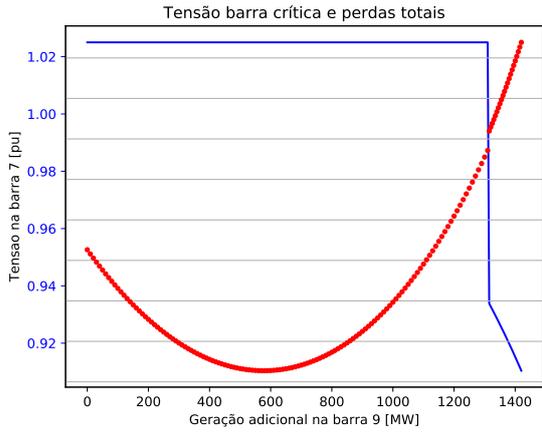


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

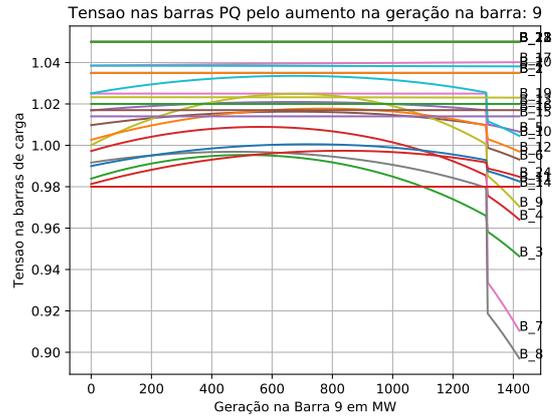


(b) Tensão nas barras

Figura 73 – Penetração de geração eólica na Barra 8

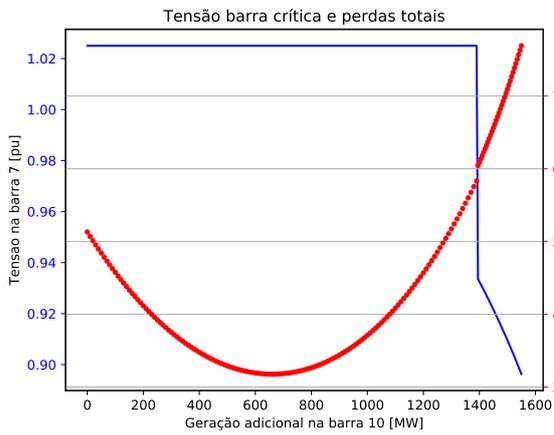


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

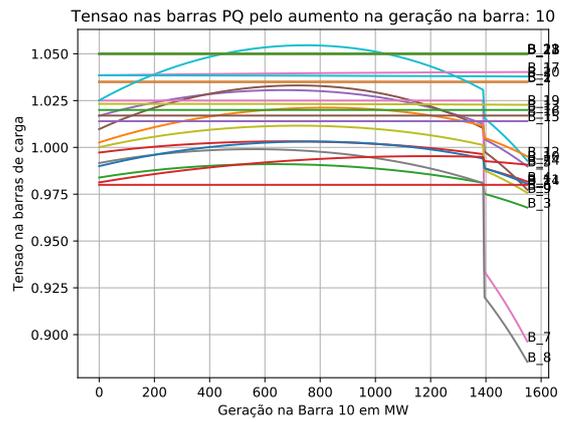


(b) Tensão nas barras

Figura 74 – Penetração de geração eólica na Barra 9

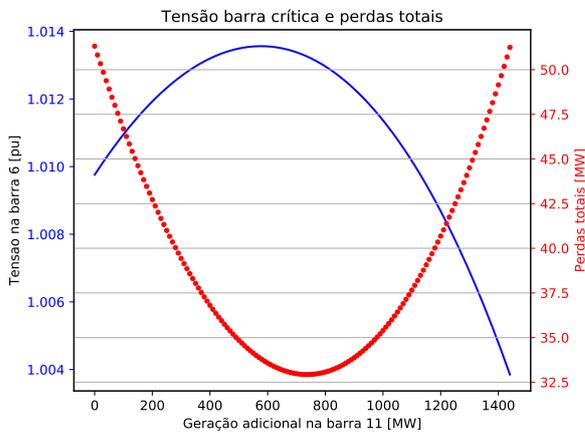


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

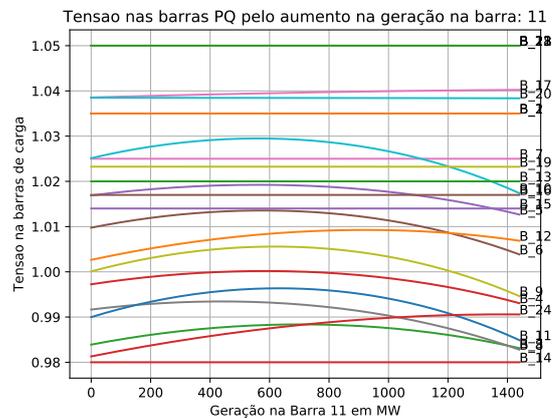


(b) Tensão nas barras

Figura 75 – Penetração de geração eólica na Barra 10

