

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**JAIMIS SAJID LEON COLQUI**

**CONTROLE DE TENSÃO EM REDES DE BAIXA TENSÃO COM ALTA  
PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

Ilha Solteira  
2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONTROLE DE TENSÃO EM REDES DE BAIXA TENSÃO COM ALTA  
PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**JAIMIS SAJID LEON COLQUI**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área do Conhecimento: Automação

Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin  
**Orientador**

Ilha Solteira  
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L579c Leon Colqui, Jaimis Sajid.  
Controle de tensão em redes de baixa tensão com alta penetração de geração fotovoltaica / Jaimis Sajid Leon Colqui. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
118 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Antonio Padilha Feltrin  
Inclui bibliografia

1. Geração fotovoltaica. 2. Redes de distribuição em baixa tensão. 3. Problema de aumento de tensão. 4. Estratégias de controle de tensão. 5. Matriz de sensibilidade de tensão.


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Controle de tensão em redes de baixa tensão com alta penetração de geração fotovoltaica


**AUTOR:** JAIMIS SAJID LEON COLQUI

**ORIENTADOR:** ANTONIO PADILHA FELTRIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JOEL DAVID MELO TRUJILLO

Departamento de Engenharia de Energia / Universidade Federal do ABC

Ilha Solteira, 30 de janeiro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Elvis e Hilda, por todo o amor, carinho dedicados ao longo desses anos.

Aos meus irmãos, Mijael, Cathia e Anyeli, pela força e confiança que sempre foram para mim.

À minha namorada Aline Oliveira, pelo carinho e companhia em todas as fases de elaboração da dissertação.

Aos professores doutores Antônio Padilha Feltrin e Joel David Melo Trujillo pela sua orientação, pelo apoio e pela confiança depositada em mim.

Ao professor Rubén Romero Lazaro e família por sua ajuda e amizade desde minha chegada ao Brasil.

Aos professores, amigos e colegas do LaPSEE que sempre foram muito solícitos, ajudando em todos os momentos necessários, além de tornarem o ambiente bem mais divertido.

E a CAPES, por ter financiado e facilitado minha participação deste Programa de Mestrado

“A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca. E ensinar a aprender não podem dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria.”

**Paulo Freire**

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de estratégia global de controle de tensão que emprega programação não linear e duas extensões de estratégias de controle de tensão, encontrados na literatura. O principal objetivo destas estratégias é solucionar o problema de aumento de tensão nas redes de distribuição de baixa tensão, causado pela injeção de potência do gerador fotovoltaico distribuído. Estas estratégias de controle de tensão foram implementadas e analisadas a fim de verificar a sua eficácia e comparar os seus comportamentos. Para os testes, foram considerados a operação de geradores fotovoltaicos monofásicos e trifásicos distribuídos em um sistema teste de distribuição em baixa tensão. Os resultados mostraram que depois da aplicação das estratégias de controle, os perfis de tensão em regime permanente ficaram dentro da faixa de tensão permitida, obtendo-se uma mínima redução de potência ativa dos geradores fotovoltaicos assim como seus correspondentes fatores de potência.

**Palavras-chave:** Geração fotovoltaica. Redes de distribuição em baixa tensão. Problema de aumento de tensão. Estratégias de controle de tensão. Matriz sensibilidade de tensão.

## ABSTRACT

This work presents a proposal of a global voltage control strategy that use nonlinear programming and two extensions of voltage control strategies that are found in the literature. The main objective of these strategies is to solve the problem of voltage increase in low voltage distribution networks, caused by the power injection of the distributed photovoltaic generator. These voltage control strategies have been implemented and analyzed in order to verify their effectiveness and compare their behaviors. For the test, the operation of single-phase and three-phase photovoltaic generators distributed in a low voltage distribution test system were considered. The results showed that after the application of the control strategies, the steady-state voltage profiles were within the allowed voltage range, obtaining a minimum reduction of the active power of the photovoltaic generators as well as their corresponding power factors.

**Keywords:** Photovoltaic generation. Low voltage distribution networks. Voltage rise problem. Voltage control strategies. Voltage sensitivity matrix.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Evolução global da capacidade FV instalada acumulada de 2000-2016.....	16
<b>Figura 2</b> - Evolução Europeia da capacidade instalada de sistemas FVs, 2000-2016.....	17
<b>Figura 3</b> - Sistemas FVs instalados por nível de tensão na Europa até final de 2013.....	17
<b>Figura 4</b> - Evolução do número de conexões de micro e minigeração.....	18
<b>Figura 5</b> - Distribuição por classe de consumo, Agosto 2016.....	19
<b>Figura 6</b> - Perfil de tensão em um alimentador com sistema FV. ....	20
<b>Figura 7</b> - Sistema de distribuição simples.....	23
<b>Figura 8</b> - Conexão do gerador FV à rede de BT através do inversor.....	25
<b>Figura 9</b> - Área de operação do GD conectado à rede de distribuição.....	27
<b>Figura 10</b> - Característica FP (P). ....	28
<b>Figura 11</b> - Representação simplificada de uma rede de distribuição com gerador FV.....	30
<b>Figura 12</b> - Características de regulação de potência reativa do gerador FV.....	35
<b>Figura 13</b> - Categorização das estratégias de controle de tensão com base a suas necessidades de comunicação.....	37
<b>Figura 14</b> - Sistema TT.....	39
<b>Figura 15</b> - Sistema TN-C.....	40
<b>Figura 16</b> - Esquema equivalente da linha trifásica em BT.....	42
<b>Figura 17</b> - Curva de carga ao longo de um dia. ....	44
<b>Figura 18</b> - Diagrama de um sistema FV. ....	44
<b>Figura 19</b> - Modelos da carga e do gerador FV e seus fatores de potência.....	45
<b>Figura 20</b> - Perfil típico diário de geração FV.....	46
<b>Figura 21</b> - Seção de uma linha. ....	47
<b>Figura 22</b> - Notações do fluxo de potência para dois barramentos relacionadas às equações (24) e (25). ....	48
<b>Figura 23</b> - Rede de BT com três geradores FVs monofásicos ubicados um por fase.....	50
<b>Figura 24</b> - Rede de BT com três geradores FVs monofásicos ubicados dois na mesma fase.....	50
<b>Figura 25</b> - Perfil de tensão da rede de 5 barras durante uma falha em cascata.....	52
<b>Figura 26</b> - Perfil de tensão da rede desequilibrada em BT. ....	54
<b>Figura 27</b> - Perfil de tensão da rede desequilibrada em BT. ....	55
<b>Figura 28</b> - Solução da variação de potência onde usamos a técnica de PL. ....	56

<b>Figura 29</b> - Região da variação de potência onde usamos a técnica de PNL.....	59
<b>Figura 30</b> - Rede secundária de distribuição em BT de 5 barras.....	65
<b>Figura 31</b> - Perfil de tensão do nó 3T.....	67
<b>Figura 32</b> - Perfil de tensão do nó 4S.....	67
<b>Figura 33</b> - Perfil de tensão no nó 5R.....	68
<b>Figura 34</b> - Perfil de tensão do nó 3T.....	68
<b>Figura 35</b> - Perfil de tensão do nó 4S.....	69
<b>Figura 36</b> - Perfil de tensão do nó 5R.....	69
<b>Figura 37</b> - Perfil de tensão do nó 3T.....	70
<b>Figura 38</b> - Perfil de tensão do nó 4S.....	71
<b>Figura 39</b> - Perfil de tensão do nó 5R.....	71
<b>Figura 40</b> - Perfil de redução de potência ativa dos geradores FVs.....	72
<b>Figura 41</b> - Fator de potência inicial e final dos geradores FVs.....	73
<b>Figura 42</b> - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.....	74
<b>Figura 43</b> - Perfil de tensão do nó 4S, com geração FV.....	74
<b>Figura 44</b> - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.....	74
<b>Figura 45</b> - Perfil de redução de potência ativa dos geradores FVs.....	75
<b>Figura 46</b> - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.....	76
<b>Figura 47</b> - Perfil de tensão do nó 4S, com geração FV.....	76
<b>Figura 48</b> - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV.....	77
<b>Figura 49</b> - Perfil de redução de potência ativa dos geradores FVs.....	77
<b>Figura 50</b> - Perfil de tensão do nó 3R.....	80
<b>Figura 51</b> - Perfil de tensão no nó 3S.....	80
<b>Figura 52</b> - Perfil de tensão do nó 3T.....	81
<b>Figura 53</b> - Perfil de tensão do nó 5R.....	81
<b>Figura 54</b> - Perfil de tensão do nó 3R, com geração FV.....	82
<b>Figura 55</b> - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV.....	82
<b>Figura 56</b> - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.....	83
<b>Figura 57</b> - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV.....	83
<b>Figura 58</b> - Perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs.....	84
<b>Figura 59</b> - Perfil de tensão do nó 3R.....	86
<b>Figura 60</b> - Perfil de tensão do nó 3S.....	86

<b>Figura 61</b> - Perfil de tensão do nó 3T .....	87
<b>Figura 62</b> - Perfil de tensão do nó 4T .....	87
<b>Figura 63</b> - Perfil de tensão do nó 5R.....	88
<b>Figura 64</b> - Perfil de tensão do nó 3R, com geração FV .....	88
<b>Figura 65</b> - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV.....	89
<b>Figura 66</b> - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.....	89
<b>Figura 67</b> - Perfil de tensão do nó 4T, com geração FV.....	90
<b>Figura 68</b> - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV .....	90
<b>Figura 69</b> - Perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs .....	91
<b>Figura 70</b> - Perfil de tensão do nó 3R.....	93
<b>Figura 71</b> - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV.....	93
<b>Figura 72</b> - Perfil de tensão do nó 3T .....	94
<b>Figura 73</b> - Perfil de tensão do nó 5R.....	94
<b>Figura 74</b> - Perfil de tensão do nó 5S .....	95
<b>Figura 75</b> - Perfil de tensão do nó 5T .....	95
<b>Figura 76</b> - Perfil de tensão do nó 3R, com geração FV .....	96
<b>Figura 77</b> - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV.....	96
<b>Figura 78</b> - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.....	97
<b>Figura 79</b> - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV .....	97
<b>Figura 80</b> - Perfil de tensão do nó 5S, com geração FV.....	98
<b>Figura 81</b> - Perfil de tensão do nó 5T, com geração FV.....	98
<b>Figura 82</b> - Perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs .....	99
<b>Figura 83</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 2 – 1ª demanda. ....	107
<b>Figura 84</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 3 – 1ª demanda. ....	108
<b>Figura 85</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 4 – 1ª demanda. ....	108
<b>Figura 86</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 5 – 1ª demanda. ....	108
<b>Figura 87</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 2 – 2ª demanda. ....	109
<b>Figura 88</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 3 – 2ª demanda. ....	109
<b>Figura 89</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 4 – 2ª demanda. ....	110
<b>Figura 90</b> - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 5 – 2ª demanda. ....	110
<b>Figura 91</b> - Curvas dos geradores FVs monofásicos a céu aberto – Perfil.....	112
<b>Figura 92</b> - Curvas de geração FV trifásico e monofásico a céu aberto – Perfil.....	114

<b>Figura 93</b> - Curvas de geração FV trifásico e monofásico a céu aberto – Perfil.....	116
<b>Figura 94</b> - Curvas da geração FV trifásico a céu aberto – Perfil .....	118

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Modo de conexão em função da potência instalada. ....	25
<b>Tabela 2</b> - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV. ....	26
<b>Tabela 3</b> - Tempo máximo de desconexão para condições críticas de tensão. ....	26
<b>Tabela 4</b> - Fator de potência para cada capacidade. ....	27
<b>Tabela 5</b> - Comportamento do módulo de tensão na barra de carga para diferentes fatores de potência do gerador FV. ....	32
<b>Tabela 6</b> - Cenário de carga e geração empregado nas Figuras 23 e 24. ....	50
<b>Tabela 7</b> - Sensibilidades de tensão devido a injeção de potência FV para a rede de distribuição da Figura 23. ....	51
<b>Tabela 8</b> - Sensibilidades de tensão devido a injeção de potência FV para a rede de distribuição da Figura 24. ....	51
<b>Tabela 9</b> - Tensões dos nós 3T, 4S e 5R durante a falha em cascata. ....	53
<b>Tabela 10</b> - Cenário de carga e geração empregado na Figura 26. ....	54
<b>Tabela 11</b> - Cenário de carga e geração empregado na Figura 26. ....	55
<b>Tabela 12</b> - Potência ativa final em pu dos geradores FVs. ....	72
<b>Tabela 13</b> - Potência ativa final em pu dos geradores FVs. ....	75
<b>Tabela 14</b> - Potência ativa final em pu dos geradores FVs. ....	78
<b>Tabela 15</b> - Quantidade de redução de potência ativa em pu dos geradores FVs. ....	84
<b>Tabela 16</b> - Quantidade de redução de potência ativa em pu dos geradores FVs. ....	91
<b>Tabela 17</b> - Quantidade de redução de potência ativa em pu dos geradores FVs. ....	99
<b>Tabela 18</b> - Potências máximas das barras por fase para a primeira demanda. ....	107
<b>Tabela 19</b> - Potências máximas das barras por fase para a segunda demanda. ....	109
<b>Tabela 20</b> - Quantidade de residências e de potências contratada – inicial e final. ....	111
<b>Tabela 21</b> - Quantidade de residências e de potências contratadas – inicial e final. ....	113
<b>Tabela 22</b> - Quantidade de residências e de potências contratadas – inicial e final. ....	115
<b>Tabela 23</b> - Quantidade de residência e de potências contratadas – inicial e final. ....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
AC	Corrente Alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EN	<i>European Norm</i>
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
FP	Fator de Potência
FV	Fotovoltaico (a)
GD	Geração Distribuída (o)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MT	Media Tensão
OLTC	<i>On-Load tap changer</i>
OSD	Operador do Sistema de Distribuição
SE	Subestação Elétrica
VDE	<i>Verband Der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik</i>
PNL	Programação Não Linear
PL	Programação Linear
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
pu	Por unidade
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	ANTECEDENTES .....	16
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	19
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO.....	21
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	21
<b>2</b>	<b>REDE SECUNDÁRIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E REGULAMENTAÇÕES PARA CONECTAR OS GERADORES DISTRIBUÍDOS</b> .....	23
2.1	REDE SECUNDÁRIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	23
2.2	REGULAMENTAÇÕES PARA CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	24
<b>2.2.1</b>	<b>Modo de conexão da micro e minigeração distribuída à rede elétrica</b> .....	24
<b>2.2.2</b>	<b>Variação de tensão em regime permanente</b> .....	26
<b>2.2.3</b>	<b>Fator de potência do gerador FV</b> .....	27
<b>3</b>	<b>AUMENTO DA TENSÃO E SOLUÇÕES DE MITIGAÇÃO</b> .....	29
3.1	AUMENTO DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE – ANÁLISE TEÓRICA.....	29
3.2	SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA DE AUMENTO DE TENSÃO .....	32
<b>3.2.1</b>	<b>Reforço da rede de BT</b> .....	32
<b>3.2.2</b>	<b>Transformadores MT/BT com OLTC</b> .....	33
<b>3.2.3</b>	<b>Controle de Potência Reativa dos geradores FVs</b> .....	34
<b>3.2.4</b>	<b>Redução de potência ativa dos geradores FVs</b> .....	35
<b>3.2.5</b>	<b>Armazenamento de energia</b> .....	36
3.3	CATEGORIZAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE TENSÃO COM BASES EM SUAS NECESSIDADES DE COMUNICAÇÃO.....	36
<b>3.3.1</b>	<b>Estratégia local</b> .....	37
<b>3.3.2</b>	<b>Estratégia descentralizada</b> .....	37
<b>3.3.3</b>	<b>Estratégia central</b> .....	38
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO</b> .....	39
4.1	SISTEMA DE ATERRAMENTO DA REDE DE BAIXA TENSÃO .....	39
4.2	MODELAGEM DA LINHA ELÉTRICA DA REDE DE BAIXA TENSÃO .....	41
4.3	MODELAGEM DA CARGA.....	43
4.4	MODELAGEM DO SISTEMA FV .....	44

<b>5</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b> .....	47
5.1	FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM BT ....	47
5.2	ANÁLISE DA MATRIZ SENSIBILIDADE DE TENSÃO .....	48
5.3	ABORDAGENS PARA O CONTROLE DE TENSÃO .....	51
<b>5.3.1</b>	<b>Estratégia global de controle de tensão empregando programação linear e considerando FP constante do gerador FV</b> .....	55
<b>5.3.2</b>	<b>Estratégia global de controle de tensão empregando programação não linear e considerando FP variável do gerador FV</b> .....	59
<b>5.3.3</b>	<b>Estratégia local de controle de tensão empregando um algoritmo iterativo e considerando FP constante do gerador FV</b> .....	61
<b>6</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b> .....	64
6.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE.....	65
6.2	SISTEMA TESTE COM TRÊS GERADORES FVs MONOFÁSICOS .....	66
<b>6.2.1</b>	<b>Tensão em regime permanente antes dos controles de tensão</b> .....	66
<b>6.2.2</b>	<b>Tensão em regime permanente depois dos controles global e local de tensão</b> .....	69
<b>6.2.3</b>	<b>Conclusões parciais</b> .....	78
6.3	SISTEMA TESTE COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E UM MONOFÁSICO	79
<b>6.3.1</b>	<b>Tensão em regime permanente antes do controle de tensão</b> .....	79
<b>6.3.2</b>	<b>Tensão em regime permanente depois do controle global de tensão empregando PNL</b> .....	81
<b>6.3.3</b>	<b>Conclusões parciais</b> .....	85
6.4	SISTEMA TESTE COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E DOIS MONOFÁSICOS.....	85
<b>6.4.1</b>	<b>Tensão em regime permanente antes do controle de tensão</b> .....	86
<b>6.4.2</b>	<b>Tensão em regime permanente depois do controle de global de tensão com PNL</b> .....	88
<b>6.4.3</b>	<b>Conclusões parciais</b> .....	92
6.5	SISTEMA TESTE COM DOIS GERADORES FVs TRIFÁSICOS .....	92
<b>6.5.1</b>	<b>Tensão em regime permanente antes do controle de tensão</b> .....	93
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	101
7.1	TRABALHOS FUTUROS .....	102
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	103
	<b>APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE</b> .....	107



