



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Fluxo de Potência Ótimo Considerando Geração Eólica**

**Rafael de Oliveira Silva**

João Monlevade, MG  
2022

**Rafael de Oliveira Silva**

# **Fluxo de Potência Ótimo Considerando Geração Eólica**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**João Monlevade**  
**2022**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586f Silva, Rafael de Oliveira.  
Fluxo de potência ótimo considerando geração eólica. [manuscrito] /  
Rafael de Oliveira Silva. - 2022.  
97 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia  
Elétrica .

1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Energia eólica. 3. Sistemas de  
energia elétrica. I. Manso, Juan Carlos Galvis. II. Universidade Federal de  
Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.3

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafael de Oliveira Silva

### Fluxo de Potência Ótimo Considerando Geração Eólica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 24 de junho de 2022

#### Membros da banca

Dr. Juan Carlos Galvis Manso - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich - Universidade Federal de Ouro Preto

Juan Carlos Galvis Manso, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Galvis Manso, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/07/2022, às 12:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0355636** e o código CRC **12049FA3**.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Alessandra e Valdeci por sempre estarem ao meu lado durante essa jornada, e ao meu irmão Bruno pelo apoio incondicional.

Agradeço e reverencio o Professor Dr. Juan Carlos Galvis Manso pelos ensinamentos e orientação deste trabalho e por meio dele agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha caminhada.

Gostaria de deixar registrado o meu agradecimento a minha namorada Iriane, por todo apoio e companheirismo.

Por fim e não menos importante, gostaria de deixar o meu agradecimento a todos os amigos que me acompanharam nessa jornada e que fizeram parte da minha formação.

# Resumo

A incorporação de parques eólicos aos sistemas elétricos de potência tem sido cada vez mais comum no cenário energético brasileiro, uma vez que esse tipo de energia se caracteriza por ser limpa. Tal fato, tem instigado a análise dos impactos que esse tipo de geração provoca na operação do sistema elétrico. Nesse contexto, surge a necessidade de se construir técnicas de análise para auxiliar a previsibilidade do comportamento do sistema elétrico diante da inserção dos parques eólicos. Neste trabalho são descritos três tipos de aerogeradores (dois modelos de aerogeradores de velocidade fixa e um modelo de aerogerador de velocidade variável) e as modificações que cada um provoca na formulação básica do fluxo de potência. Posteriormente esses modelos são utilizados dentro da formulação de um fluxo de potência ótimo (FPO), o qual é construído a partir do método do gradiente reduzido. A função objetivo utilizada no FPO são minimizar as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão. Todos os modelos de aerogeradores bem como o FPO, foram implementados no MATLAB. Os sistemas elétricos utilizados para testes são compostos por sistemas de 3, 14 e 30 barras. O FPO implementado conseguiu reduzir as perdas para os três modelos de aerogeradores considerados. O FPO obteve menores perdas de potência ativa para o sistema com aerogerador de velocidade variável para todos os sistemas teste, uma vez que neste foi inserido um valor maior de potência gerada. Em relação aos modelos de aerogeradores de velocidade fixa, o caracterizado por ter um controle por passo obteve menores perdas em relação ao controlado por estol. Alguns dos resultados obtidos foram validados usando o software Matpower e artigos da literatura especificada.

**Palavras-chave:** Aerogeradores, Fluxo de Potência ótimo, Gradiente reduzido.

# Abstract

The incorporation of wind farms into electrical power systems has been increasingly common in the Brazilian energy scenario, since this type of energy is characterized by being clean. This fact has instigated the impact that this type of generation of analysis causes on the operation of the electrical system. In this context, there is a need to build analysis techniques to help predict the behavior of the electrical system in view of the insertion of wind farms. In this work, the types of speed wind turbines and a variable speed wind turbine model are described as three models of variable speed wind turbines and thought for each one as a provocateur in the formulation of basic power flow models. Subsequently, these models are used within an optimal power flow (FPO), which is constructed from the reduced gradient method. The objective function used in the FPO is minimized as the activation capacity in the transmission lines. All wind turbine models as well as the FPO were implemented in MATLAB. The electrical systems used for testing are composed of 3, 14 and 30 bus systems. The FPO managed to reduce losses for the three aerosol models considered. The FPO with lower activated power losses for the variable operating system for all systems tested, since a higher value of operated power was entered. Regarding the clamping speed models, the feature of having a control by smaller steps is in relation to the speed control by models. Some of the results obtained were validated using Matpower software and articles from the specified literature.

**Keywords:** Wind generators, Optimal power flow, reduced gradient method.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Crescimento geração eólica em MW . . . . .	1
Figura 2 – Modelo Aerogerador velocidade fixa . . . . .	7
Figura 3 – Gerador eólico DFIG . . . . .	7
Figura 4 – Circuito equivalente monofásico da máquina de indução. . . . .	8
Figura 5 – Comparação entre controladores . . . . .	11
Figura 6 – Curva de potência aerogerador equipado com controle por passo. . . . .	13
Figura 7 – Barramento com geração, carga e linhas. . . . .	16
Figura 8 – Esquema de conexão do parque eólico ao SEP . . . . .	27
Figura 9 – Diagrama unifilar sistema 3 barras modificado . . . . .	27
Figura 10 – Diagrama unifilar sistema IEEE 14 barras modificado . . . . .	28
Figura 11 – Diagrama unifilar sistema IEEE 30 barras modificado . . . . .	29
Figura 12 – Perfil de Tensão - Sistema 3 barras . . . . .	30
Figura 13 – Perfil de Tensão - Sistema 14 barras . . . . .	31
Figura 14 – Perfil de Tensão - Sistema 30 barras . . . . .	32
Figura 15 – Comparação com artigo (Krishna; Khatod, 2015). . . . .	36
Figura 16 – Potência Ativa gerada em relação ao escorregamento . . . . .	38
Figura 17 – Potência Reativa consumida em relação ao escorregamento . . . . .	39
Figura 18 – Perfil de Tensão - Sistema 3 barras . . . . .	40
Figura 19 – Perfil de Tensão - Sistema 14 barras . . . . .	41
Figura 20 – Perfil de Tensão - Sistema 30 barras . . . . .	42
Figura 21 – Fluxo de Potência Ótimo - Sistema 3 barras . . . . .	44
Figura 22 – Fluxo de Potência Ótimo - Sistema 14 barras . . . . .	45
Figura 23 – Fluxo de Potência Ótimo - Sistema 30 barras . . . . .	46
Figura 24 – Diagrama unifilar sistema 3 barras com barramento de geração eólica . . . . .	55

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Controladores Aerodinâmicos . . . . .	12
Tabela 2 – Características dos Parques Eólicos . . . . .	26
Tabela 3 – Resultados de geração (p.u), escorregamento e nível de perdas (p.u) . .	30
Tabela 4 – Resultados de geração (p.u), escorregamento e nível de perdas (p.u) . .	31
Tabela 5 – Resultados de geração (p.u), escorregamento e nível de perdas (p.u) . .	32
Tabela 6 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW . . . . .	33
Tabela 7 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW . . . . .	33
Tabela 8 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW . . . . .	34
Tabela 9 – Comparação de resultados do fluxo de potência para algumas linhas em MW - SEP IEEE 14 barras . . . . .	34
Tabela 10 – Comparação de resultados do fluxo de potência para algumas linhas em MW - SEP IEEE 30 barras . . . . .	34
Tabela 11 – Perfil de tensão comparados com artigo (Krishna; Khatod, 2015) . . .	36
Tabela 12 – Resultados comparados com artigo (Krishna; Khatod, 2015) . . . . .	37
Tabela 13 – Convergência Modelo Passo e Estol . . . . .	39
Tabela 14 – Convergência Modelo Variável . . . . .	43
Tabela 15 – Resumo do fluxo de potência Ótimo em p.u - SEP DE 3 BARRAS . .	44
Tabela 16 – Resumo do fluxo de potência Ótimo em p.u - SEP DE 14 BARRAS . .	45
Tabela 17 – Resumo do fluxo de potência Ótimo em p.u - SEP DE 30 BARRAS . .	46
Tabela 18 – Comparação do FPO com artigo . . . . .	47
Tabela 19 – Parâmetros do gerador eólico controlado por passo . . . . .	58
Tabela 20 – Dados da Curva de Potência do gerador controlado por passo . . . . .	58
Tabela 21 – Parâmetros do gerador eólico controlado por estol . . . . .	59
Tabela 22 – Dados das barras . . . . .	60
Tabela 23 – Dados das linhas . . . . .	60
Tabela 24 – Dados das barras . . . . .	61
Tabela 25 – Dados das linhas . . . . .	62
Tabela 26 – Dados das barras . . . . .	63
Tabela 27 – Dados das linhas . . . . .	64
Tabela 28 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu . . . . .	65
Tabela 29 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu . . . . .	65
Tabela 30 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu . . . . .	65
Tabela 31 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu . . . . .	66
Tabela 32 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu . . . . .	66
Tabela 33 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu . . . . .	67
Tabela 34 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu . . . . .	67

Tabela 35 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu . . . . .	68
Tabela 36 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu . . . . .	69
Tabela 37 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu . . . . .	70
Tabela 38 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu . . . . .	71
Tabela 39 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu . . . . .	72
Tabela 40 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW . . . . .	73
Tabela 41 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW . . . . .	73
Tabela 42 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW . . . . .	73
Tabela 43 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em MW . . . . .	74
Tabela 44 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW . . . . .	74
Tabela 45 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW . . . . .	75
Tabela 46 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW . . . . .	76
Tabela 47 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em MW . . . . .	77
Tabela 48 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW . . . . .	79
Tabela 49 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW . . . . .	80
Tabela 50 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW . . . . .	81
Tabela 51 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em MW . . . . .	82

# Lista de abreviaturas e siglas

SEP	Sistema Elétrico de Potência
FPO	Fluxo de potencia ótimo
$P_k^{esp}$	Potência Ativa especificada na barra k
$Q_k^{esp}$	Potência Reativa especificada na barra k
$S_k$	Potência aparente na barra k
$I_k$	Corrente injetada na barra k
$Y_{barra}$	Matriz de Admitâncias
$Y_{km}$	Elemento entre barra k e m da matriz de admitâncias
$P_k$	Potência Ativa líquida injetada na barra k
$Q_k$	Potência Reativa líquida injetada na barra k
$G_{km}$	Parte real do elemento entre a barra k e m da matriz de admitâncias
$B_{km}$	Parte imaginária do elemento entre a barra k e m matriz de admitâncias
$N_{PQ}$	Número de barras PQ do sistema
$N_{PV}$	Número de barras PV do sistema
$\theta_{km}$	Diferença angular entre barras k e m
$V_k$	Magnitude da tensão na barra k
$\Delta P_k$	Variação de potência ativa líquida na barra k
$\Delta Q_k$	Variação de potência reativa líquida na barra k
$\Delta x$	Vetor de variáveis do fluxo de potência
$g(x)$	Vetor de equações do fluxo de potência
$v$	Iterações do fluxo de potência
$J$	Matriz Jacobiana do fluxo de potência
$\Omega_k$	Conjunto de barras conectadas a barra k
$u$	Vetor de variáveis de controle do FPO

$\nabla f$	Gradiente
$c$	Constante de otimização
$\lambda$	Multiplicadores de Lagrange
$V_{sem-ger}$	Magnitude de tensão nos barramentos do sistema sem geração eólica
$V_{estol}$	Magnitude de tensão nos barramentos com inserção de aerogerador com controle por estol
$V_{passo}$	Magnitude de tensão nos barramentos com inserção de aerogerador controlado por passo
$\theta_{sem-ger}^{\circ}$	Ângulo em graus sem inserção de geração eólica
$\theta_{estol}^{\circ}$	Ângulo em graus com inserção de aerogerador com controle por estol
$\theta_{passo}^{\circ}$	Ângulo em graus com inserção de aerogerador com controle por passo
$s$	Escorregamento

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
1.2.1	Fluxo de potência aplicado a sistemas elétricos de potência com inserção de aerogeradores	3
1.2.2	Análise do Fluxo de Potência Ótimo	4
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>5</b>
1.3.1	Objetivo geral	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
<b>2</b>	<b>MODELAGEM DO AEROGERADOR</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Gerador eólico de velocidade fixa e variável</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelagem do gerador eólico de velocidade fixa</b>	<b>8</b>
2.2.1	Controladores Aerodinâmicos	10
2.2.2	Gerador eólico de velocidade fixa com controlador por estol	12
2.2.3	Gerador eólico de velocidade fixa com controlador por passo	13
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Fluxo de Potência</b>	<b>15</b>
3.1.1	Formulação matemática do fluxo de potência	17
3.1.2	Método de Newton Raphson	17
3.1.2.1	Montagem da matriz jacobiana	18
3.1.3	Algoritmo Newton Raphson aplicado ao fluxo de potência	18
<b>3.2</b>	<b>Fluxo de Potência Ótimo</b>	<b>19</b>
3.2.1	Representação Matemática	20
3.2.2	Especificações do fluxo de potência ótimo com restrições de geração eólica	20
3.2.3	Método do Gradiente Reduzido	22
3.2.3.1	Algoritmo de solução	22
<b>3.3</b>	<b>Integração do gerador eólico ao fluxo de potência</b>	<b>23</b>
3.3.1	Fluxo de Potência aplicado ao gerador eólico controlado por estol	23
3.3.1.1	Equações de balanço de potência	23
3.3.1.2	Matriz Jacobiana Ampliada	23
3.3.2	Fluxo de potência aplicado ao gerador eólico controlado por passo	24
3.3.2.1	Equações de balanço de potência	24
3.3.2.2	Matriz Jacobiana Ampliada	24
3.3.3	Fluxo de potência aplicado ao gerador de indução duplamente alimentado	24

<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistemas de transmissão testados</b>	<b>27</b>
4.1.1	Sistema de 3 barras	27
4.1.2	Sistema de 14 barras	28
4.1.3	Sistema de 30 barras	29
<b>4.2</b>	<b>Resultados dos geradores eólicos de velocidade fixa</b>	<b>29</b>
4.2.1	Resultados obtidos para o sistema de 3 barras	30
4.2.2	Resultados obtidos para o sistema de 14 barras	31
4.2.3	Resultados obtidos para o sistema de 30 barras	32
4.2.4	Discussão dos resultados	32
4.2.4.1	Validação do Modelo Estol	35
4.2.4.2	Validação do Modelo Passo usando teoria de circuitos elétricos	37
4.2.4.3	Convergência do fluxo de potência	39
<b>4.3</b>	<b>Resultados do gerador eólico de velocidade variável</b>	<b>39</b>
4.3.1	Resultados obtidos para o sistema de 3 barras	40
4.3.2	Resultados obtidos para o sistema de 14 barras	41
4.3.3	Resultados obtidos para o sistema de 30 barras	42
4.3.4	Discussão dos resultados	42
4.3.4.1	Convergência do fluxo de potência	43
<b>4.4</b>	<b>Resultado do fluxo de potência ótimo</b>	<b>43</b>
4.4.1	Validação do Fluxo de Potência Ótimo	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
	<b>APPENDICES</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA CORRENTE DO ESTATOR PARA O GERADOR DE INDUÇÃO APLICADOS NO MODELO ESTOL E PASSO</b>	<b>51</b>
<b>B</b>	<b>DEDUÇÃO DAS DERIVADAS DA MATRIZ JACOBIANA AMPLIADA</b>	<b>53</b>
<b>B.1</b>	<b>Expansão da matriz jacobiana para o exemplo de 3 barras</b>	<b>55</b>
B.1.1	Sistema de 3 barras modificado	55
<b>C</b>	<b>EXPANSÃO DAS SUBMATRIZES DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PARA O SISTEMA DE 3 BARRAS</b>	<b>57</b>
<b>D</b>	<b>PARÂMETROS DOS GERADORES EÓLICOS</b>	<b>58</b>

<b>E</b>	<b>DADOS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO</b>	<b>60</b>
<b>E.1</b>	<b>Dados das barras para o sistema de 3 barras em pu ( Potência Base = 100MVA)</b>	<b>60</b>
<b>E.2</b>	<b>Dados das linhas para o sistema de 3 barras em pu</b>	<b>60</b>
<b>E.3</b>	<b>Dados das barras para o sistema de 14 barras em pu ( Potência Base = 100MVA)</b>	<b>61</b>
<b>E.4</b>	<b>Dados das linhas para o sistema de 14 barras em pu</b>	<b>62</b>
<b>E.5</b>	<b>Dados das barras para o sistema de 30 barras em pu ( Potência Base = 100MVA)</b>	<b>63</b>
<b>E.6</b>	<b>Dados das linhas para o sistema de 3 barras em pu</b>	<b>64</b>
<b>F</b>	<b>RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA TODOS OS SISTEMAS EM COMPARAÇÃO COM MATPOWER</b>	<b>65</b>
<b>F.1</b>	<b>Sistema de 3 barras</b>	<b>65</b>
F.1.1	Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu	65
F.1.2	Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu	65
F.1.3	Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu	65
F.1.4	Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu	66
<b>F.2</b>	<b>Sistema de 14 barras</b>	<b>66</b>
F.2.1	Resultados do fluxo de potência sem geração eólica	66
F.2.2	Resultados do fluxo de potência com modelo passo	67
F.2.3	Resultados do fluxo de potência com modelo estol	67
F.2.4	Resultados do fluxo de potência com modelo variável	68
<b>F.3</b>	<b>Sistema de 30 barras</b>	<b>69</b>
F.3.1	Resultados do fluxo de potência sem geração eólica	69
F.3.2	Resultados do fluxo de potência com modelo passo	70
F.3.3	Resultados do fluxo de potência com modelo estol	71
F.3.4	Resultados do fluxo de potência com modelo variável	72
<b>G</b>	<b>RESULTADO DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA NAS LINHAS DOS SISTEMAS TESTES</b>	<b>73</b>
<b>G.1</b>	<b>Sistema de 3 barras</b>	<b>73</b>
G.1.1	Sem inserção de geração eólica	73
G.1.2	Modelo passo	73
G.1.3	Modelo Estol	73
G.1.4	Modelo Variável	74
<b>G.2</b>	<b>Sistema de 14 barras</b>	<b>74</b>
G.2.1	Sem inserção de geração eólica	74
G.2.2	Modelo Passo	75
G.2.3	Modelo Estol	76

G.2.4	Modelo Variável . . . . .	77
<b>G.3</b>	<b>Sistema de 30 barras . . . . .</b>	<b>79</b>
G.3.1	Sem inserção de geração eólica . . . . .	79
G.3.2	Modelo Passo . . . . .	80
G.3.3	Modelo Estol . . . . .	81
G.3.4	Modelo Variável . . . . .	82

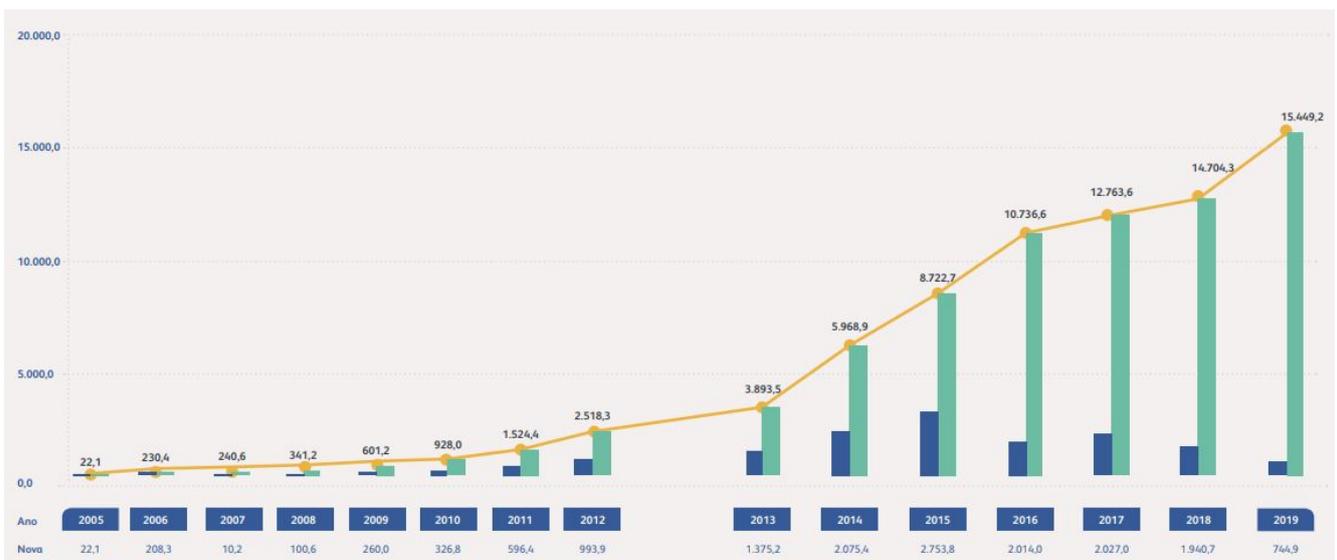
# 1 Introdução

O sistema elétrico de potência é subdividido em três partes fundamentais: as usinas geradoras, a rede de transmissão e os sistemas de distribuição (STEVENSON, 1986). As linhas de transmissão tem o papel de interligar as usinas de geração aos centros de distribuição, que por sua vez é responsável por levar a energia para os consumidores. Embora esses três pilares estejam interconectados, é necessário fazer uma análise rigorosa das características e operação de cada um, uma vez que a eficiência e confiabilidade do sistema está relacionado ao funcionamento ideal de cada subdivisão.

A indústria de energia elétrica apresentou consideráveis mudanças nas últimas décadas no que tange a geração, transmissão e distribuição de energia. Nos anos de 1970, o discurso de reduzir o uso de fontes de energia que utilizavam combustíveis fósseis devido ao impacto ambiental ficou em evidência. Diante dessa motivação foi incentivada a busca por fontes alternativas de energia, surgindo a exposição das fontes renováveis como a energia eólica, que não emitem gases poluentes na atmosfera, além de serem abundantes no planeta (PINTO, 2012).

O Brasil apresenta um grande crescimento no uso desse tipo de energia como representado na Figura 1. No início de 2020 a capacidade passou a ser 15.4GW, representando 600 parques eólicos e cerca de 7532 aerogeradores distribuídos em 12 estados (ABEEÓLICA, 2020).

Figura 1 – Crescimento geração eólica em MW



Fonte: (ABEEÓLICA, 2020)

Em 2018 o Brasil foi considerado o oitavo país com maior quantidade de instalações de usinas eólicas pelo Global Wind Energy Council (GWEC) (ABEEÓLICA, 2020). Diante desse contexto, surge a necessidade de estudar o comportamento do sistema de energia perante a penetração da geração eólica, a fim de identificar futuros problemas e desenvolver alternativas de solução, uma vez que esta começará a substituir fontes de energia que utilizam geradores síncronos convencionais (ACKERMANN, 2005). As usinas eólicas em sua grande parte, utilizam tecnologias diferentes de geração de energia tradicional, como geradores de indução gaiola de esquilo ou geradores acoplados à rede por meio de conversores eletrônicos. A interação desse tipo de tecnologia com o sistema de potência é diferente em relação ao gerador síncrono, utilizado nas fontes convencionais (usinas hidrelétricas e termoeletricas). Por consequência a inserção de parques eólicos na rede afetam diretamente a resposta dinâmica do sistema (ACKERMANN, 2005). Nesse contexto, é importante o desenvolvimento de métodos matemáticos e ferramentas tais como o fluxo de potência ótimo que permitem analisar os sistemas de potência visando encontrar pontos de operação mais eficientes (ARAUJO, 2018).