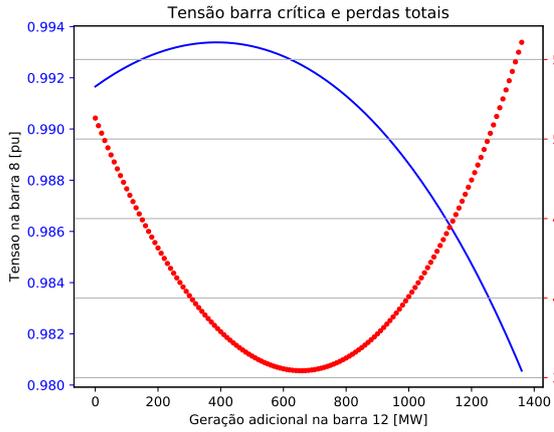


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

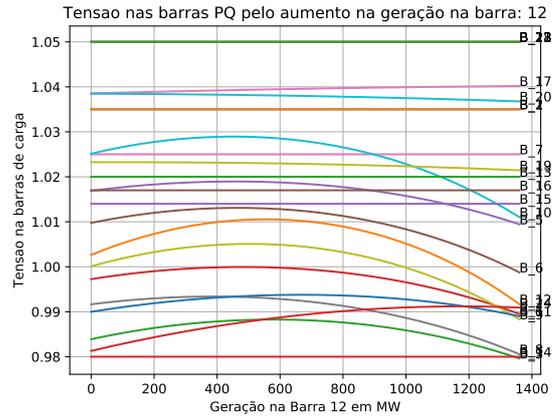


(b) Tensão nas barras

Figura 76 – Penetração de geração eólica na Barra 11

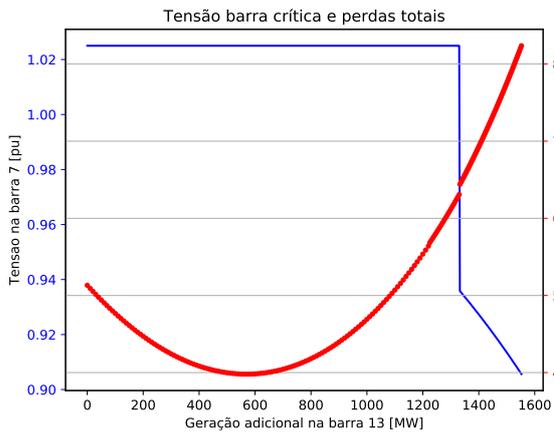


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

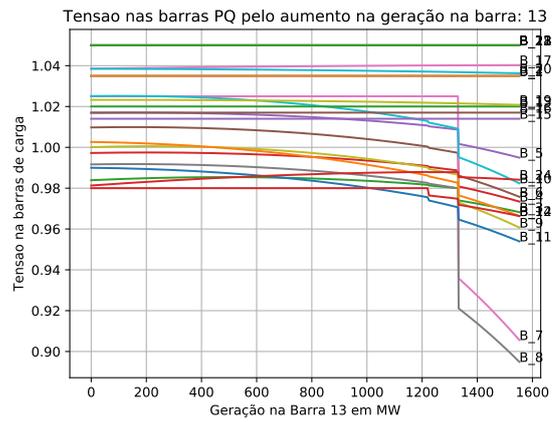


(b) Tensão nas barras

Figura 77 – Penetração de geração eólica na Barra 12

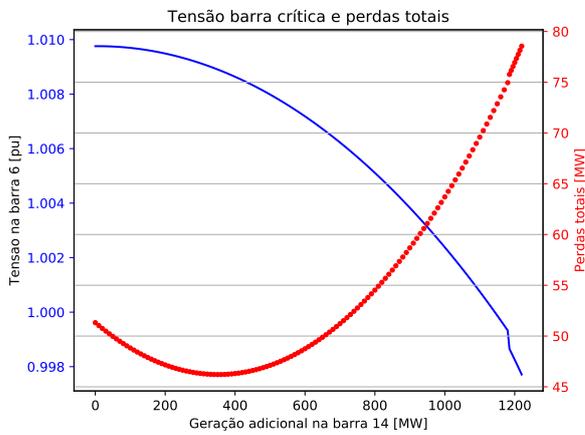


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

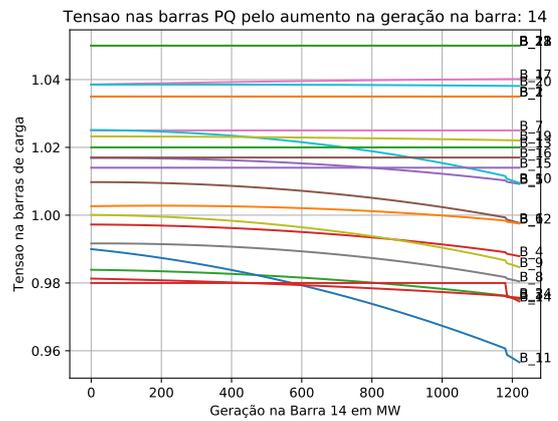


(b) Tensão nas barras