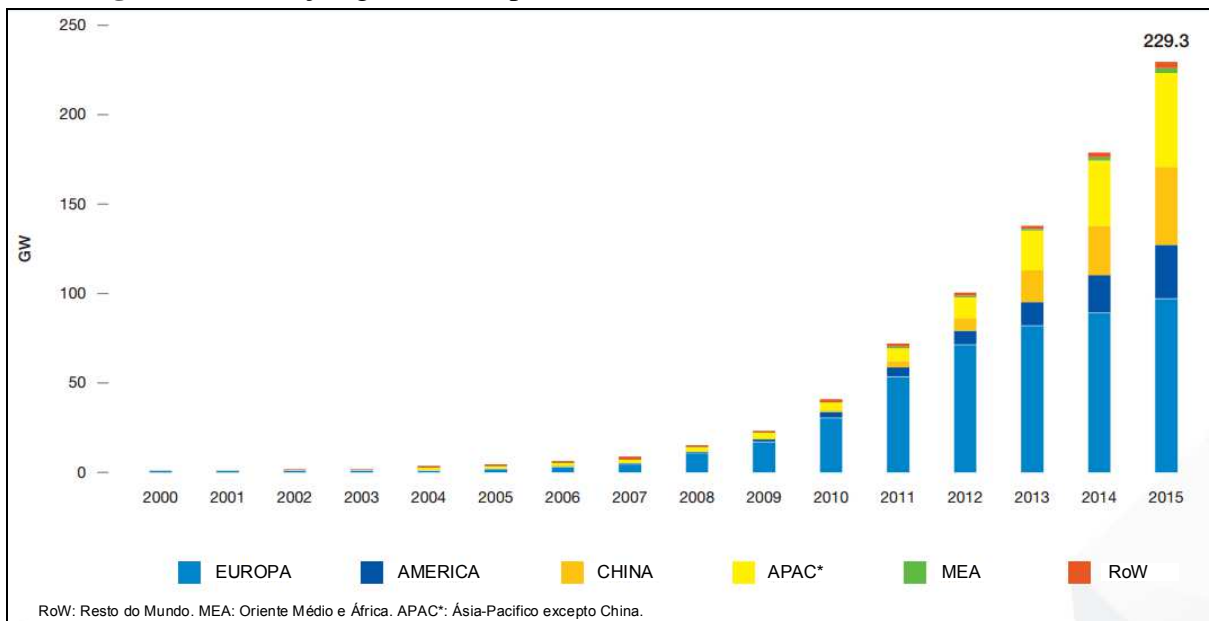
<b>APÊNDICE B – SISTEMA COM TRÊS GERADORES FVS MONOFÁSICOS .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE C – SISTEMA COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E UM MONOFÁSICO .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE D – SISTEMA COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E DOIS MONOFÁSICOS .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE E – SISTEMA COM DOIS GERADOR FVS TRIFÁSICO .....</b>	<b>117</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ANTECEDENTES

Ao longo dos últimos anos a capacidade de geradores fotovoltaicos (FVs) instalados no mundo vem crescendo em um ritmo exponencial, como é mostrada pela Associação da Indústria Fotovoltaica Europeia (EPIA, na sigla em inglês) que fez o levantamento da capacidade instalada desde 2000 até 2015. Os resultados desse levantamento são ilustrados na Figura 1.

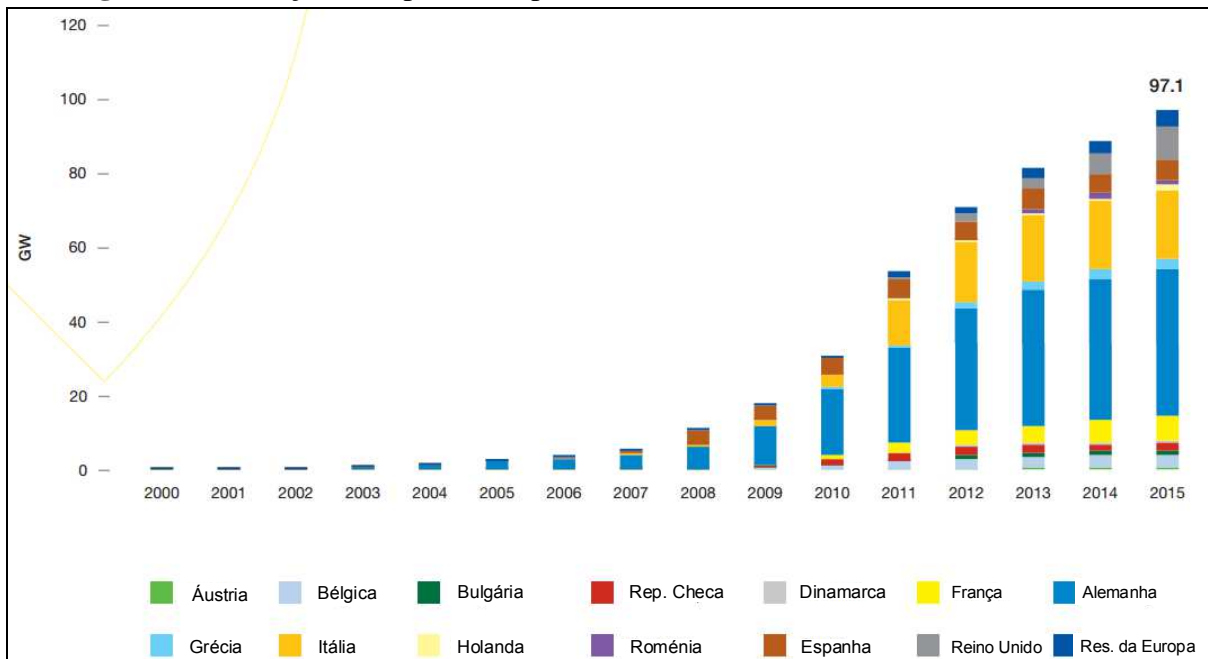
**Figura 1** - Evolução global da capacidade FV instalada acumulada de 2000-2015.



Fonte: Associação da Indústria Fotovoltaica Europeia- EPIA (2016).

No final do 2015, dos 229 GW de capacidade FV instalada acumulada, a Europa continuava representando a maior participação global com quase 97 GW, mas os países de Ásia-Pacífico (APAC) quase alcançaram o mesmo nível com 96 GW. América (incluindo tanto a América do Norte e América do Sul) ainda ficaram para trás com 31 GW. Oriente Médio / África (MEA) tinham apenas 3GW de capacidade FV (EPIA, 2016).

O desenvolvimento do mercado FV europeu é resultado da liderança de alguns países ano após ano, como a Alemanha mostrando compromissos constantes dos políticos para apoiar o desenvolvimento de sistemas FVs. Junto com a Itália, os dois países têm a maior parte da capacidade europeia de geração FV instalada (Figura 2).

**Figura 2** - Evolução Europeia da capacidade instalada de sistemas FVs, 2000-2015.

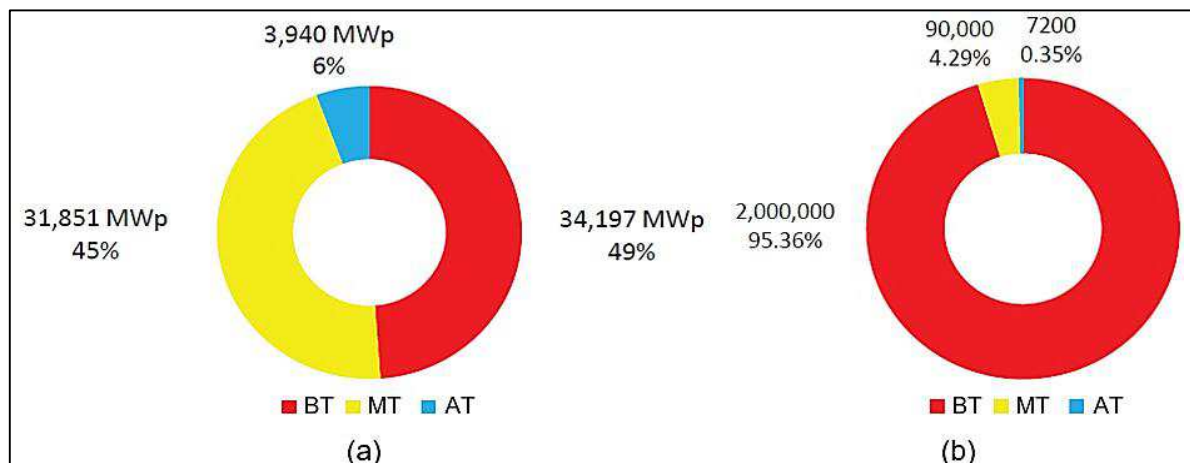
Fonte: EPIA (2016).

Os sistemas FVs podem ser conectadas às redes de AT, MT ou BT, no entanto se conectam principalmente às redes de MT e BT. Na Europa, por exemplo, até o final de 2013 cerca de 94% dos sistemas FVs instalados foram conectados às redes de MT e BT como ilustra a Figura 3a. Além disso, o número de conexões dos sistemas FVs na rede de BT foi cerca de 96% do total de conexões na Europa, Figura 3b. Por conseguinte, as redes de BT têm sido mais propensas a ter um número alto de penetração de sistemas FVs (VANDENBERGH et al., 2013).

**Figura 3** - Sistemas FVs instalados por nível de tensão na Europa até final de 2013.

(a) Capacidade cumulativa

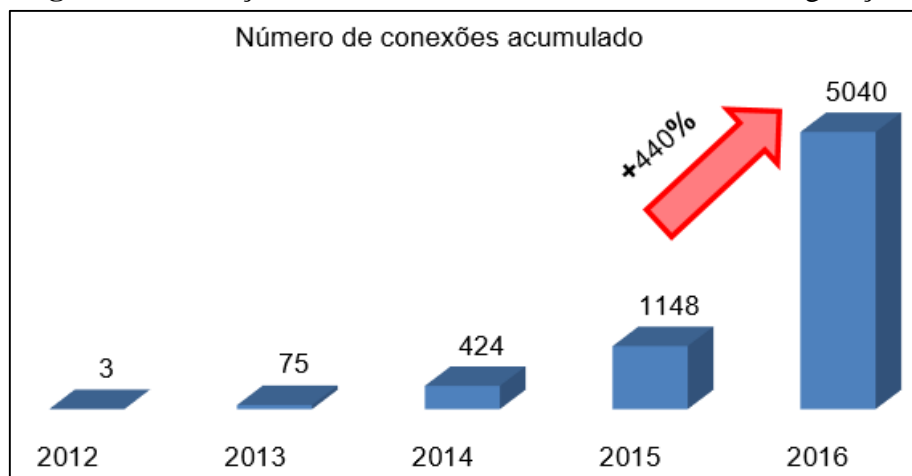
(b) Número de conexões



Fonte: Vandenberg (2013).

No Brasil, os sistemas FVs (micro e minigeração FV) conectadas às redes de MT e BT têm potencial para tornar-se relevante devido ao elevado nível de radiação solar em todo território nacional mas em especial às novas regulamentações normativas estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que permitem que os consumidores possam gerar energia e fornecer o excedente à concessionária de energia em troca de créditos (sistema de compensação de energia). Dados mais recentes da ANEEL mostram o crescimento das conexões de micro e minigeração nos últimos cinco anos até agosto de 2016, Figura 4 (Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL, 2016).

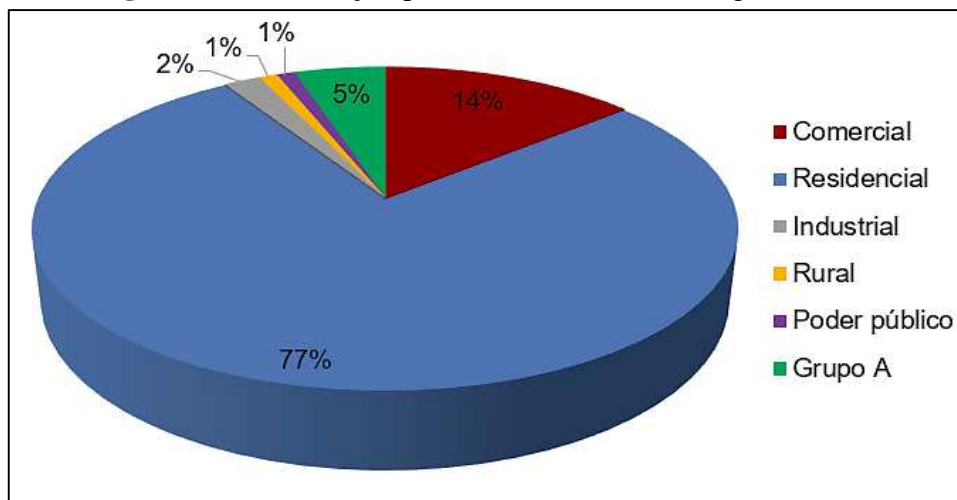
**Figura 4 -** Evolução do número de conexões de micro e minigeração.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

Como resultado da resolução 687 do 24 de novembro de 2015 (ANEEL, 2015) que atualiza e expande a resolução 482 de 2012 (ANEEL, 2012) com mais regras para a inclusão dos geradores distribuídos, observou-se que em agosto de 2016 o número acumulado de conexões FVs chegou a 5040, crescendo 440% em comparação com agosto de 2015, que tinha 1148 conexões.

Segundo a ANEEL (2016), a potência instalada da mini e microgeração FV do país até o final de agosto de 2016 foi de 47,9 MW, sendo o 77% das conexões do setor residencial e 14% do setor comercial, como ilustra a Figura 5.

**Figura 5** - Distribuição por classe de consumo, Agosto 2016.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

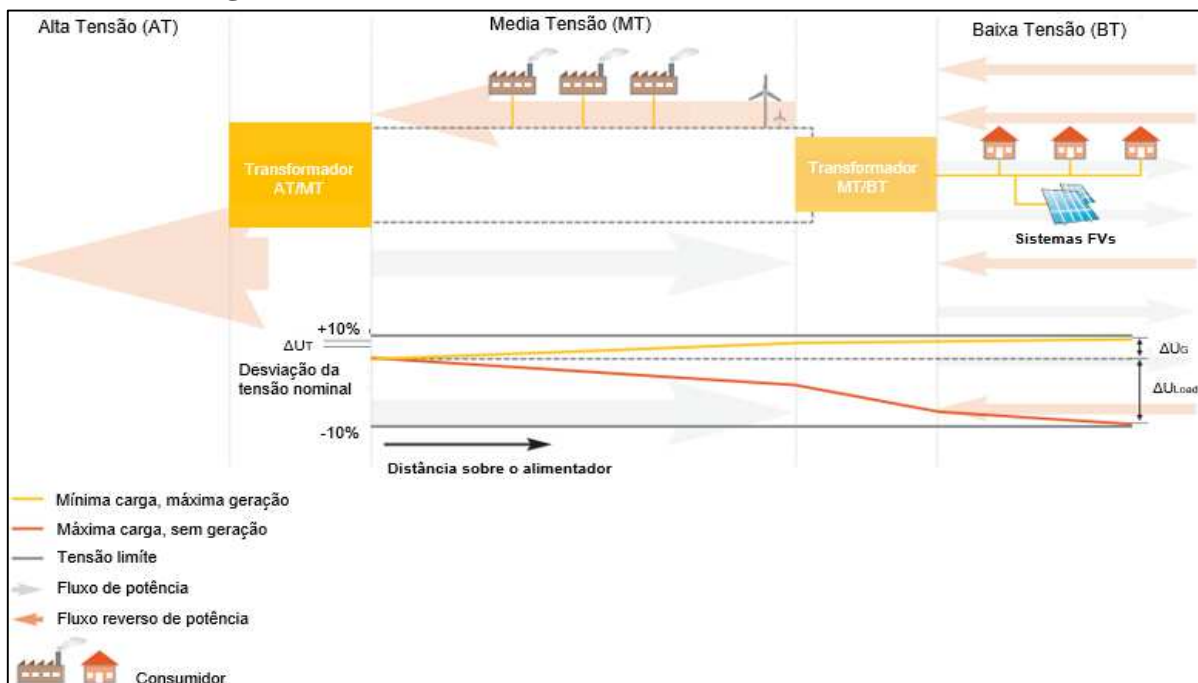
O escopo deste trabalho é sobre as redes de distribuição de BT. Durante muitos anos a energia elétrica foi gerada por usinas hidráulicas e térmicas de grande porte que se conectam com um transformador às linhas de AT e, em seguida, entregues aos consumidores conectados principalmente às redes de distribuição de MT e BT. No entanto, nos dados apresentados demonstram a mudança (devido ao preço do petróleo, os níveis de contaminação e a dificuldade para construção de usinas com reservatórios) na última década e que agora permitem aos consumidores gerar energia elétrica através dos sistemas FVs de pequeno porte (ou outras fontes distribuídas).