## 1.1 Justificativa

A inserção da geração eólica como fonte de energia vem se tornando cada vez mais comum na matriz energética brasileira, assumindo o papel de segunda fonte de energia mais utilizada no país, com cerca de 9% de participação. Esse panorama se deve principalmente ao fato da energia eólica ser limpa e renovável. Além disso o Brasil, possui ventos estáveis e sem grandes variações de velocidade e direção (ABEEÓLICA, 2020).

A introdução dos parques eólicos nas redes de transmissão e os seus impactos na operação do sistema devem ser analisados de maneira minuciosa uma vez que esta fonte de energia aumenta a complexidade da solução do fluxo de potência, porque a geração eólica utiliza na sua grande parte geradores de indução que possuem características diferentes de geradores síncronos que são usados em fontes convencionais de energia, acarretando em um comportamento diferente na visão do sistema de transmissão de energia (Qiao; Min; Lu, 2006).

Devido ao crescimento dessa fonte, a análise do sistema elétrico considerando a penetração da geração eólica é cada vez mais importante. Nesse contexto surge o fluxo de potência ótimo que incorpore restrições de geração eólica, que pode ser usado como uma ferramenta de análise de diminuição de problemas causados pela energia eólica nos atuais sistemas de transmissão.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

### 1.2.1 Fluxo de potência aplicado a sistemas elétricos de potência com inserção de aerogeradores

Com o constante aumento da participação da geração eólica na matriz energética brasileira, é importante aumentar ao mesmo passo do crescimento, os estudos sobre os impactos que esse tipo de geração de energia causa nos sistemas de transmissão. Um destes estudos possíveis, é a análise de fluxo de potência, que é a abordagem determinística do fluxo de potência ativa e reativa em um ponto de operação do SEP.

Nesse contexto, surgem estudos em como modelar o aerogerador para ser inserido dentro de um processo iterativo para solução do fluxo de potência. Na análise do fluxo de potência convencional, onde a geração é somente dada por geradores síncronos, existem três tipos distintos de barramentos, barramento de referência conhecido como *Slack*, onde é conhecida a tensão e ângulo de referência, barramento *PV*, onde se conhece a tensão e a potência ativa gerada, e o barramento de carga, onde é conhecido a potência ativa e reativa consumida (MONTICELLI, 1983). Todavia, neste trabalho e nas referências utilizadas, o aerogerador tem como característica, ser um gerador assíncrono, e o comportamento desse tipo de gerador não pode ser tratado da mesma maneira do gerador síncrono.

Em Cidras (2000), são propostas duas formas de modelar o aerogerador dentro do fluxo de potência, no modelo denominado *PQ*, a potência ativa do gerador eólico é obtida através da curva de potência, e a potência reativa é uma função quadrática aproximada, que depende da potência ativa e da magnitude da tensão terminal. No segundo modelo, através da curva de coeficiente de potência, é determinada a potência extraída do vento e a potência elétrica do gerador para valores específicos de velocidades do vento e rotor. Posteriormente, é calculado o valor do escorregamento do gerador assíncrono envolvido, através da comparação entre a potência elétrica e mecânica.

Em (Lin Wang, 2008) são analisados dois modelos de aerogeradores, um de velocidade fixa e o outro de velocidade variável. Através dos circuitos equivalentes, são especificadas as equações que irão representar a inserção dos aerogeradores na solução do fluxo de potência. Dessa forma, são propostos dois algoritmos distintos para calcular o fluxo de potência, cada algoritmo calcula a solução para um determinado tipo de aerogerador. O autor compara os seus resultados com outros trabalhos e mostra que o seu método possui uma convergência mais rápida.

Em Castro e Fuerte-Esquivel (2011) é realizado um detalhamento maior de como é feita a inserção de um gerador assíncrono em um barramento do sistema elétrico de potência. Através do circuito equivalente da máquina de indução, é determinada a potência ativa e reativa gerada, a qual é função da tensão terminal, escorregamento do gerador de indução e os parâmetros de construção de estator e rotor definidos pelo circuito equivalente. Além disso, o autor define as correntes no enrolamento de estator e rotor

que também são funções da tensão terminal e parâmetros da máquina. A definição dessas grandezas são fundamentais para a modelagem matemática da integração do aerogerador ao fluxo de potência. São apresentados quatro modelos de aerogeradores, sendo que cada um deles implica uma mudança distinta nas equações que modelam o problema básico de fluxo de potência. São definidos dois modelos de aerogeradores de velocidade fixa, um modelo de velocidade semi-variável e um modelo de velocidade variável.

Em Krishna e Khatod (2015) é inserido no sistema elétrico de potência um modelo de aerogerador de velocidade fixa. O trabalho mostra com detalhes as equações utilizadas para representar as características do aerogerador e as mudanças que este irá acarretar na formulação básica do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson. Os sistemas utilizados para fazer os testes da modelagem proposta são os sistema IEEE 5 barras e IEEE 14 barras.

### 1.2.2 Análise do Fluxo de Potência Ótimo

O primeiro trabalho que analisava o problema de FPO, foi relacionado ao problema de despacho econômico e foi proposto por Carpentier (1962). No decorrer dos anos, surgiram diferentes modelos lineares e não lineares para o problema de FPO, que estudaram diversas formulações de função objetivo, restrições e variáveis de controle.

O trabalho de Dommel e Tinney (1968) foi pioneiro na solução do FPO através de programação não linear e serviu de alicerce para o desenvolvimento de grande parte dos trabalhos relacionados à formulação e solução do problema de FPO por métodos de otimização clássica (ARAUJO, 2018). Por meio da solução do problema de fluxo de potência determinístico obtido pelo método de Newton e uma função objetivo que buscava minimizar as perdas do sistema de potência em análise, foi apresentado a solução da otimização através de ajustes pontuais de variáveis de controle previamente estabelecidas. A estratégia de solução utilizada consistia no método do gradiente reduzido, que utiliza os multiplicadores de Lagrange para relacionar as equações do fluxo de potência com a função objetivo com restrições. Além disso, foram testados outros métodos de solução como o cálculo da sensibilidade de segunda ordem da função Lagrangeana com relação às variáveis de controle e método das tangentes paralelas e uma técnica que relacionava ambos os métodos (ARAUJO, 2018).

Em Kelly (1974) é apresentado um método que consiste em uma abordagem da matriz Hessiana para calcular as correções nas variáveis de controle estabelecidas, combinado com uma redução do número de variáveis do sistema, melhorando a sensibilidade do algoritmo em relação ao tamanho do gradiente e a convergência diante de funções objetivo de maior complexidade. Nesta abordagem, diferentemente do trabalho de Dommel e Tinney (1968), os barramentos *PV* podem ser tratados como barramentos slack, cuja a potência é determinada a partir da distribuição de tensão no sistema e o valor da magnitude da tensão nos barramentos de geração podem mudar dentro de limites especificados.

Em Torres e Quintana (1998), é desenvolvido um método de programação não linear através de pontos interiores preditor corretor. A formulação matemática do problema se apresenta na forma retangular, por consequência a função objetivo e as restrições são da forma quadrática, facilitando a montagem da matriz Jacobiana e Hessiana. A função objetivo analisada é a minimização de perdas de potência ativa no sistema (ARAÚJO, 2018).

No que tange a análise de variáveis discretas dentro da formulação de fluxo de potência ótimo, o Artigo Capitanescu e Wehenkel (2010) estuda três abordagens distintas com essa característica. As duas primeiras abordagens são baseadas nas sensibilidades dos objetivos e restrições de desigualdade em relação as variáveis discretas analisadas no problema. A terceira técnica de otimização trata-se do uso dos multiplicadores de Lagrange que modelam às restrições das variáveis discretas tratadas na solução de fluxo de potência ótimo. Em Capitanescu e Wehenkel (2010) é analisado como função objetivo a minimização de perdas de potência ativa e os custos de geração. Além disso, o autor mostra que o método proposto supera outras abordagens em relação a número de iterações e confiabilidade do modelo.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Aplicar a solução de fluxo de potência ótimo considerando geração eólica para minimizar as perdas de potência ativa em SEP's.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar as características dos aerogeradores ( de velocidade fixa e variável) visando a análise do fluxo de potência;
- Deduzir e implementar as equações que representam os modelos matemáticos dos aerogeradores de velocidade fixa ( controlados por passo e por estol ) e de velocidade variável;
- Incorporar os modelos matemáticos implementados na matriz Jacobiana para análise de fluxo de potência;
- Implementar um algoritmo de Fluxo de Potência Ótimo baseado no método do gradiente reduzido e levando em consideração as variáveis que envolvem os aerogeradores;

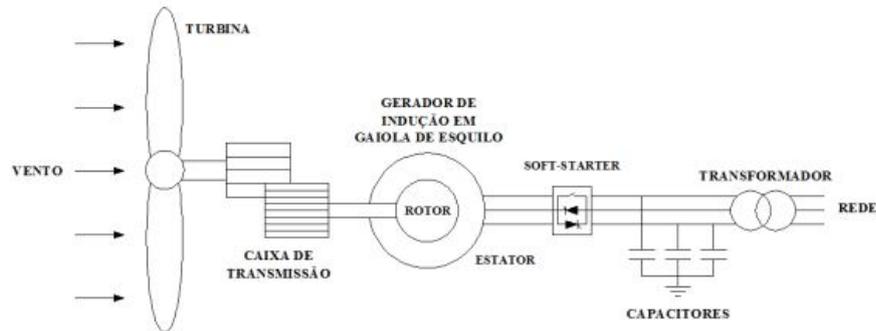
## 2 Modelagem do Aerogerador

Neste capítulo são apresentados os modelos de aerogeradores utilizados no trabalho que serão inseridos em um sistema de transmissão como representação de um parque eólico. É feita uma classificação entre aerogeradores de velocidade fixa e variável, porém é mostrada apenas a modelagem dos geradores eólicos de velocidade fixa, uma vez que estes interferem diretamente na representação matemática do fluxo de potência, ao passo que o gerador de velocidade variável utilizado no trabalho é representado no sistema da mesma maneira que um barramento de carga. O capítulo também aborda o comportamento dos aerogeradores de velocidade fixa em relação à potência ativa e reativa gerada no cálculo do fluxo de potência, de acordo com qual tipo de controlador aerodinâmico é usado pela turbina. Portanto é preciso definir as características de cada tipo de controlador utilizado, para compreender como é feita a inserção de um gerador eólico de velocidade fixa na análise de fluxo de potência em um sistema de transmissão.

### 2.1 Gerador eólico de velocidade fixa e variável

O gerador eólico de velocidade fixa utiliza um gerador de indução de gaiola de esquilo é caracterizado por ajustar um ponto fixo de velocidade para o rotor da turbina e do gerador, mesmo submetido a variações na velocidade do vento. A velocidade do rotor do gerador é obtida através da frequência da rede elétrica e pela quantidade de polos do gerador (SOHN, 2014). Apesar da velocidade ser considerada constante, ela varia cerca de 1 a 2% da velocidade nominal, devido ao escorregamento do gerador. Essa pequena variação também é importante, uma vez que a energia gerada varia de acordo com o escorregamento (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011). Além disso, o gerador de indução é conectado diretamente a rede elétrica, com a utilização de um *soft-starter*, com o objetivo de limitar a corrente de partida devido ao consumo de potência reativa da rede (SOHN, 2014). O esquema desse tipo de gerador pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Modelo Aerogerador velocidade fixa

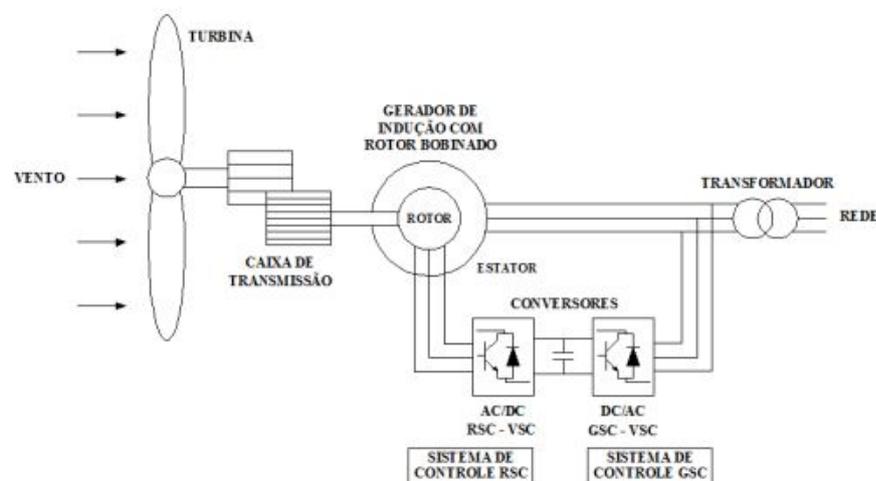


Fonte:(SOHN, 2014)

Por outro lado os aerogeradores de velocidade variável permitem a mudança de velocidade do rotor da turbina para diferentes valores de velocidade do vento. Essa operação se deve ao conversor eletrônico de potência, que atua para converter a tensão e frequência gerada para a frequência e tensão do sistema elétrico (SOHN, 2014). Neste trabalho, é usado como gerador eólico de velocidade variável apenas o gerador de indução com rotor bobinado duplamente alimentado ou *DFIG* (*Doubly Fed Induction Generator*).

O gerador eólico de velocidade variável equipado com gerador *DFIG*, é caracterizado por manter o estator conectado à rede através de um transformador de potência, enquanto o rotor é conectado à rede por um conversor *back to back* (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011). O esquema desse gerador eólico pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Gerador eólico DFIG



Fonte:(SOHN, 2014)

O controle de potência ativa e reativa é feito de maneira separada. Em relação a potência ativa, quando a velocidade do vento está abaixo da nominal, o controlador atua

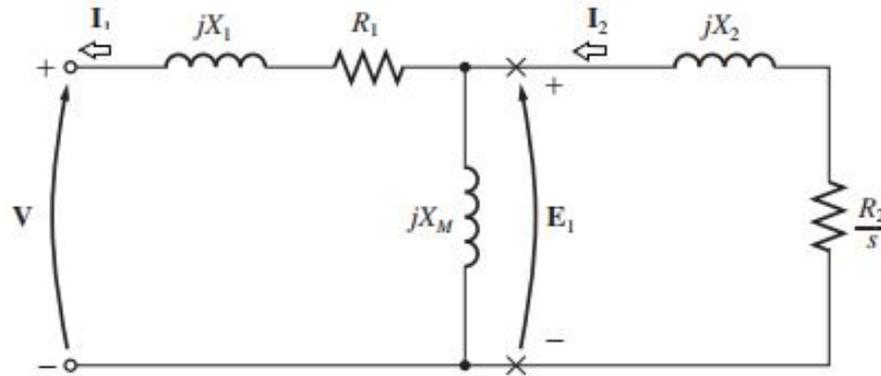
para manter a injeção de potência ativa máxima. Caso a velocidade do vento ultrapasse a velocidade nominal do rotor, o controlador de potência atua para limitar a geração e injeção de potência na rede, mitigando problemas mecânicos na turbina (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

O controle de potência reativa é definido pelo gerador de indução que opera na maioria das vezes com um fator de potência fixo (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

## 2.2 Modelagem do gerador eólico de velocidade fixa

O modelo matemático do gerador eólico de velocidade fixa deriva do circuito equivalente em estado estacionário da máquina de indução mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Circuito equivalente monofásico da máquina de indução.



Fonte:(CHAPMAN, 2013)

Os elementos presentes no circuito são:

$R_1$ : resistência do enrolamento do estator ( $\Omega$ ).

$X_1$ : reatância do enrolamento do estator ( $\Omega$ ).

$R_2$ : resistência do enrolamento do rotor referida ao estator ( $\Omega$ ).

$X_2$ : reatância do enrolamento do rotor referida ao estator ( $\Omega$ ).

$X_m$ : reatância de magnetização ( $\Omega$ ).

$V$ : tensão em terminais do estator ( $V$ ).

$s$ : escorregamento

A partir da Figura 4, obtêm-se a corrente de estator ( $I_1$ ). O sinal negativo da Equação 2.1 é dado em função do sentido da corrente do enrolamento do estator mostrado na Figura 4.

$$I_1 = \frac{-V[(R_2/s) + j(X_2 + X_m)]}{R_1(R_2/s) - X_m X_2 - X_1(X_2 + X_m) + j[(R_2/s)(X_1 + X_m) + R_1(X_2 + X_m)]} \quad (2.1)$$

Com o auxílio da corrente de estator, encontra-se a potência ativa e reativa gerada através da Equação 2.2 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

$$S = VI_1^* \quad (2.2)$$

$$Pg(V, s) = Re \{S\} = -V^2 \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \quad (2.3)$$

$$Qg(V, s) = Im \{S\} = -V^2 \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \quad (2.4)$$

$$A = R_2^2(X_1 + X_m)$$

$$B = (X_2 + X_m)[X_2X_m + X_1(X_2 + X_m)]$$

$$C = R_1R_2$$

$$D = X_2X_m + X_1(X_2 + X_m)$$

$$E = R_2(X_1 + X_m)$$

$$F = R_1(X_2 + X_m)$$

$$H = R_2X_m^2$$

$$K = R_1R_2^2$$

$$L = R_1(X_2 + X_m)^2$$

$$M = X_mR_2(X_1 + X_m)$$

$$N = X_mR_1(X_2 + X_m)$$

$$T = R_1R_2X_m$$

$$W = X_m[X_2X_m + X_1(X_2 + X_m)]$$

Aplicando um divisor de corrente no circuito da Figura 4, obtêm-se a corrente do rotor  $I_2$ . Escrevendo ambas correntes em função dos elementos do circuito, obtêm-se as Equações 2.5 e 2.6 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011). A demonstração da Equação 2.5 e as constantes A a W encontram-se no apêndice A.

$$I_1^2 = V^2 \frac{(K + Hs + Ls^2)^2 + (A + Bs^2)^2}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \quad (2.5)$$

$$I_2^2 = V^2 \frac{(Ms + Ns^2)^2 + (Ts - Ws^2)^2}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \quad (2.6)$$

Quando a máquina de indução está trabalhando como gerador a potência mecânica convertida é dada por (CHAPMAN, 2013):

$$P_{conv} = -I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (2.7)$$

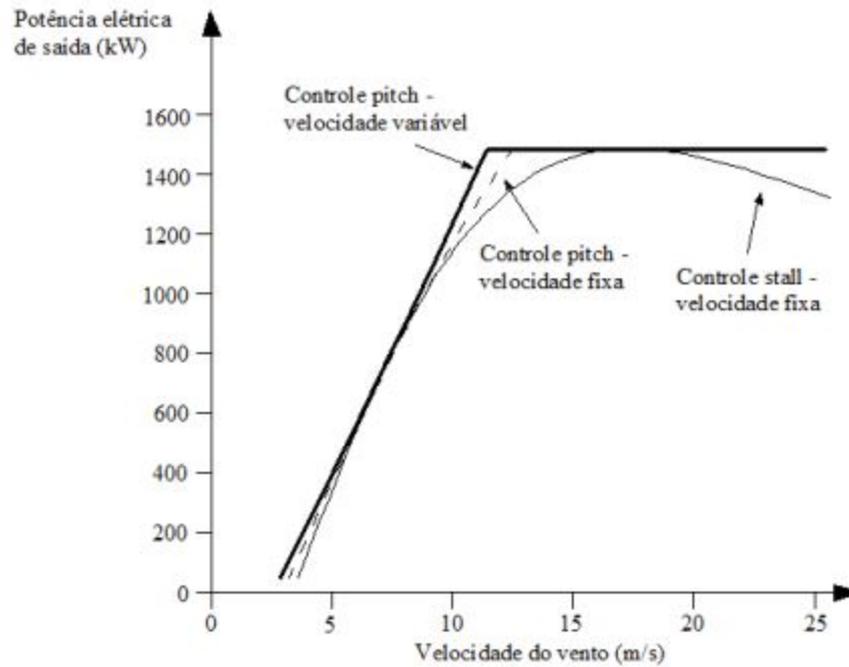
### 2.2.1 Controladores Aerodinâmicos

Em geradores eólicos de velocidade fixa, a potência mecânica obtida através do movimento das pás com a variação do vento é limitada quando a velocidade do vento ultrapassa a velocidade nominal da turbina eólica, para evitar esforço mecânico e danos às turbinas (SOHN, 2014). Diante disso, existe a necessidade de métodos de controle para ajustar a velocidade do rotor em situações adversas (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011). Existem três tipos de controladores aerodinâmicos associados à turbina eólica: sistema de controle de passo (pitch-control); sistema de controle por estol (stall-regulated ou passive-stall); e o sistema híbrido (active-stall) que é a junção dos dois sistemas de controle citados anteriormente (PINTO, 2012).

O controle de passo é utilizado tanto em geradores eólicos de velocidade fixa, quanto de velocidade variável. É formado por um sistema eletrônico que monitora a geração para que não ultrapasse o seu valor nominal. Caso a velocidade do vento supere a velocidade nominal da turbina eólica o controlador é acionado, as pás da turbina são inclinadas alguns graus determinando um valor ótimo de ângulo de ataque do vento, ou até mesmo permitindo que o vento passe livremente, para um determinado valor de velocidade do vento acima do valor nominal. A escolha do ângulo de ataque é feita para fornecer a potência ativa nominal (PINTO, 2012). Em geradores de velocidade variável o controlador de passo consegue otimizar o fornecimento da energia extraída do vento em relação aos aerogeradores de velocidade fixa (SOHN, 2014).

No controle por estol, diferentemente do controlador de passo, as pás das turbinas são fixas. Dessa maneira, as pás já são projetadas para que diminuam a eficiência em situações onde a velocidade do vento ultrapasse a velocidade nominal do rotor da turbina (PINTO, 2012). A Figura 5 mostra uma comparação entre os dois controladores citados anteriormente.

Figura 5 – Comparação entre controladores



Fonte:(SOHN, 2014)

O controlador híbrido combina as duas tecnologias e é utilizado em máquinas de alta potência, acima de 1MW. Nesse tipo de topologia quando a velocidade do vento supera a velocidade nominal do rotor, o ângulo de ataque é aumentando para utilizar o controlador por estol. Porém, ao contrário do controlador passivo onde as pás permanecem fixas, no sistema híbrido as pás realizam uma variação automática do ângulo na mesma direção do vento, controlando o fluxo do vento (PINTO, 2012).

Tabela 1 – Controladores Aerodinâmicos

Tipos de controlador	Vantagens	Desvantagens
Estol	Simplicidade e Robustez	Instabilidade da potência elétrica gerada para velocidades do vento acima da nominal, estresse mecânico nas pás devido ao fato de serem fixas.
Passo	Facilidade de controle da potência, maximização da energia coletada	Menor confiabilidade, custo do controlador, vulnerabilidade a grandes variações da velocidade do vento.
Híbrido	Facilidade de controle da potência, turbinas mais simples de serem construídas em relação ao controlador por estol	Custo do controlador

Fonte: (SOHN, 2014)

## 2.2.2 Gerador eólico de velocidade fixa com controlador por estol

Nessa configuração a potência mecânica extraída do vento por este gerador é mostrada na Equação 2.8 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011):

$$P_m = 0.5\rho c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} AV_w^3 \quad (2.8)$$

$$\lambda_i = \left( \left( \frac{1}{\lambda + c_8\beta} \right) - \left( \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right) \right)^{-1} \quad (2.9)$$

$$\lambda = \frac{R\omega_T}{V_w} = \frac{Rn_{gb}\omega_s(1-s)}{V_w} \quad (2.10)$$

onde:

$\rho$ : densidade do ar [ $kg/m^3$ ].