Figura 78 – Penetração de geração eólica na Barra 13

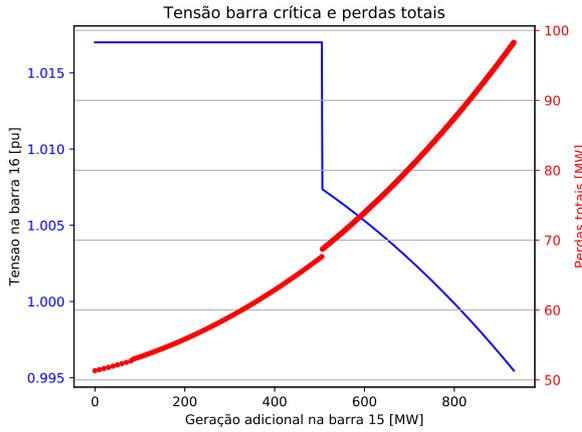


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

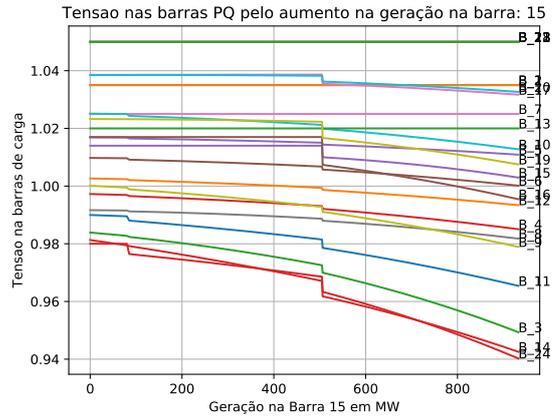


(b) Tensão nas barras

Figura 79 – Penetração de geração eólica na Barra 14

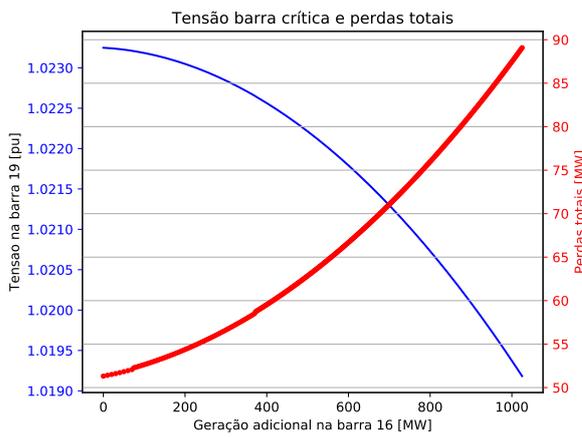


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

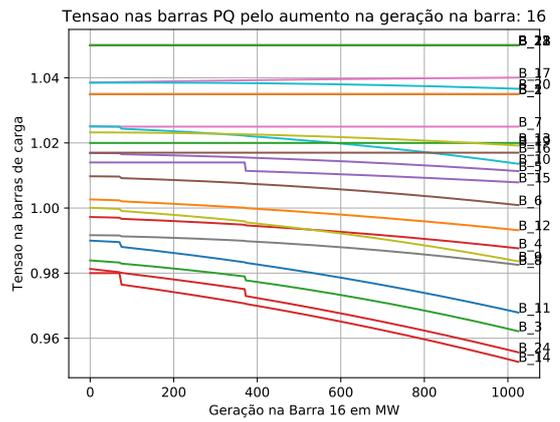


(b) Tensão nas barras

Figura 80 – Penetração de geração eólica na Barra 15

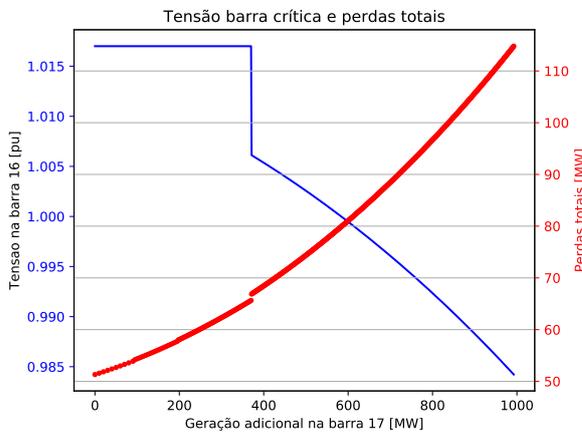


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

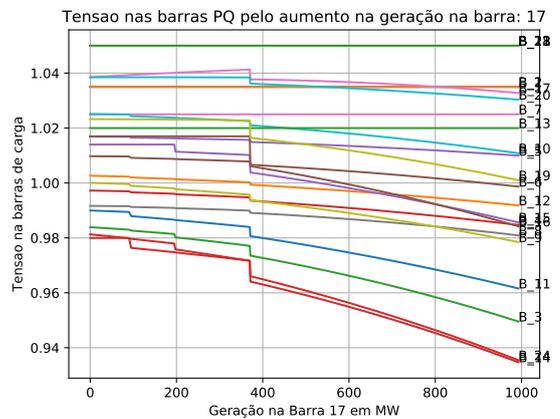