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Elevado nível de penetração de sistemas FVs vem dando lugar a desafios técnicos como o fluxo de potência reverso e a elevação da magnitude de tensão em regime permanente. Na Figura 6 é mostrado o problema de aumento de tensão (EPIA, 2012) que aparece na condição de máxima geração e baixa demanda no consumidor, então o nível de tensão aumenta. Um dos principais desafios para os operadores de sistemas de distribuição (OSD) é manter o perfil de tensão dentro de uma faixa de operação estabelecida pelas normas. A elevação de tensão devido ao fluxo de potência excedente dos sistemas FVs pode trazer impactos negativos no funcionamento estável no lado do fornecedor de energia e no lado da demanda. Estes impactos podem diminuir o tempo de vida útil dos equipamentos conectados ao sistema elétrico. Nesse sentido, a integração de mais sistemas FVs em redes de distribuição podem ser atrasados se não é tomada em conta as medidas de controle de tensão em

alimentadores com alta penetração de FVs. Portanto, é necessário criar soluções para resolver as consequências acima mencionadas de elevado nível de penetração de sistemas FVs.

**Figura 6 - Perfil de tensão em um alimentador com sistema FV.**



Fonte: Adaptado de EPIA (2012).

Diferentes soluções têm sido propostas para lidar com o problema de aumento de tensão associado com o alto nível de penetração dos sistemas FVs em redes de BT, algumas delas são:

- Reforços das redes de BT;
- Uso de transformadores MT/BT com OLTC (On Load Tap Changer);
- Sistema de armazenamento de energia;
- Controle da redução de potência ativa injetada pelos sistemas FVs;
- Controle de potência reativa consumida pelos sistemas FVs;
- Static Var Compensator (SVC).

Cada solução tem suas próprias vantagens e desvantagens. No entanto, do ponto de vista econômico a solução estudada para resolver o problema de aumento de tensão é o controle de tensão através da redução de potência ativa injetada pelos sistemas FVs, que é muito atraente porque requer pequenas modificações na lógica de controle dos inversores FVs (FERREIRA et al., 2013; TONKOSKI et al., 2011). No Brasil, para evitar níveis excessivos

de injeção ou consumo de potência reativa as concessionárias limitam, em suas normas técnicas, o FP com a qual o gerador FV pode operar.

Portanto, o escopo principal da pesquisa apresentada neste trabalho é sobre o controle de tensão através da redução de potência ativa dos sistemas FVs, para resolver o problema de aumento de tensão associado com o alto nível de penetração de sistemas FVs em redes de BT.

### 1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é pesquisar e desenvolver estratégias de controle de tensão adequadas via regulação da potência ativa dos sistemas FVs conectados à rede de distribuição de BT.

Dado que as regulações de tensão através dos sistemas FVs têm que operar dentro de poucos segundos, se assume uma análise em regime permanente para ser apropriado. Portanto, o cálculo do fluxo de carga em regime permanente é considerado para a realização das estratégias de controle de tensão, o que significa basicamente que a dinâmica do sistema e as perturbações transitórias não são consideradas.

Neste trabalho abordam-se apenas aspectos técnicos de possíveis soluções para manter o perfil de tensão abaixo do limite superior permitido em regime permanente, e assim, os investimentos para a implementação das estratégias não são analisadas aqui. Cabe ressaltar que o escopo deste trabalho é propor métodos que possam resolver o problema de aumento de tensão associada ao alto nível de penetração de sistemas FVs. No entanto, os métodos propostos podem ser estendidos para tratar situações de tensões baixas, no caso de redes fracas quando a demanda da carga é muito maior do que a produção da geração FV. No entanto, estes não serão abordados neste trabalho.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Além deste capítulo introdutório, este documento está organizado em 7 capítulos, os quais são estruturados da seguinte maneira:

- No capítulo 2, apresentam-se os requisitos estabelecidos pelos novos regulamentos para a conexão de geradores FVs distribuídos na rede de BT.
- No capítulo 3, apresentam-se as análises do problema de aumento de tensão e as principais estratégias de controle de tensão que aparecem na literatura. Em seguida,

categorizam-se as estratégias com base em suas necessidades de infraestrutura de comunicação.

- No capítulo 4, apresentam-se os sistemas típicos de ligação à terra das redes de BT, assim como também as modelagens matemáticas da linha elétrica, da carga e do sistema FV. Todos eles presentes na rede de BT.
- No capítulo 5, apresenta-se a metodologia proposta para resolver o problema de aumento de tensão como o cálculo de fluxo de carga trifásico, as análises da matriz sensibilidade de tensão e as abordagens das estratégias de controle de tensão.
- No capítulo 6, apresentam-se os resultados obtidos das estratégias de controle de tensão para o sistema de distribuição teste de baixa tensão.
- No capítulo 7, apresentam-se as conclusões gerais e propostas para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos.



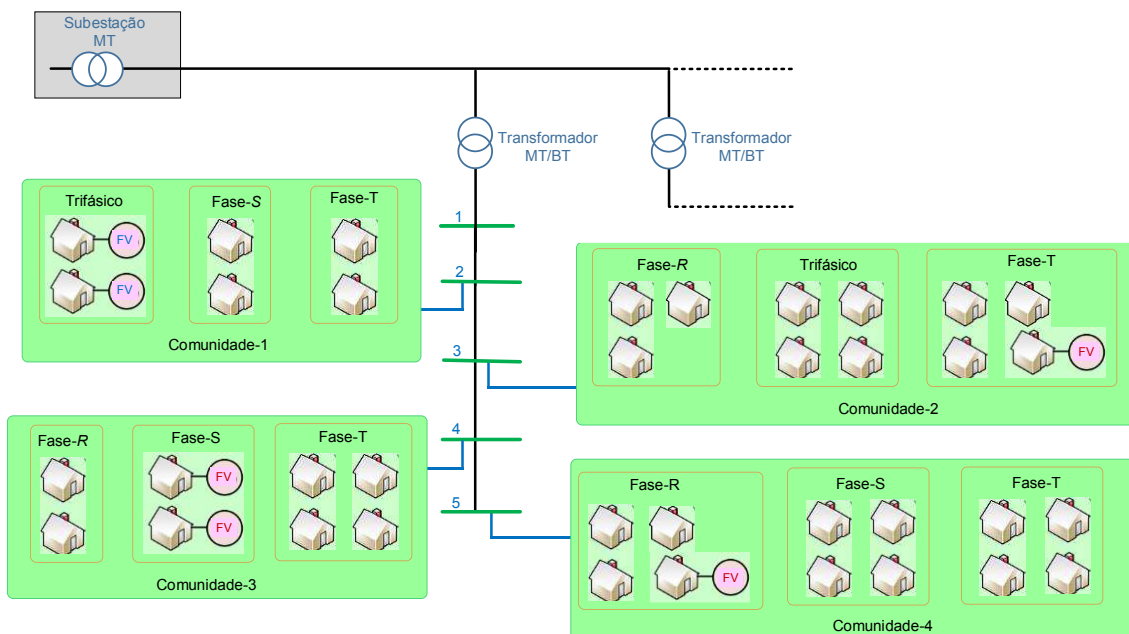
## 2 REDE SECUNDÁRIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E REGULAMENTAÇÕES PARA CONECTAR OS GERADORES DISTRIBUÍDOS

A rede secundária do sistema de distribuição de energia elétrica são gerenciadas para manter o nível de tensão dentro dos limites especificados e entregar uma boa qualidade de energia elétrica aos consumidores. Os aparelhos eletrodomésticos são capazes de trabalhar só dentro de certas margens de tensão e frequência, então, para evitar a sua degradação os operadores da rede de distribuição necessitam garantir que cada consumidor tenha acesso a uma energia elétrica de qualidade (EPIA, 2012).

### 2.1 REDE SECUNDÁRIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A rede secundária do sistema de distribuição de energia elétrica deriva-se da subestação transformadora de MT/BT, e caracteriza-se por operar em baixos níveis de tensão, isto é, sua tensão nominal entre fases é igual ou inferior a 1 kV (ANEEL 2017) e é responsável pelo suprimento de energia elétrica aos consumidores de baixa tensão (BT) que são indústrias, pequenos comércios e predominantemente residências. Estas redes de distribuição apresentam características muito particulares e que as diferenciam das outras redes. Em geral distinguem-se: a topologia radial, as múltiplas conexões das cargas (monofásico, bifásico e trifásico) e as conexões de geradores distribuídos de pequeno porte. Na Figura 7 é mostrado um exemplo simples de sistema de distribuição.

**Figura 7 - Sistema de distribuição simples.**



Fonte: Adaptado de Shahnian e Chandrasena (2016).

## 2.2 REGULAMENTAÇÕES PARA CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

As normas para a conexão da geração distribuída (GD) à rede de distribuição mudaram drasticamente ao longo da última década (2003 até 2013). No começo da década os operadores das redes de distribuição não consideraram GD para ser importante no sistema de energia elétrica, portanto quando havia um problema na rede (por exemplo, uma tensão ou desvio de frequência) eles exigiam a cada GD instalado para se desligar automaticamente e instantaneamente. Com o passar dos anos e com o aumento da GD os operadores da rede acrescentaram novas normas e agora eles exigem que os GDs não só fiquem ligados durante perturbações na rede de distribuição, mas também que sejam capazes de apoiar ativamente a operação do sistema. Este passo está sendo considerado como absolutamente necessário para garantir a confiabilidade e qualidade do fornecimento de eletricidade (EPIA, 2012; DEGNER et al., 2011).

Considerando o contexto internacional, no caso brasileiro são expostos alguns dos requisitos de conexão e operação dos geradores FVs no sistema de distribuição. Estes requisitos baseiam-se na resolução normativa 687 da ANEEL (2015), nas informações contidas nos Módulos 3 e 8 do PRODIST e nas normas técnicas de duas concessionárias de energia brasileiras (ENERGIAS DO BRASIL- EDP 2016; COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS- CEMIG 2016). As normas técnicas das concessionárias são destinadas aos consumidores que desejam instalar mini ou microgeração em redes de BT e que participam do sistema de compensação de energia. Além disso, algumas referências serão feitas com a norma alemã VDE-AR-N 4105 (2011) e as normas europeias EN 50438 (2013) e EN 50160 (2010).

### 2.2.1 Modo de conexão da micro e minigeração distribuída à rede elétrica

Segundo a norma técnica do EDP (2016), a conexão entre os micro e minigeradores distribuídos à rede elétrica deve ser realizada no mesmo ponto de conexão da unidade consumidora, e o valor da potência instalada destes geradores deve limitar-se à carga instalada da mesma. Caso a unidade consumidora deseja instalar mini ou microgerador com potência superior ao limite estabelecido, então, deve solicitar aumento de carga instalada da mesma.

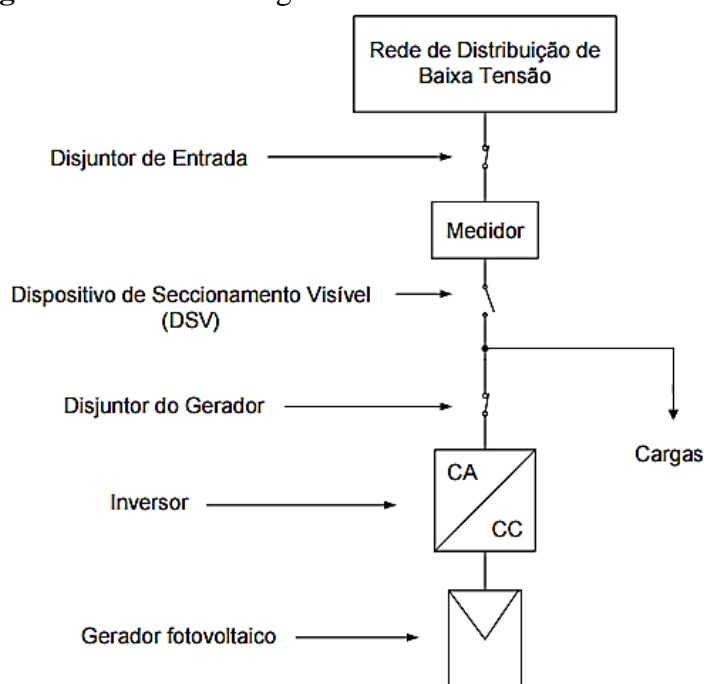
A potência instalada classifica qual o tipo de conexão que deverá ocorrer: monofásica, bifásica ou trifásica, como é exposto na Tabela 1.

**Tabela 1** - Modo de conexão em função da potência instalada.

Potência instalada (kW)	Modo de conexão
< 10	Monofásico, bifásico ou trifásico
10 a 15	Bifásico ou trifásico
> 15 <sup>1</sup>	Trifásico
< 15 <sup>2</sup>	Monofásico

Fonte: EDP (2016).

Os pequenos geradores que necessitam de inversores para conectar-se à rede de BT, como é o caso dos geradores FVs, devem basear sua conexão na estrutura apresentada na Figura 8, segundo citado em CEMIG (2016).

**Figura 8** - Conexão do gerador FV à rede de BT através do inversor.

Fonte: Adaptado de CEMIG (2016).

O medidor indicado na Figura 8 representa um medidor bidirecional que possibilita o registro tanto da energia gerada quanto da consumida pela unidade consumidora. Segundo a seção 7.1.1 do Módulo 3 do PRODIST, para a conexão em BT, o medidor bidirecional pode ser substituído por dois medidores unidirecionais, sendo um para cada sentido do fluxo de energia.

<sup>1</sup> Em rede de distribuição trifásica.

<sup>2</sup> Em rede de distribuição rural monofásica com transformador exclusivo.

### 2.2.2 Variação de tensão em regime permanente

As normas técnicas destacam que o valor da tensão no ponto de conexão do gerador distribuído deve estar dentro dos limites preestabelecidos. Para o caso brasileiro, serão considerados os valores indicados no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017). Para a rede secundária do sistema de distribuição (classe de tensão igual ou inferior a 1 kV), os valores de tensão podem variar de acordo com a Tabela 2.

**Tabela 2** - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.

Tensão Nominal $V_N$	Faixa de variação de tensão de leitura
<b>220/127</b>	$202 \leq V \leq 231$
	$117 \leq V \leq 133$
<b>380/220</b>	$350 \leq V \leq 399$
	$202 \leq V \leq 231$
<b>254/127</b>	$234 \leq V \leq 267$
	$117 \leq V \leq 133$
<b>440/220</b>	$405 \leq V \leq 462$
	$202 \leq V \leq 231$
<b>208/120</b>	$196 \leq V \leq 218$
	$110 \leq V \leq 126$
<b>230/115</b>	$212 \leq V \leq 242$
	$106 \leq V \leq 121$
<b>240/120</b>	$216 \leq V \leq 254$
	$108 \leq V \leq 127$
<b>220/110</b>	$202 \leq V \leq 231$
	$101 \leq V \leq 116$

Fonte: ANEEL (2017).

Segundo a norma técnica do EDP (2016), se as condições de operação atingirem valores críticos, os GD devem parar de fornecer energia à rede de distribuição. Isto se aplica a qualquer sistema seja ele mono ou polifásico. O tempo máximo de desconexão e os valores críticos de tensão no ponto de conexão são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Tempo máximo de desconexão para condições críticas de tensão.

Tensão no ponto de conexão (pu)	Tempo máximo de desconexão
$V < 0.8$	0.4 s
$V > 1.1$	0.2 s

Fonte: EDP (2016).

### 2.2.3 Fator de potência do gerador FV

Em relação aos micro e minigeradores distribuídos, segundo a norma técnica da EDP (2016), se a potência ativa fornecida pelo gerador à rede for superior a 20% da potência nominal do próprio gerador, então, o valor de fator de potência pode variar de acordo com a Tabela 4.

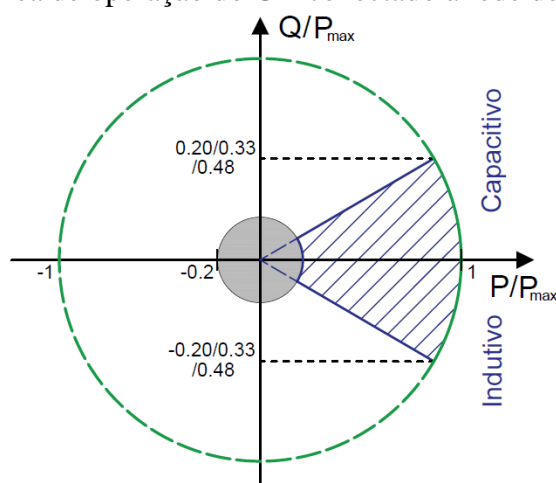
**Tabela 4** - Fator de potência para cada capacidade.

Potência nominal (P) em kW da GD	Faixa de fator de potência (FP)
$\leq 3$	0,98 indutivo até 0,98 capacitivo
$3 < P < 6$	0,95 indutivo até 0,95 capacitivo
$\geq 6$	0,90 indutivo até 0,90 capacitivo

Fonte: Adaptado do EDP (2016).