$A$ : área varrida pelas pás [ $m^2$ ].

$V_w$ : velocidade do vento [ $m/s$ ].

$R$ : raio do rotor da turbina [ $m$ ].

$n_{gb}$ : relação da caixa de velocidade.

$\omega_s$ : velocidade angular síncrona[ $rad/s$ ].

$\beta$ : ângulo de passo( $^\circ$ ).

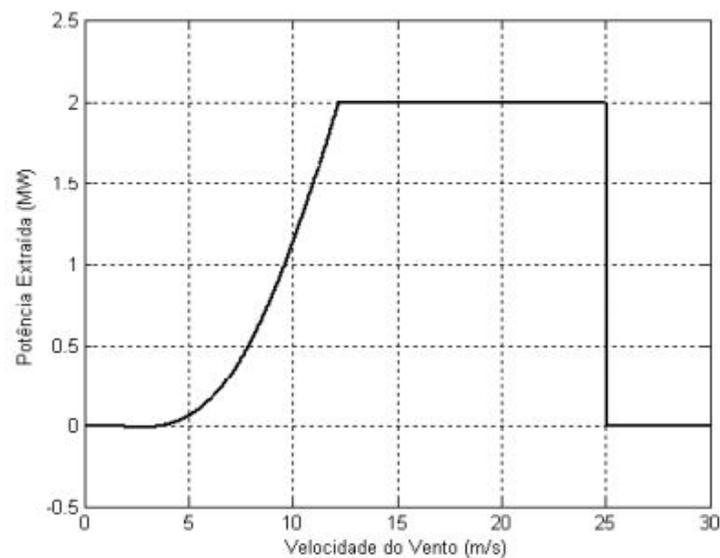
$\omega_T$ : velocidade angular da turbina. [ $rad/s$ ]

$c_1 - c_9$ : parâmetros de fabricação da turbina.

### 2.2.3 Gerador eólico de velocidade fixa com controlador por passo

A operação das turbinas equipadas com esse tipo de controle é comumente feita por um dispositivo mecânico que varia o ângulo de passo. Para velocidades acima da nominal, onde os limites da turbina são ultrapassados, as pás da turbina são giradas longitudinalmente, reduzindo o ângulo de ataque, através do aumento do ângulo de passo, mantendo a potência nominal para qualquer velocidade de vento e controlando a potência ativa gerada (SILVA, 2006).

Figura 6 – Curva de potência aerogerador equipado com controle por passo.



Fonte: (SILVA, 2006)

Na Figura 6, observa-se que o gerador eólico inicia a operação na velocidade de 4m/s, a velocidade inicial de operação de um gerador eólico é denominada  $Vw_{cutin}$ . Nota-se que quando o vento atinge o valor de 12m/s, a turbina atinge a potência nominal que no caso é de 2MW. Quando a velocidade do vento ultrapassa o valor nominal, o controle por passo é acionado limitando a potência para o valor nominal. Na curva nota-se também que quando o vento atinge a velocidade de 25m/s a turbina é desligada por questão de segurança, essa velocidade é chamada de  $Vw_{cutout}$  (SILVA, 2006).

A potência reativa precisa ser calculada através da Equação 2.4, assim como no gerador eólico de velocidade fixa controlado por estol. A potência mecânica para esse

gerador é dado pela Equação 2.11 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

$$P_m = P_g + Perdas_E + Perdas_R \quad (2.11)$$

onde  $P_g$  é a potência gerada obtida através da curva de potência do gerador. E  $Perdas_E$  e  $Perdas_R$  são as perdas no estator e rotor do gerador respectivamente.

## 3 Metodologia

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para resolver o fluxo de potência e fluxo de potência ótimo com a inserção de um gerador eólico no sistema de transmissão. É descrito o passo a passo de como resolver o fluxo de potência convencional, ou seja, para um sistema de transmissão compreendendo apenas geradores síncronos, e as modificações necessárias na modelagem matemática do fluxo para inserção de um gerador eólico em um barramento do sistema, além do método de otimização utilizado para resolver o fluxo de potência ótimo. No presente trabalho, foram modelados três tipos de geradores eólicos, cada um possui uma representação distinta dentro do fluxo de potência e essas representações bem como as modificações estruturais na análise do fluxo é apresentada no decorrer do capítulo.

### 3.1 Fluxo de Potência

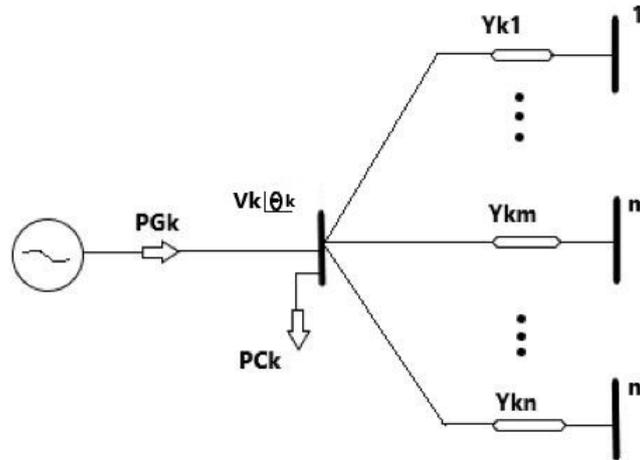
O fluxo de potência é uma ferramenta fundamental utilizada para análise de um sistema de transmissão, pois a partir dele são calculadas, para um ponto de operação específico de carga e geração, grandezas importantes para a compreensão da rede como:

- Tensão nos barramentos
- Ângulo de fase das tensões
- Fluxo de potência nas linhas
- Perdas totais do sistema

No presente trabalho, o fluxo de potência será utilizado para obter pontos de operação iniciais do fluxo de potência ótimo com restrições de geração eólica.

O problema do fluxo de potência pode ser representado por um conjunto de equações e inequações algébricas não-lineares que obedecem às leis de Kirchhoff e um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes (MONTICELLI, 1983). De acordo com a Figura 7, a cada barramento da rede são associados quatro tipos de variáveis ( $V$ ,  $\theta$ ,  $P_G$ ,  $P_C$ ), sendo que  $P_G$ ,  $P_C$  entram como dados e  $V$ ,  $\theta$  como incógnitas do problema:

Figura 7 – Barramento com geração, carga e linhas.



Fonte: Autor

De acordo com a figura 7

 $P_k^{esp}$ : Potência ativa especificada na barra k (Equação 3.1) $Q_k^{esp}$ : Potência reativa especificada na barra k (Equação 3.2) $V_k$ : Magnitude da tensão na barra k $\theta_k$ : Ângulo da tensão na barra k

$$P_k^{esp} = P_{Gk} - P_{Ck} \quad (3.1)$$

$$Q_k^{esp} = Q_{Gk} - Q_{Ck} \quad (3.2)$$

Dependendo de quais dados dos barramentos serão especificados na barra k, são determinados três tipos de barras no sistema: (MONTICELLI, 1983)

- Barra *PQ*: Barramento de carga, onde o valor de  $P_k^{esp}$  e  $Q_k^{esp}$  são considerados.
- Barra *PV*: Barramento de geração, onde o valor de  $P_k^{esp}$  e  $V_k$  são conhecidos. Também é definida como barra de tensão controlada.
- Barra *Slack*: É caracterizada como barra de referência por oferecer a referência angular do sistema, além de ser utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema (MONTICELLI, 1983). Os valores de  $V_k$  e  $\theta_k$  são conhecidos.

### 3.1.1 Formulação matemática do fluxo de potência

A injeção líquida de potência ativa e reativa em cada barra é calculada de acordo com as Equações 3.3 e 3.4 respectivamente (MONTICELLI, 1983):

$$P_k(V, \theta) = V_k \left\{ \sum_{m \in \Omega_k}^N V_m G_{km} \cos(\theta_{km}) + V_m B_{km} \sin(\theta_{km}) \right\}, k = 1..nk \in \{PV \cup PQ\} \quad (3.3)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \left\{ \sum_{m \in \Omega_k}^N V_m G_{km} \sin(\theta_{km}) + V_m B_{km} \cos(\theta_{km}) \right\}, k = 1..nk \in \{PQ\} \quad (3.4)$$

O conjunto  $\Omega_k$  correspondem às barras interconectadas à barra k. O termo  $\theta_{km}$  corresponde à diferença angular  $\theta_k - \theta_m$ .  $G_{km}$  e  $B_{km}$  correspondem respectivamente a parte real e imaginária do elemento  $Y_{km}$  da matriz de admitâncias.

### 3.1.2 Método de Newton Raphson

Segundo (MONTICELLI, 1983), dado um sistema de potência que contém  $N_{PQ}$  barras de carga,  $N_{PV}$  barras de tensão controlada e uma barra de referência, então existem  $2N_{PQ} + N_{PV}$  equações não lineares com o mesmo número de incógnitas para o problema. As equações algébricas não-lineares em questão são formadas através da relação entre as Equações 3.1 e 3.3 formando a variação de injeção de potência ativa para as barras  $PQ$  e  $PV$ , e a relação entre as Equações 3.2 e 3.4 formando a variação de injeção de potência reativa para as barras  $PQ$ .

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k(V_k, \theta_k) \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k(V_k, \theta_k) \quad (3.6)$$

Dentro do conjunto das Equações 3.5 e 3.6 temos as incógnitas do sistema que podem ser agrupadas em um vetor  $\mathbf{x}$  de tamanho  $(2N_{PQ} + N_{PV}) \times 1$ .

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ V_k \end{bmatrix}$$

Onde  $\theta_k$  é o vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e  $V_k$  é o vetor das magnitudes das tensões das barras PQ (MONTICELLI, 1983).

As Equações 3.5 e 3.6 também podem ser representadas na forma matricial:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}$$

### 3.1.2.1 Montagem da matriz jacobiana

Considerando as Equações 3.5 e 3.6 e lembrando que 3.1 e 3.2 representam termos constantes, a matriz jacobiana, pode ser escrita da seguinte maneira (MONTICELLI, 1983):

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}$$

A dimensão da matriz jacobiana é dada pelo número de equações e pelo número de incógnitas, isto é:  $2N_{PQ} + N_{PV} \times 2N_{PQ} + N_{PV}$ .

Sendo:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.7)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.8)$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.9)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.10)$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.11)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.12)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.13)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.14)$$

### 3.1.3 Algoritmo Newton Raphson aplicado ao fluxo de potência

Segundo (MONTICELLI, 1983), o algoritmo de Newton Raphson para solucionar o problema do fluxo de potência segue os seguintes passos:

1. Fazer o número de iterações  $v = 0$  e escolher valores iniciais para os ângulos, por exemplo  $\theta = 0^\circ$  das barras PQ e PV, e as magnitudes das tensões das barras PQ por exemplo  $V = 1(pu)$ .

2. Calcular  $P_k(V_k^v, \theta_k^v)$  para as barras de carga e tensão controlada usando a Equação 3.3 e  $Q_k(V_k^v, \theta_k^v)$  para as barras de carga usando a Equação 3.4 e determinar a variação de potência líquida ativa e reativa  $\Delta P_k^v$  e  $\Delta Q_k^v$  usando as Equações 3.5 e 3.6.
3. Testar convergência: se  $Max|\Delta P_k^v| \leq \varepsilon$  e  $Max|\Delta Q_k^v| \leq \varepsilon$ , o processo convergiu para solução  $(V^v, \theta^v)$ , caso contrário seguir para passo 4, onde a taxa de convergência ( $\varepsilon$ ) é um valor muito pequeno que garante a convergência do método.
4. Calcular matriz jacobiana  $J(V^v, \theta^v)$ .
5. Determinar  $\Delta V^v$  e  $\Delta \theta^v$  a partir da Equação 3.15.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k(V^v, \theta^v) \\ \Delta Q_k(V^v, \theta^v) \end{bmatrix} = [J(V^v, \theta^v)] \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

6. Determinar nova solução  $(V^{v+1}, \theta^{v+1})$ .

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad (3.16)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (3.17)$$

7. Incrementar o número de iterações  $v + 1 = v$  e voltar ao passo 2.

## 3.2 Fluxo de Potência Ótimo

O Fluxo de Potência Ótimo(FPO) consiste em um método matemático que formula o fluxo de potência convencional, a fim de otimizar um conjunto de variáveis para minimizar objetivos tais como: custo de geração,perdas totais no sistema de transmissão, despacho ótimo de reativos, ao passo que cumpre uma série de restrições operacionais presentes no sistema elétrico (ARAUJO, 2018).

### 3.2.1 Representação Matemática

Segundo (ARAÚJO, 2018), o fluxo de potência ótimo pode ser representado da seguinte maneira:

$$\text{Min}F(x, u) \quad (3.18)$$

*s.a.*

$$g(x, u) = 0 \quad (3.19)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3.20)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (3.21)$$

$$u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \quad (3.22)$$

Onde:

$f(x, u)$ : Corresponde a função objetivo do problema, por exemplo, minimizar perdas de potência ativa e reativa ou minimizar custos de geração.

$g(x, u)$ : Corresponde as restrições de igualdade do problema (equações de balanço de fluxo de potência 3.5 e 3.6);

$h(x, u)$ : Corresponde as restrições de desigualdade, por exemplo, limites operacionais das usinas geradoras e rede de transmissão, limites de tensão nas barras, limites de fluxo de potência nas linhas.

$\mathbf{x}$ : Vetor de variáveis independentes do sistema (ângulo e magnitude de tensão nos barramentos do sistema e de geração eólica, escorregamento do gerador eólico)

$\mathbf{u}$ : Vetor que contém as variáveis a serem otimizadas, variáveis de controle (tensão, potência ativa e reativa em barras  $PV$ , ângulo de transformadores defasadores)

### 3.2.2 Especificações do fluxo de potência ótimo com restrições de geração eólica

O presente trabalho aborda a otimização com o objetivo de minimizar as perdas de potência ativa no sistema com inserção de geração eólica. É importante ressaltar que a

potência na barra de referência não é especificada na solução do fluxo de potência, uma vez que esta barra é responsável por suprir as perdas do sistema. Dessa forma, minimizar as perdas de potência ativa, significa reduzir a potência gerada pela barra de referência do sistema (Dommel; Tinney, 1968).

As variáveis que serão utilizadas como variáveis de controle na solução do fluxo de potência ótimo serão as magnitudes de tensão nas barras de referência e nas barras *PV*. O algoritmo atualiza o valor das variáveis de controle,  $\mathbf{u}$ , a fim de minimizar as perdas de potência ativa do sistema. Dessa forma, o problema do fluxo de potência ótimo pode ser descrito da seguinte maneira:

$$\text{Min} P_{slack} \quad (3.23)$$

*s.a.*

$$g(x, u) = 0 \quad (3.24)$$

$$V_{slack}^{min} \leq V_{slack} \leq V_{slack}^{max} \quad (3.25)$$

$$V_{PV}^{min} \leq V_{PV} \leq V_{PV}^{max} \quad (3.26)$$

Onde  $g(x, u)$  corresponde as equações de balanço de potência do fluxo de potência com inserção de geração eólica.

$V_{slack}$  e  $V_{PV}$  correspondem as variáveis de controle, que formam o vetor  $\mathbf{u}$ .

O método que será utilizado na otimização é o método dos multiplicadores de Lagrange proposto por (Dommel; Tinney, 1968). O mínimo da função objetivo pode ser encontrado utilizando os multiplicadores de lagrange  $\lambda$  e minimizando a função Lagrangeana mostrada na Equação 3.27.

$$L(x, u) = f(x, u) + [\lambda]^T [g(x, u)] \quad (3.27)$$

Da Equação 3.27 surgem as condições de Karush Kuhn-Tucker descritas pelas Equações 3.28 a 3.30, necessárias para se obter o mínimo da função objetivo.

$$\left[ \frac{\partial L}{\partial x} \right] = \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right] + \left[ \frac{\partial g}{\partial x} \right]^T [\lambda] = 0 \quad (3.28)$$

Onde

$$\left[ \frac{\partial L}{\partial u} \right] = \left[ \frac{\partial f}{\partial u} \right] + \left[ \frac{\partial g}{\partial u} \right]^T [\lambda] = 0 \quad (3.29)$$

$$\left[ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right] = [g(x, u)] = 0 \quad (3.30)$$

$$\left[ \frac{\partial g}{\partial u} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial u} \end{bmatrix}$$

$$\left[ \frac{\partial g}{\partial x} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial x} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$\left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right] = \left[ \frac{\partial P_{slack}}{\partial x} \right]$$

$$\left[ \frac{\partial f}{\partial u} \right] = \left[ \frac{\partial P_{slack}}{\partial u} \right]$$

A expansão das submatrizes que formam o fluxo de potência estão no Apêndice C.

### 3.2.3 Método do Gradiente Reduzido

#### 3.2.3.1 Algoritmo de solução

Uma das maneiras de se calcular o FPO é por meio do método do gradiente. O algoritmo utilizado para o FPO pode ser encontrado em (Dommel; Tinney, 1968):

1. Definir valores iniciais para as variáveis de controle  $u$ .
2. Encontrar uma solução do fluxo de potência usando o método de Newton-Raphson e obter a matriz Jacobiana da última iteração.
3. Encontrar os valores dos multiplicadores de Lagrange  $[\lambda]$ .

$$[\lambda] = - \left[ \frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-T} \cdot \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right] \quad (3.31)$$

4. Calcular o gradiente  $[\nabla f]$ .

$$[\nabla f] = \left[ \frac{\partial f}{\partial u} \right] + \left[ \frac{\partial g}{\partial u} \right]^T \cdot [\lambda] \quad (3.32)$$

5. Se o gradiente for suficientemente pequeno, então a solução ótima foi encontrada. Caso contrário ir ao passo 6.
6. Atualizar os valores das variáveis de controle e retornar para o passo 2.

$$[u^{novo}] = [u^{antigo}] + [\Delta u] \quad (3.33)$$

$$[\Delta u] = -c \cdot [\nabla f] \quad (3.34)$$

O vetor gradiente quantifica a sensibilidade da função objetivo em relação as mudanças sofridas pelas variáveis de controle.

Uma parte importante do algoritmo se encontra no item 6. O valor da constante  $c$  define o tamanho do passo que o algoritmo caminha na direção contrária do gradiente (Dommel; Tinney, 1968). Um valor pequeno para  $C$ , garante a convergência apesar de solicitar um grande número de iterações. Um valor muito grande causa grandes alterações em volta do valor mínimo.

### 3.3 Integração do gerador eólico ao fluxo de potência

Nesta seção são mostradas as modificações necessárias no fluxo de potência convencional para inserir um determinado tipo de gerador eólico. O trabalho compreende três tipos de geradores eólicos.

#### 3.3.1 Fluxo de Potência aplicado ao gerador eólico controlado por estol

##### 3.3.1.1 Equações de balanço de potência

Para uma dada barra  $k$  que contém um gerador eólico de velocidade fixa controlado por estol, as equações de balanço de potência são (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011):

$$\Delta P_k = P_g(V, s) - P_k^{esp} - P_k = 0 \quad (3.35)$$

$$\Delta Q_k = Q_g(V, s) - Q_k^{esp} - Q_k = 0 \quad (3.36)$$

$$\Delta P_{WTk} = -(P_m - P_{conv}) = 0 \quad (3.37)$$

onde  $P_k$  e  $Q_k$  são dados pelas Equações 3.3 e 3.4 respectivamente.

##### 3.3.1.2 Matriz Jacobiana Ampliada

As equações de balanço de potência são combinadas na montagem da matriz jacobiana. Além da magnitude e o ângulo da tensão, o escorregamento do gerador de indução se torna uma variável dentro do fluxo de potência. Dessa forma, a matriz jacobiana é ampliada, incluindo termos relacionados ao escorregamento. A Equação 3.15 do algoritmo

de Newton-Raphson pode ser ampliada conforme a Equação 3.38 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{WTk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial P_k}{\partial V_k} - \frac{\partial P_g}{\partial V_k} \right) & \frac{\partial P_g}{\partial s} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} - \frac{\partial Q_g}{\partial V_k} \right) & \frac{\partial Q_g}{\partial s} \\ 0 & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

A dedução dos novos termos do jacobiano que compreendem a geração eólica estão no apêndice B.

### 3.3.2 Fluxo de potência aplicado ao gerador eólico controlado por passo

#### 3.3.2.1 Equações de balanço de potência

Para uma dada barra  $k$  que contém um gerador eólico de velocidade fixa controlado por passo, as equações de balanço de potência são (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011):

$$\Delta P_k = P_g - P_k^{esp} - P_k = 0 \quad (3.39)$$

$$\Delta Q_k = Q_g(V, s) - Q_k^{esp} - Q_k = 0 \quad (3.40)$$

$$\Delta P_{WTk} = P_g - \left( (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) + I_2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \right) = 0 \quad (3.41)$$

Nesse tipo de gerador eólico, a potência gerada é dada pela curva de potência do gerador para um valor fixo de velocidade do vento. Esse valor está representado pela variável  $P_g$  na Equação 3.39.  $P_k$  e  $Q_k$  são dados pelas Equações 3.3 e 3.4 respectivamente.

#### 3.3.2.2 Matriz Jacobiana Ampliada

De maneira análoga ao modelo do gerador eólico controlado por estol, as equações de balanço de potência são combinadas na montagem da matriz Jacobiana. A Equação 3.15 do algoritmo de Newton-Raphson pode ser reescrita conforme a Equação 3.42 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{WTk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \right) & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} - \frac{\partial Q_g}{\partial V_k} \right) & \frac{\partial Q_g}{\partial s} \\ 0 & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

### 3.3.3 Fluxo de potência aplicado ao gerador de indução duplamente alimentado

Esse tipo de gerador eólico, no que tange à análise de fluxo de potência, pode ser tratado como um nó  $PQ$ , uma vez que o conversor eletrônico associado oferece a

possibilidade de controle de potência ativa e reativa, regulando o fator de potência e controlando a tensão para níveis previamente estabelecidos (SOHN, 2014). Dessa forma, não há mudanças estruturais na matriz jacobiana do sistema. Todavia as equações de balanço de potência ativa e reativa na barra  $k$ , com a presença desse tipo de gerador, apresentam o termo que compreende a geração eólica como observado nas Equações 3.43 e 3.44 (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

$$\Delta P_k = P_g - P_k^{esp} - P_k = 0 \quad (3.43)$$

$$\Delta Q_k = Q_g - Q_k^{esp} - Q_k = 0 \quad (3.44)$$

Na Equação 3.43  $P_g$  é obtida através da curva de potência do gerador. E na Equação 3.44  $Q_g$  pode ser obtido através da Equação 3.45 onde  $\phi$  é o ângulo do fator de potência do gerador.

$$Q_g = P_g \tan \phi \quad (3.45)$$

## 4 Testes e Resultados

Os algoritmos descritos no capítulo 3, foram implementados no MATLAB e utilizados para simular a inserção de geração eólica no sistema de potência e também realizar a otimização das perdas de potência ativa. A Figura 8 mostra o esquema utilizado para conectar o barramento de geração eólica aos sistemas de transmissão. O valor da impedância do transformador utilizada para conectar os aerogeradores descritos no Capítulo 2 ao sistema de potência foi arbitrado em  $0,2pu$  assim como nos artigos (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011) e (Krishna; Khatod, 2015).

No apêndice D, são apresentados os parâmetros do gerador eólico com controlador de passo e estol, além dos dados da curva de potência do gerador eólico controlado por passo. Os parâmetros dos aerogeradores estão presentes no fluxo de potência, pois a partir deles são calculados grandezas como potência ativa e reativa.