(b) Tensão nas barras

Figura 81 – Penetração de geração eólica na Barra 16

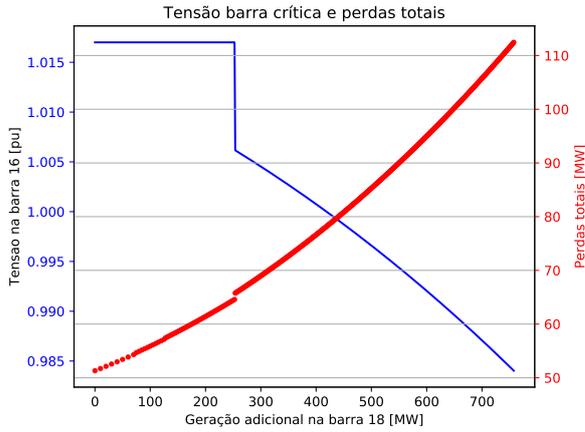


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

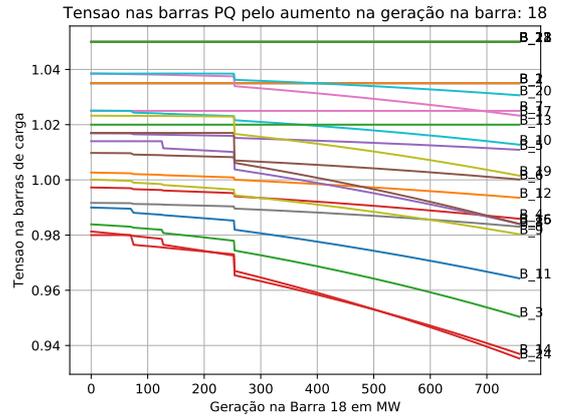


(b) Tensão nas barras

Figura 82 – Penetração de geração eólica na Barra 17

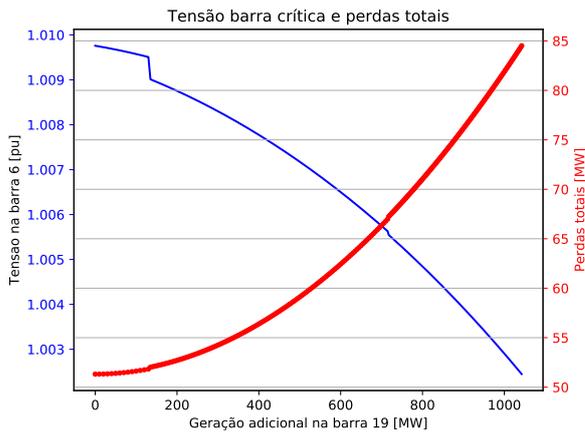


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

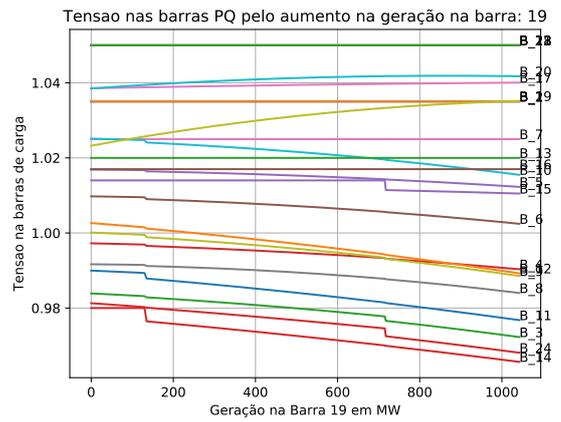


(b) Tensão nas barras

Figura 83 – Penetração de geração eólica na Barra 18

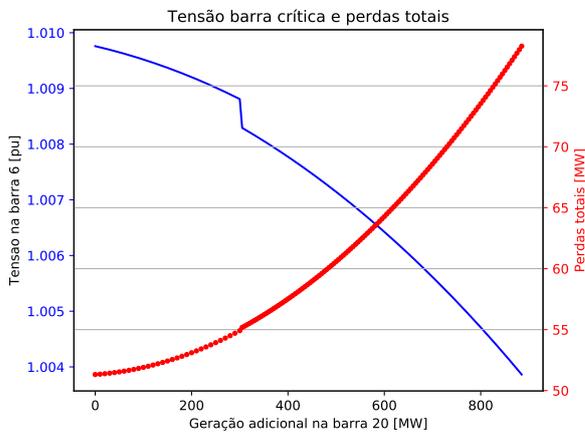


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

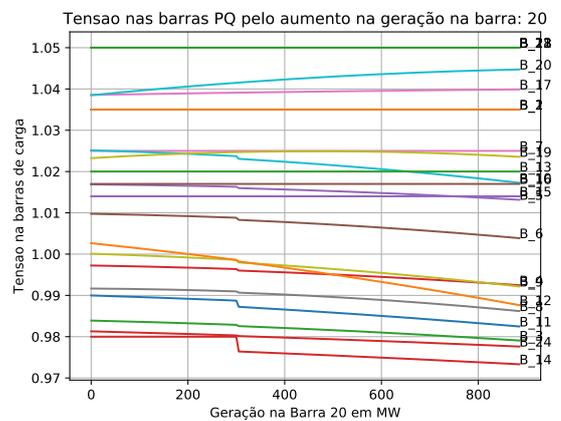