Na Figura 9 mostra-se a característica PxQ para representar a área de operação do GD, de acordo com a Tabela 4 e com a norma alemã VDE 4105. Esta figura indica que quando os GDs fornecem pelo menos 20% de sua potência nominal são autorizadas a mudar livremente seu fator de potência dentro da área representada. A faixa de fator de potência para unidades maiores que 6 kW esta entre 0,9 indutivo e capacitivo, enquanto para unidades entre 3 kW e 6 kW é 0,95 indutivo e capacitivo, e para unidades menores que 3 kW é 0,98 indutivo e capacitivo .

**Figura 9** - Área de operação do GD conectado à rede de distribuição.



Fonte: Adaptado de Samadi (2014).

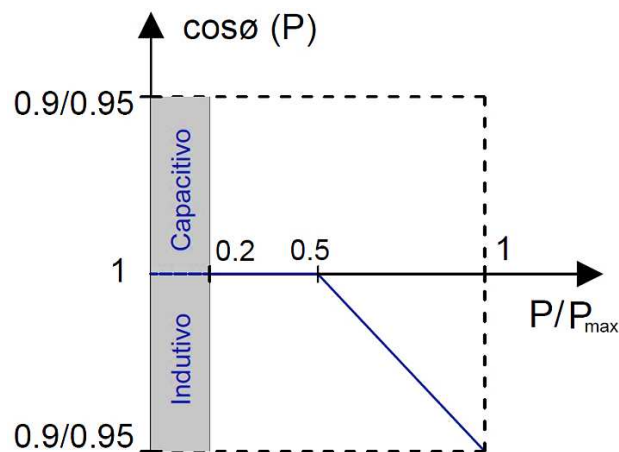
Após uma mudança na potência ativa, o sistema de GD deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente para corresponder ao valor de FP predefinido. Qualquer ponto de operação resultante destas definições/curvas deve ser atingido em, no máximo, 10s (EDP, 2016).

A norma europeia EN 50438 (EUROPEAN STANDATDS, 2013) segue as curvas características definidas pelos operadores dos sistemas de distribuição. Sendo o FP do microgerador capaz de operar nos seguintes modos:

- Com fator de potência constante, FP constante.
- Com fator de potência dependente da potência ativa, FP (P).

A norma alemã VDE 4105 sugere também, que o modo FP constante seja usado em caso de GD com geração de potência ativa constante. Quando se trata de GD com geração intermitente, a norma recomenda o uso do modo baseado no FP (P). Esta norma, com intuito de reduzir o aumento de tensão provocado pelo próprio gerador, é mais específico nos requisitos da característica FP (P) dos GDs e é mostrada na Figura 10, onde  $P$  e  $P_{max}$  representam, respectivamente, a entrada e a máxima potência ativa do gerador. O objetivo desta característica FP (P) exige que o gerador funcione em um modo indutivo quando a potência ativa de alimentação passa por um limite de 50% da  $P_{max}$  para mitigar o aumento de tensão associado.

**Figura 10 - Característica FP (P).**



Fonte: Adaptado de Samadi (2014).

### 3 AUMENTO DA TENSÃO E SOLUÇÕES DE MITIGAÇÃO

---

Um dos principais impactos do elevado nível da penetração de geradores fotovoltaicos (FVs) e outros geradores distribuídos (GDs) é o aumento de tensão em regime permanente ao longo do alimentador da rede de baixa tensão (BT). Inicialmente neste capítulo, uma análise teórica é realizada com o objetivo de obter maior entendimento sobre o problema de aumento de tensão. Em seguida, apresentam-se algumas soluções para mitigar o problema de aumento da tensão.

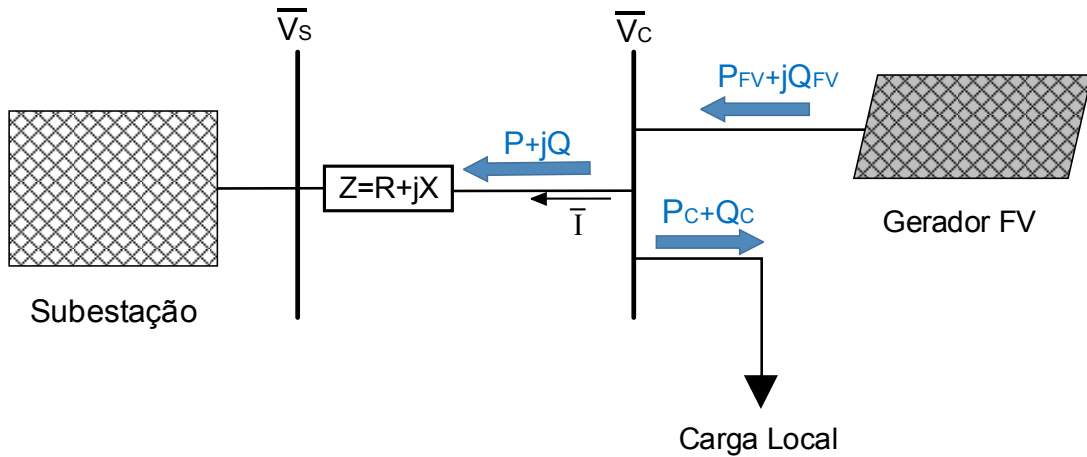
#### 3.1 AUMENTO DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE – ANÁLISE TEÓRICA

Sem geradores FVs instalados na rede de distribuição, o perfil da tensão ao longo do alimentador da rede cai devido às impedâncias das linhas e às cargas. Com a integração da geração FV distribuída ao longo da rede, o perfil de tensão melhora porque se reduz a queda de tensão, já que reduz o fluxo de potência no alimentador. Entretanto, se a geração FV for maior que a demanda no seu ponto de conexão, então a potência excedente flui de volta para a rede. O excedente de potência da geração FV produz o fluxo de potência reverso no alimentador e este, por sua vez, dá lugar ao aumento de tensão no alimentador (PANTZIRIS, 2014). Para entender melhor como pode ocorrer o aumento de tensão provocado pela conexão de um gerador FV, a análise apresentada em Aryes (2010) é descrita a seguir.

Para o sistema da Figura 11, o fluxo de potência exportado pelo gerador FV em direção à subestação é dado pela equação (1), em que  $\bar{V}_C$  é a tensão na barra de carga,  $P, Q$  e  $I$  são, respectivamente, potência ativa, potência reativa e corrente exportadas da barra de carga em direção à barra da subestação.

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{V}_C \bar{I}^* \quad (1)$$

**Figura 11** - Representação simplificada de uma rede de distribuição com gerador FV.



Fonte: Adaptado de Ayres (2010).

Da equação (1), a corrente da barra de carga em direção à barra da subestação é dada por:

$$\bar{I} = \frac{P - jQ}{\bar{V}_C^*} \quad (2)$$

E usando a lei das malhas de Kirchhoff, a tensão na barra de carga é:

$$\bar{V}_C = \bar{V}_S + (R + jX) \bar{I} \quad (3)$$

Substituindo a equação (2) na equação (3), tem-se que o aumento de tensão na barra de carga devido à conexão de um gerador FV é dado por:

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_C - \bar{V}_S = (R + jX) \left( \frac{P - jQ}{\bar{V}_C^*} \right) = \frac{(RP + XQ) + j(XP - RQ)}{\bar{V}_C^*} \quad (4)$$

Em redes de distribuição, a relação  $X/R$  tende a ser baixa de forma que os termos que multiplicam o valor de resistência não podem ser desprezados, contudo, a diferença entre os ângulos de fase das tensões nesse tipo de rede é aproximadamente zero. Assumindo que a tensão na barra de carga como sendo puramente real, então despreza-se a parte imaginária do numerador da equação (4). Portanto, a variação de tensão entre o ponto de conexão do gerador e a subestação torna-se um número real, e é dado por:

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V_C} \quad (5)$$



Finalmente, as potências ativa e reativa líquidas injetadas no sistema pela barra de carga são dadas pela diferença entre a potência gerada ( $P_{FV} + Q_{FV}$ ) e a potência consumida localmente ( $P_C + Q_C$ ), originando a expressão (6).

$$\Delta V = \bar{V}_C - \bar{V}_S \approx \frac{R(P_{FV} - P_C) + X(Q_{FV} - Q_C)}{V_C} \quad (6)$$

Analisando a equação (6), podem ser extraídas algumas conclusões a respeito da variação de tensão em um barra provocada pela conexão de um gerador FV com potência pré-determinada, que são resumidas em:

- A potência ativa fornecida pelo gerador FV possui maior impacto que a potência reativa sobre a variação de tensão na barra por duas razões principais: em redes de BT o valor de  $R$  é frequentemente maior que  $X$  e normalmente os geradores FVs são controlados de forma de manter a injeção de potência reativa ( $Q_{FV}$ ) próxima de zero.
- Quanto menor a potência demandada pela carga, maior a variação de tensão na barra.
- Quanto maiores parâmetros  $R$  e  $X$ , maior a variação de tensão na barra.
- Quanto menor a magnitude de tensão na barra, maior a variação da mesma.

Deve-se notar que as observações acima são realizadas mantendo-se os demais parâmetros da equação (6) constantes. Ainda com base na equação (6), sendo que a tensão na subestação ( $V_S$ ) é constante e  $P_C > 0$  por se tratar de um gerador, pode-se concluir que um gerador com FP unitário ou capacitivo ( $Q_{FV} \geq 0$ ) eleva a magnitude de tensão na barra de conexão. Um gerador com FP indutivo ( $Q_{FV} < 0$ ) tipicamente também provoca elevação de tensão na barra, pois  $RP_{FV} + XQ_{FV} > 0$ . Entretanto, caso o FP do gerador seja tal que  $RP_{FV} + XQ_{FV} < 0$ , ocorre redução de tensão na barra de conexão e nas barras vizinhas. A Tabela 5 resume a descrição deste parágrafo.

**Tabela 5** - Comportamento do módulo de tensão na barra de carga para diferentes fatores de potência do gerador FV.

Casos	Potência reativa ( $Q_{FV}$ ) intercambiada pelo gerador FV	Fator de potência	$RP_{FV} + XQ_{FV}$	Resultado da tensão no ponto de conexão ( $V_C$ )
Caso 1	$Q_{FV} > 0$	Capacitivo	$> 0$	Elevação
Caso 2	$Q_{FV} = 0$	Unitário	$> 0$	Elevação
Caso 3	$Q_{FV} < 0$	Indutivo	$> 0$	Elevação
Caso 4	$Q_{FV} < 0$	Indutivo	$< 0$	Redução

Fonte: Ayres (2010).

Para facilitar a análise, considerou-se um sistema composto apenas pela barra da subestação e a barra terminal do gerador, contudo, a análise acima é válida para sistemas com múltiplas barras e derivações.

Para evitar níveis excessivos de injeção ou consumo de potência reativa as concessionárias limitam, em suas normas técnicas, o FP com a qual o gerador FV pode operar.

### 3.2 SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA DE AUMENTO DE TENSÃO

Em Vandenberg et al. (2013), D'hulst e Peeters (2010), e Pantziris, K. (2014) foram propostas algumas soluções para mitigar o aumento da tensão provocada pelo elevado nível da penetração da geração FV em redes de BT, e são:

- a) Reforço da rede de BT.
- b) Uso de transformadores MT/BT com OLTC;
- c) Controle de potência reativa dos geradores fotovoltaicos;
- d) Redução de potência ativa injetada dos geradores fotovoltaicos;
- e) Armazenamento de energia.

#### 3.2.1 Reforço da rede de BT

De acordo com a equação (6), a redução da impedância do condutor resultaria em um aumento de tensão mais baixo. A fim de conseguir essa diminuição, devem ser usados condutores com maior secção transversal. Atualmente, esta é a abordagem típica aplicada (NAVARRO; OCHOA 2015; PANTZIRIS, K. 2014), antes de outras soluções que ajudam a controlar a tensão. Está solução implica no aumento da capacidade da rede, melhorando os transformadores de distribuição para maiores potência ou reforçando os alimentadores de BT

através da adição de condutores em paralelo ou substituição de condutores antigos por outros de maior bitola. No entanto, este é um procedimento bastante caro, especialmente quando se utilizam cabos subterrâneos e portanto os OSDs tentam evitar ou postergar estes custos, já que os elementos da rede, tais como alimentadores e transformadores estão ainda longe de aproveitar sua capacidade máxima (GEIBEL, D. et al. 2012).

### 3.2.2 Transformadores MT/BT com OLTC

Segundo Pantziris (2014) e de acordo com a norma EN 50160 (2010) a faixa de tensão admissível para os consumidores conectados à rede de distribuição de BT é de 230 V  $\pm 10\%$  (tensão fase-neutro). Atualmente a regulação de tensão na rede de distribuição é limitada principalmente pelo OLTC do transformador de AT/MT. Desse modo, a tensão nos terminais de MT do transformador pode ser adaptada às condições atuais da rede com o fim de manter a tensão dentro dos limites permissíveis. O nível de tensão na subestação AT/MT é normalmente configurado em 104% para o caso de carga elevada. Até agora, a mudança do tap de um transformador MT/BT é realizada principalmente em vazio e o nível de tensão pode ser tão alta como 106% (DEGNER et al. 2011). Com essa configuração e com o objetivo de cobrir um cenário de carga elevada, um aumento de tensão de apenas 4% da tensão nominal é permitido até que o limite da tensão superior seja atingido em condições de baixa carga e de elevada geração FV.

Uma forma de controlar a tensão pode ser através do uso de um transformador de MT/BT com OLTC. O nível de tensão na barra de BT do transformador já não depende do nível de tensão variável do lado de MT, mas pode ser controlada, por exemplo, por meio de um valor constante e uma faixa de controle utilizando a relação de transformação variável. A mudança de tap é necessária quando a faixa do controle é excedida. Desta forma, o aumento de tensão permitido devido à injeção dos GDs, aumentaria de 3% até 10% (limite superior definido pela norma EN 50160). O uso desta faixa, mais ampla, de tensão pode permitir o aumento de GDs, e que a restrição de novas instalações já não se deve às limitações de faixa de tensão (GEIBEL et al., 2012).

Existem várias estratégias de controle de OLTC. As mais convencionais usam pontos de ajuste de tensão nos terminais de BT do transformador, compensação de queda da linha ou medição de fluxo de potência local. Os de última geração utilizam valores de medição da tensão remota dos medidores inteligentes conectados nos consumidores. Os mais convencionais poderiam evitar investimento e custos operacionais para a tecnologia de

informação e comunicação adicional, mas pode ter outros inconvenientes técnicos como ajustes de tap não desejados, devido a uma má interpretação dos valores medidos localmente. Os de última geração, por outro lado, podem necessitar de adaptações na localização das unidades de medição quando ocorrerem possíveis mudanças dentro da rede de BT (STETZ et al., 2013).

Os projetos pilotos já estão em desenvolvimento, a fim de avaliar a eficácia dos transformadores de MT/BT com OLTC. No sudoeste da Alemanha, por exemplo, um operador do sistema de distribuição equipou uma de suas estações transformadoras rurais de MT/BT com um protótipo de transformador de 400 kVA regulado, a fim de testar os seus benefícios. Os resultados gerais foram animadores. No entanto, analisando os dados recolhidos durante as primeiras semanas de operação mostrou-se que os problemas de flicker podem ocorrer quando o algoritmo de controle faz com que o tap comutador avance e volte em pequena sucessão. Portanto, esta solução não é madura o suficiente para ser aceita como viável (CONSTANTIN et al., 2012; KORNER et al., 2012).

### 3.2.3 Controle de Potência Reativa dos geradores FVs

Da Figura 11 e da equação (5), supondo que seja alcançado o limite de tensão máximo permitido ( $V_{Cmax}$ ) no ponto de conexão do gerador FV, se desejamos aumentar a potência ativa injetada ( $P'$ ) sem aumentar ainda mais a tensão, a solução pode ser o uso de certa quantidade de potência reativa ( $Q'$ ) (TONKOSKI et al., 2011). Supõe-se que a magnitude de tensão na subestação não alterou.

$$\frac{P'R + Q'X}{V_{Cmax}} \approx \frac{PR + QX}{V_{Cmax}} \quad (7)$$

Então pode-se calcular a mudança da potência reativa requerida no ponto de conexão para manter a tensão máxima permitida, para certo aumento da potência ativa injetada pelo gerador FV, da equação anterior tem-se:

$$\begin{aligned} (P' - P)R + (Q' - Q)X &= 0 \Rightarrow \Delta P R + \Delta Q X = 0 \Rightarrow \\ \Delta Q &= -\frac{R}{X} \cdot \Delta P \end{aligned} \quad (8)$$

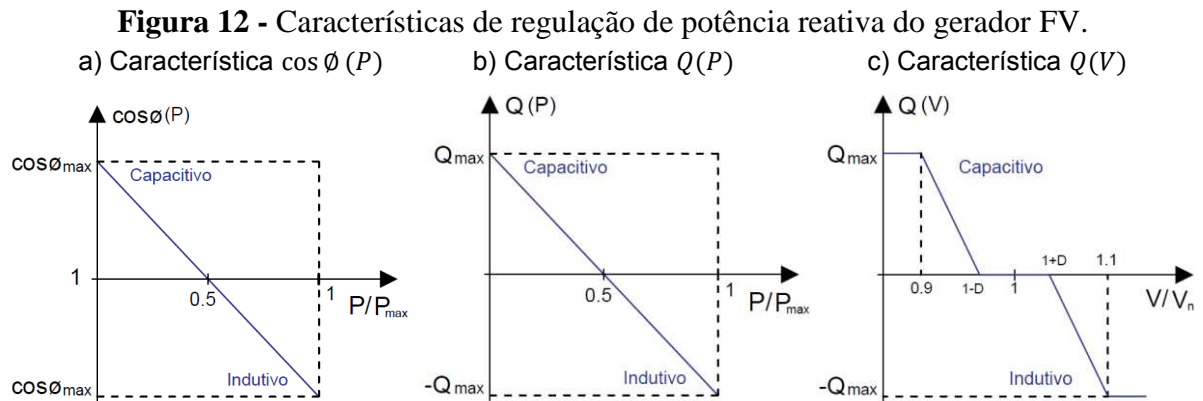
Da Equação (8), verifica-se que à medida em que a relação R/X do alimentador aumenta, valores mais elevados de injeção de potência reativa da rede serão necessários para

evitar o aumento de tensão. Desta forma, a eficiência de um controle de tensão através da regulação de potência reativa depende das características da rede (TONKOSKI et al., 2011).