Na Tabela 2 é representado as principais características dos parques eólico dos modelos utilizados na simulação. Vale ressaltar que a potência gerada do modelo passo é um valor de entrada no fluxo de potência, oriundo da curva de potência do modelo passo que está representada na Tabela 20. Os valores descritos na Tabela 20 representam os valores de potência trifásica de apenas um gerador, e o fluxo de potência analisa o equivalente monofásico, portanto para o valor de  $11m/s$ , a potência monofásica é de  $150kW$ .

A potência ativa gerada para o gerador controlado por estol é calculada no fluxo de potência e não é possível obtê-la previamente, diante disso, foi escolhido um número conveniente de 18 geradores para representar o parque eólico de aerogeradores controlados por estol para fins comparativos, representando  $11400kW$  (geração próxima ao modelo anterior). Todos os sistemas testes possuem uma potência base de  $100MVA$ .

Tabela 2 – Características dos Parques Eólicos

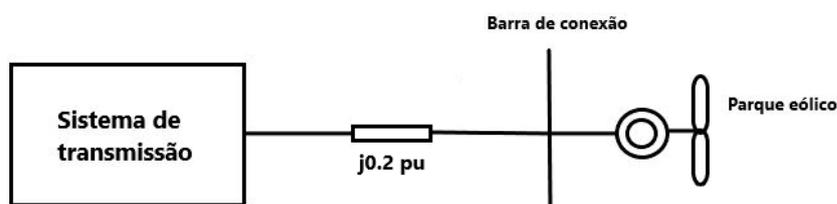
Modelo	Geradores Eólicos	Potência do Parque (kW)	$V_{vento}(m/s)$
Estol	18	11400	11
Passo	75	11250	11
Variável	10	20000	15

Fonte: Autor

A potência ativa e reativa do gerador eólico de velocidade variável é conhecida, e é um valor fixo no fluxo de potência. A potência ativa é dada pela curva de potência da mesma forma que no modelo passo, e a potência reativa dada pela Equação 3.45. O fator de potência utilizado foi de  $0,95$ . Na Tabela 2, nota-se que o valor de velocidade do vento para esse modelo é de  $15m/s$ , pois é nesse valor que o gerador atinge sua potência nominal

de  $2000kW$  (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011). É importante ressaltar, que os resultados para esse modelo de aerogerador são analisados de forma separada dos modelos anteriores, por se tratar de um modelo de velocidade variável, e ter um parâmetro de velocidade do vento diferente dos modelos de velocidade fixa comentados anteriormente. A curva de potência, assim como o fator de potência utilizado como referência encontra-se em (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011). Para esse modelo, será observado os resultados do fluxo de potência e comparados com simulações feitas no software Matpower para todos os sistemas teste.

Figura 8 – Esquema de conexão do parque eólico ao SEP



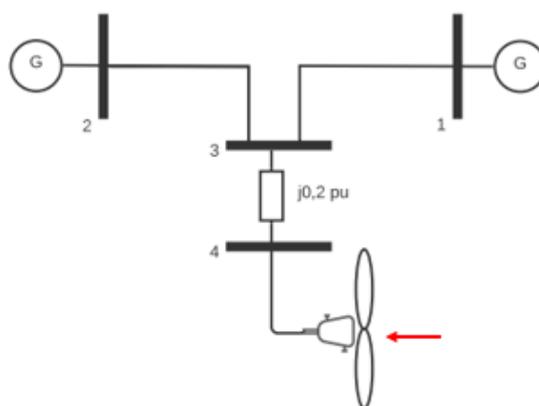
Fonte: Autor

## 4.1 Sistemas de transmissão testados

Para simular a inserção de um parque eólico na rede, foram utilizados os sistemas testes de 3 barras (Dommel; Tinney, 1968), IEEE 14 barras (CARDOSO, 1999) e IEEE 30 barras (CARDOSO, 1999). Os dados das barras e linhas de todos os sistemas podem ser consultados no apêndice E.

### 4.1.1 Sistema de 3 barras

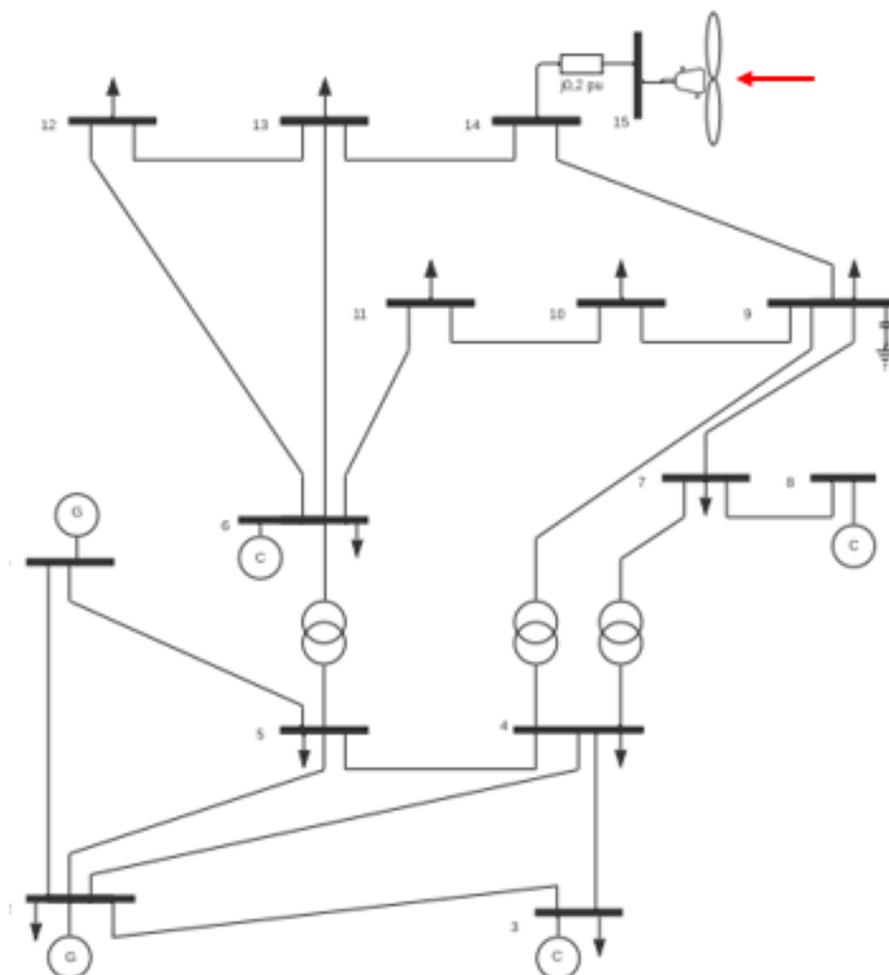
Figura 9 – Diagrama unifilar sistema 3 barras modificado



Fonte: Adaptado de (Dommel; Tinney, 1968)

### 4.1.2 Sistema de 14 barras

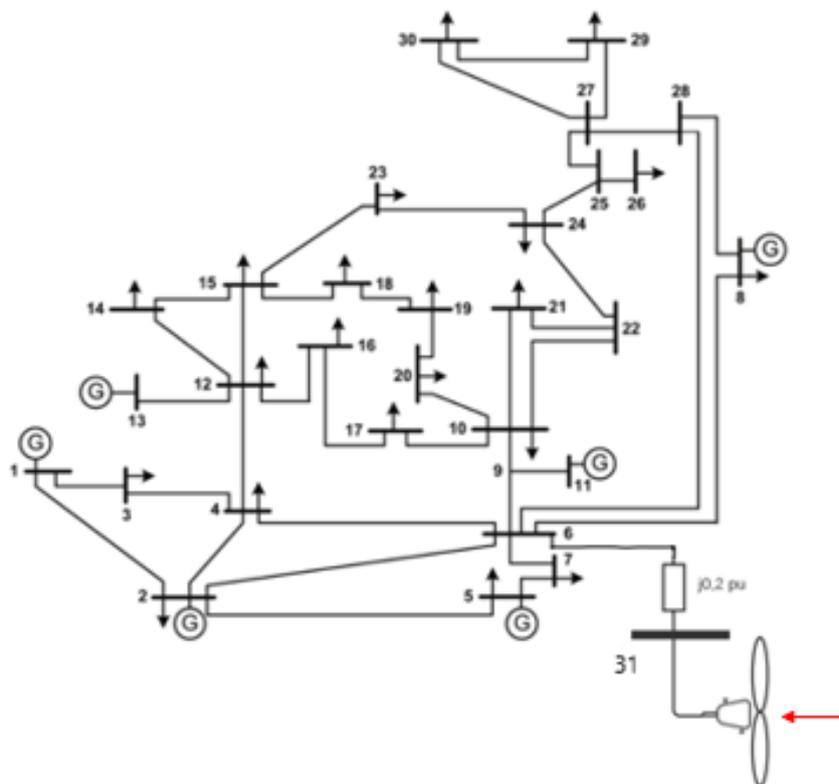
Figura 10 – Diagrama unifilar sistema IEEE 14 barras modificado



Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 1999)

### 4.1.3 Sistema de 30 barras

Figura 11 – Diagrama unifilar sistema IEEE 30 barras modificado



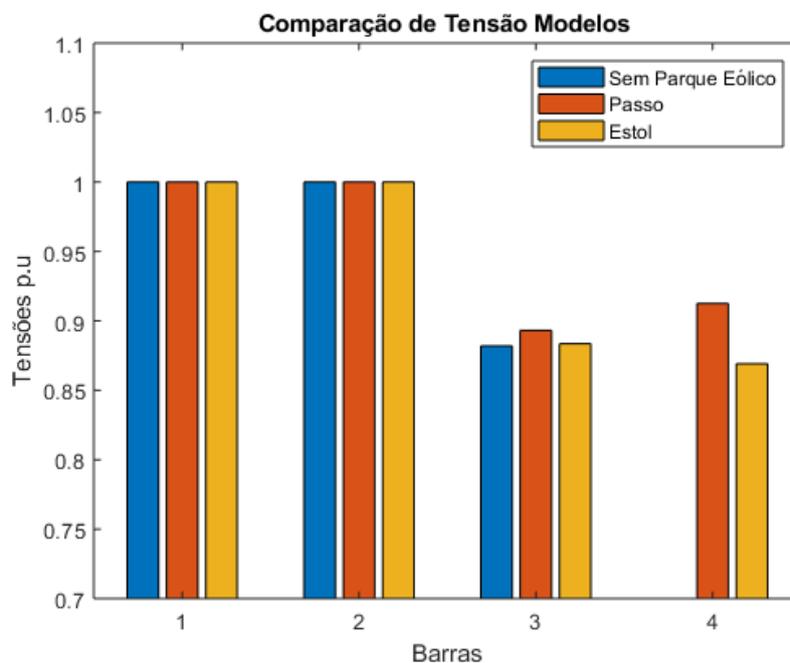
Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 1999)

## 4.2 Resultados dos geradores eólicos de velocidade fixa

Nesta seção são mostrados os resultados obtidos no fluxo de potência sem a inserção de geração eólica, e com inserção de geradores eólicos de velocidade fixa por modelo passo e estol. Nas Figuras 12, 13 e 14 são mostrados os perfis de tensão em p.u para os sistemas de 3, 14 e 30 barras respectivamente, além disso, para uma melhor compreensão e interpretação dos resultados, encontram-se no apêndice F todos os resultados numéricos do fluxo de potência para a magnitude de tensão em p.u e ângulos em graus para todos os modelos em todos os sistemas apresentados. Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentados de forma comparativa, os resultados de potência ativa gerada e potência reativa consumida dos parques eólicos, o escorregamento dos geradores e o nível de perdas de potência ativa dos sistemas pré e pós inserção dos aerogeradores. Além disso, no apêndice G são apresentados os resultados de fluxo de potências nas linhas pré e pós inserção dos geradores eólicos para todos os modelos em todos sistemas testes apresentados.

## 4.2.1 Resultados obtidos para o sistema de 3 barras

Figura 12 – Perfil de Tensão - Sistema 3 barras



Fonte: Autor

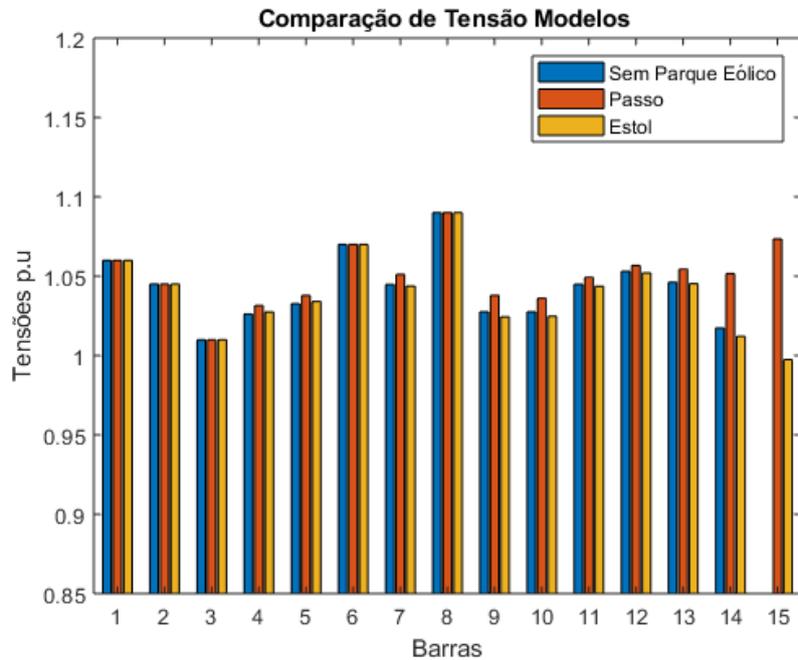
Tabela 3 – Resultados de geração (p.u), escorregamento e nível de perdas (p.u)

Modelo	$P_4$	$Q_4$	s	Perdas Ativas Totais
Sem Gerador Eólico	-	-	-	0,1764
Estol	0,1140	-0,0611	-0,0041	0,1750
Passo	0,1125	-0,0899	-0,0015	0,1613

Fonte: Autor

## 4.2.2 Resultados obtidos para o sistema de 14 barras

Figura 13 – Perfil de Tensão - Sistema 14 barras



Fonte: Autor

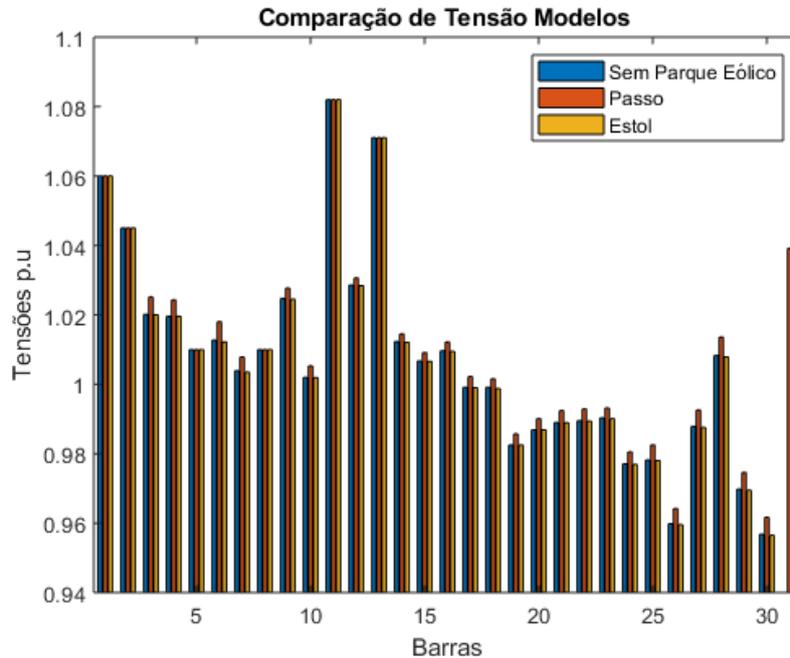
Tabela 4 – Resultados de geração (p.u), escorregamento e nível de perdas (p.u)

Modelo	$P_{15}$	$Q_{15}$	s	Perdas Ativas Totais
Sem gerador Eólico	-	-	-	0,1352
Estol	0,1140	-0,0718	-0,0031	0,1231
Passo	0,1125	-0,1182	-0,0012	0,1206

Fonte: Autor

### 4.2.3 Resultados obtidos para o sistema de 30 barras

Figura 14 – Perfil de Tensão - Sistema 30 barras



Fonte: Autor

Tabela 5 – Resultados de geração (p.u), escorregamento e nível de perdas (p.u)

Modelo	$P_{31}$	$Q_{31}$	s	Perdas Ativas Totais
Sem gerador Eólico	-	-	-	0,1733
Estol	0,1140	-0,0720	-0,0031	0,1531
Passo	0,1125	-0,1116	-0,0012	0,1532

Fonte: Autor

### 4.2.4 Discussão dos resultados

O resultado do fluxo de potência mostra que o barramento de geração eólica para os controladores de passo e estol se comportam de maneira diferente de barramentos tradicionais *PV* e *PQ*. Como se trata de um nó de geração, a potência ativa é gerada, porém como o parque eólico é formado por geradores de indução, é preciso consumo de potência reativa da rede, esse fato pode ser confirmado nas tabelas 3, 4 e 5, uma vez que os valores de potência reativa gerada para ambos os sistemas testados se mostraram negativos, indicando que a potência reativa é consumida do sistema de potência ao qual o parque eólico está conectado. Vale ressaltar que nenhum dos modelos implementados foi considerado a inserção banco de capacitores na barra do gerador eólico.

No apêndice G, especificamente nas tabelas 40, 44 e 48 ilustra-se o fluxo de potência ativa e reativa em todas as linhas dos sistemas teste com e sem a inserção de geração eólica.

Nas figuras 12, 13 e 14 observa-se que o perfil de tensão com a inserção do parque eólico com aerogeradores controlados por passo e estol apresentaram uma pequena variação na magnitude da tensão em relação ao sistema elétrico sem geração eólica. Tal fato pode ser explicado pela inserção de geração propriamente dita, uma vez que o acréscimo de geração em um sistema, faz com que o fluxo de potência nas linha seja redistribuído, alterando assim o nível de tensão nos barramentos.

A tabela 6 mostra o fluxo de potência ativa sem inserção de geração eólica no SEP de 3 barras. As tabelas 7 e 8 mostram, o efeito da inserção do parque eólico modelo passo e estol respectivamente, em relação ao fluxo de potência ativa no sistema de 3 barras. É perceptível que o fluxo é redistribuído devido ao aumento de geração, e consequentemente as perdas de potência ativa se tornam menores em algumas linhas. As perdas de potência ativa para o parque eólico com aerogeradores controlados por passo são menores se comparadas ao parque eólico de aerogeradores controlados por estol para os sistemas de 3 e 14 barras, para o sistema de 30 barras as perdas são praticamente idênticas. Esse efeito pode ser explicado pela ligeira diferença entre a potência ativa inserida e também pela característica de abordagem que cada modelo tem para ser inserido no fluxo de potência.

Tabela 6 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	47,6350	-42,0620	58,6860	-51,7220	5,5738	69,6440
2	3	170	-157,940	78,5020	-48,2780	12,0620	30,2240

Fonte: Autor

Tabela 7 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	34,8840	-30,1970	59,8870	-54,0320	4,6861	5,8553
2	3	170	-158,5500	66,1630	-37,4780	11,4470	28,6850
3	4	-11,2500	11,2500	8,4902	-8,9883	0	0,4980

Fonte: Autor

Tabela 8 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	36,2090	-30,5790	66,7790	-59,7405	5,6297	7,0342
2	3	170	-158,030	76,8010	-46,8050	11,9710	29,9960
3	4	-11,3920	11,3920	6,5496	-6,1072	0	0,44239

Fonte: Autor

Esse efeito também pode ser visto para o sistema de 14 e 30 barras, para estes, o fluxo de potência ativa se mostrou menor na maioria das linhas, e conseqüentemente as perdas também diminuiram. Abaixo, nas tabelas 9 e 10 apresentam-se os resultados do fluxo de potência para algumas linhas dos sistemas de 14 e 30 barras respectivamente.

Tabela 9 – Comparação de resultados do fluxo de potência para algumas linhas em MW - SEP IEEE 14 barras

Mod	Ori	Dest	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	$P_W$	$P_{V_{ar}}$
Sem Geração	1	2	156,0900	-151,8400	-17,2540	30,2420	4,2539	12,9880
Passo	1	2	147,8400	-144,0300	-15,2990	26,9310	3,8100	11,6330
Estol	1	2	147,9200	-144,1100	-15,3200	26,9660	3,8146	11,6460
Sem Geração	2	4	55,8500	-54,1790	-4,4923	9,5612	1,6706	5,0689
Passo	2	4	52,6400	-51,1490	-5,6225	10,1480	1,4914	4,5251
Estol	2	4	52,5500	-51,0700	-4,4751	8,9662	1,4801	4,4911
Sem Geração	6	13	18,1600	-17,9070	10,3960	-9,8974	0,2529	0,4982
Passo	6	13	14,3380	-14,2000	5,7564	-5,4847	0,1379	0,2716
Estol	6	13	14,4980	-14,2790	12,9770	-12,5470	0,2187	0,4307

Fonte: Autor

Tabela 10 – Comparação de resultados do fluxo de potência para algumas linhas em MW - SEP IEEE 30 barras

Mod	Ori	Dest	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
Sem Geração	1	2	162,6800	-158,1000	-19,2330	32,9670	4,5857	13,733
Passo	1	2	155,0500	-150,8900	-17,3940	29,8520	4,1598	12,4580
Estol	1	2	155,1500	-150,9800	-17,4170	29,8910	4,1651	12,4740
Sem Geração	5	7	-16,1330	16,3150	11,9900	-11,5310	0,1821	0,45943
Passo	5	7	-17,7730	17,9700	11,0800	-10,5810	0,1978	0,4987
Estol	5	7	-17,6240	17,8390	12,9240	-12,3810	0,2153	0,5431
Sem Geração	12	16	6,9574	-6,8759	6,5400	-6,3688	0,8144	0,1712
Passo	12	16	6,7149	-6,6378	6,4303	-6,2682	0,0770	0,1620
Estol	12	16	6,6995	-6,6201	6,6277	-6,4609	0,0793	0,1668

Fonte: Autor

Para validar os resultados deste trabalho foi ilustrado no Apêndice F, os resultados obtidos com o software MATPOWER, obtendo-se respostas bem parecidas.

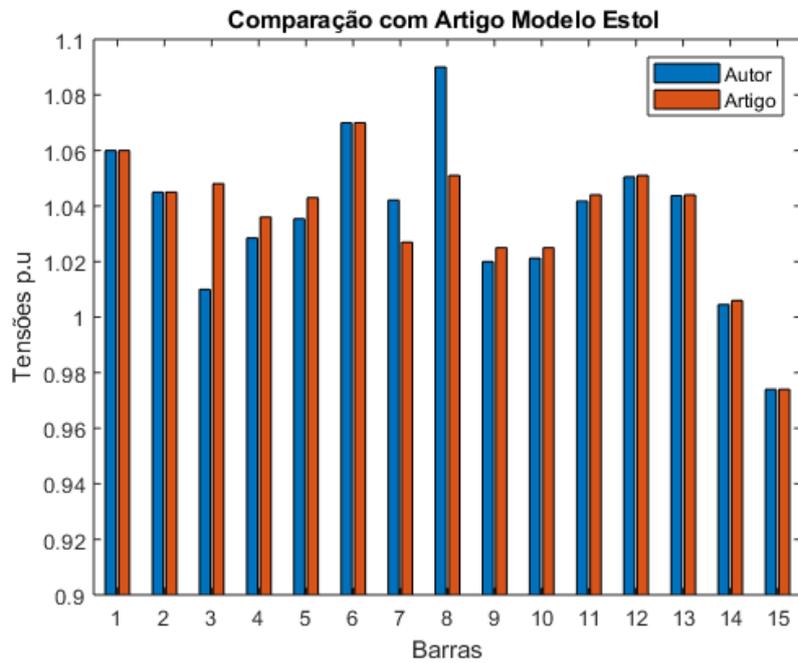
Isto devido a que o software utiliza banco de capacitores que não foram modelados neste trabalho.