(b) Tensão nas barras

Figura 84 – Penetração de geração eólica na Barra 19

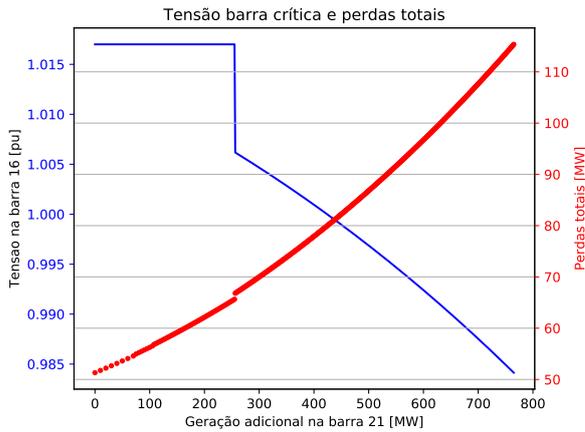


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

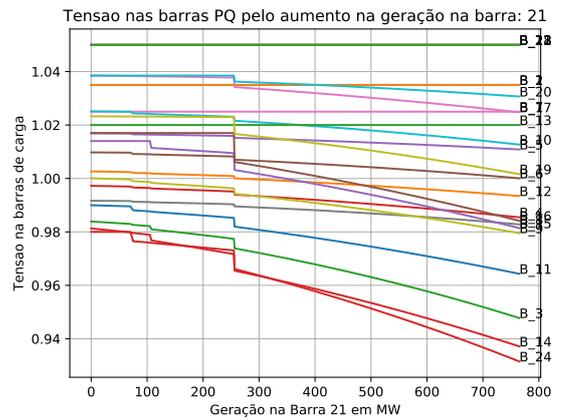


(b) Tensão nas barras

Figura 85 – Penetração de geração eólica na Barra 20

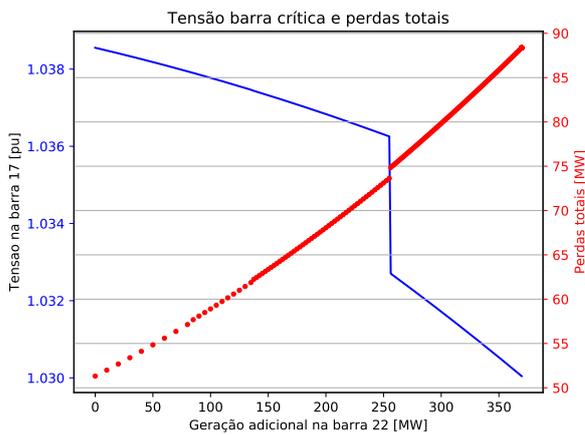


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

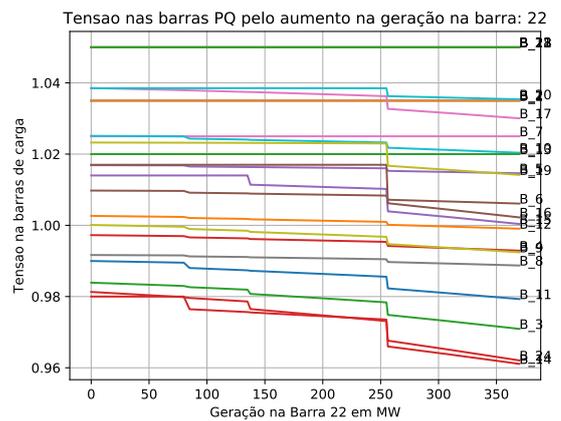


(b) Tensão nas barras

Figura 86 – Penetração de geração eólica na Barra 21

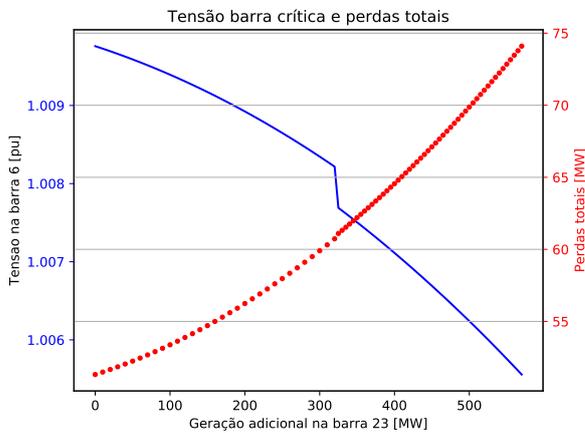


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