A alta capacidade dos inversores FVs para a regulação de potência reativa torna-se desejável para mitigar os aumentos de tensão, alguns metodos com controle de potência reativa são mencionadas a seguir (DEMIROK, et al., 2011):

- Fator de potência como função da potência ativa,  $\cos \phi (P)$ .
- Potência reativa como função da potência ativa,  $Q(P)$ .
- Potência reativa como função da tensão,  $Q(V)$ .

Cada um destes métodos de controle definidos usam um valor constante e/ou equações selecionadas de primeira ordem que podem ser facilmente implementadas nos controladores dos inversores e que podem ser modificadas remotamente (DEMIROK et al., 2011). As características de controle destes métodos são ilustradas na Figura 12.



Fonte: Adaptado de Samadi (2014).

### 3.2.4 Redução de potência ativa dos geradores FVs

A opção de reduzir potência ativa pode ser vista como muito atrativa para os OSDs, já que pressupõe o reforço da rede e, portanto, poderiam ser consideradas em alguns casos como uma forma de aumentar a integração dos geradores FVs.

Em Ferreira et al. (2013) propõem abordagens para a redução ótima de potência ativa, com os objetivos de obter o máximo benefício dos geradores FVs e prevenir problemas elevação de tensão. Estas abordagens são designadas como controle global e controle local de tensão. O controle global é feito de forma a controlar as tensões da rede, monitorizando e ajustando varias tensões. O controle local, como o nome indica, é feito analisando e corrigindo apenas a tensão de cada ponto de injeção de potência dos geradores FVs.

Neste trabalho são analisadas, desenvolvidas, estendidas e comparadas estas abordagens de controle local e global para solucionar o aumento de tensão que causam os geradores FVs nas redes de distribuição. No capítulo 5.3 são apresentadas as descrições das abordagens mencionadas nesta seção.

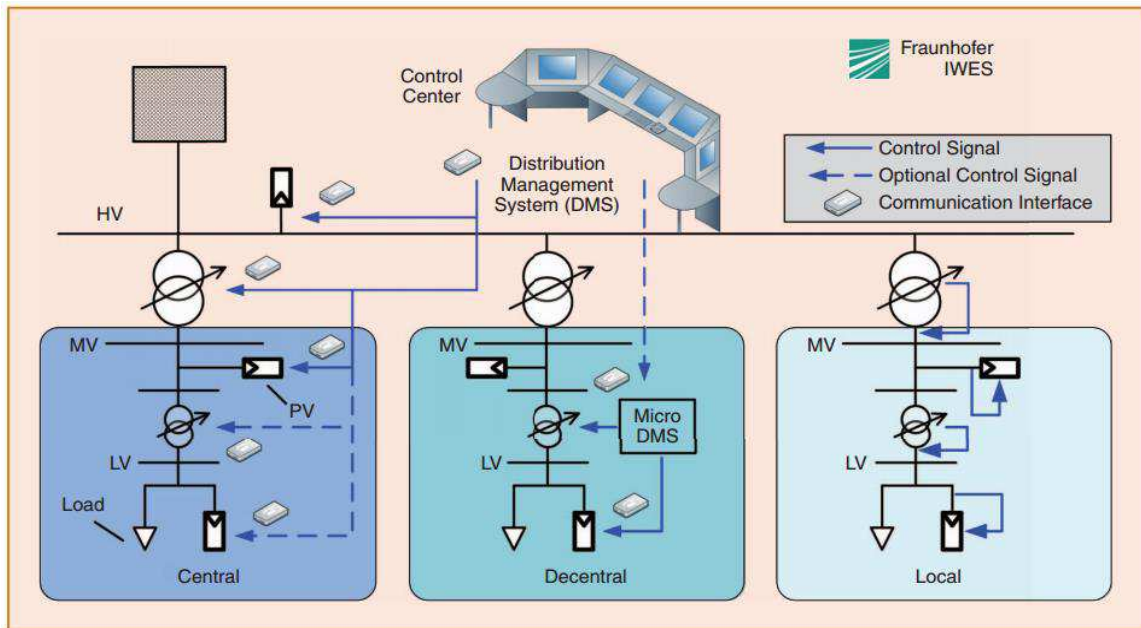
### **3.2.5 Armazenamento de energia**

Para mitigar o aumento de tensão em um alimentador de distribuição de BT com alto nível de penetração de geração FV, também têm sido propostos opções de sistemas de armazenamento de energia. Os sistemas de armazenamento de energia podem ser uma bateria (fluxo de potência direcional) ou uma carga AC controlável (fluxo de potência unidirecional), por exemplo bombas de calor (CONSTANTIN et al., 2012). Quando se trata dos sistemas de armazenamento de energia baseado em bateria, dois conceitos em geral estimulam o interesse. O primeiro conceito é baseado em um sistema de bateria que pode proporcionar suporte de tensão para todo o alimentador desde uma localização estratégica definida, enquanto que o segundo conceito é baseado em um número de sistemas de baterias distribuídos para obter o mesmo objetivo, por exemplo com sistemas de baterias em cada localização do sistema FV (MARRA et al., 2013).

## **3.3 CATEGORIZAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE TENSÃO COM BASES EM SUAS NECESSIDADES DE COMUNICAÇÃO**

Com base em seus requisitos de comunicação, três tipos de estratégias de controle de tensão podem ser distinguidos (Figura 13): Local, descentralizada e central (PANTZIRIS, 2014).

**Figura 13** - Categorização das estratégias de controle de tensão com base a suas necessidades de comunicação.



Fonte: Pantziris (2014).

### 3.3.1 Estratégia local

A estratégia de controle local não necessita de dispositivos de comunicação. Os sistemas FVs reagem a situações específicas da rede de distribuição de acordo com seus parâmetros predefinidos e suas medições, por exemplo tensão ou frequência, de seu ponto de conexão na rede de distribuição.

Os inversores FVs conectados às redes de distribuição, podem contribuir na redução do impacto da tensão em tempo de alta irradiação solar, utilizando os seus recursos de controle de potência ativa e reativa. Eles reduzem a necessidade de medidas adicionais de reforço da rede e não requerem informação adicional e infraestrutura de comunicação. Portanto, as estratégias locais de controle de tensão podem ser facilmente integradas no funcionamento da rede global (PANTZIRIS, 2014).

### 3.3.2 Estratégia descentralizada

A estratégia de controle descentralizada pode ser obtida através da coordenação de vários componentes ativos da rede de distribuição, automatizados e sem regulação por parte do centro de controle da rede do operador do sistema. No entanto, não apenas as medições locais, mas também uma troca de informações é necessária entre os componentes controláveis

individualmente, tais como subestações de distribuição e inversores FVs, para aumentar o desempenho geral do sistema (PANTZIRIS, 2014).

### **3.3.3 Estratégia central**

Em contraste com a estratégia de controle de tensão descentralizada, onde os subgrupos da rede de distribuição são controlados de forma independente, a estratégia de controle central aponta para o controle coordenado de todo o sistema do centro de controle do sistema de distribuição. Portanto requer um conjunto de informações, com o qual estabelece o estado atual do sistema, assim como o conhecimento dos limites em que o sistema necessita para operar (PANTZIRIS, 2014).



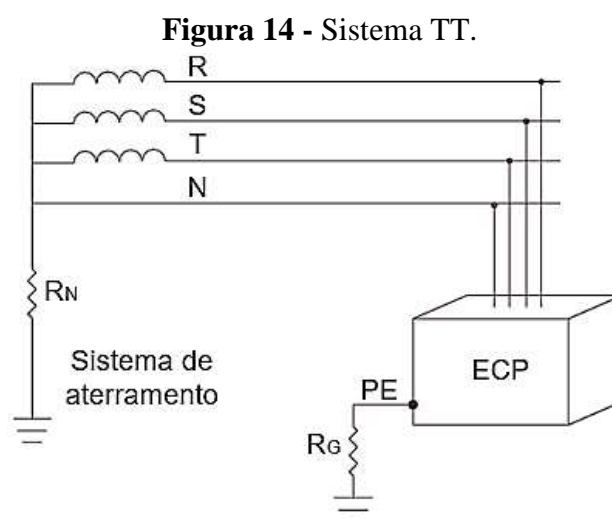
## 4 MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os sistemas típicos de aterramento da rede de BT, assim como também as modelagens matemáticas dos elementos presentes na rede de distribuição de BT como as linhas aéreas, geradores FVs e cargas.

### 4.1 SISTEMA DE ATERRAMENTO DA REDE DE BAIXA TENSÃO

A maioria dos consumidores finais das redes de BT são consumidores residenciais que estão conectados à rede de forma monofásica. Portanto, as correntes de retorno por neutro na rede podem ser elevadas. Às vezes as correntes de retorno por neutro são ainda maiores do que as correntes de fase (FERREIRA, P. et al. 2013). Estas correntes do neutro dependem do sistema de aterramento e do neutro em uso, que muda de distribuidora para distribuidora e de país para país (MELIPOULOS et al., 1998).

Vários tipos de aterramento estão disponíveis na Norma Brasileira NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 2008). Estes tipos são geralmente designados pelo sistema de aterramento TN, TT e TI. Os sistemas básicos TN e TT são comumente usados na Europa e Estados Unidos, e são caracterizados pelo neutro do transformador aterrado e os quadros de carga elétrica conectados ao neutro NBR 5410 (ABNT, 2008). Na Figura 14 mostra-se o sistema TT e na Figura 15 o sistema TN-C.

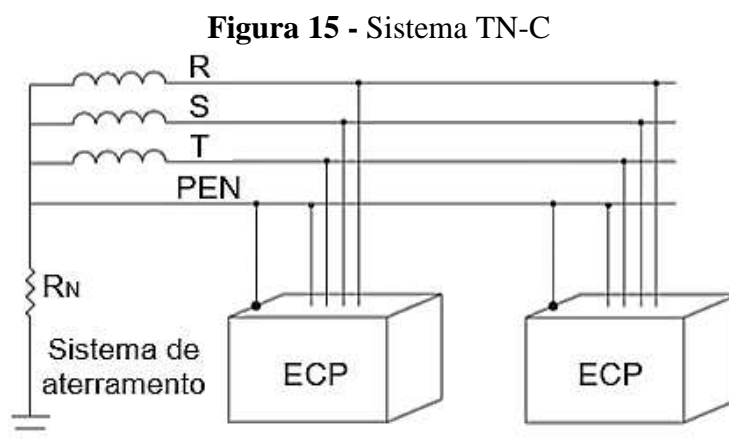


Fonte: Adaptado de ABNT (2008).

Onde:

ECP É a parte condutora exposta (exemplo o gabinete de equipamento).

- PE Condutor de proteção.
- TT É o sistema de energia solidamente aterrado, onde a parte condutora exposta (ECP) está diretamente ligada a terra, independente do aterramento de qualquer ponto do sistema de energia.



Fonte: Adaptado de ABNT (2008).

Onde:

- PEN É a atuação do condutor neutro também como condutor de proteção (PE).
- TN-C Sistema de energia solidamente aterrado, as partes condutoras expostas (ECPs) são diretamente ligados ao ponto neutro e ao condutor de proteção (PE) e neutro são combinadas em um único condutor numa parte do sistema.

Em Ferreira et al. (2013) consideram, para redes de BT em Portugal, que a impedância de ligação a terra dos quadros de cargas e outras instalações de ligação a terra são alta o suficiente para considerar que toda a corrente flui de volta para o transformador através do neutro, isto é, que a corrente através das impedâncias de carga de ligação a terra é insignificante durante a operação normal. Neste caso, o sistema é representado por um circuito de quatro fios (3-fases e neutro) em vez de um circuito de cinco fios. Portanto o sistema de aterramento é TN-C.

Neste trabalho consideramos, para redes de BT do Brasil, que a corrente neutra flui de volta para o transformador através do neutro e da terra durante a operação normal. Neste caso, o sistema é representado por um circuito de quatro fios (3-fases e neutro) (OCHOA, 2003). Portanto o sistema de aterramento é TT.

## 4.2 MODELAGEM DA LINHA ELÉTRICA DA REDE DE BAIXA TENSÃO

Apresenta-se a modelagem das linhas trifásicas em BT com correntes que retornam pelo condutor neutro e pela terra. Para modelar a linha trifásica procede-se similarmente à metodologia usada para a linha de Carson (OCHOA, 2003). Com finalidade de representar a impedância série de uma linha trifásica com correntes de retorno pelo neutro e pela terra, será usada a seguinte matriz:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} & Z_{RN} & Z_{Rg} \\ Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} & Z_{SN} & Z_{Sg} \\ Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} & Z_{TN} & Z_{Tg} \\ Z_{NR} & Z_{NS} & Z_{NT} & Z_{NN} & Z_{Ng} \\ Z_{gR} & Z_{gS} & Z_{gT} & Z_{gN} & Z_{gg} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Neste trabalho considera-se que nas linhas de BT as impedâncias mútuas  $Z_{ij}$  são desprezados. As impedâncias próprias  $Z_{ii}$  dos condutores  $i$  e a impedância de terra  $Z_{gg}$  são deduzidos das equações de Carson (OCHOA, 2003), e são dadas pelas seguintes equações:

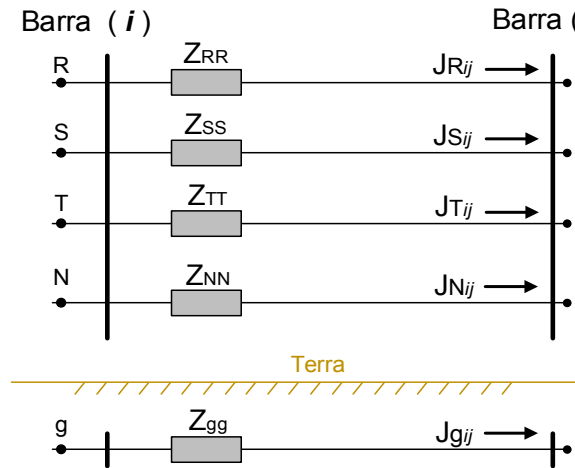
$$\bar{Z}_{ii} = r_i + j4\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln\left(\frac{2h_i}{RMG_i}\right) \quad (10)$$

$$\bar{Z}_{gg} = \pi^2 \cdot 10^{-4} \cdot f - j0,0386 \cdot 8\pi \cdot 10^{-4} \cdot f + j4\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln\frac{2}{5,6198 \cdot 10^{-3}} \quad (11)$$

Onde:

- $i$  São os condutores  $R, S, T$  e  $N$ .
- $r_i$  Resistência do condutor  $i$  em  $\Omega/km$ .
- $h_i$  Altura do condutor  $i$  em metros.
- $RMG_i$  Raio médio geométrico do condutor  $i$  em metros.
- $f$  Frequência.

O esquema equivalente da linha trifásica em BT a cinco fios entre duas barras adjacentes  $i$  e  $j$  é mostrada na Figura 16:

**Figura 16** - Esquema equivalente da linha trifásica em BT.

A representação da impedância série é uma matriz de 5x5 expressada na equação (9), e pode ser representada também por uma matriz de 3x3 onde os efeitos do cabo neutro e do aterramento são transferidos aos cabos de fase através de operações detalhadas nos parágrafos seguintes.