#### 4.2.4.1 Validação do Modelo Estol

Para desenvolver o modelo estol, foram utilizados como base os artigos de (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011) e (Krishna; Khatod, 2015). Os dois artigos fizeram a mesma modelagem apresentada neste trabalho para inserir o aerogerador controlado por estol no fluxo de potência por Newton-Raphson. Todavia, os artigos testaram os modelos de maneiras distintas. E enquanto o primeiro testou vários modelos no mesmo sistema de potência, o segundo testou de maneira individual, ou seja, da mesma maneira que foi testado neste trabalho. Além disso, o artigo do (Krishna; Khatod, 2015) utilizou o sistema de 14 barras, conectando o parque eólico na barra 14. Observando essas condições, foi possível fazer uma comparação dos resultados obtidos com esse artigo. Na figura 15 juntamente com a tabela 11 é possível observar a comparação da magnitude de tensão encontrada no trabalho com o resultado do artigo. Observa-se que a maioria das tensões apresentam valores muito próximos, principalmente o valor da tensão no barramento que está conectado o parque eólico, que apresentou o mesmo valor. Os valores que se encontram diferentes, são de barramentos PV, já que o artigo utilizou valores diferentes de tensão em relação ao trabalho.

Além disso, na tabela 12 são apresentados os valores de geração de potência ativa e reativa e escorregamento do artigo e do trabalho. Nota-se que os valores ficaram muito próximos, mostrando que toda a modelagem realizada para inserir o aerogerador modelo estol obteve valores coerentes. O valor da geração nesta subseção é diferente da subseção anterior, porque nesta teve o objetivo de fazer uma comparação com o artigo (Krishna; Khatod, 2015), dessa forma, foi necessário aumentar o número de geradores eólicos presentes no parque eólico para aproximadamente 10% da demanda do sistema, com objetivo de aproximar o resultado de geração apresentado pelo artigo e realizar a comparação.

Figura 15 – Comparação com artigo (Krishna; Khatod, 2015).



Fonte: Autor

Tabela 11 – Perfil de tensão comparados com artigo (Krishna; Khatod, 2015)

Tensão Artigo	Tensão Trabalho
1,0600	1,0600
1,0450	1,0450
1,0480	1,0100
1,0360	1,0285
1,0430	1,0354
1,0700	1,0700
1,0270	1,0421
1,0510	1,0900
1,0250	1,0200
1,0250	1,0212
1,0440	1,0418
1,0510	1,0505
1,0440	1,0437
1,0060	1,0045
<b>0,9740</b>	<b>0,9740</b>

Fonte: Autor

Tabela 12 – Resultados comparados com artigo (Krishna; Khatod, 2015)

Grandeza	Artigo	Trabalho
Potência Ativa Gerada (p,u)	0,2383	0,2346
Potência Reativa Gerada (p,u)	-0,1527	-0,1430
Escorregamento	-0,0030	-0,0033

Fonte: Autor

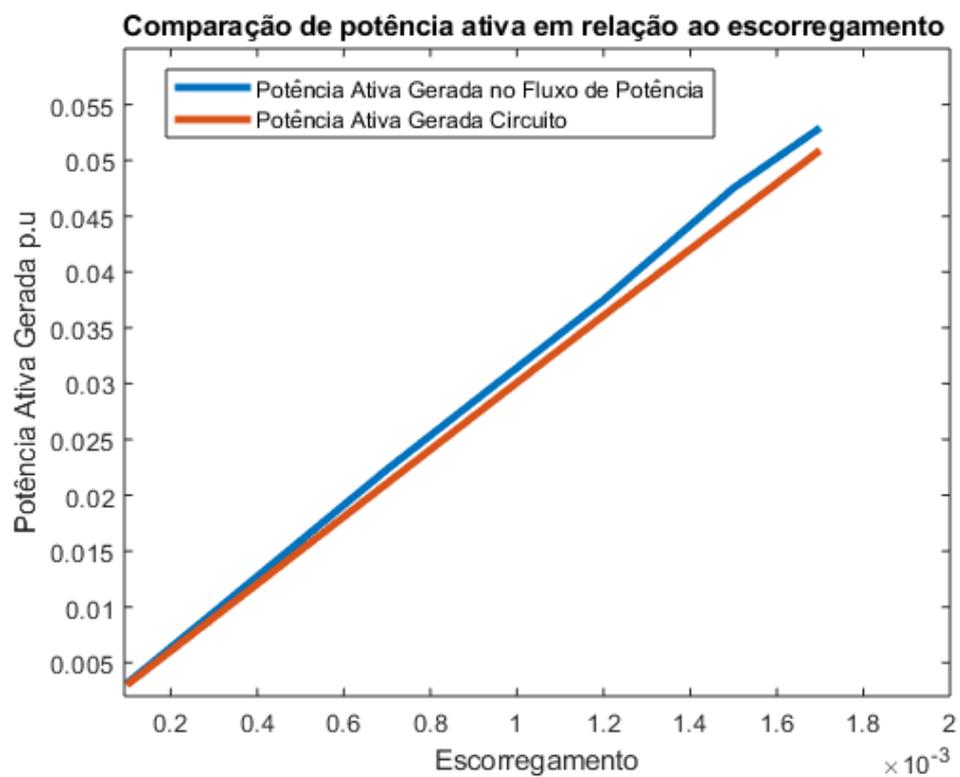
#### 4.2.4.2 Validação do Modelo Passo usando teoria de circuitos elétricos

Como mais uma alternativa de mostrar a coerência dos resultados obtidos pelo fluxo de potência com inserção de aerogeradores do modelo passo, foram comparados os resultados de potência ativa gerada e potência reativa consumida pelo parque eólico. É importante lembrar que para o modelo passo, a potência gerada é um dado de entrada do fluxo de potência, uma vez que a curva de potência do gerador é conhecida. Porém, a potência reativa consumida pelo parque é um resultado do fluxo de potência. Para verificar se o resultado obtido é coerente, utilizou-se das equações da teoria de circuitos elétricos aplicados ao circuito equivalente da máquina de indução, uma vez que são conhecidos todos os parâmetros do circuito, e eles podem ser vistos no apêndice D. A partir das equações do circuito, foi possível plotar o gráfico da potência ativa gerada e potência reativa consumida e comparar com os resultados obtidos no fluxo de potência para o sistema de 14 barras.

Observando a figura 16, podemos observar que pela teoria de circuitos, a medida que o escorregamento aumenta, a potência gerada também aumenta. Esse efeito pode ser visto também pelo resultado do fluxo de potência, uma vez que quando era aumentado a inserção de geração eólica, o escorregamento também aumentava.

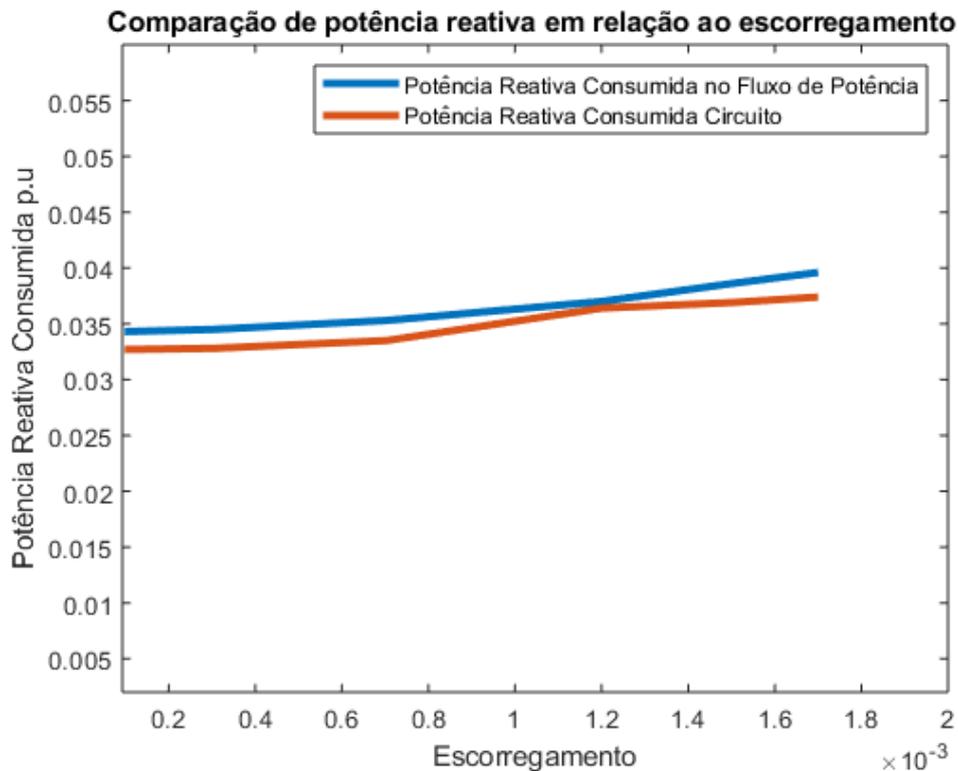
Em contrapartida, observando a figura 17, observa-se que a medida que o escorregamento aumenta, o valor da potência reativa consumida pelo parque não aumenta significativamente, esse efeito tem relação com o número de geradores presentes no parque eólico. Apesar da geração de potência ativa estar aumentando conforme o escorregamento aumenta, o número de máquinas de indução permanece o mesmo, e como a potência reativa está relacionada com a excitação da máquina de indução, ela não se comporta da mesma maneira que a potência ativa.

Figura 16 – Potência Ativa gerada em relação ao escorregamento



Fonte: Autor

Figura 17 – Potência Reativa consumida em relação ao escorregamento



Fonte: Autor

#### 4.2.4.3 Convergência do fluxo de potência

Na Tabela 13 podemos ver o número de iterações dentro da rotina de Newton-Raphson que cada fluxo de potência com seus respectivos modelos gastou.

Tabela 13 – Convergência Modelo Passo e Estol

Sistema	Iterações Modelo Passo	Iterações Modelo Estol	Tolerância
3 barras	8	18	0,00001
14 barras	7	18	0,00001
30 barras	8	18	0,00001

Fonte: Autor

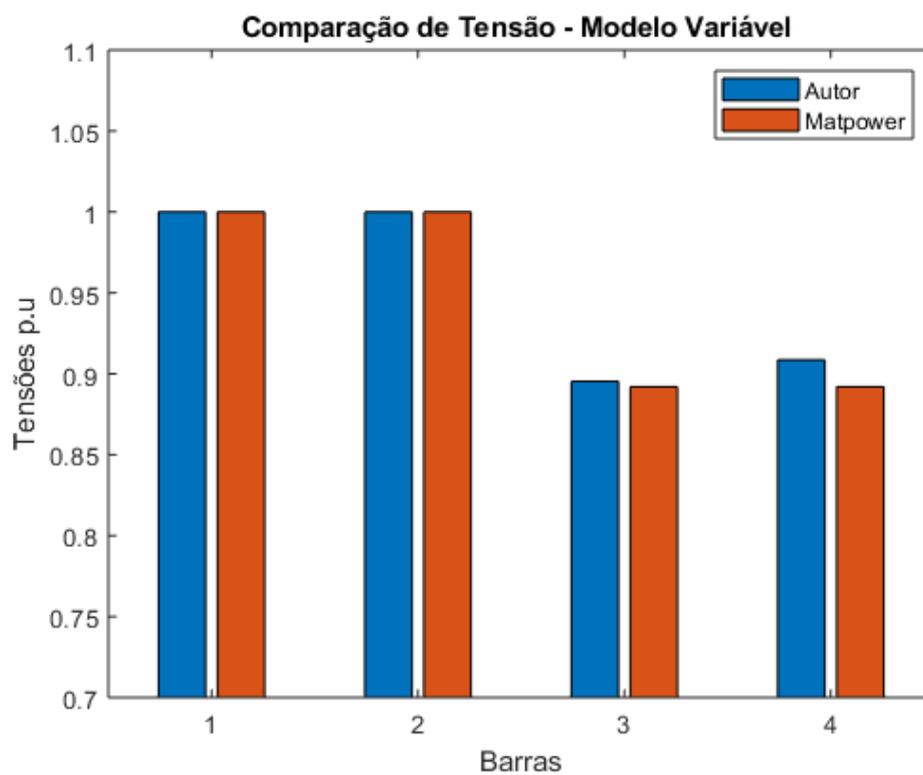
### 4.3 Resultados do gerador eólico de velocidade variável

Esta secção trata dos resultados do fluxo de potência para o gerador eólico de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado e está separada da anterior, por se tratar de um gerador eólico de velocidade variável diferentemente dos

modelos de aerogeradores com controlador por passo e estol, que são classificados como aerogeradores de velocidade fixa.

### 4.3.1 Resultados obtidos para o sistema de 3 barras

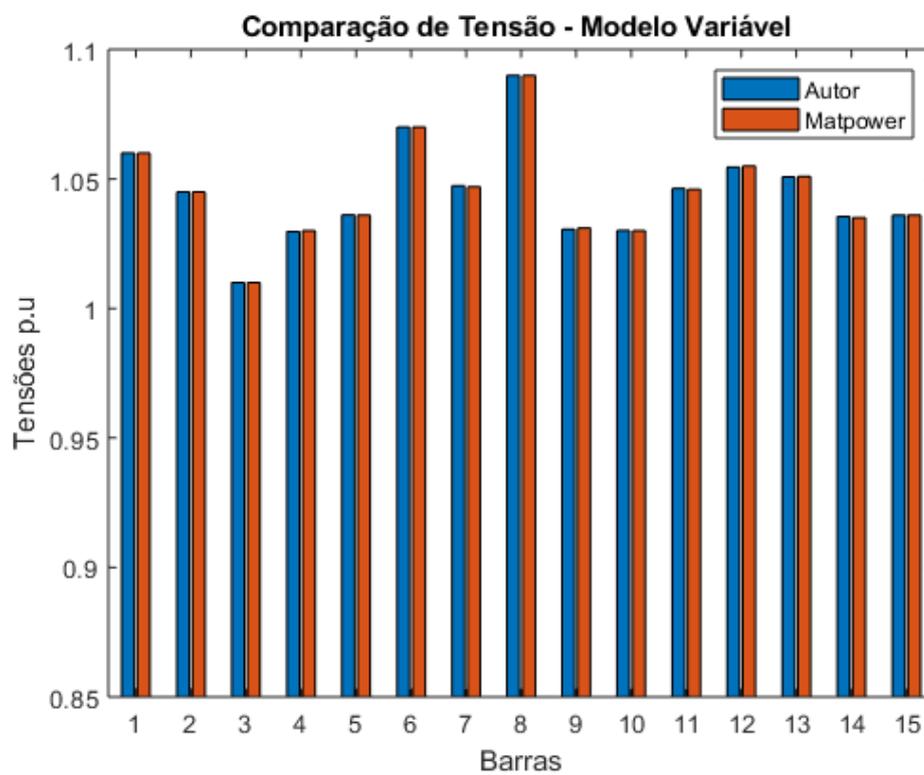
Figura 18 – Perfil de Tensão - Sistema 3 barras



Fonte: Autor

### 4.3.2 Resultados obtidos para o sistema de 14 barras

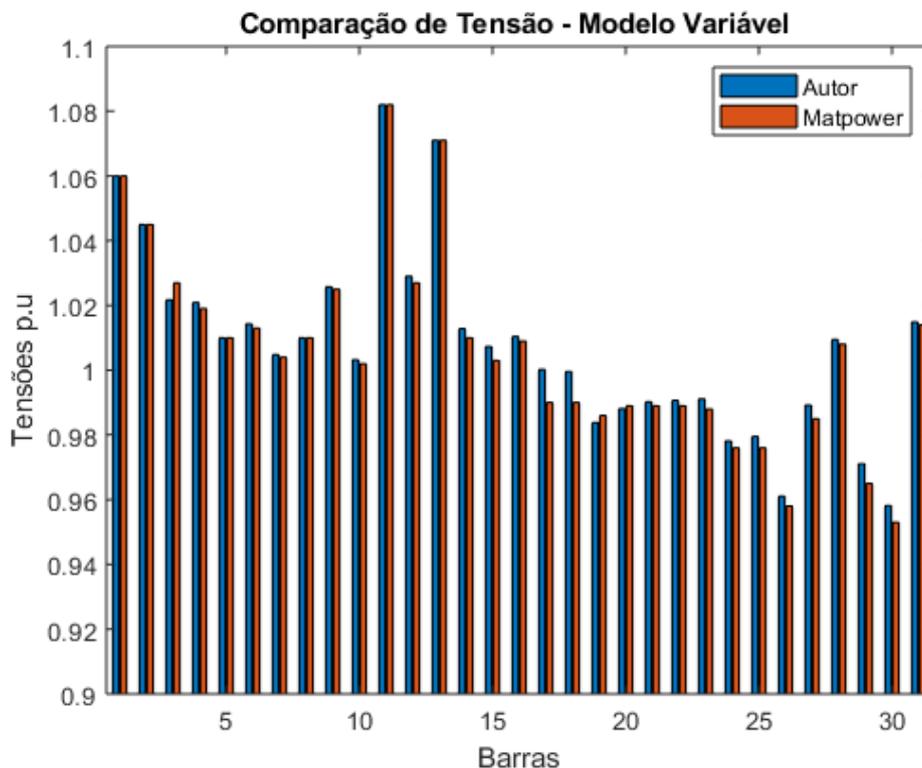
Figura 19 – Perfil de Tensão - Sistema 14 barras



Fonte: Autor

### 4.3.3 Resultados obtidos para o sistema de 30 barras

Figura 20 – Perfil de Tensão - Sistema 30 barras



Fonte: Autor

### 4.3.4 Discussão dos resultados

Para essa configuração de aerogerador, observa-se nas figuras 18 a 20, um valor diferente na magnitude da tensão nos barramentos do sistema devido a redistribuição do fluxo de potência ativa e reativa que pode ser consultado nas Tabelas, 43, 47 e 51 no apêndice G. É notável que o fluxo de potência é redistribuído devido ao acréscimo de geração, e conseqüentemente observa-se queda nas perdas de potência ativa totais dos sistemas. Vale ressaltar, que esse modelo de aerogerador tem uma modelagem idêntica a uma barra PQ, dessa forma, somente informa-se os valores de potência ativa e reativa gerada.

Para mostrar que os resultados do fluxo de potência foram coerentes, foi feita uma comparação com o software MATPOWER para todos os sistemas testados nesse modelo, essas comparações podem ser observadas no apêndice F, nas tabelas 31, 35 e 39. É notável a proximidade dos resultados encontrados com os resultados obtidos através do MATPOWER, validando os resultados do algoritmo desenvolvido.

#### 4.3.4.1 Convergência do fluxo de potência

Na Tabela 14 podemos ver o número de iterações dentro da rotina de Newton-Raphson que o fluxo de potência com o modelo de aerogerador de velocidade variável gastou para todos os sistemas teste.

Tabela 14 – Convergência Modelo Variável

Sistema	Iterações Modelo Variável	Tolerância
3 barras	5	0,00001
14 barras	5	0,00001
30 barras	5	0,00001

Fonte: Autor

## 4.4 Resultado do fluxo de potência ótimo

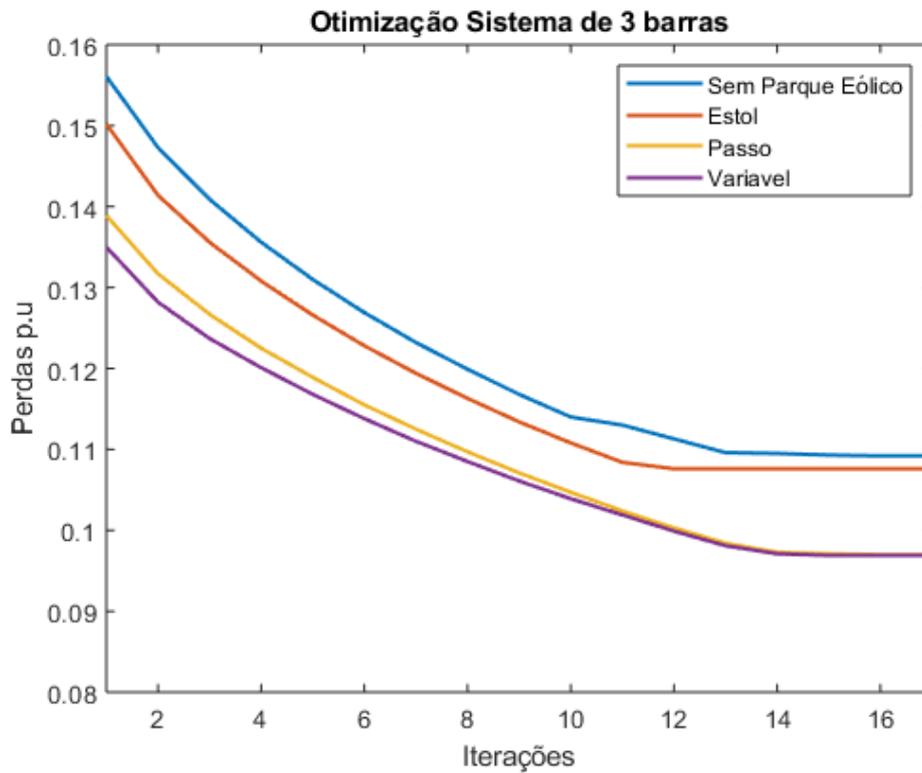
A metodologia desenvolvida no trabalho para a solução do fluxo de potência ótimo foi a metodologia utilizada em (Dommel; Tinney, 1968), a qual utiliza os multiplicadores da Lagrange e o método do Gradiente Reduzido. Nessa metodologia, são utilizadas variáveis de controle para serem atualizadas ao longo do algoritmo para atingir o objetivo previamente especificado, nesse caso, reduzir as perdas de potência ativa totais do sistema. No trabalho desenvolvido, as variáveis de controle são as magnitudes de tensão nos barramentos PV e Slack.

Dessa forma, podemos observar na Figura 21 que o algoritmo cumpriu o seu papel e reduziu as perdas de potência ativa no sistema de 3 barras para o SEP sem geração eólica e para todos os modelos de inserção desenvolvidos nesse trabalho. Na Tabela 15 é possível encontrar os valores numéricos da redução de perdas para esse sistema.

Observando a Figura 22, vemos que o fluxo de potência ótimo também conseguiu minimizar as perdas de potência ativa para todos os modelos, porém no modelo de aerogerador controlado por passo, a otimização se comportou de maneira diferente, em um momento do algoritmo as perdas subiram ligeiramente e depois voltaram a decair. Além disso, para esse sistema de potência em específico, foi usado um passo de otimização menor, o que acarretou em um número maior de iterações. O passo de otimização é explicado com mais detalhes na subseção. 3.2.3. Na Tabela 16 é possível encontrar os valores numéricos da redução de perdas para esse sistema.