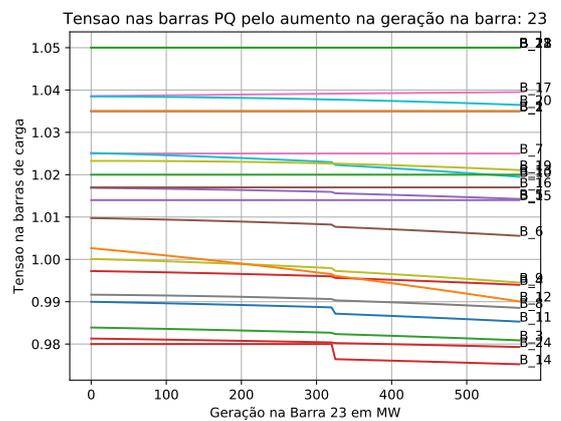


(b) Tensão nas barras

Figura 87 – Penetração de geração eólica na Barra 22

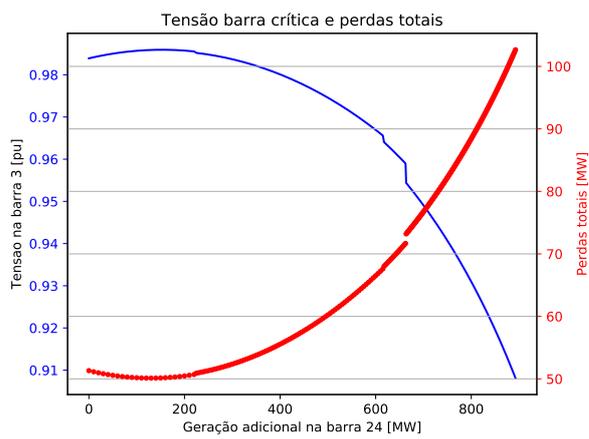


(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas

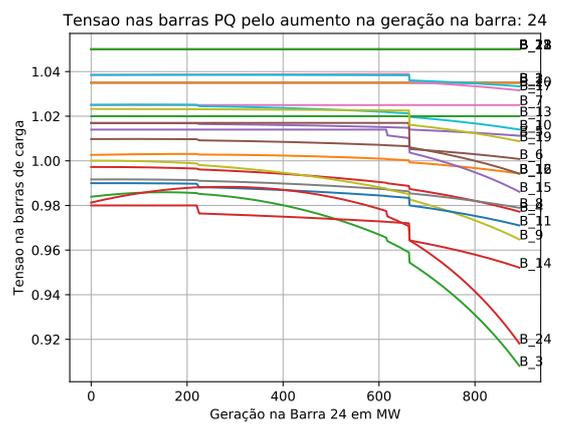


(b) Tensão nas barras

Figura 88 – Penetração de geração eólica na Barra 23



(a) Tensão na b. crítica e evolução de perdas



(b) Tensão nas barras

Figura 89 – Penetração de geração eólica na Barra 24

ANEXO A – Informações das Barras e Linhas do Sistema Teste IEEE 24

Sistema teste de confiabilidade IEEE 24 Barras. Dados de entrada do software Anarede (ANAREDE, 2015).