Na Figura 16 empregamos a lei de tensões de Kirchhoff para escrever as equações das tensões do segmento  $i$  e  $j$  da linha, e obtemos as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} V_{RNj} &= V_{RNi} - Z_{RR} \cdot J_{Rij} + Z_{NN} \cdot J_{Nij} \\ V_{SNj} &= V_{SNi} - Z_{SS} \cdot J_{Sij} + Z_{NN} \cdot J_{Nij} \\ V_{TNj} &= V_{TNi} - Z_{SS} \cdot J_{Tij} + Z_{NN} \cdot J_{Nij} \end{aligned} \quad (12)$$

Como a soma das correntes das fases, neutro e terra nos ramos  $i$  e  $j$  é zero temos:

$$J_{Nij} + J_{gij} = - (J_{Rij} + J_{Sij} + J_{Tij}) \quad (13)$$

Da Figura 16 para o condutor neutro e a terra, tem-se:

$$Z_{NN} \cdot J_{Nij} = Z_{gg} \cdot J_{gij} \quad (14)$$

Substituindo a equação (14) na (13), obtém-se a equação (15).

$$J_{Nij} = - (J_{Rij} + J_{Sij} + J_{Tij}) \cdot \left( \frac{Z_{gg}}{Z_{gg} + Z_{NN}} \right) \quad (15)$$

Multiplicando  $Z_{NN}$  na Equação (15), obtém-se:

$$Z_{NN} \cdot J_{Nij} = - \left( J_{Rij} + J_{Sij} + J_{Tij} \right) \cdot \left( \frac{Z_{NN} \cdot Z_{gg}}{Z_{gg} + Z_{NN}} \right) \quad (16)$$

A equação (16) pode ser reescrita como:

$$Z_{NN} \cdot J_{Nij} = - \left( J_{Rij} + J_{Sij} + J_{Tij} \right) \cdot Z_{gN} \quad (17)$$

Sendo:

$$Z_{gN} = \left( \frac{Z_{NN} \cdot Z_{gg}}{Z_{gg} + Z_{NN}} \right) \quad (18)$$

Substituindo a equação (17) na expressão (12), obtemos a seguinte:

$$\begin{aligned} V_{RNj} &= V_{RNi} - (Z_{RR} + Z_{gN}) \cdot J_{Rij} - Z_{gN} \cdot J_{Sij} - Z_{gN} \cdot J_{Tij} \\ V_{SNj} &= V_{SNi} - Z_{gN} \cdot J_{Rij} - (Z_{SS} + Z_{gN}) \cdot J_{Sij} - Z_{gN} \cdot J_{Tij} \\ V_{TNj} &= V_{TNi} - Z_{gN} \cdot J_{Rij} - Z_{gN} \cdot J_{Sij} - (Z_{SS} + Z_{gN}) \cdot J_{Tij} \end{aligned} \quad (19)$$

Colocando as equações anteriores em forma matricial, obtemos a seguinte:

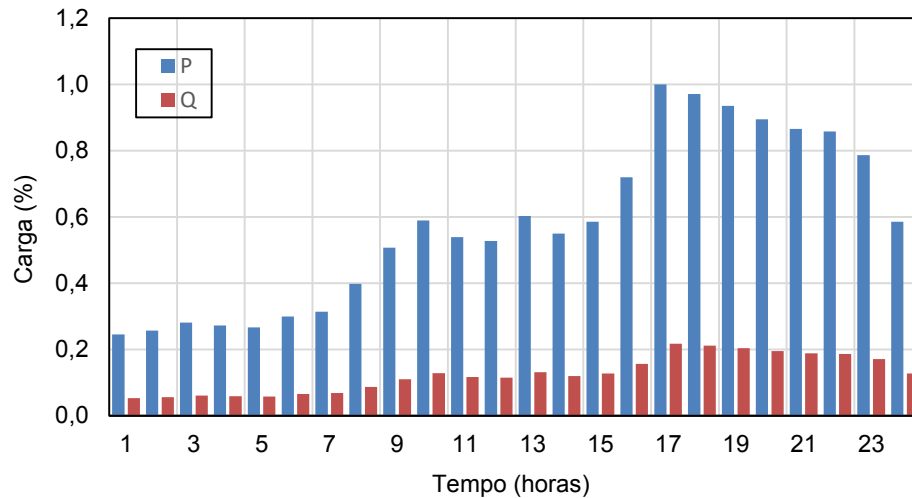
$$\begin{bmatrix} V_{RNj} \\ V_{SNj} \\ V_{TNj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{RNi} \\ V_{SNi} \\ V_{TNi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{RR} + Z_{gN} & Z_{gN} & Z_{gN} \\ Z_{gN} & Z_{SS} + Z_{gN} & Z_{gN} \\ Z_{gN} & Z_{gN} & Z_{SS} + Z_{gN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{Rij} \\ J_{Sij} \\ J_{Tij} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Da equação (20), obtemos a impedância série trifásica reduzida e é dada por:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{RR} + Z_{gN} & Z_{gN} & Z_{gN} \\ Z_{gN} & Z_{SS} + Z_{gN} & Z_{gN} \\ Z_{gN} & Z_{gN} & Z_{SS} + Z_{gN} \end{bmatrix} \quad (21)$$

### 4.3 MODELAGEM DA CARGA

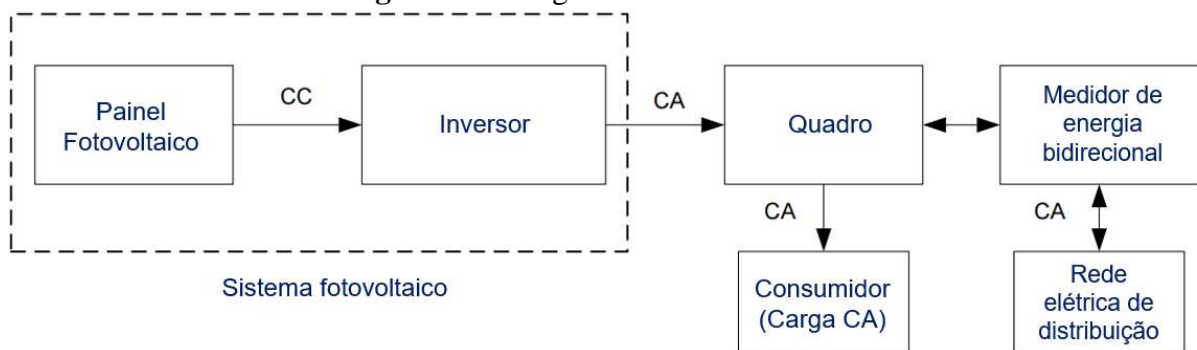
Neste trabalho, todas as cargas são modeladas tipo potência constante, são conectadas em Y aterrado e possuem um perfil típico de carga residencial (Francisquini, A. 2006). Este perfil está apresentado na Figura 17. Os valores variam em escala unitária e são multiplicados aos valores de carga que correspondem ao valor máximo para obter o perfil de carga ao longo de um período, como horas, dias ou anos.

**Figura 17 - Curva de carga ao longo de um dia.**

Fonte: Adaptado de Francisquini (2006).

#### 4.4 MODELAGEM DO SISTEMA FV

Na Figura 18 é ilustrado o esquema de um sistema FV composto pelos painéis FVs e pelo inversor. Os painéis FVs transformam a radiação solar em energia elétrica com corrente contínua, que por sua vez é convertida em energia elétrica em corrente alternada através do inversor. Em Villalva (2010) há uma explicação detalhada do sistema FV e dos parâmetros que podem ser considerados .

**Figura 18 - Diagrama de um sistema FV.**

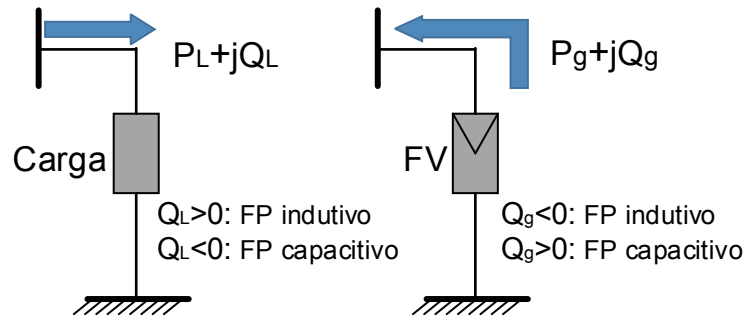
Fonte: Adaptado de Villalva (2010).

A geração FV é cada vez mais relevante nas redes de distribuição, assim é importante a sua modelagem matemática no fluxo de carga. O sistema FV conectado à rede de distribuição pode funcionar num dos três modos seguintes (MARTINS, 2012):

- Fornecendo potência constante;
- Fornecendo potência com um fator de potência preestabelecido;
- Fornecendo potência com uma tensão preestabelecida (barra PV).

No contexto de fluxo de carga, nos dois primeiros modos, os nós de geração podem ser modelados como nós tipo PQ e, portanto são modelados como cargas negativas representado na Figura 19, o que não traz alterações significativas nas equações do fluxo de carga (MISHRA et al., 2014). No terceiro caso, os nós de geração são modelados como nós tipo PV, o que leva que sejam desenvolvidos procedimentos especiais para manter a tensão no valor requerido e para monitorar a sua produção de potência reativa, ou seja, verificar se esta se encontra entre os limites permitidos.

**Figura 19** - Modelos da carga e do gerador FV e seus fatores de potência.



Fonte: Adaptado de Mishra (2014).

Com sistemas FVs modelados como cargas negativas, as cargas equivalentes no nó  $i$  podem ser expressas como:

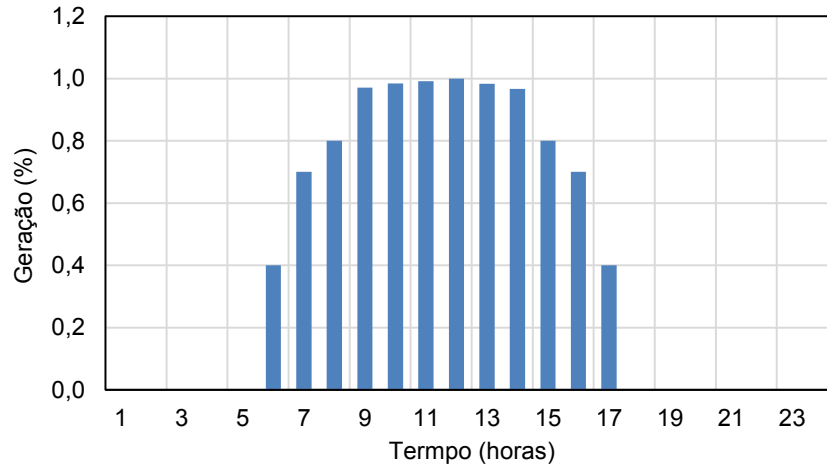
$$P_i = P_{Li} - P_{gi} \quad (22)$$

$$Q_i = Q_{Li} - Q_{gi} \quad (23)$$

Onde  $P_{Li}$  e  $Q_{Li}$  são cargas de tipo potência constante conectados no nó  $i$ ,  $P_{gi}$  e  $Q_{gi}$  são potências real e reativa injetadas pelo sistema FV conectada no nó  $i$ .

Neste trabalho, um perfil típico diário de geração FV, com base em dados do sistema de informação geográfica fotovoltaica (PVGIS, 2012), foi utilizada e é apresentado na Figura 20. Os valores variam em escala unitária e são multiplicados pelo valor pico de geração para obter o perfil de geração ao longo de um período.

**Figura 20** - Perfil típico diário de geração FV.



Fonte: Adaptado de Sistema Fotovoltaico de Informação Geográfica-PVGIS (2012).



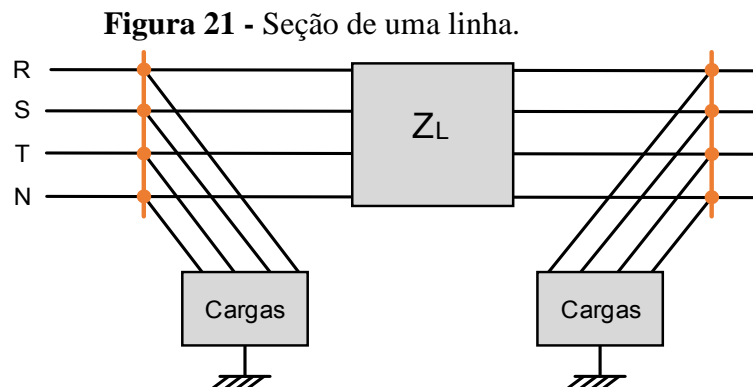
## 5 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo, apresentam-se a solução do cálculo do fluxo de potência para redes de distribuição trifásicas a quatro fios, assim como a formulação para obter a matriz de sensibilidade de tensão da rede de distribuição trifásica, e por último mostramos as estratégias global e local de controle de tensão para solucionar o problema de aumento de tensão dos nós de conexão dos geradores FVs provocado pela injeção de potência destes geradores na rede de distribuição de energia elétrica.

### 5.1 FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM BT

O cálculo de fluxo de carga é uma ferramenta importante para o planejamento e operação do sistema de energia elétrica. Para diversas aplicações em redes de distribuição, diversos métodos de fluxo de carga têm sido desenvolvidos nas últimas duas décadas (MISHRA et al., 2010). Entre os diversos métodos de fluxo de carga para sistemas de distribuição o método de varredura direta e inversa, denominado *Forward Backward Sweep* em inglês, provou ser o método mais simples e rápido para realizar o fluxo de carga do sistema de distribuição (MISHRA et al., 2014).

Nesta Dissertação, o algoritmo de fluxo de carga trifásico com base ao método de varredura direta e inversa (MISHRA et al., 2014) foi utilizado. Na Figura 21 ilustra-se a seção de uma linha da rede trifásica a quatro fios utilizado para o fluxo de carga, sendo que a matriz de impedância série ( $Z_L$ ) para a seção da linha é calculada através da equação (21).



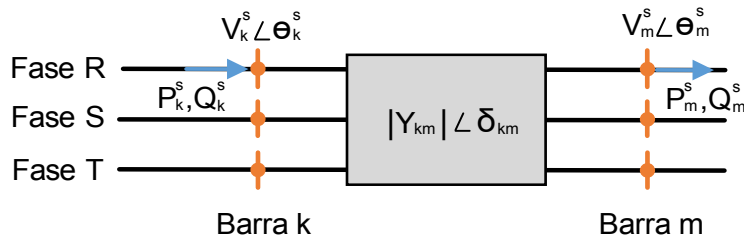
Fonte: Adaptado de Ochoa (2003).

## 5.2 ANÁLISE DA MATRIZ SENSIBILIDADE DE TENSÃO

O método de análise da matriz sensibilidade de tensão é utilizado para obter uma medida quantitativa da variação de potência ativa e reativa dos geradores FVs sobre as tensões da rede de BT, e assim poder ajudar a resolver o problema de aumento de tensão provocado pela injeção de potências dos geradores FVs na rede de distribuição. Este método ajuda a obter os pontos mais eficazes para o controle de tensão da rede de distribuição (Demirok et al., 2011).

A matriz sensibilidade de tensão é obtida fazendo a inversa da matriz jacobiana que por sua vez se calcula linearizando e resolvendo as duas equações não lineares de fluxo de potência, equações (24) e (25), em torno do ponto de operação do sistema (Demirok et al., 2011). Na Figura 22 mostram-se as notações de fluxo de carga de dois barramentos onde  $P_k^s$ ,  $Q_k^s$ ,  $V_k^s$ ,  $\theta_k^s$ ,  $Y_{km}^{st}$ , e  $\delta_{km}^{st}$  indicam, respectivamente, a injeção de potência ativa na barra k fase s, a injeção de potência reativa na barra k fase s, a magnitude da tensão de nó na barra k fase s, o ângulo da tensão de nó na barra k fase s, a magnitude da admitância de linha da barra k fase s à barra m fase t, e o ângulo da admitância de linha na barra k fase s à barra m fase t.

**Figura 22** - Notações do fluxo de potência para dois barramentos relacionadas às equações (24) e (25).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

$$P_k^s = V_k^s \cdot \sum_{t \in \Omega_f} \sum_{m \in K} V_m^t |Y_{km}^{st}| \cos(\theta_m^t - \theta_k^s + \delta_{km}^{st}) \quad (24)$$

$$Q_k^s = -V_k^s \cdot \sum_{t \in \Omega_f} \sum_{m \in K} V_m^t |Y_{km}^{st}| \sin(\theta_m^t - \theta_k^s + \delta_{km}^{st}) \quad (25)$$

Onde:

- $s, t \in \Omega_f$
- $\Omega_f$  é o conjunto de fases R, S e T

- $K$  é o conjunto de barras  $m$  adjacentes à barra  $k$ .

A linearização das equações (24) e (25) de fluxo de carga levam à seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{\text{RST}} \\ \Delta \mathbf{Q}^{\text{RST}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\text{P}\theta} & \mathbf{J}_{\text{P}V} \\ \mathbf{J}_{\text{Q}\theta} & \mathbf{J}_{\text{Q}V} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{\text{RST}} \\ \Delta \mathbf{V}^{\text{RST}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Onde  $\mathbf{J}$  é a matriz jacobiana<sup>3</sup> do sistema que é atualizada em cada iteração do fluxo de carga. Calculando a matriz jacobiana da equação (26) obtém-se a matriz sensibilidade, como é dada na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{\text{RST}} \\ \Delta \mathbf{V}^{\text{RST}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\theta P} & \mathbf{S}_{\theta Q} \\ \mathbf{S}_{VP} & \mathbf{S}_{VQ} \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{\text{RST}} \\ \Delta \mathbf{Q}^{\text{RST}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

A matriz de sensibilidade  $\mathbf{S}$  é composta por quatro submatrizes com derivadas parciais que retratam a variação da magnitude de tensão e do ângulo, de todos os nós, devido às variações de potência ativa e reativa de cada nó. Devido à importância do controle da magnitude de tensão pela variação da potência ativa e reativa, as submatrizes  $\mathbf{S}_{VP}$  e  $\mathbf{S}_{VQ}$  são de mais interesse. Portanto, de maneira geral, o controle de tensão é calculado pela seguinte equação.