Por fim, nota-se na Figura 23 o comportamento da otimização para o sistema de 30 barras. Nesse caso, os três modelos de inserção de geração eólica e o modelo sem geração eólica, tiveram um comportamento parecido, e o fluxo de potência ótimo também minimizou as perdas para todos os casos. Na Tabela 17 é possível encontrar os valores numéricos da redução de perdas para esse sistema.

Figura 21 – Fluxo de Potência Ótimo - Sistema 3 barras



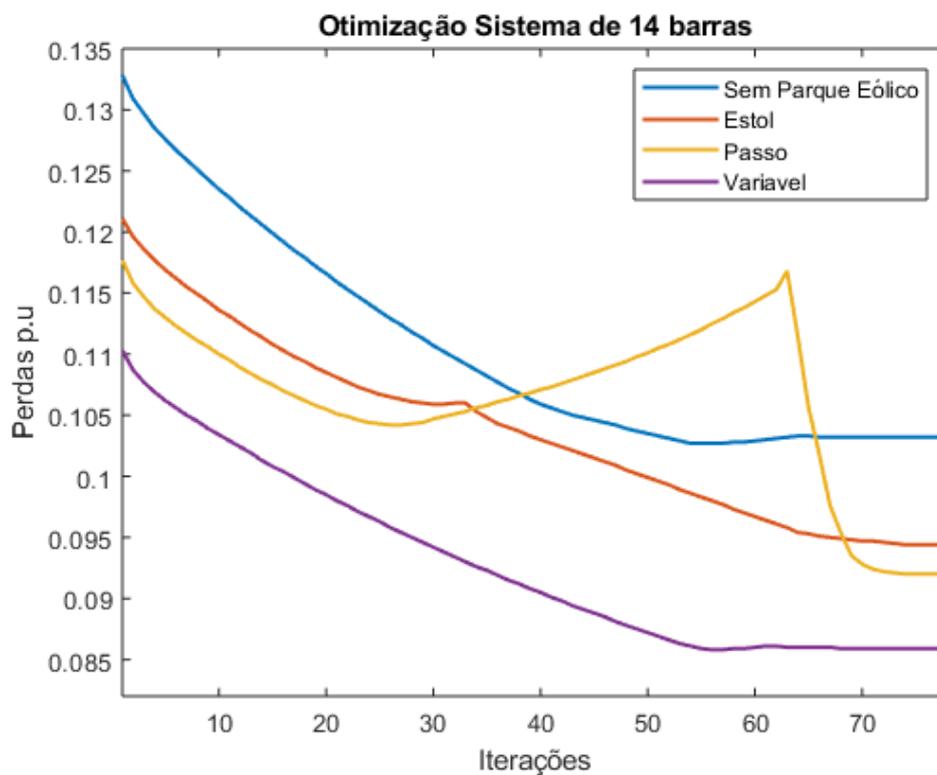
Fonte: Autor

Tabela 15 – Resumo do fluxo de potência Ótimo em p.u - SEP DE 3 BARRAS

Modelo	$P_{semotm}$	$P_{otm}$	Iterações	Redução de Perdas em %
Sem Geração	0,1764	0,1092	17	38%
Estol	0,1750	0,1076	17	38%
Passo	0,1613	0,0970	17	39%
Variável	0,1126	0,0969	17	14%

Fonte: Autor

Figura 22 – Fluxo de Potência Ótimo - Sistema 14 barras



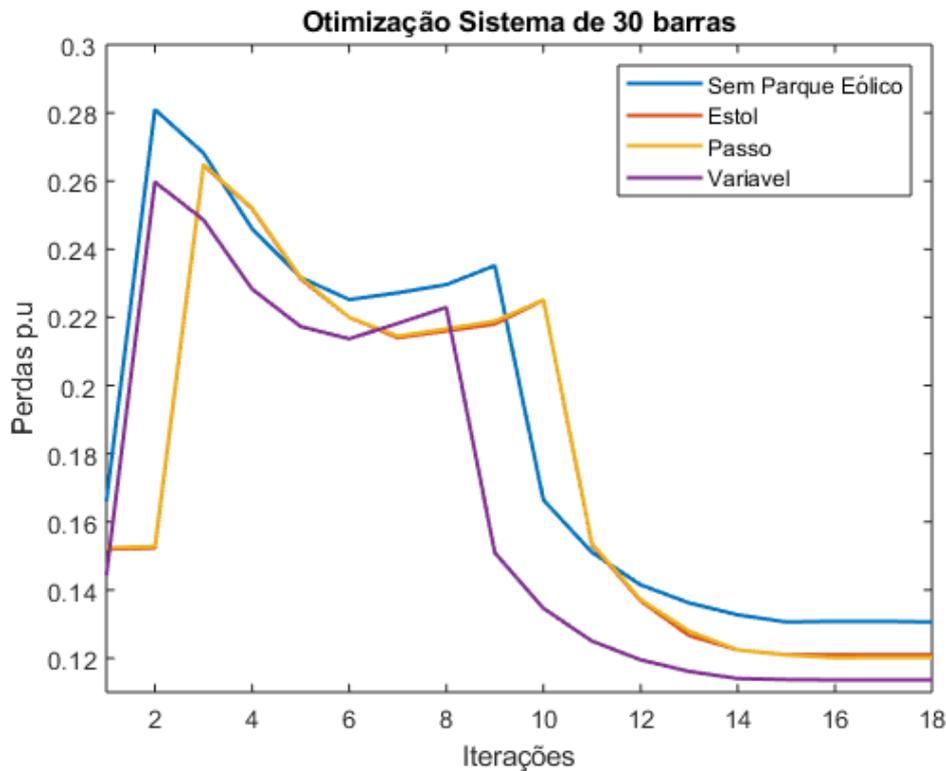
Fonte: Autor

Tabela 16 – Resumo do fluxo de potência Ótimo em p.u - SEP DE 14 BARRAS

Modelo	$P_{semotm}$	$P_{otm}$	Iterações	Redução de Perdas em %
Sem Geração	0,1352	0,1032	78	23%
Estol	0,1231	0,0944	78	23%
Passo	0,1206	0,0920	78	23%
Variável	0,1126	0,0859	78	23%

Fonte: Autor

Figura 23 – Fluxo de Potência Ótimo - Sistema 30 barras



Fonte: Autor

Tabela 17 – Resumo do fluxo de potência Ótimo em p.u - SEP DE 30 BARRAS

Modelo	$P_{semotm}$	$P_{otm}$	Iterações	Redução de Perdas em %
Sem Geração	0,1733	0,1306	18	24%
Estol	0,1531	0,1210	18	21%
Passo	0,1532	0,1202	18	21%
Variável	0,1432	0,1136	18	20%

Fonte: Autor

#### 4.4.1 Validação do Fluxo de Potência Ótimo

O artigo que foi utilizado para comparar o FPO é o artigo (Lezama; Pareja, 2008) que igualmente à este trabalho, utilizou o artigo do (Dommel; Tinney, 1968) para formular o fluxo de potência ótimo. O sistema de 3 barras, foi utilizado por (Dommel; Tinney, 1968) e (Lezama; Pareja, 2008) como teste do FPO.

O artigo do (Lezama; Pareja, 2008) além de formular o FPO utiliza uma estratégia para reduzir o número de iterações do algoritmo, que se baseia em atualizar em cada iteração o valor do passo de otimização citado na subseção 3.2.3. Essa estratégia não foi utilizada neste trabalho, somente foi usado a formulação básica proposta por (Dommel;

Tinney, 1968). Na Tabela 18 é feita uma comparação do fluxo de potência ótimo para o sistema de 3 barras sem a inserção do gerador eólico com o artigo do (Lezama; Pareja, 2008).

Observa-se na Tabela 18 a atualização das variáveis de controle V1 e V2 ao passo que as perdas de potência ativa (função objetivo) diminuem. Nota-se que o resultado do artigo converge mais rápido que o algoritmo desenvolvido, uma vez que este implementou uma técnica para diminuir o número de iterações. Todavia, analisando a perda de potência ativa após a convergência, os resultados são muito próximos, mostrando que o algoritmo desenvolvido obteve um bom resultado no que tange à redução das perdas no sistema.

Tabela 18 – Comparação do FPO com artigo

Iteração	V1 <sub>art</sub>	V2 <sub>art</sub>	P <sub>art</sub>	V1 <sub>trab</sub>	V2 <sub>trab</sub>	P <sub>trab</sub>
1	1,0349	1,200	0,2022	0,9785	1,0665	0,1561
2	1,0908	1,1580	0,1674	1,0168	1,0651	0,1473
3	1,1186	1,1701	0,1224	1,0261	1,0913	0,1409
4	1,1273	1,200	0,1170	1,0467	1,1032	0,1356
5	1,1518	1,200	0,1135	1,0608	1,1198	0,1310
6	1,1524	1,200	0,1096	1,0764	1,1332	0,1269
7	1,1523	1,200	0,1096	1,0902	1,1469	0,1232
8	-	-	-	1,1038	1,1596	0,1199
9	-	-	-	1,1166	1,1718	0,1168
10	-	-	-	1,1289	1,1835	0,1140
11	-	-	-	1,1407	1,1948	0,1113
12	-	-	-	1,1521	1,2000	0,1096
13	-	-	-	1,1593	1,2000	0,1093
14	-	-	-	1,1618	1,2000	0,1092
15	-	-	-	1,1626	1,2000	0,1092
16	-	-	-	1,1629	1,2000	0,1092
17	-	-	-	1,1630	1,2000	0,1092

Fonte: Autor

## 5 Conclusão

O trabalho desenvolvido pode ser dividido em duas partes, a primeira parte está relacionada ao desenvolvimento da modelagem de um aerogerador inserido no SEP. Nessa parte do trabalho, foram analisados três modelos diferentes de aerogerador, o primeiro trata-se do modelo de aerogerador controlado por estol. Este fez com que as equações básicas do fluxo de potência e a matriz jacobiana tivessem várias modificações, houve acréscimos de equações e variáveis, além da matriz jacobiana ser ampliada. Para fazer essas modificações na matriz jacobiana foram deduzidas equações por meio de derivadas parciais, além de deduzir equações do circuito equivalente que representava uma máquina de indução, isto é, um gerador eólico. As equações foram deduzidas e o equacionamento detalhado neste trabalho. O segundo modelo trata-se do aerogerador controlado por passo, da mesma forma que o primeiro, este trouxe várias modificações nas equações e na matriz Jacobiana, e todo o detalhamento está descrito no trabalho. Por fim, o modelo de aerogerador de velocidade variável, é o mais simples, visto que não traz mudanças na formulação básica do fluxo de potência, sendo representado como uma barra PQ.

A segunda parte do trabalho desenvolvido, trata-se do desenvolvimento do fluxo de potência ótimo. Para formular o FPO, foi desenvolvida uma técnica clássica de otimização, que utiliza multiplicadores de Lagrange e o método do Gradiente Reduzido juntamente com a própria resposta do fluxo de potência do passo anterior.

É importante ressaltar que os algoritmos dos modelos foram implementados pelo autor, desde o fluxo de potência básico, fluxo de potência com inserção de geradores eólicos e o fluxo de potência ótimo. No capítulo de resultados, foram mostrados os testes nos sistemas de 3, 14 e 30 barras, além disso os resultados foram validados usando artigos da literatura especializada, conceitos da teoria de circuitos elétricos e máquinas elétricas, e o software de simulação MATPOWER para validar e embasar cientificamente os algoritmos desenvolvidos no MATLAB.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, no sentido que o fluxo de potência teve uma boa convergência nos sistemas testados e para todos os modelos de aerogeradores. Além disso o fluxo de potência ótimo conseguiu minimizar as perdas de potência ativa nos sistemas testes usados para os modelos propostos nesse trabalho. Por fim, este trabalho pode contribuir com trabalhos futuros que necessitam analisar inserção de geradores eólicos em sistemas elétricos de potência.

# Referências

- ABEEÓLICA. *Eólica: energia para um futuro inovador*. 2020. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>>. 1, 2
- ACKERMANN, T. *Wind Power in Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2005. 2
- ARAUJO, E. X. S. *Fluxo de potência ótimo em sistema elétricos de potência através de um algoritmo genético multiobjetivo*. Tese (Doutorado) — UNESP, 2018. 2, 4, 5, 19, 20
- Capitanescu, F.; Wehenkel, L. Abordagens baseadas em sensibilidade para lidar com variáveis discretas em cálculos de fluxo de potência ideal. v. 25, n. 4, p. 1780–1789, 2010. 5
- CARDOSO, R. M. *Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência*. 1999. 27, 28, 29
- Carpentier, J. Contribuição para o problema de despacho econômico. v. 3, n. 8, p. 431–447, 1962. 4
- Castro, L. M.; Fuerte-Esquivel, C. R. A unified approach for the solution of power flows in electric power systems including wind farms. v. 81, n. 10, p. 1859–1865, 2011. 3, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 23, 24, 25, 26, 27, 35, 53, 58, 59
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. [S.l.: s.n.], 2013. 8, 9
- Cidras, A. F. e J. Modeling of wind generators load flow analysis. v. 15, n. 1, p. 110–115, 2000. 3
- Dommel, H. W.; Tinney, W. F. Optimal power flow solutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-87, 1968. 4, 21, 22, 23, 27, 43, 46, 47, 55, 57
- Kelly, A. H. e D. Optimal load flow solution using lagrangian multipliers and the hessian matrix. PAS-93, n. 5, p. 1292–1297, 1974. 4
- Krishna, A.; Khatod, D. Modeling of wind generators for load flow analysis. v. 2, n. 6, p. 35–38, 2015. 5, 6, 4, 26, 35, 36, 37
- Lezama, J. M. L.; Pareja, L. A. G. Flujo de potencia óptimo usando el método del gradiente para reducción de pérdidas em sistema de potencia. PAS-87, n. 10, p. 1–15, 2008. 46, 47
- Lin Wang, Y. e Wei Wang e Lijie Xu e Pinghao Ni e. Research on power flow algorithm for power system including wind farm. p. 2551–2555, 2008. 3
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.: s.n.], 1983. 3, 15, 16, 17, 18
- PINTO, M. de O. *Fundamentos de energia eólica*. [S.l.: s.n.], 2012. 1, 10, 11
- Qiao, J.; Min, Y.; Lu, Z. Optimal reactive power flow in wind generation integrated power system. In: *2006 International Conference on Power System Technology*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5. 2

SILVA, K. F. da. *Controle e integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. 13

SOHN, A. P. *Estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência na presença de diferentes modelos de unidades eólicas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014. 6, 7, 10, 11, 12, 25

STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. [S.l.: s.n.], 1986. 1

Torres, G.; Quintana, V. Um método de ponto interior para fluxo de potência ideal não linear usando coordenadas retangulares de tensão. v. 13, n. 4, p. 1211–1218, 1998. 5

# A Dedução da equação da corrente do estator para o gerador de indução aplicados no modelo estol e passo

A partir da figura 4 obtêm-se a impedância equivalente do circuito monofásico da máquina de indução  $Z_{eq}$ .

$$Z_{eq} = \frac{(jX_m) \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{\left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right)} + (R_1 + jX_1)$$

$$Z_{eq} = \frac{R_1 \left( \frac{R_2}{s} \right) - X_m X_2 - (X_2 + X_m) + j \left( \frac{R_2}{s} (X_1 + X_m) + R_1 (X_2 + X_m) \right)}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)}$$

A corrente do enrolamento do estator  $I_1$ , considerando a máquina trabalhando como gerador é dado por:

$$I_1 = \frac{-V}{Z_{eq}}$$

$$I_1 = \frac{\left( \frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m) \right) V}{R_1 \left( \frac{R_2}{s} \right) - X_m X_2 - X_1 (X_2 + X_m) + j \left( \frac{R_2}{s} (X_1 + X_m) + R_1 (X_2 + X_m) \right)}$$

Elevando a equação ao quadrado, temos:

$$|I_1|^2 = \frac{\left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_m)^2 V^2}{\left( R_1 \left( \frac{R_2}{s} \right) - X_m X_2 - X_1 (X_2 + X_m) \right)^2 + \left( \left( \frac{R_2}{s} (X_1 + X_m) \right) + R_1 (X_2 + X_m) \right)^2}$$

$$|I_1|^2 = \frac{\frac{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2 s^2}{s^2} V^2}{\frac{R_1 R_2 - (X_2 X_m + X_1 (X_2 + X_m) s)^2 + (R_2 (X_1 + X_2) + R_1 (X_2 + X_m) s)^2}{s^2}}$$

$$|I_1|^2 = \frac{R_2^2 + (X_2 + X_m) s^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \quad (\text{A.1})$$

Para obter as equações 2.3 e 2.4 é necessário utilizar a corrente conjugada do enrolamento do estator. Sejam  $Z$  e  $W$  dois números complexos que representam respectivamente o numerador e denominador da equação A.1.

$$|I_1|^2 = \frac{|Z^2|}{|W^2|}$$

$$\begin{aligned} |Z^2| &= (R_2 + j(X_2 + X_m)s) (R_1 R_2 - (X_m X_2 + X_1 (X_2 + X_m)) s - j(R_2 (X_1 + X_m) + R_1 (X_2 + X_m) s)) = \\ &= R_1 R_2^2 - R_2 \left( X_m X_2 + X_1 (X_2 + X_m) s + R_2 (X_2 + X_m) (X_1 + X_m) s + R_1 (X_2 + X_m)^2 s^2 \right) + \\ &+ j \left( R_1 R_2 (X_2 + X_m) s - X_m X_2 (X_2 + X_m) s^2 + X_1 (X_2 + X_m)^2 s^2 - R_2^2 (X_1 + X_m) - R_1 R_2 (X_2 + X_m) s \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= R_1 R_2^2 + R_2 X_m^2 s + R_1 (X_2 + X_m) s^2 - j \left( R_2^2 (X_1 + X_m) + (X_2 + X_m) (X_m X_2 + X_1 (X_2 + X_m) s^2) \right) \\
 &= (K + Hs + Ls^2) - j(A + Bs^2) \\
 |W^2| &= ((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2
 \end{aligned}$$

Portanto a equação A.1 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$I_1^2 = \frac{(K + Hs + Ls^2) - j(A + Bs^2)}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \quad (\text{A.2})$$

$$A = R_2^2 (X_1 + X_m)$$

$$B = (X_2 + X_m) [X_2 X_m + X_1 (X_2 + X_m)]$$

$$C = R_1 R_2$$

$$D = X_2 X_m + X_1 (X_2 + X_m)$$

$$E = R_2 (X_1 + X_m)$$

$$F = R_1 (X_2 + X_m)$$

$$H = R_2 X_m^2$$

$$K = R_1 R_2^2$$

$$L = R_1 (X_2 + X_m)^2$$

## B Dedução das Derivadas da matriz jacobiana ampliada

No presente trabalho é tratada a inserção de três tipos de geradores eólicos no sistema de potência. Dois dos três realizam mudanças na representação na matriz jacobiana, acrescentando termos para analisar o comportamento do gerador de indução quanto a geração de potência ativa e reativa e o escorregamento. São estes os aerogeradores controlados por estol e passo. A matriz jacobiana que representa a inserção do aerogerador controlado por estol é (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial P_k}{\partial V_k} - \frac{\partial P_g}{\partial V_k} \right) & \frac{\partial P_g}{\partial s} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} - \frac{\partial Q_g}{\partial V_k} \right) & \frac{\partial Q_g}{\partial s} \\ 0 & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial s} \end{bmatrix}$$

Para o controlador por passo a matriz jacobiana é (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \right) & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \left( \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} - \frac{\partial Q_g}{\partial V_k} \right) & \frac{\partial Q_g}{\partial s} \\ 0 & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{WTk}}{\partial s} \end{bmatrix}$$

Nota-se que com a inserção do aerogerador no sistema, a matriz jacobiana convencional do fluxo de potência é ampliada. As equações B.1 e B.2 representam a geração de potência ativa e reativa do gerador eólico. As equações B.3 e B.4 representam respectivamente a potência mecânica convertida e a corrente do enrolamento do rotor.

$$P_g(V, s) = \operatorname{Re} \{S\} = -V^2 \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \quad (\text{B.1})$$

$$Q_g(V, s) = \operatorname{Im} \{S\} = -V^2 \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \quad (\text{B.2})$$

$$P_{conv} = -I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (\text{B.3})$$

$$I_2^2 = V^2 \frac{(Ms + Ns^2)^2 + (Ts - Ws^2)^2}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \quad (\text{B.4})$$

A partir das equações B.1 a B.4 pode-se deduzir os novos termos presentes na matriz jacobiana ampliada.

$$\frac{\partial P_g}{\partial V_k} = \frac{\partial}{\partial V_k} \left( -V_k^2 \left( \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \right) = \left( \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \frac{\partial}{\partial V_k} (-V_k^2) =$$

$$= -2V_k \left( \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_g}{\partial V_k} &= \frac{\partial}{\partial V_k} \left( -V_k^2 \left( \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \right) = \left( \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \frac{\partial}{\partial V_k} (-V_k^2) = \\ &= -2V_k \left( \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_g}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial s} \left( -V_k^2 \left( \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \right) = -V_k^2 \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{K + Hs + Ls^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) = \\ &= -V_k^2 \left( \frac{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2) \frac{\partial}{\partial s} (K + Hs + Ls^2) - (K + Hs + Ls^2) \frac{\partial}{\partial s} ((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \right) \\ &= -V_k^2 \left( \frac{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)(H + 2Ls) - (K + Hs + Ls^2)(-2D(C - Ds) + 2F(E + Fs))}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_g}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial s} \left( -V_k^2 \left( \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \right) = -V_k^2 \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{A + Bs^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) = \\ &= -V_k^2 \left( \frac{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2) \frac{\partial}{\partial s} (A + Bs^2) - (A + Bs^2) \frac{\partial}{\partial s} ((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \right) = \\ &= -V_k^2 \left( \frac{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)(2Bs) - (A + Bs^2)(-2D(C - Ds) + 2F(E + Fs))}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_{WTk}}{\partial V_k} = -R_2 \left( \left( \frac{1-s}{s} \right) \left( -2V_k \frac{(Ms + Ns^2)^2 + (Ts - Ws^2)^2}{(C - Ds)^2 + (E + Fs)^2} \right) \right)$$

$$\frac{\partial P_{WTk}}{\partial s} = -R_2 \left( \left( \frac{1-s}{s} \right) \frac{\partial I_2^2}{\partial s} + I_2^2 \left( \frac{-1}{s^2} \right) \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_2^2}{\partial s} &= -V_k^2 \frac{1}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^4} \left( ((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^2 \frac{\partial}{\partial s} ((Ms + Ns^2)^2 + (Ts - Ws^2)^2) \right. \\ &\quad \left. - ((Ms + Ns^2)^2 + (Ts - Ws^2)^2) \frac{\partial}{\partial s} ((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2) \right) = \\ &= \frac{-V_k^2}{((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)^4} \left( 2(Ms + Ns^2)(M + 2Ns) + 2(Ts - Ws^2)(T - 2Ws) \right) \left( (C - Ds)^2 + (E + Fs)^2 \right)^2 \\ &\quad - 2((C - Ds)^2 + (E + Fs)^2)(-2D(C - Ds) + 2(E + Fs)F) \left( (Ms + Ns^2)^2 + (Ts - Ws^2)^2 \right) \end{aligned}$$

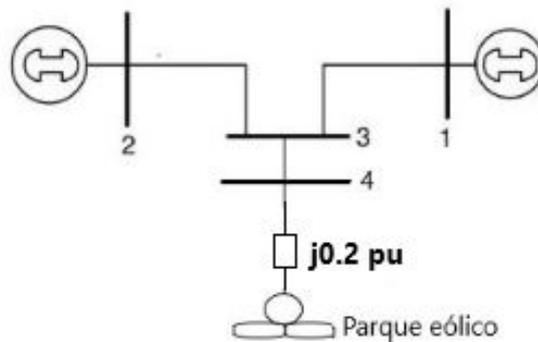
## B.1 Expansão da matriz jacobiana para o exemplo de 3 barras

Essa secção foi criada com o objetivo de mostrar a montagem da matriz jacobiana ampliada do gerador eólico controlado por estol para o exemplo de três barras utilizado como teste no trabalho. Os mesmos mecanismos de montagem são válidos para a matriz jacobiana ampliada do gerador eólico controlado por passo.