| DBAR | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|---|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| # | OETG | b | (V) | (A) | (Pg) | (Qg) | (Qn) | (Qm) | (Bc) | (P1) | (Q1) | (Sh) | Are(Vf) |
| 1 | L1 | 1 | 1035 | -22. | 172. | 24.81 | -50. | 80. | | 108. | 22. | | 1 1000 |
| 2 | L1 | 2 | 1035 | -22. | 172. | 17.1 | -50. | 80. | | 97. | 20. | | 1 1000 |
| 3 | L | 1 | 1000 | -20. | | | | | | 180. | 37. | | 1 1000 |
| 4 | L | 2 | 998 | -24. | | | | | | 74. | 15. | | 1 1000 |
| 5 | L | 1 | 1017 | -24. | | | | | | 71. | 14. | | 1 1000 |
| 6 | L | 2 | 1010 | -27. | | | | | | 136. | 28. | -100. | 1 1000 |
| 7 | L1 | 1 | 1025 | -21. | 240. | 53.09 | 0. | 180. | | 125. | 25. | | 1 1000 |
| 8 | L | 2 | 992 | -25. | | | | | | 171. | 35. | | 1 1000 |
| 9 | L | 1 | 1000 | -22. | | | | | | 175. | 36. | | 1 1000 |
| 10 | L | 2 | 1000 | -24. | | | | | | 195. | 40. | | 1 1000 |
| 11 | L | A | 990 | -16. | | | | | | | | | 1 1000 |
| 12 | L | S | 1003 | -15. | | | | | | | | | 1 1000 |
| 13 | L2 | A | 1020 | -13. | 285.3 | 117.5 | 0. | 240. | | 265. | 54. | | 2 1000 |
| 14 | L1 | S | 980 | -13. | 0. | -36.5 | -50. | 200. | | 194. | 39. | | 2 1000 |
| 15 | L1 | A | 1014 | -4.8 | 215. | -23.6 | -50. | 110. | | 317. | 64. | | 2 1000 |
| 16 | L1 | S | 1017 | -5.5 | 155. | 32.79 | -50. | 80. | | 100. | 20. | | 2 1000 |
| 17 | L | A | 1039 | -1.6 | | | | | | | | | 2 1000 |
| 18 | L1 | S | 1050 | -56 | 400. | 134.4 | -50. | 200. | | 333. | 68. | | 2 1000 |
| 19 | L | A | 1023 | -6.4 | | | | | | 181. | 37. | | 2 1000 |
| 20 | L | S | 1038 | -5.3 | | | | | | 128. | 26. | | 2 1000 |
| 21 | L1 | A | 1050 | 0. | 400. | 115.1 | -50. | 200. | | | | | 2 1000 |
| 22 | L1 | S | 1050 | 5.87 | 300. | -30.1 | -60. | 96. | | | | | 2 1000 |
| 23 | L1 | A | 1050 | -4. | 660. | 129. | -125. | 310. | | | | | 2 1000 |
| 24 | L | S | 984 | -11. | | | | | | | | | 2 1000 |

Onde:

| | |
|-----|---|
| # | Número da Barra |
| E | Estado Ligado ou Desl. |
| T | Tipo (0-PQ, 1-PV, 2-slack) |
| Gb | Grupo de Tensão |
| V | Valor Inicial da magnitude de Tensão [pu] |
| A | Ângulo de fase inicial [°] |
| Pg | Geração Ativa [MW] |
| Qg | Geração Reativa [Mvar] |
| Qn | Limite mínimo de geração reativa [Mvar] |
| Qm | Limite máximo de geração reativa Mvar |
| Pl | Carga Ativa [MW] |
| Ql | Carga Reativa [Mvar] |
| Sh | Capacitor/Reator na Barra [Mvar] |
| Are | Área da Barra |
| Vf | Tensão em que valores de carga foram medidos [pu] |