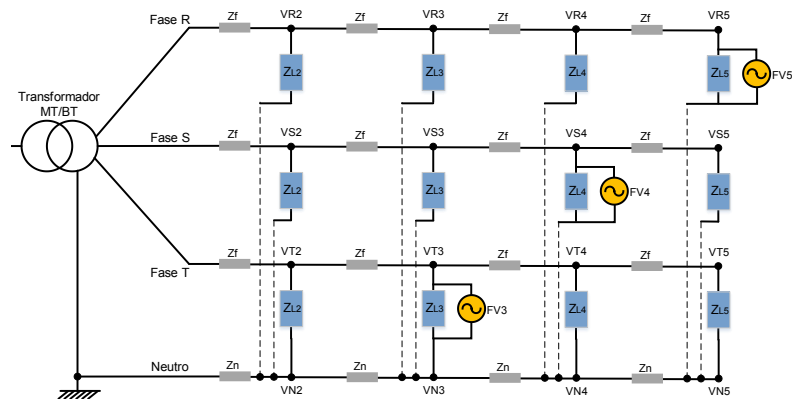
$$\Delta \mathbf{V}^{\text{RST}} = \mathbf{S}_{VP} \Delta \mathbf{P}^{\text{RST}} + \mathbf{S}_{VQ} \Delta \mathbf{Q}^{\text{RST}} \quad (28)$$

Onde os elementos diagonais das matrizes  $\mathbf{S}_{VP}$  e  $\mathbf{S}_{VQ}$  representam a variação da tensão do nó de cada fase devido a uma variação da potência ativa e reativa, respectivamente, do mesmo nó. Os elementos não diagonais das matrizes  $\mathbf{S}_{VP}$  e  $\mathbf{S}_{VQ}$  descrevem a variação da tensão na fase de um nó devido à variação da potência ativa e reativa, num nó diferente.

Para ilustrar os efeitos das injeções de potência dos geradores FVs nas sensibilidades de tensão, se utiliza um exemplo de uma rede de BT para mostrar o cálculo das sensibilidades  $\mathbf{S}_{VP}$  e  $\mathbf{S}_{VQ}$  para duas redes desequilibradas de BT adaptadas de Ferreira, P. et al. (2013) e representadas nas Figuras 23 e 24, onde as gerações FVs monofásicas estão alocados no nós 3T, 4S e 5R para a primeira rede e nos nós 3T, 4S e 5T para a segunda rede. O cenário de carga e geração das redes são descritos na Tabela 6, sendo a tensão das redes 400 V e as impedâncias de linha por trecho  $Z=0,125+j0,0125$  pu ( $S_b=100$  kVA). Considerou-se a tensão do secundário do transformador igual a 1,02 pu.

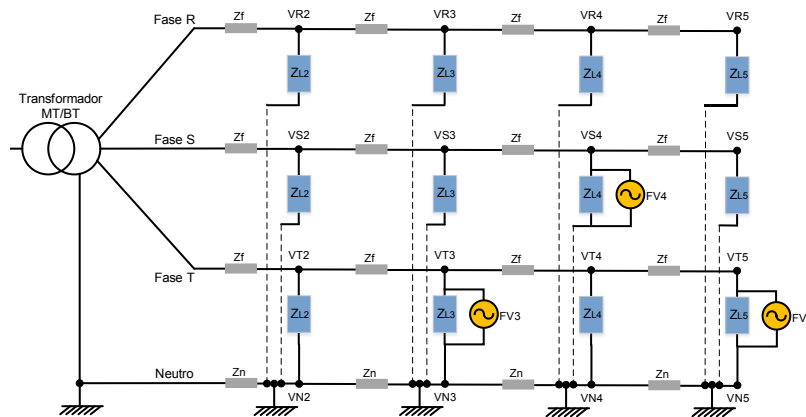
<sup>3</sup> Neste trabalho, matrizes e vetores são representados em negrito.

**Figura 23** - Rede de BT com três geradores FVs monofásicos ubicados um por fase.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2013).

**Figura 24** - Rede de BT com três geradores FVs monofásicos ubicados dois na mesma fase.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2013).

**Tabela 6** - Cenário de carga e geração empregado nas Figuras 23 e 24.

Barra	$S_R$ (pu)	$S_S$ (pu)	$S_T$ (pu)	Barra	$S_R$ (pu)	$S_S$ (pu)	$S_T$ (pu)
2	$0,10+j0,05$	$0,10+j0,05$	$0,05+j0,05$	2	$0,10+j0,05$	$0,10+j0,05$	$0,05+j0,05$
3	$0,10+j0,05$	$0,00+j0,15$	$-0,16+j0,05$	3	$0,05+j0,00$	$0,00+j0,15$	$-0,10+j0,05$
4	$0,15+j0,15$	$-0,20+j0,05$	$0,05+j0,01$	4	$0,05+j0,01$	$-0,20+j0,05$	$0,05+j0,01$
5	$-0,22+j0,05$	$0,05+j0,00$	$0,10+j0,05$	5	$0,05+j0,00$	$0,05+j0,00$	$-0,10+j0,05$

Fonte: Adaptado de Ferreira (2013).

As sensibilidades  $S_{VP}$  e  $S_{VQ}$  nos nós de conexão dos geradores FVs para as redes de distribuição das Figuras 23 e 24 são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

**Tabela 7** - Sensibilidades de tensão devido a injeção de potência FV para a rede de distribuição da Figura 23.

	$\partial P_{3T}$	$\partial P_{4S}$	$\partial P_{5R}$		$\partial Q_{3T}$	$\partial Q_{4S}$	$\partial Q_{5R}$
$\partial V_{3T}$	<b>0,512</b>	-0,131	-0,138	$\partial V_{3T}$	<b>0,056</b>	-0,231	-0,292
$\partial V_{4S}$	-0,093	<b>0,632</b>	-0,165	$\partial V_{4S}$	-0,206	<b>0,100</b>	-0,257
$\partial V_{5R}$	-0,188	-0,096	<b>0,920</b>	$\partial V_{5R}$	-0,178	-0,388	<b>0,280</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Tabela 8** - Sensibilidades de tensão devido a injeção de potência FV para a rede de distribuição da Figura 24.

	$\partial P_{3T}$	$\partial P_{4S}$	$\partial P_{5T}$		$\partial Q_{3T}$	$\partial Q_{4S}$	$\partial Q_{5T}$
$\partial V_{3T}$	<b>0,449</b>	-0,082	<b>0,420</b>	$\partial V_{3T}$	<b>0,051</b>	-0,187	<b>0,075</b>
$\partial V_{4S}$	-0,044	<b>0,618</b>	-0,053	$\partial V_{4S}$	-0,244	<b>0,136</b>	-0,358
$\partial V_{5T}$	<b>0,439</b>	-0,114	<b>0,856</b>	$\partial V_{5T}$	<b>0,028</b>	-0,289	<b>0,103</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As sensibilidades de tensão com relação às injeções de potência dos geradores FVs ilustram o seguinte:

- Sensibilidades numa determinada fase são positivas e elevadas para os nós que injetam potência de geração FV na mesma fase.
- Sensibilidades numa determinada fase são negativos e pequenos para os nós que injetam potência de geração FV nas outras fases.

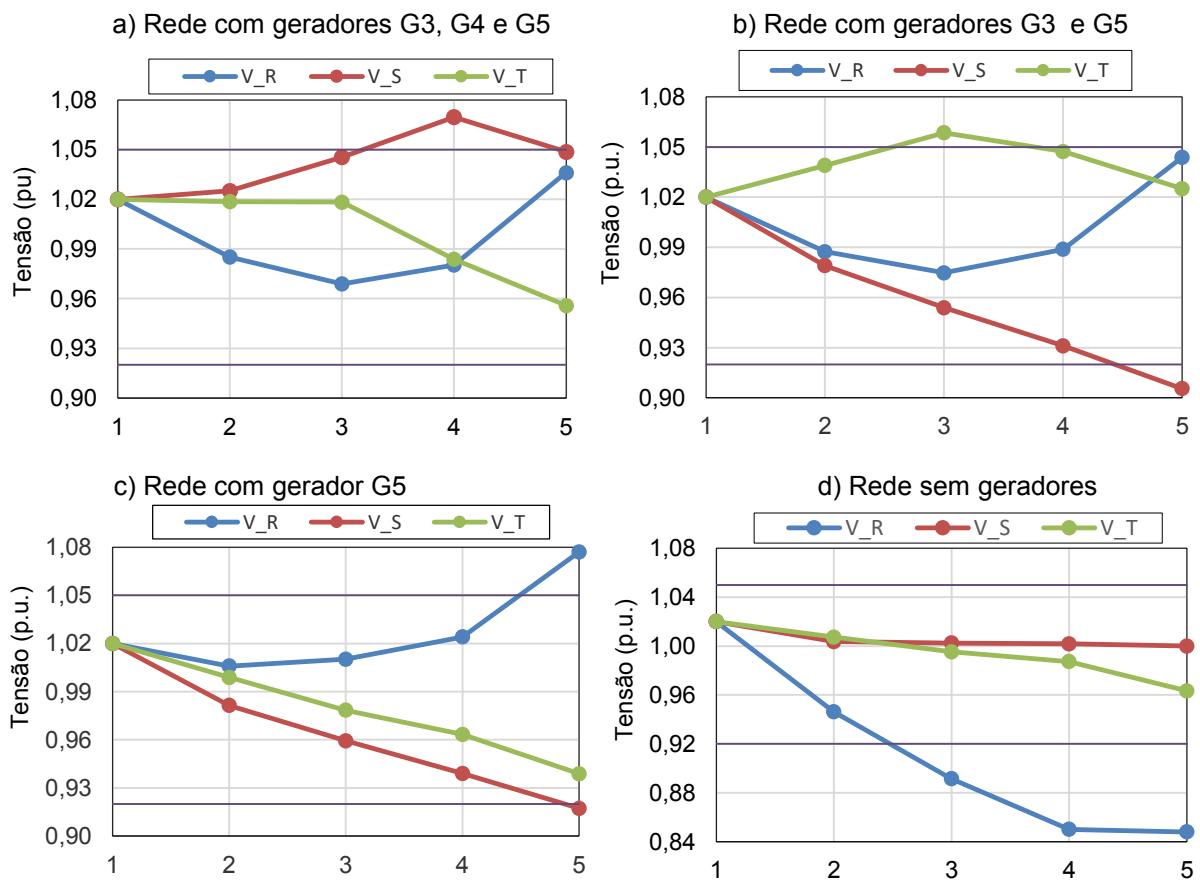
### 5.3 ABORDAGENS PARA O CONTROLE DE TENSÃO

Para evitar que a tensão dos nós de conexão dos geradores FVs violem o limite superior de tensão, deve-se desenvolver estratégias de controle de tensão. Uma das estratégias mais simples, é desligar o gerador FV (controle ON-OFF) quando a sua tensão no ponto de conexão esteja violando o limite superior de tensão. No entanto, esta estratégia tem dois grandes inconvenientes. Um deles, o fato de que o dono da geração FV fica limitado ao não produzir nada nesses períodos. O segundo, mais grave ainda, é o fato da existência de possíveis efeitos de cascata. O que acontece é que a rede de BT é trifásica e o fato de desligar a injeção de potência ativa numa dada fase, pode levar ao aumento de tensão em outra fase, gerando assim um efeito de cascata que poderá levar a que todos os geradores FVs tenham que se desligar, situação de que não é de todo desejável.

Em Ferreira et al. (2013) mostra o efeito de cascata para uma rede de distribuição em BT. Para ilustrar o risco deste efeito cascata de tensão usamos a rede de 5 barras adaptada (Figura 23) que tem três geradores FVs monofásicos conectados nos nós 3T, 4S e 5R. O cenário de carga e geração são descritos na Tabela 6. Assumindo que o limite superior de tensão nos nós permitido é 1,05 pu.

Na Figura 25 ilustra-se a violação da tensão nos nós 3T, 4S e 5R durante uma falha em cascata acionados pela tensão irregular do nó 4S. Como consequência da tensão irregular do nó 4S, o inversor desliga FV4 e a tensão no nó 4S cai para valores aceitáveis. Porém, ao desligar FV4, a tensão no nó 3T sobe acima de 1,05 pu. Novamente, o procedimento de controle desliga FV3 e a tensão no nó 3T cai para valores aceitáveis. Porém, ao desligar FV3 a tensão no nó 5R sobe acima de 1,05 pu. Novamente, o procedimento de controle desliga FV5 e a tensão no nó 5R cai abaixo do 0,92 pu e nenhuma outra geração pode ser ligada sem causar violação nos limites de tensão.

**Figura 25** - Perfil de tensão da rede de 5 barras durante uma falha em cascata.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 9 mostra-se também a violação da tensão nos nós 3T, 4S e 5R durante a falha em cascata apresentada na Figura 27.

**Tabela 9** - Tensões dos nós 3T, 4S e 5R durante a falha em cascata.

Etapa	V_3T (pu)	V_4S (pu)	V_5R (pu)
-	1,018	<b>1,070</b>	1,036
<b>1</b>	<b>1,058</b>	0,931	1,044
<b>2</b>	0,978	0,939	<b>1,077</b>
<b>3</b>	0,995	1,002	0,848

Fonte: Elaboração do próprio autor.

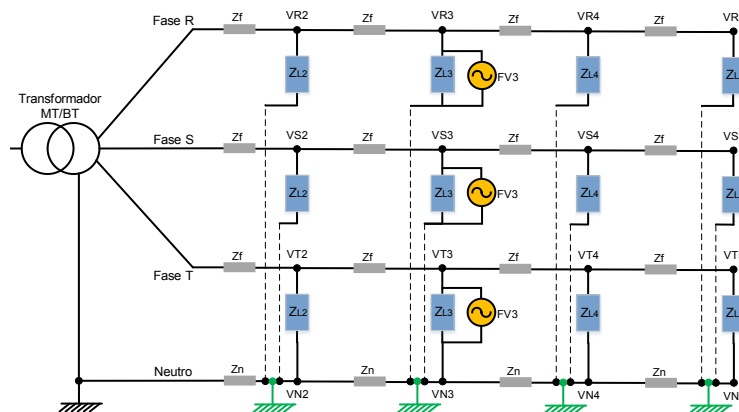
Visto que a estratégia de controle ON-OFF não tem resultados aceitáveis, por conseguinte, passa a ser desejável controlar a tensão dos pontos de conexão dos geradores FVs para que este passe a estar dentro dos valores permitidos, assim os donos da geração FV continuam produzindo. Portanto, para controlar a tensão dos nós conectados aos geradores FVs, foram propostas novas abordagens, que visam reduzir a potência ativa injetada, mas permitindo aos donos das gerações FVs produzir, ao invés de estar completamente desligadas.

Em termos gerais estas abordagens são designadas como controle global e controle local de tensão. O controle global é feito de forma a controlar a rede, monitorando e ajustando várias tensões. O controle local, como o nome indica, é feito analisando e corrigindo apenas a tensão de cada ponto de injeção de potência. No que se refere ao controle global, necessita-se obter dois parâmetros: tensão e potência injetada nos pontos de geração FV para corrigir as tensões a nível global, determinando as variações mínimas de redução de potência injetada para as quais a rede está em cumprimento com as regulamentações. No entanto, o fato de ser necessário saber tanta informação acerca da rede, é uma desvantagem, pois para a obtenção destes dados é necessário um sistema de comunicação e coordenação complexo e com custos elevados. Por outro lado, o controle local só observa a tensão e potência no seu próprio ponto, aplicando um algoritmo iterativo de correção da tensão e potência injetada para se manter a sua magnitude de tensão dentro dos valores desejados. Este tipo de controle torna-se mais simples e mais barato para sua implementação, o que é, a princípio uma vantagem. A desvantagem é o fato de necessitar de monitoração contínua.

Até agora, supõe-se que a maior tensão está no ponto de conexão do gerador FV, e se este passar o limite superior usamos as abordagens de controle de tensão para corrigí-lo. Mas essa maior tensão pode estar em um nó que não tem gerador FV, isto depende de vários fatores como carregamento menor de uma fase comparado com as outras fases, tipo de

geração FV e principalmente de ter ou não aterramento nos consumidores (sistemas tipo TT e TN-C). Para mostrar esse comportamento da tensão fazemos uma análise do fluxo de carga, sem e com aterramento nos consumidores, numa rede desequilibrada de BT com geração FV trifásica na barra 3 apresentada na Figura 26. O cenário de carga e geração é descrito na Tabela 10 e as características da rede são as mesmas que a rede adaptada da Figura 23 que possui um comprimento total da linha de distribuição de 120 metros.

**Figura 26 - Perfil de tensão da rede desequilibrada em BT.**



Fonte: Adaptado de Ferreira (2013).