A figura 24, representa o sistema de três barras após a inserção do parque eólico. Nota-se que o barramento que corresponde a geração eólica é o barramento 4.

### B.1.1 Sistema de 3 barras modificado

Figura 24 – Diagrama unifilar sistema 3 barras com barramento de geração eólica



Fonte: (Dommel; Tinney, 1968)-modificado

Para montar a matriz jacobiana, primeiramente identifica-se o vetor  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  para o exemplo.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ V_3 \\ V_4 \\ s_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ P_{WT4} \end{bmatrix}$$

A partir dos vetores  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ , é possível montar a matriz jacobiana ampliada para o exemplo.

$$\left[ J_{\text{ampliada}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} & \frac{\partial P_2}{\partial s_4} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial s_4} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \left( \frac{\partial P_4}{\partial V_4} - \frac{\partial P_g^{eolica}}{\partial V_4} \right) & \frac{\partial P_4}{\partial s_4} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial s_4} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \left( \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} - \frac{\partial Q_g^{eolica}}{\partial V_4} \right) & \frac{\partial Q_4}{\partial s_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{WT4}}{\partial V_3} & \frac{\partial P_{WT4}}{\partial V_4} & \frac{\partial P_{WT4}}{\partial s_4} \end{bmatrix}$$

## C Expansão das submatrizes do fluxo de potência ótimo para o sistema de 3 barras

A matriz  $\left[\frac{\partial g}{\partial u}\right]$  relaciona o conjunto de equações de balanço de potência do fluxo de potência convencional com as variáveis de controle do fluxo de potência ótimo.

A matriz  $\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]$  trata-se da matriz Jacobiana da solução do fluxo de potência pelo método de Newton.

A matriz  $\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right]$  relaciona a função objetivo, que no caso é minimizar a potência da barra de referência (minimizar perdas de potência ativa) com as variáveis do fluxo de potência convencional.

A matriz  $\left[\frac{\partial f}{\partial u}\right]$  relaciona a função objetivo com as variáveis de controle do fluxo de potência ótimo.

As matrizes  $\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]$  e  $\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right]$  irão ser utilizadas no cálculo dos multiplicadores de Lagrange. Já  $\left[\frac{\partial g}{\partial u}\right]$  e  $\left[\frac{\partial f}{\partial u}\right]$  juntamente com os multiplicadores de Lagrange irão ser utilizados no cálculo do vetor gradiente que mede a sensibilidade da função objetivo em relação as mudanças das variáveis de controle (Dommel; Tinney, 1968).

$$\left[\frac{\partial g}{\partial u}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_1} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} \end{bmatrix}$$

$$\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial x} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} \end{bmatrix}$$

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] = \left[ \frac{\partial P_{slack}}{\partial x} \right] = \left[ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} \quad \frac{\partial P_1}{\partial \theta_3} \quad \frac{\partial P_1}{\partial V_3} \right]$$

$$\left[\frac{\partial f}{\partial u}\right] = \left[ \frac{\partial P_{slack}}{\partial u} \right] = \left[ \frac{\partial P_1}{\partial V_1} \quad \frac{\partial P_1}{\partial V_2} \right]$$

## D Parâmetros dos geradores eólicos

As tabelas 19 e 20 mostram respectivamente os parâmetros do gerador eólico controlado por passo e os dados da curva de potência para definir a potência ativa gerada para um valor específico de velocidade do vento. A tabela 21 mostra os parâmetros do gerador eólico controlado por estol (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011).

Tabela 19 – Parâmetros do gerador eólico controlado por passo

Parâmetro	Valor
Resistência do enrolamento do estator	0
Reatância do enrolamento do estator	0,09985 $\Omega$
Resistência do enrolamento do rotor	0,00373 $\Omega$
Reatância do enrolamento do rotor	0,10906 $\Omega$
Reatância de magnetização	3,54708 $\Omega$
Tensão nominal	690 V
Potência nominal	600 kW

Fonte: (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011)

Tabela 20 – Dados da Curva de Potência do gerador controlado por passo

$V_{wind}$ m/s	$P_{gerada}$ kW
5	37,5
7	116,4
9	269,4
11	450
13	570,3
15	625,4
17	635

Fonte: (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011)

Tabela 21 – Parâmetros do gerador eólico controlado por estol

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Resistência do enrolamento do estator	0,0027 $\Omega$
Reatância do enrolamento do estator	0,025 $\Omega$
Resistência do enrolamento do rotor	0,0022 $\Omega$
Reatância do enrolamento do rotor	0,046 $\Omega$
Reatância do enrolamento de magnetização	1,38 $\Omega$
Tensão nominal	690 V
Potência nominal	900 kW
Diâmetro do rotor	57 m
Densidade do ar	1,225 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011)

Os coeficientes utilizados para calcular a equação 2.8 de acordo com (Castro; Fuerte-Esquivel, 2011) são respectivamente:  $c_1 = 0,5$ ;  $c_2 = 116$ ;  $c_3 = 0,4$ ;  $c_4 = 0$ ;  $c_5 = 0$ ;  $c_6 = 5$ ;  $c_7 = 21$ ;  $c_8 = 0,08$ ;  $c_9 = 0,035$ ;  $\beta = 0$

## E Dados dos sistemas de transmissão

### E.1 Dados das barras para o sistema de 3 barras em pu ( Potência Base = 100MVA)

Tabela 22 – Dados das barras

Barra	Tipo	$P_g$	$P_c$	$Q_g$	$Q_c$	V	$\theta$
1	3	0	0	0	0	1	0
2	2	1.70	0	0	0	1	0
3	0	0	2.00	0	1.00	1	0

Fonte: Autor

### E.2 Dados das linhas para o sistema de 3 barras em pu

Tabela 23 – Dados das linhas

Origem	Destino	Resistência	Reatância
1	3	0,09756	0,1219
2	3	0,0344	0,0862

Fonte: Autor

### E.3 Dados das barras para o sistema de 14 barras em pu ( Potência Base = 100MVA)

Tabela 24 – Dados das barras

Barra	Tipo	$P_g$	$P_c$	$Q_g$	$Q_c$	V	$\theta$
1	3	2,3240	0	-0,1690	0	1,0600	0
2	2	0,4000	0,2170	0,4240	0,1270	1,0450	-4,9800
3	2	0	0,9420	0,2340	0,1900	1,0100	-12,7200
4	0	0	0,4780	0	-0,0390	1	-10,3300
5	0	0	0,0760	0	0,0160	1	-8,7800
6	2	0	0,1120	0,1220	0,0750	1,0700	-14,2200
7	0	0	0	0	0	1	-13,3700
8	2	0	0	0,1740	0	1,0900	-13,3600
9	0	0	0,2950	0	0,1660	1	-14,9400
10	0	0	0,0900	0	0,0580	1	-15,5100
11	0	0	0,0350	0	0,0180	1	-14,7900
12	0	0	0,0610	0	0,0160	1	-15,0700
13	0	0	0,1350	0	0,0580	1	-15,1600
14	0	0	0,1490	0	0,0500	1	-16,0400

Fonte: Autor

## E.4 Dados das linhas para o sistema de 14 barras em pu

Tabela 25 – Dados das linhas

Origem	Destino	Resistência	Reatância
1	2	0,01938	0,05917
1	5	0,05403	0,22304
2	3	0,04699	0,19797
2	4	0,05811	0,17632
2	5	0,05695	0,17388
3	4	0,06701	0,17103
4	5	0,01335	0,04211
4	7	0	0,20912
4	9	0	0,55618
5	6	0	0,25202
6	11	0,09498	0,19890
6	12	0,12291	0,25581
6	13	0,06615	0,13027
7	8	0	0,17615
7	9	0	0,11001
9	10	0,03181	0,08450
9	14	0,12711	0,27038
10	11	0,08205	0,19207
12	13	0,22092	0,19988
13	14	0,17093	0,34802

Fonte: Autor

## E.5 Dados das barras para o sistema de 30 barras em pu ( Potência Base = 100MVA)

Tabela 26 – Dados das barras

Barra	Tipo	$P_g$	$P_c$	$Q_g$	$Q_c$	V	$\theta$
1	3	2,6020	0	-0,1610	0	1,060	0
2	2	0,4000	0,2170	0,5000	0,1270	1,0450	0
3	0	0	0,0240	0	0,0120	1,0000	0
4	0	0	0,0760	0	0,0160	1,0000	0
5	2	0	0,9420	0,3700	0,1900	1,0100	0
6	0	0	0	0	0	1,0000	0
7	0	0	0,2280	0	0,1090	1,0000	0
8	2	0	0,3000	0,3730	0,3000	1,0100	0
9	0	0	0	0	0,0	1,0000	0
10	0	0	0,0580	0	0,0200	1,000	0
11	2	0	0	0,1620	0,0	1,0820	0
12	0	0	0,1120	0	0,0750	1,0000	0
13	2	0	0	0,1060	0,0	1,0710	0
14	0	0	0,0620	0	0,0160	1,0000	0
15	0	0	0,0820	0	0,0250	1,0000	0
16	0	0	0,0350	0	0,0180	1,0000	0
17	0	0	0,0900	0	0,0580	1,0000	0
18	0	0	0,0320	0	0,0009	1,0000	0
19	0	0	0,0950	0	0,0340	1,0000	0
20	0	0	0,0220	0	0,0007	1,0000	0
21	0	0	0,1750	0	0,1120	1,0000	0
22	0	0	0	0	0,0	1,0000	0
23	0	0	0,0320	0	0,0160	1,0000	0
24	0	0	0,0870	0	0,0670	1,0000	0
25	0	0	0	0	0,0	1,0000	0
26	0	0	0,0350	0	0,0230	1,0000	0
27	0	0	0	0	0,0	1,0000	0
28	0	0	0	0	0,0	1,0000	0
29	0	0	0,0240	0	0,0009	1,0000	0
30	0	0	0,1060	0	0,0190	1,0000	0

Fonte: Autor

## E.6 Dados das linhas para o sistema de 3 barras em pu

Tabela 27 – Dados das linhas

Origem	Destino	Resistência	Reatância
1	2	0,0192	0,0575
1	3	0,0452	0,1652
2	4	0,057	0,1737
3	4	0,0132	0,0379
2	5	0,0472	0,1938
2	6	0,0581	0,1763
3	6	0,0119	0,0414
5	7	0,046	0,116
6	7	0,0267	0,082
6	8	0,012	0,042
6	9	0	0,208
6	10	0	0,556
9	11	0	0,208
9	10	0	0,11
4	12	0	0,256
12	13	0	0,140
12	14	0,1231	0,2559
12	15	0,0662	0,1304
12	16	0,0945	0,1987
14	15	0,221	0,1997
16	17	0,0524	0,1923
15	18	0,1073	0,2185
18	19	0,6390	0,1292
19	20	0,0340	0,0680
10	20	0,0936	0,209
10	17	0,0324	0,0845
10	21	0,0348	0,0749
10	22	0,0727	0,1499
21	22	0,0116	0,0236
15	23	0,1000	0,2020
22	24	0,1150	0,1790
23	24	0,1320	0,2700
24	25	0,1885	0,3292
25	26	0,2544	0,3800
25	27	0,1093	0,2087
28	27	0	0,396
27	29	0,2198	0,4153
27	30	0,3202	0,6027
29	30	0,2399	0,4533
8	28	0,0636	0,2
6	28	0,0169	0,0599

Fonte: Autor

## F Resultados do fluxo de potência para todos os sistemas em comparação com Matpower

### F.1 Sistema de 3 barras

#### F.1.1 Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu

Tabela 28 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	-7,7364	1,0000	-7,7350
0,8819	-0,0528	0,8820	-0,0540

Fonte: Autor

#### F.1.2 Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu

Tabela 29 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	8,9868	1,0000	9,1520
0,8931	1,0203	0,8840	1,3300
0,9125	2,6024	0,8710	3,0100

Fonte: Autor

#### F.1.3 Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu

Tabela 30 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	9,1766	1,0000	9,1900
0,8835	1,3627	0,8840	1,3800
0,8691	3,0630	0,8690	3,1000

Fonte: Autor

### F.1.4 Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu

Tabela 31 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	10,0410	1,0000	10,1120
0,8954	2,0392	0,8920	2,1670
0,9086	4,8576	0,8920	5,0500

Fonte: Autor

## F.2 Sistema de 14 barras

### F.2.1 Resultados do fluxo de potência sem geração eólica

Tabela 32 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0,0000	1,0600	0,0000
1,0450	-4,9565	1,0450	-4,9500
1,0100	-12,6328	1,0100	-12,6330
1,0261	-10,3659	1,0180	-10,3660
1,0326	-8,9467	1,0200	-8,9470
1,0700	-14,8794	1,0700	-14,8790
1,0448	-13,4503	1,0620	-13,4500
1,0900	-13,4503	1,0900	-13,4500
1,0276	-15,0699	1,0560	-15,0700
1,0275	-15,3181	1,0510	-15,3180
1,0449	-15,2134	1,0570	-15,2130
1,0530	-15,7197	1,0550	-15,7200
1,0462	-15,7383	1,0500	-15,7380
1,0174	-16,3940	1,0170	-16,3940

Fonte: Autor

## F.2.2 Resultados do fluxo de potência com modelo passo

Tabela 33 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0,0000	1,0600	0,0000
1,0450	-4,6787	1,0450	-4,6940
1,0100	-12,1540	1,0100	-12,1960
1,0315	-9,8307	1,0280	-9,7850
1,0379	-8,4516	1,0340	-8,4230
1,0700	-13,6031	1,0700	-13,7880
1,0511	-12,4634	1,0440	-12,3880
1,0900	-12,4634	1,0900	-12,3880
1,0379	-13,8394	1,0210	-13,7650
1,0361	-14,0805	1,0220	-14,0510
1,0493	-13,9614	1,0420	-14,0310
1,0568	-14,3504	1,0520	-14,4620
1,0544	-14,3602	1,0430	-14,2610
1,0517	-14,5955	1,0100	-13,5830
1,0735	-13,4536	0,9770	-12,2650

Fonte: Autor

## F.2.3 Resultados do fluxo de potência com modelo estol

Tabela 34 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0,0000	1,0600	0,0000
1,0450	-4,6861	1,0450	-4,6860
1,0100	-12,1813	1,0100	-12,1820
1,0274	-9,7764	1,0270	-9,7770
1,0341	-8,4165	1,0340	-8,4170
1,0700	-13,7206	1,0700	-13,7210
1,0438	-12,3772	1,0440	-12,3780
1,0900	-12,3772	1,0900	-12,3780
1,0244	-13,7491	1,0240	-13,7500
1,0248	-14,0261	1,0250	-14,0270
1,0436	-13,9862	1,0440	13,9870
1,0520	-14,4070	1,0520	-14,4080
1,0453	-14,2483	1,0450	-14,2490
1,0121	-13,7532	1,0120	13,7540
0,9974	-12,4574	0,9970	-12,4590

Fonte: Autor

## F.2.4 Resultados do fluxo de potência com modelo variável

Tabela 35 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0,0000	1,0600	0,0000
1,0450	-4,4793	1,0450	-4,4790
1,0100	-11,8329	1,0100	-11,8330
1,0297	-9,3513	1,0300	-9,3510
1,0361	-8,0176	1,0360	-8,0180
1,0700	-12,7550	1,0700	-12,7550
1,0473	-11,6110	1,0470	-11,6110
1,0900	-11,6110	1,0900	-11,6110
1,0306	-12,7985	1,0310	-12,7980
1,0301	-13,0733	1,0300	-13,0730
1,0463	-13,0297	1,0460	-13,0300
1,0545	-13,3670	1,0550	-13,3670
1,0508	-13,1914	1,0510	-13,1910
1,0355	-12,3557	1,0350	-12,3560
1,0360	-10,2189	1,0360	-10,2190

Fonte: Autor

### F.3 Sistema de 30 barras

#### F.3.1 Resultados do fluxo de potência sem geração eólica

Tabela 36 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0	1,0600	0
1,0450	-5,0360	1,0450	-5,3730
1,0201	-8,3991	1,0250	-7,5870
1,0196	-8,6716	1,0170	-9,3470
1,0100	-13,4493	1,0100	-14,1350
1,0127	-10,2342	1,0120	-11,0570
1,0039	-12,0800	1,0030	-12,8470
1,0100	-10,9425	1,0100	-11,7840
1,0247	-13,4651	1,0240	-14,2760
1,0020	-15,1913	1,0010	-15,9950
1,0820	-13,4651	1,0820	-14,2760
1,0286	-14,7856	1,0260	-15,5460
1,0710	-14,7856	1,0710	-15,5460
1,0123	-15,7021	1,0090	-16,4610
1,0067	-15,7494	1,0020	-16,4770
1,0096	-15,2074	1,0080	-15,9900
0,9991	-15,4402	0,9980	-16,2370
0,9991	-16,4150	0,9890	-17,0570
0,9825	-16,3834	0,9850	-17,1960
0,9869	-16,1563	0,9880	-16,9570
0,9890	-15,6598	0,9880	-16,4620
0,9895	-15,6399	0,9880	-16,4410
0,9903	-16,0057	0,9870	-16,7580
0,9771	-15,9777	0,9750	-16,7610
0,9782	-15,5932	0,9750	-16,3890
0,9598	-16,0477	0,9560	-16,8470
0,9879	-15,0702	0,9840	-15,8730
1,0083	-10,8527	1,0070	-11,6710
0,9698	-16,4664	0,9630	-17,2050
0,9568	-17,3813	0,9510	-18,1640

Fonte: Autor

### F.3.2 Resultados do fluxo de potência com modelo passo

Tabela 37 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0	1,0600	0
1,0450	-4,7835	1,0450	-5,1100
1,0252	-8,0032	1,0250	-7,1870
1,0243	-8,2948	1,0170	-8,8490
1,0100	-12,9885	1,0100	-13,6890
1,0180	-9,6837	1,0110	-10,4060
1,0079	-11,5809	1,0030	-12,2800
1,0100	-10,3024	1,0100	-11,1380
1,0277	-12,9148	1,0240	-13,6500
1,0053	-14,6444	1,0010	-15,3830
1,0820	-12,9148	1,0820	-13,6500
1,0306	-14,2911	1,0260	-14,9910
1,0710	-14,2911	1,0710	-14,9910
1,0145	-15,1960	1,0090	-15,8990
1,0091	-15,2382	1,0020	-15,9080
1,0122	-14,6918	1,0080	-15,4110
1,0022	-14,9008	0,9980	-15,6350
1,0016	-15,8870	0,9890	-16,4730
0,9857	-15,8456	0,9850	-16,6030
0,9901	-15,6158	0,9880	-16,3590
0,9924	-15,1110	0,9880	-15,8510
0,9929	-15,0915	0,9880	-15,8310
0,9932	-15,4794	0,9870	-16,1740
0,9805	-15,4326	0,9750	-16,1560
0,9825	-15,0391	0,9750	15,7670
0,9642	-15,4896	0,9560	-16,2250
0,9926	-14,5124	0,9840	-15,2410
1,0136	-10,3029	1,0070	-11,0230
0,9746	-15,8951	0,9630	-16,5730
0,9617	-16,8008	0,9510	-17,5320
1,0392	-8,4651	0,9870	-9,1310

Fonte: Autor

### F.3.3 Resultados do fluxo de potência com modelo estol

Tabela 38 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0	1,0600	0
1,0450	-4,7930	1,0450	-5,1070
1,0200	-7,9311	1,0250	-7,1790
1,0196	-8,2367	1,0170	-8,8400
1,0100	-13,0321	1,0100	-13,6850
1,0122	-9,6094	1,0110	-10,3940
1,0035	-11,5402	1,0030	-12,2720
1,0100	-10,3280	1,0100	-11,1310
1,0245	-12,8717	1,0240	-13,6400
1,0019	-14,6139	1,0010	-15,3740
1,0820	-12,8717	1,0820	-13,6400
1,0284	-14,2857	1,0260	-14,9840
1,0710	-14,2857	1,0710	-14,9840
1,0121	-15,1948	1,0090	-15,8920
1,0066	-15,2334	1,0020	-15,9000
1,0095	-14,6747	1,0080	-15,4020
0,9990	-14,8769	0,9980	-15,6260
0,9988	-15,8869	0,9890	-16,4650
0,9825	-15,8217	0,9850	-16,5940
0,9869	-15,5906	0,9880	-16,3500
0,9889	-15,0846	0,9880	-15,8420
0,9894	-15,0653	0,9880	-15,8220
0,9901	-15,4689	0,9870	-16,1660
0,9769	-15,4120	0,9740	-16,1470
0,9780	-15,0065	0,9750	-15,7580
0,9596	-15,4613	0,9560	-16,2160
0,9876	-14,4706	0,9840	-15,2310
1,0079	-10,2328	1,0070	-11,0120
0,9695	-15,8675	0,9630	-16,5640
0,9565	-16,7830	0,9510	-17,5240
0,9975	-8,3136	0,9960	-9,0970

Fonte: Autor

### F.3.4 Resultados do fluxo de potência com modelo variável

Tabela 39 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em pu

Tensão	$\theta^\circ$	Tensão <sub>mp</sub>	$\theta^\circ_{mp}$
1,0600	0,0000	1,0600	0,0000
1,0450	-4,6063	1,0450	-4,9030
1,0217	-7,6027	1,0270	-6,8910
1,0209	-7,9245	1,0190	-8,4800
1,0100	-12,7006	1,0100	-13,3290
1,0143	-9,1730	1,0130	-9,9270
1,0048	-11,1453	1,0040	-11,8490
1,0100	-9,8546	1,0100	-10,6270
1,0257	-12,4451	1,0250	-13,1800
1,0032	-14,1940	1,0020	-14,9190
1,0820	-12,4451	1,0820	-13,1800
1,0290	-13,9078	1,0270	-14,5630
1,0710	-13,9078	1,0710	-14,5630
1,0128	-14,8100	1,0100	-15,4640
1,0073	-14,8441	1,0030	-15,4690
1,0104	-14,2799	1,0090	-14,9680
1,0002	-14,4639	0,9900	-15,1770
0,9996	-15,4868	0,9900	-16,0240
0,9838	-15,4108	0,9860	-16,1480
0,9881	-15,1773	0,9890	-15,9010
0,9902	-14,6642	0,9890	-15,3870
0,9907	-14,6452	0,9890	-15,3670
0,9911	-15,0672	0,9880	-15,7250
0,9781	-14,9939	0,9760	-15,6930
0,9795	-14,5753	0,9760	-15,2830
0,9611	-15,0286	0,9580	-15,7490
0,9892	-14,0319	0,9850	-14,7600
1,0095	-9,7889	1,0080	-10,5380
0,9711	-15,4243	0,9650	-16,0880
0,9582	-16,3365	0,9530	-17,0440
1,0149	-6,9461	1,0140	-7,6960