| DLIN | | | | | | | | | | | | |
|------|------|----|----|------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|--------|
| (De) | (Pa) | Nc | EP | (R%) | (X%) | (Mvar) | (Tap) | (Tmm) | (Tmx) | (Bc) | (Cn) | (Ce)Ns |
| 1 | 2 | 1 | | .26 | 1.39 | 46.11 | | | | | 175. | 200. |
| 1 | 3 | 1 | | 5.46 | 21.12 | 5.72 | | | | | 175. | 220. |
| 1 | 5 | 1 | | 2.18 | 8.45 | 2.29 | | | | | 175. | 220. |
| 2 | 4 | 1 | | 3.28 | 12.67 | 3.43 | | | | | 175. | 220. |
| 2 | 6 | 1 | | 4.97 | 19.2 | 5.2 | | | | | 175. | 220. |
| 3 | 9 | 1 | | 3.08 | 11.9 | 3.22 | | | | | 175. | 220. |
| 3 | 24 | 1 | | .23 | 8.39 | | 1.015 | .95 | 1.1 | 3 | 400. | 600.33 |
| 4 | 9 | 1 | | 2.68 | 10.37 | 2.81 | | | | | 175. | 220. |
| 5 | 10 | 1 | | 2.28 | 8.83 | 2.39 | | | | | 175. | 220. |
| 6 | 10 | 1 | | 1.39 | 6.05 | 245.9 | | | | | 175. | 200. |
| 7 | 8 | 1 | | 1.59 | 6.14 | 1.66 | | | | | 175. | 220. |
| 8 | 9 | 1 | | 4.27 | 16.51 | 4.47 | | | | | 175. | 220. |
| 8 | 10 | 1 | | 4.27 | 16.51 | 4.47 | | | | | 175. | 220. |
| 9 | 11 | 1 | | .23 | 8.39 | | 1.03 | .95 | 1.1 | 9 | 400. | 600.33 |
| 9 | 12 | 1 | | .23 | 8.39 | | 1.03 | .95 | 1.1 | 9 | 400. | 600.33 |
| 10 | 11 | 1 | | .23 | 8.39 | | 1.015 | .95 | 1.05 | 10 | 400. | 600.33 |
| 10 | 12 | 1 | | .23 | 8.39 | | 1.015 | .95 | 1.05 | 10 | 400. | 600.33 |
| 11 | 13 | 1 | | .61 | 4.76 | 9.99 | | | | | 500. | 625. |
| 11 | 14 | 1 | | .54 | 4.18 | 8.79 | | | | | 500. | 625. |
| 12 | 13 | 1 | | .61 | 4.76 | 9.99 | | | | | 500. | 625. |
| 12 | 23 | 1 | | 1.24 | 9.66 | 20.3 | | | | | 500. | 625. |
| 13 | 23 | 1 | | 1.11 | 8.65 | 18.18 | | | | | 500. | 625. |
| 14 | 16 | 1 | | .5 | 3.89 | 8.18 | | | | | 500. | 625. |
| 15 | 16 | 1 | | .22 | 1.73 | 3.64 | | | | | 500. | 625. |
| 15 | 21 | 1 | | .63 | 4.9 | 10.3 | | | | | 500. | 625. |
| 15 | 21 | 2 | | .63 | 4.9 | 10.3 | | | | | 500. | 625. |
| 15 | 24 | 1 | | .67 | 5.19 | 10.91 | | | | | 500. | 625. |
| 16 | 17 | 1 | | .33 | 2.59 | 5.45 | | | | | 500. | 625. |
| 16 | 19 | 1 | | .3 | 2.31 | 4.85 | | | | | 500. | 625. |
| 17 | 18 | 1 | | .18 | 1.44 | 3.03 | | | | | 500. | 625. |
| 17 | 22 | 1 | | 1.35 | 10.53 | 22.12 | | | | | 500. | 625. |
| 18 | 21 | 1 | | .33 | 2.59 | 5.45 | | | | | 500. | 625. |
| 18 | 21 | 2 | | .33 | 2.59 | 5.45 | | | | | 500. | 625. |
| 19 | 20 | 1 | | .51 | 3.96 | 8.33 | | | | | 500. | 625. |
| 19 | 20 | 2 | | .51 | 3.96 | 8.33 | | | | | 500. | 625. |
| 20 | 23 | 1 | | .28 | 2.16 | 4.55 | | | | | 500. | 625. |
| 20 | 23 | 2 | | .28 | 2.16 | 4.55 | | | | | 500. | 625. |
| 21 | 22 | 1 | | .87 | 6.78 | 14.24 | | | | | 500. | 625. |

Onde:

| | |
|------|--|
| De | Barra de uma extremidade do circuito |
| Pa | Barra de outra extremidade do circuito |
| c | Número de circuitos em paralelo |
| R | Resistência do circuito em % |
| X | Resistência do circuito em % |
| Mvar | Suceptância Shunt do Circuito [Mvar] |
| Tap | Valor do TAP |
| Tmn | Tap Mínimo |
| Tmx | Tap Máximo |
| Bc | Barra Controlada |
| Cn | Capacidade normal do circuito [MVA] |
| Ce | Capacidade em emergência do circuito [MVA] |
| Ns | Número de Taps |