Fonte: Autor

## G Resultado do fluxo de potência ativa e reativa nas linhas dos sistemas testes

### G.1 Sistema de 3 barras

#### G.1.1 Sem inserção de geração eólica

Tabela 40 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	47,6350	-42,0620	58,6860	-51,7220	5,5738	69,644
2	3	170	-157,9400	78,5020	-48,2780	12,0620	30,2240

Fonte: Autor

#### G.1.2 Modelo passo

Tabela 41 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	34,8840	-30,1970	59,8870	-54,0320	4,6861	5,8553
2	3	170	-158,5500	66,1630	-37,4780	11,4470	28,6850
3	4	-11,2500	11,2500	-8,4902	8,9883	0	0,4980

Fonte: Autor

#### G.1.3 Modelo Estol

Tabela 42 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	36,2090	-30,5790	66,7790	-59,7450	5,6297	7,0342
2	3	170	-158,0300	76,8010	-46,8050	11,9710	29,9960
3	4	-11,3920	11,3920	6,5496	-6,10720	0	0,4423

Fonte: Autor

### G.1.4 Modelo Variável

Tabela 43 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	3	26,1710	-21,3360	65,3580	-59,3160	4,8357	6,0421
2	3	170	-158,6600	63,6610	-35,2550	11,3360	28,4050
3	4	-20	20	-5,4286	6,5000	0	1,0714

Fonte: Autor

## G.2 Sistema de 14 barras

### G.2.1 Sem inserção de geração eólica

Tabela 44 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	2	156,0900	-151,8400	-17,2540	30,2420	4,2539	12,9880
1	5	76,4340	-73,6250	0,4778	11,1200	2,8094	11,5970
2	3	72,6410	-70,3550	6,0107	3,6209	2,2861	9,6315
2	4	55,8500	-54,1790	-4,4923	9,5612	1,6706	5,0689
2	5	41,6500	-40,7340	-4,6835	7,4805	0,9161	2,7970
3	4	-23,8450	24,2190	0,3133	0,6401	0,3735	0,9534
4	5	-60,9710	61,4450	4,2500	-2,7559	0,4735	1,4940
4	7	27,5840	-27,5840	-8,4424	10,0950	0	1,6520
4	9	15,5470	-15,5470	0,3547	0,9227	0	1,2776
5	6	45,3140	-45,3140	-12,9770	18,2280	0	5,2513
6	11	7,9142	-7,7840	9,7098	-9,4372	0,1301	0,2726
6	12	8,0394	-7,9584	3,2882	-3,1196	0,0809	0,1685
6	13	18,1600	-17,9070	10,3960	-9,8974	0,2529	0,4981
7	8	0	0	-26,8030	27,962	0	1,1592
7	9	27,5840	-27,5840	16,7070	-15,6590	0	1,0481
9	10	4,7814	-4,7736	-1,6817	1,7023	0,0077	0,0205
9	14	8,8504	-8,7561	-0,1816	0,38227	0,0943	0,2006
10	11	-4,2264	4,2840	-7,5023	7,6372	0,0576	0,1348
12	13	1,8584	-1,8469	1,5196	-1,5092	0,0114	0,0103
13	14	6,2541	-6,1439	5,6066	-5,3823	0,1101	0,2243

Fonte: Autor

## G.2.2 Modelo Passo

Tabela 45 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	2	147,8400	-144,0300	-15,2990	26,9310	3,8100	11,6330
1	5	71,9590	-69,4690	-0,4320	10,7110	2,4900	10,2790
2	3	70,9480	-68,7660	6,1817	3,0130	2,1824	9,1947
2	4	52,6400	-51,1490	-5,6225	10,1480	1,4914	4,5251
2	5	38,7370	-37,9380	-5,5903	8,0293	0,7988	2,4390
3	4	-25,4340	25,8600	-0,9324	2,0185	0,4255	1,0860
4	5	-59,7150	60,1670	4,8484	-3,4219	0,4522	1,4266
4	7	23,7750	-23,7750	-9,6839	10,9850	0	1,3007
4	9	13,4300	-13,4300	-0,9513	1,9029	0	0,9514
5	6	39,6400	-39,6400	-12,4270	16,4840	0	4,0569
6	11	7,2420	-7,1470	7,8754	-7,6765	0,0949	0,1988
6	12	6,8596	-6,8035	2,2810	-2,1642	0,0561	0,1167
6	13	14,3380	-14,2000	5,7564	-5,4847	0,1379	0,2716
7	8	0	0	-23,7780	24,6810	0	0,9031
7	9	23,7750	-23,7750	12,7930	-12,0660	0	0,7271
9	10	5,3973	-5,3887	0,0298	-0,0069	0,0086	0,0228
9	14	2,3069	-2,2512	-6,4669	6,5854	0,0557	0,1185
10	11	-3,6113	3,6470	-5,7930	5,8765	0,0356	0,0835
12	13	0,7034	-0,7018	0,5642	-0,5627	0,0016	0,0014
13	14	1,4019	-1,3988	0,2474	-0,2411	0,0031	0,0063
14	15	-11,2500	11,2500	11,3440	-11,8060	0	0,4620

Fonte: Autor

## G.2.3 Modelo Estol

Tabela 46 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	2	147,9200	-144,1100	-15,3200	26,9660	3,8146	11,6460
1	5	71,9750	-69,4840	0,1758	10,1080	2,4911	10,2830
2	3	71,0100	-68,8240	6,1754	3,0351	2,1862	9,2105
2	4	52,5500	-51,0700	-4,4751	8,9662	1,4801	4,4911
2	5	38,8480	-38,0490	-4,8441	7,2845	0,7992	2,4404
3	4	-25,3760	25,7990	0,2126	0,8670	0,4230	1,0797
4	5	-58,9070	59,3470	3,0411	-1,6530	0,4406	1,3881
4	7	23,2690	-23,2690	-7,5190	8,7037	0	1,1847
4	9	13,1090	-13,1090	1,0145	-0,1035	0	0,9109
5	6	40,5850	-40,5850	-12,8590	17,1300	0	4,2718
6	11	7,6477	-7,5066	10,5660	-10,2710	0,1411	0,2955
6	12	7,2396	-7,1653	4,0967	-3,9421	0,0742	0,1546
6	13	14,4980	-14,2790	12,9770	-12,5470	0,2187	0,4307
7	8	0	0	-27,3990	28,6130	0	1,2138
7	9	23,2690	-23,2690	18,6950	-17,7950	0	0,8996
9	10	5,0692	-5,0590	-2,4900	2,5157	0,0096	0,0256
9	14	1,8090	-1,7877	3,7889	-3,7434	0,0213	0,0454
10	11	-3,9404	4,0066	-8,3157	8,4705	0,0661	0,1548
12	13	1,0653	-1,0521	2,3421	-2,3302	0,0132	0,0119
13	14	1,8313	-1,6971	9,0768	-8,8036	0,1341	0,2731
14	15	-11,4150	11,4150	7,5471	-7,1815	0	0,3656

Fonte: Autor

## G.2.4 Modelo Variável

Tabela 47 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	2	141,6800	-138,1900	-13,8150	24,4870	3,4953	10,6720
1	5	68,5750	-66,3130	-0,4253	9,7604	2,2614	9,3351
2	3	69,7340	-67,6250	6,3079	2,5800	2,1096	8,8879
2	4	50,1080	-48,7570	-5,2214	9,3194	1,3506	4,0980
2	5	36,6440	-35,9290	-5,4473	7,6327	0,7157	2,1854
3	4	-26,5750	27,0400	-0,6313	1,8161	0,4642	1,1848
4	5	-57,8890	58,3130	3,3844	-2,0488	0,42342	1,3356
4	7	20,3340	-20,3340	-8,3029	9,2544	0	0,9515
4	9	11,4730	-11,4730	0,1639	0,5267	0	0,6906
5	6	36,3290	-36,3290	-12,4470	15,9090	0	3,4624
6	11	7,1632	-7,0481	9,3490	-9,1080	0,1150	0,2409
6	12	6,3659	-6,3097	3,4442	-3,3272	0,0562	0,1170
6	13	11,6000	-11,4660	9,9005	-9,6358	0,1343	0,2646
7	8	0	0	-25,3620	26,3950	0	1,0330
7	9	20,3340	-20,3340	16,1080	-15,4330	0	0,6748
9	10	5,5110	-5,5014	-1,3666	1,3922	0,0096	0,0256
9	14	-3,2042	3,2166	-0,3271	0,3535	0,0124	0,0264
10	11	-3,4986	3,5481	-7,1922	7,3080	0,0494	0,1157
12	13	0,20966	-0,2036	1,7272	-1,7217	0,0060	0,0054
13	14	-1,8304	1,8834	5,5576	-5,4496	0,0529	0,1079
14	15	-20	20	0,0961	0,6500	0	0,7461

Fonte: Autor



## G.3 Sistema de 30 barras

### G.3.1 Sem inserção de geração eólica

Tabela 48 – Resultados do fluxo de potência sem geração eólica em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>V<sub>ar</sub></sub>
1	2	162,6800	-158,1000	-19,2330	32,9670	4,5857	13,7330
1	3	97,2540	-93,4340	6,0242	7,9355	3,8195	13,9600
2	4	40,0120	-39,1710	3,4060	-0,8410	0,8417	2,5650
3	4	12,0790	-12,0600	-2,7871	2,8431	0,0194	0,0559
2	5	80,9080	-78,0670	5,0283	6,6338	2,8403	11,662
2	6	55,4780	-53,8340	3,3092	1,6773	1,6433	4,9865
3	6	78,9550	-78,2410	-3,3203	5,8049	0,7141	2,4846
5	7	-16,1330	16,3150	11,9900	-11,5310	0,1821	0,4594
6	7	39,5220	-39,1150	-1,2651	2,5152	0,4070	1,2501
6	8	29,6270	-29,5240	-1,6775	2,0381	0,1030	0,3606
6	9	28,1190	-28,1190	-5,0356	6,6906	0	1,6550
6	10	15,7720	-15,7720	2,6299	-1,2430	0	1,3859
9	11	0	0	-28,2240	29,8020	0	1,5780
9	10	28,1190	-28,1190	21,5340	-20,2200	0	1,3141
4	12	43,6300	-43,6300	-1,2528	5,9446	0	4,6918
12	13	0	0	-31,179	32,4650	0	1,2864
12	14	7,8630	-7,7818	2,8173	-2,6485	0,08117	0,1687
12	15	17,6100	-17,3720	8,3771	-7,9084	0,2379	0,4687
12	16	6,9574	-6,8759	6,5400	-6,3688	0,0814	0,1712
14	15	1,5818	-1,5741	1,0485	-1,0415	0,0077	0,0070
16	17	3,3759	-3,3593	4,5688	-4,5079	0,0165	0,0606
15	18	5,7149	-5,6797	0,7477	-0,6761	0,0351	0,0716
18	19	2,4797	-2,4382	0,5861	-0,5777	0,0415	0,0084
19	20	-7,061	7,0822	-2,8222	2,8630	0,0203	0,0407
10	20	9,3733	-9,2822	3,1363	-2,9330	0,0910	0,2033
10	17	5,6515	-5,6407	1,3205	-1,2921	0,01086	0,0283
10	21	15,5820	-15,4610	10,2510	-9,9920	0,1207	0,2595
10	22	7,4844	-7,4275	4,7554	-4,6380	0,0569	0,1173
21	22	-2,0389	2,0395	-1,2080	1,2094	0,0006	0,0013
15	23	5,0310	-4,9740	5,7021	-5,5869	0,0570	0,1152
22	24	5,3880	-5,3401	3,4287	-3,3541	0,0479	0,0745
23	24	1,7740	-1,7483	3,9869	-3,9344	0,0256	0,0524
24	25	-1,611	1,6174	0,5885	-0,57838	0,0058	0,0101
25	26	3,5484	-3,5000	2,3723	-2,3000	0,0484	0,0723
25	27	-5,1659	5,2000	-1,7940	1,8592	0,0341	0,0652
28	27	18,4980	-18,4980	5,8795	-4,4119	0	1,4675
27	29	6,2014	-6,1121	1,0974	-0,9286	0,0893	0,1687
27	30	7,0971	-6,9249	1,4553	-1,1312	0,1720	0,3241
29	30	3,7121	-3,6751	0,8386	-0,7688	0,0369	0,0698
8	28	-0,4756	0,4764	1,0145	-1,0121	0,0007	0,0024
6	28	19,0350	-18,9750	2,2455	-2,0309	0,06053	0,2145

Fonte: Autor

## G.3.2 Modelo Passo

Tabela 49 – Resultados do fluxo de potência com modelo passo em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>Var</sub>
1	2	155,0500	-150,8900	-17,3940	29,8520	4,1598	12,4580
1	3	92,3600	-88,9180	5,1689	7,4125	3,4423	12,5800
2	4	38,1230	-37,3610	2,7690	-0,4449	0,7626	2,3200
3	4	13,3870	-13,3640	-2,0498	2,1163	0,0231	0,0665
2	5	79,1470	-76,4270	5,1939	5,9709	2,7192	11,1600
2	6	51,9230	-50,4850	2,3781	1,9834	1,4374	4,3616
3	6	73,1300	-72,5200	-3,5206	5,6435	0,6102	2,1229
5	7	-17,773	17,9700	11,0800	-10,5810	0,1978	0,4987
6	7	41,2100	-40,7700	-0,2231	1,5728	0,4394	1,3496
6	8	29,6210	-29,5150	5,7017	-5,3314	0,1058	0,3703
6	9	28,3540	-28,3540	-4,3651	6,0242	0	1,6591
6	10	15,9130	-15,9130	2,8695	-1,4606	0	1,4089
9	11	0	0	-27,4490	28,9370	0	1,4877
9	10	28,3540	-28,3540	21,4250	-20,1060	0	1,3188
4	12	43,1250	-43,1250	-0,9132	5,4782	0	4,5640
12	13	0	0	-30,5490	31,7820	0	1,2320
12	14	7,8082	-7,7282	2,8134	-2,6471	0,0800	0,1663
12	15	17,402	-17,1690	8,3270	-7,8690	0,2324	0,4579
12	16	6,7149	-6,6378	6,4303	-6,2682	0,0770	0,1620
14	15	1,5282	-1,5208	1,0471	-1,0404	0,0073	0,0066
16	17	3,1378	-3,1225	4,4682	-4,4121	0,0152	0,0560
15	18	5,6194	-5,5854	0,7620	-0,6928	0,0339	0,0691
18	19	2,3854	-2,3467	0,6028	-0,5950	0,0386	0,0078
19	20	-7,1533	7,1740	-2,8049	2,8464	0,0207	0,0414
10	20	9,4663	-9,3740	3,1225	-2,9164	0,0922	0,2060
10	17	5,8893	-5,8775	1,4187	-1,3879	0,0117	0,0307
10	21	15,6090	-15,4890	10,2630	-10,0040	0,1205	0,2593
10	22	7,5025	-7,4455	4,7629	-4,6454	0,0569	0,1174
21	22	-2,0114	2,0120	-1,1963	1,1976	0,0006	0,0013
15	23	4,8708	-4,8161	5,6474	-5,5368	0,0547	0,1106
22	24	5,4335	-5,3851	3,4478	-3,3724	0,0484	0,0754
23	24	1,6161	-1,5918	3,9368	-3,8870	0,0243	0,0497
24	25	-1,7232	1,7296	0,5594	-0,5481	0,0064	0,0112
25	26	3,5482	-3,5000	2,3720	-2,3000	0,0482	0,0720
25	27	-5,2778	5,3133	-1,8239	1,8916	0,0354	0,0677
28	27	18,6100	-18,6100	5,9204	-4,4416	0	1,4787
27	29	6,2007	-6,1118	1,0962	-0,9282	0,0889	0,1679
27	30	7,0963	-6,9249	1,4538	-1,1312	0,1713	0,3225
29	30	3,7118	-3,6751	0,8382	-0,7687	0,0367	0,0694
8	28	-0,4847	0,48493	-0,1609	0,1614	0,0001	0,0005
6	28	19,1570	-19,0950	3,4522	-3,2322	0,0620	0,2199
6	31	-11,2500	11,2500	10,6560	-11,1220	0	0,4654

Fonte: Autor

## G.3.3 Modelo Estol

Tabela 50 – Resultados do fluxo de potência com modelo estol em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>Var</sub>
1	2	155,1500	-150,9800	-17,4170	29,8910	4,1651	12,4740
1	3	92,1430	-88,7090	6,7084	5,8409	3,4336	12,5490
2	4	38,1230	-37,3560	3,8924	-1,5565	0,7665	2,3358
3	4	13,4290	-13,4050	-3,4708	3,5408	0,0244	0,0700
2	5	79,3060	-76,5760	5,1787	6,0307	2,7300	11,2090
2	6	51,8550	-50,4130	4,4939	-0,1202	1,4413	4,3736
3	6	72,8800	-72,2720	-0,5424	2,6561	0,6075	2,1136
5	7	-17,6240	17,8390	12,9240	-12,3810	0,2153	0,5431
6	7	41,0800	-40,6390	-2,0098	3,3638	0,4408	1,3540
6	8	29,6490	-29,5450	-3,0685	3,4327	0,1040	0,3642
6	9	28,3700	-28,3700	-5,1870	6,8757	0	1,6887
6	10	15,9110	-15,9110	2,5618	-1,1523	0	1,4095
9	11	0	0	-28,3300	29,9200	0	1,5905
9	10	28,3700	-28,3700	21,4540	-20,1280	0	1,3259
4	12	43,1610	-43,1610	-1,2349	5,8264	0	4,5914
12	13	0	0	-31,2900	32,5860	0	1,2960
12	14	7,8247	-7,7439	2,8518	-2,6840	0,0807	0,1678
12	15	17,4370	-17,2020	8,4844	-8,0207	0,2353	0,4636
12	16	6,6995	-6,6201	6,6277	-6,4609	0,0793	0,1668
14	15	1,5439	-1,5362	1,0840	-1,0770	0,0076	0,0069
16	17	3,1201	-3,1040	4,6609	-4,6015	0,0161	0,0593
15	18	5,6524	-5,6178	0,8240	-0,7537	0,0345	0,0703
18	19	2,4178	-2,3776	0,6637	-0,6555	0,0402	0,0081
19	20	-7,122	7,1429	-2,7444	2,7855	0,0205	0,0410
10	20	9,4347	-9,3429	3,0603	-2,8555	0,0917	0,2048
10	17	5,9078	-5,8960	1,2292	-1,1985	0,0117	0,0306
10	21	15,625	-15,5040	10,2420	-9,9817	0,1210	0,2604
10	22	7,5128	-7,4556	4,7489	-4,6309	0,0572	0,1179
21	22	-1,995	1,9964	-1,2183	1,2196	0,0006	0,0013
15	23	4,8857	-4,8292	5,7737	-5,6596	0,0564	0,1140
22	24	5,4592	-5,4105	3,4113	-3,3355	0,0486	0,0757
23	24	1,6292	-1,6035	4,0596	-4,0069	0,0257	0,0527
24	25	-1,686	1,6924	0,6424	-0,6312	0,0064	0,0112
25	26	3,5485	-3,500	2,3724	-2,3000	0,0484	0,0723
25	27	-5,240	5,2757	-1,7412	1,8077	0,0348	0,0665
28	27	18,574	-18,5740	5,8387	-4,3608	0	1,4779
27	29	6,2015	-6,1121	1,0975	-0,9286	0,0893	0,1688
27	30	7,0972	-6,9249	1,4555	-1,1312	0,1720	0,3243
29	30	3,7121	-3,6751	0,8386	-0,7688	0,0369	0,0698
8	28	-0,4549	0,4560	1,2290	-1,2257	0,0010	0,0033
6	28	19,0910	-19,0300	1,9945	-1,7790	0,0607	0,2154
6	31	-11,4150	11,4150	7,5477	-7,1821	0	0,3656

Fonte: Autor

## G.3.4 Modelo Variável

Tabela 51 – Resultados do fluxo de potência com modelo variável em MW

Origem	Destino	$P_{km}$	$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	Perdas <sub>W</sub>	Perdas <sub>Var</sub>
1	2	149,3700	-145,5100	-16,0010	27,5500	3,8562	11,5480
1	3	88,4160	-85,2560	6,1516	5,3977	3,1600	11,5490
2	4	36,6870	-35,9790	3,4618	-1,3018	0,7088	2,1600
3	4	14,4270	-14,4000	-2,9703	3,0491	0,0274	0,0787
2	5	77,9750	-75,3340	5,3074	5,5328	2,6401	10,8400
2	6	49,1500	-47,8560	3,8836	0,04071	1,2933	3,9243
3	6	68,4290	-67,8950	-0,5898	2,4471	0,5338	1,8573
5	7	-18,8660	19,0940	12,3070	-11,7300	0,2288	0,5769
6	7	42,3600	-41,8940	-1,2870	2,7184	0,4660	1,4314
6	8	29,6420	-29,5390	2,1895	-1,8289	0,1030	0,3606
6	9	28,5490	-28,5490	-4,7099	6,4025	0	1,6926
6	10	16,0180	-16,0180	2,7319	-1,3050	0	1,4269
9	11	0	0	-27,7760	29,3010	0	1,5254
9	10	28,5490	-28,5490	21,3740	-20,0440	0	1,3299
4	12	42,7780	-42,7780	-0,9915	5,4885	0	4,4969
12	13	0	0	-30,8430	32,1010	0	1,2577
12	14	7,7836	-7,7037	2,8503	-2,6843	0,0798	0,1660
12	15	17,2800	-17,0490	8,4523	-7,9966	0,2313	0,4556
12	16	6,5143	-6,4381	6,5518	-6,3916	0,0761	0,1601
14	15	1,5037	-1,4963	1,0843	-1,0776	0,0074	0,0066
16	17	2,9381	-2,9229	4,5916	-4,5357	0,0152	0,0559
15	18	5,5809	-5,5473	0,8373	-0,7687	0,0336	0,0685
18	19	2,3473	-2,3091	0,6787	-0,6710	0,0381	0,0077
19	20	-7,1900	7,2117	-2,729	2,7705	0,0207	0,0415
10	20	9,5043	-9,4117	3,0474	-2,8405	0,0926	0,2068
10	17	6,0896	-6,0771	1,2969	-1,2643	0,0124	0,0325
10	21	15,6470	-15,5260	10,2500	-9,9899	0,1209	0,2603
10	22	7,5270	-7,4698	4,7541	-4,6360	0,0572	0,1180
21	22	-1,9740	1,9748	-1,210	1,2114	0,0006	0,0012
15	23	4,7643	-4,7095	5,7369	-5,6262	0,0548	0,1107
22	24	5,4949	-5,4458	3,4246	-3,3481	0,0491	0,0764
23	24	1,5095	-1,4847	4,0262	-3,9754	0,0248	0,0508
24	25	-1,7695	1,7765	0,6235	-0,6114	0,0069	0,0121
25	26	3,5483	-3,5000	2,3722	-2,3000	0,0483	0,0721
25	27	-5,3248	5,3606	-1,7600	1,8292	0,0358	0,0684
28	27	18,6580	-18,6580	5,8668	-4,3803	0	1,4865
27	29	6,2010	-6,1119	1,0967	-0,9283	0,0890	0,1683
27	30	7,0966	-6,9249	1,4544	-1,1312	0,1717	0,3232
29	30	3,7119	-3,6751	0,8383	-0,7687	0,0368	0,0696
8	28	-0,4607	0,4609	0,3895	-0,3888	0,0002	0,0007
6	28	19,1810	-19,1190	2,8535	-2,6346	0,0617	0,2189
6	31	-20	20	0,1275	0,6500	0	0,7775

Fonte: Autor