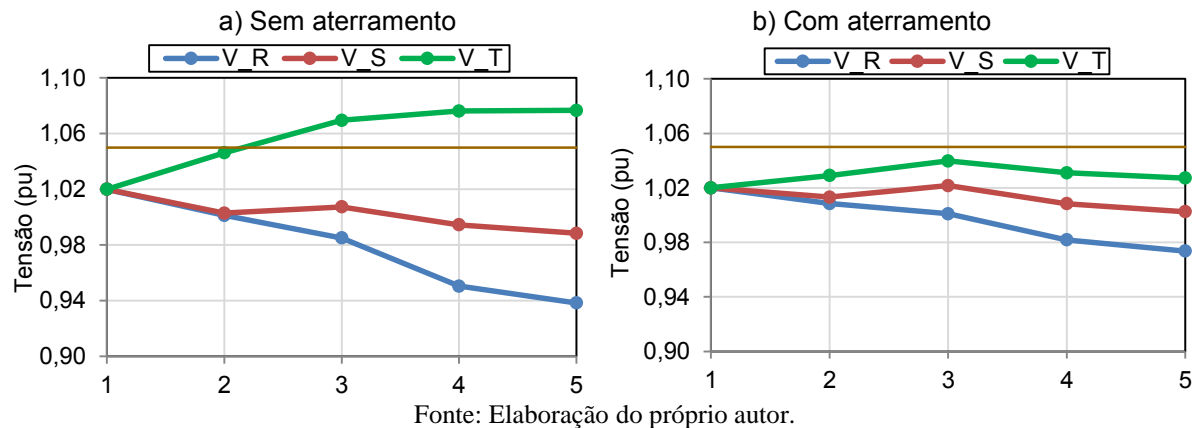
**Tabela 10 - Cenário de carga e geração empregado na Figura 26.**

Barra	S_R (pu)	S_S (pu)	S_T (pu)
2	0,05+j0,01	0,10+j0,05	0,01+j0,01
3	-0,15+j0,05	-0,15+j0,05	-0,15+j0,05
4	0,10+j0,05	0,05+j0,01	0,03+j0,01
5	0,06+j0,01	0,05+j0,00	0,03+j0,01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 27 ilustram-se os fluxos de carga. No caso sem aterramento observa-se que as tensões na fase T são violadas e que essas tensões jusantes ao ponto de conexão do gerador FV são maiores (Tabela 11) que este ponto, isto acontece porque o carregamento total da fase T é bem menor que das fases R e S. No caso com aterramento observa-se que as tensões não passam o limite superior e que as maiores tensões estão na barra de conexão do gerador FV (Tabela 11).



**Figura 27 - Perfil de tensão da rede desequilibrada em BT.**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Tabela 11 - Cenário de carga e geração empregado na Figura 26.**

a) Sem aterramento				b) Com aterramento			
Barra	V_R	V_S	V_T	Barra	V_R	V_S	V_T
1	1,020	1,020	1,020	1	1,020	1,020	1,020
2	1,001	1,003	1,046	2	1,007	1,014	1,030
3	0,985	1,007	1,069	3	1,001	1,022	1,040
4	0,950	0,994	1,076	4	0,977	1,018	1,032
5	0,938	0,988	1,077	5	0,969	1,006	1,028

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As estratégias de controle de tensão corrigem apenas as magnitudes das tensões nos pontos de conexão dos geradores FVs. No caso sem aterramento observamos maior tensão à jusante do ponto de conexão do gerador FV, porém para este caso a estratégia teria que controlar também os nós que não tem geração FV para corrigir as tensões de toda a rede. No caso com aterramento observa-se um comportamento normal, onde a maior tensão é do ponto que tem conexão do gerador FV e que as estratégias só tem que controlar os pontos de conexão destes geradores.

Neste trabalho estudamos e propomos estratégias de controle global e local de tensão para solucionar o problema de violação de tensão.

### 5.3.1 Estratégia global de controle de tensão empregando programação linear e considerando FP constante do gerador FV

Em Ferreira et al. (2013) propõe-se uma abordagem global de controle de tensão para solucionar o problema de aumento de tensão causado pela injeção de potência dos geradores FVs (operando a FP unitário constante) na rede de distribuição, obtendo assim uma redução ótima de potência ativa injetada pelos geradores FVs. Esta solução foi calculada mediante a

resolução de um modelagem de programação linear (PL) simples que usa a matriz sensibilidade de tensão explicada no capítulo anterior.

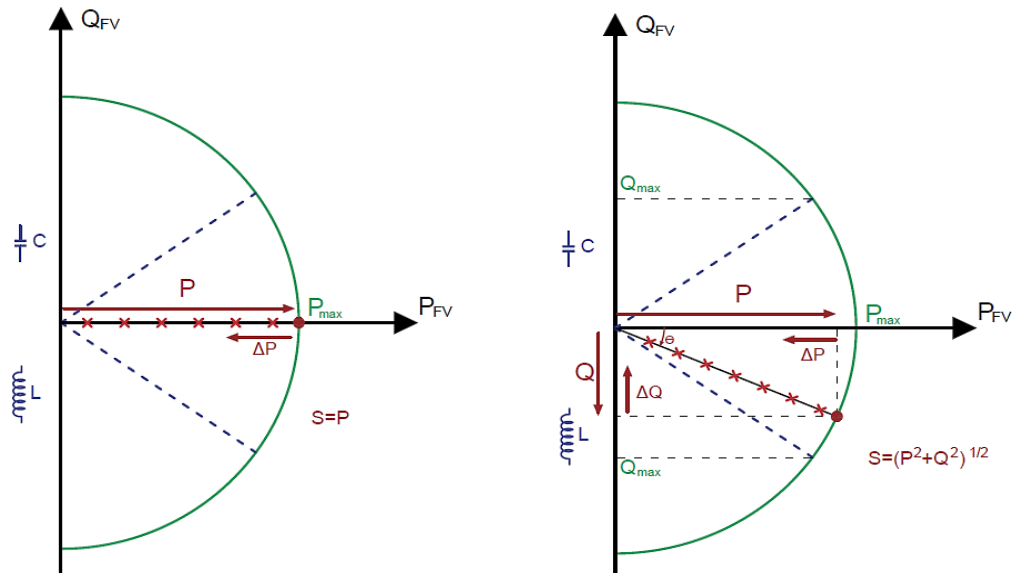
Neste trabalho estendeu-se o modo de trabalho dos geradores FVs, ou seja, estes geradores podem operar agora com FP constante e entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo. Ampliou-se também o algoritmo de controle para que os geradores FVs monofásicos trabalhem juntos com geradores FVs trifásicos.

A Figura 28a mostra a solução de controle de tensão com os geradores FVs operando em FP unitário constante e a Figura 28b mostra a solução operando a FP constante e entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo.

**Figura 28** - Solução da variação de potência onde usamos a técnica de PL.

a) Com FP unitário

b) Com FP constante e entre 0,95 (ind) e 0,95 (cap)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao representar as variações de tensão dos nós conectados aos geradores FVs, em função de suas variações de potência ativa e reativa, e de suas sensibilidades de tensão  $S_{VP}$  e  $S_{VQ}$  obtemos a seguinte equação:

$$\Delta V^{RST} = S_{VP} \Delta P^{RST} + S_{VQ} \Delta Q^{RST} \quad (29)$$

Onde as variações de potência reativa destes geradores FVs, e que se mostra na Figura 28b, são calculados pela seguinte equação:

$$\Delta Q^{RST} = \Delta P^{RST} \tan[\theta] \quad (30)$$

Substituindo a Equação (30) na Equação (29) obtém-se o seguinte:

$$\Delta V^{RST} = \frac{(S_{VP} + S_{VQ} \tan[\theta]) \Delta P^{RST}}{S_{VPQ}} \quad (31)$$

A Equação (31) pode ser reescrita como segue:

$$\Delta V^{RST} = S_{VPQ} \Delta P^{RST} \quad (32)$$

### 5.3.1.1. Formulação matemática para resolver o problema de violação de tensão na rede de BT

Se representarmos a rede de BT por suas sensibilidades de tensão devido à injeção de potência ativa e reativa dos nós conectados aos geradores FVs (como foi exemplificado na Tabela 7), então podemos calcular a redução ótima de geração FV para eliminar as violações de tensões da rede de BT, usando um técnica de programação linear (PL). Em Ferreira et al. (2013) foi formulado este PL, mas neste trabalho estendeu-se essa formulação para que os geradores FVs operem com FP constante e entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo, e também para que os geradores FVs monofásicos trabalhem junto com os geradores FVs trifásicos. Portanto o objetivo deste PL é eliminar todas as violações de tensão através da redução mínima de potência ativa,  $-\Delta P_i^{RST}$ , e sua formulação é como segue:

$$\text{Minimizar}_{\Delta P_i} \sum_{i \in \Omega_g} -\Delta P_i^{RST} \quad (33)$$

Sujeito a:

$$S_{VPQ} \Delta P^{RST} - \Delta V^{RST*} \leq \mathbf{0} \quad (34)$$

$$\Delta V_i^{RST*} = V_{i_{max}}^{RST} - V_i^{RST} - \epsilon_V \quad \forall i \in \Omega_g \quad (35)$$

$$\Delta P_{i_{min}}^{RST} \leq \Delta P_i^{RST} \leq \Delta P_{i_{max}}^{RST} \quad \forall i \in \Omega_g \quad (36)$$

$$\Delta P_j^R = \Delta P_j^S = \Delta P_j^T \quad \forall j \in \Omega_{gt} \quad (37)$$

$$\Delta \theta_j^R = \Delta \theta_j^S = \Delta \theta_j^T \quad \forall j \in \Omega_{gt} \quad (38)$$

Sendo  $\Omega_g$  o conjunto total de geradores FVs, e  $\Omega_{gt}$  o conjunto de geradores FVs trifásicos ( $\Omega_{gt} \subset \Omega_g$ ).

Onde  $\Delta V_i^{RST*}$  representa a variação de tensão necessária para eliminar a tensão violada no nó  $i$  com uma tolerância de  $\epsilon_V$ .

A abordagem desta proposta global é simples, apenas um conjunto de equações lineares é necessário para resolver o problema.

### 5.3.1.2. Algoritmo da estratégia de controle global com PL

A partir da resolução do PL para a redução ótima de geração FV, pode-se elaborar o algoritmo da estratégia de controle global de tensão empregando PL, descrito pelos seguintes passos:

- Passo 1: Determinam-se os módulos das tensões do sistema  $V_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_b$  através do fluxo de carga *backward forward*.
- Passo 2: Teste de violação de tensão. Se  $\max(V_i^{RST} - V_{max}^{RST}) \geq 0$ ,  $\forall i \in \Omega_g$  segue-se para o passo 3. Caso contrário passa-se para o passo 8.
- Passo 3: Cálculo da matriz sensibilidade  $S_{VP}$ ,  $S_{VQ}$  e  $S_{VPQ}$ .
- Passo 4: Determinam-se as reduções de potência ativa dos geradores FVs  $\Delta P_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_g$  através da resolução da programação linear.
- Passo 5: Calcula-se a variação do módulo de tensão do sistema.

$$\Delta V^{RST} = S_{VPQ} \Delta P^{RST}$$

- Passo 6: Atualização do módulo de tensão do sistema.

$$V_i^{RST(f)} = V_i^{RST} + \Delta V_i^{RST}, \forall i \in \Omega_b.$$

- Passo 7: Atualização das potências ativas e reativas dos nós conectados aos geradores FVs.

$$P_i^{RST(f)} = P_i^{RST} + \Delta P_i^{RST}, \forall i \in \Omega_g.$$

$$Q_i^{RST(f)} = Q_i^{RST} + \Delta Q_i^{RST}, \forall i \in \Omega_g.$$

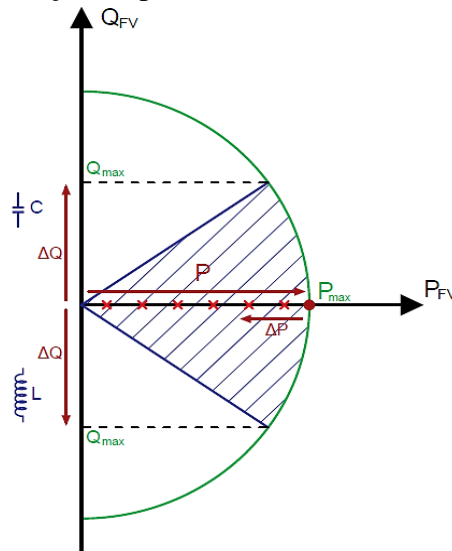
- Passo 8: Apresentar os resultados.

### 5.3.2 Estratégia global de controle de tensão empregando programação não linear e considerando FP variável do gerador FV.

A abordagem da solução global de controle de tensão apresentado na seção anterior, emprega um PL para resolver o problema de aumento de tensão, considera que os geradores FVs operam com FP constante. Nesta seção considera-se que a solução encontra um FP adequado para os geradores FVs (podendo operar entre 0,95 indutivo até 0,95 capacitivo) e assim obter uma ótima redução de potência ativa dos geradores FVs, portanto, o problema inicial de PL passa a ser agora um problema de programação não linear (PNL).

Na Figura 29 mostra-se a região de variação de potência dos geradores FVs que operam a FP variável e entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo.

**Figura 29** - Região da variação de potência onde usamos a técnica de PNL.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao representar as variações de tensão dos nós conectados aos geradores FVs em função de suas variações de potência ativa e reativa, e de suas sensibilidades de tensão  $S_{VP}$  e  $S_{VQ}$  obtemos a seguinte equação:

$$\Delta V^{RST} = S_{VP} \Delta P^{RST} + S_{VQ} \Delta Q^{RST} \quad (39)$$

Onde as variações de potência reativa destes geradores FVs, e que se mostra na Figura 29, são calculados pela seguinte equação:

$$\Delta Q_i^{RST} = (P_i^{RST} + \Delta P_i^{RST}) \tan \theta_i^{RST} \quad (40)$$

Substituindo a Equação (40) na Equação (39) obtém-se a seguinte equação:

$$\Delta V^{RST} = S_{VP} \Delta P^{RST} + S_{VQ} (P^{RST} + \Delta P^{RST}) \tan \theta^{RST} \quad (41)$$

5.3.2.1. Formulação matemática para resolver o problema de violação de tensão na rede de BT

Se representarmos a rede em BT por suas sensibilidades de tensão devido à injeção de potência ativa e reativa dos nós conectados aos geradores FVs (como foi exemplificado na Tabela 7), então podemos calcular a redução ótima de geração FV para eliminar as violações de tensões da rede de BT, usando programação não linear (PNL). Portanto o objetivo deste PNL é eliminar todas as violações de tensão através dos FPs mais apropriados para ter uma redução mínima de potência ativa,  $-\Delta P_i^{RST}$ , e sua formulação é como segue:

$$\text{Minimizar}_{\Delta P_i} \sum_{i \in \Omega_g} -\Delta P_i^{RST} \quad (42)$$

Sujeito a:

$$S_{VP} \Delta P^{RST} + S_{VQ} (P^{RST} + \Delta P^{RST}) \tan \theta^{RST} - \Delta V^{RST*} \leq 0 \quad (43)$$

$$\Delta P_{i_{mim}}^{RST} \leq \Delta P_i^{RST} \leq \Delta P_{i_{max}}^{RST} \quad \forall i \in \Omega_g \quad (44)$$

$$\theta_{i_{mim}}^{RST} \leq \theta_i^{RST} \leq \theta_{i_{max}}^{RST} \quad \forall i \in \Omega_g \quad (45)$$

$$\Delta V_i^{RST*} = V_{i_{max}}^{RST} - V_i^{RST} - \epsilon_V \quad \forall i \in \Omega_g \quad (46)$$

$$\Delta P_j^R = \Delta P_j^S = \Delta P_j^T \quad \forall j \in \Omega_{gt} \quad (47)$$

$$\Delta \theta_j^R = \Delta \theta_j^S = \Delta \theta_j^T \quad \forall j \in \Omega_{gt} \quad (48)$$

Sendo  $\Omega_g$  o conjunto total de geradores FVs, e  $\Omega_{gt}$  o conjunto de geradores FVs trifásicos ( $\Omega_{gt} \subset \Omega_g$ ).

Onde  $\Delta V_i^{RST*}$  representa a variação de tensão necessária para eliminar a tensão violada no nó  $i$  com uma tolerância de  $\epsilon_V$ .

A abordagem da proposta global é simples, apenas um conjunto de equações lineares e não lineares são necessários para resolver o problema.

### 5.3.2.2. Algoritmo da estratégia de controle global com PNL

A partir da resolução do PNL para a redução ótima de geração FV, pode-se elaborar o algoritmo da estratégia de controle global de tensão empregando PNL, descrito pelos seguintes passos:

- Passo 1: Determinam-se os módulos das tensões do sistema  $V_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_b$  através do fluxo de carga “*backward forward*”.
- Passo 2: Teste de violação de tensão. Se  $\max(V_i^{RST} - V_{max}^{RST}) \geq 0$ ,  $\forall i \in \Omega_g$  segue-se para o passo 3. Caso contrário passa-se para o passo 9.
- Passo 3: Cálculo da matriz de sensibilidades  $S_{VP}$  e  $S_{VQ}$
- Passo 4: Determinam-se as reduções de potência ativa dos geradores FVs  $\Delta P_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_g$  através da resolução da programação não linear.
- Passo 5: Cálculo das variações de potência reativa.  $\Delta Q_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_g$ .

$$\Delta Q_i^{RST} = (P_i^{RST} + \Delta P_i^{RST}) \tan \theta_i^{RST}$$

- Passo 6: Calcula-se a variação do módulo de tensão do sistema

$$\Delta V^{RST} = S_{VP} \Delta P^{RST} + S_{VQ} \Delta Q^{RST}$$

- Passo 7: Atualização do módulo de tensão do sistema

$$V_i^{RST(f)} = V_i^{RST} + \Delta V_i^{RST}, \forall i \in \Omega_b.$$

- Passo 8: Atualização das potências ativas e reativas dos nós conectados aos geradores FV.

$$P_i^{RST(f)} = P_i^{RST} + \Delta P_i^{RST}, \forall i \in \Omega_b.$$

$$Q_i^{RST(f)} = Q_i^{RST} + \Delta Q_i^{RST}, \forall i \in \Omega_b.$$

- Passo 9: Apresentar os resultados

### 5.3.3 Estratégia local de controle de tensão empregando um algoritmo iterativo e considerando FP constante do gerador FV

Ferreira et al. (2013) propõem uma solução local de controle de tensão que soluciona o problema de aumento de tensão causado pela injeção de potência dos geradores FVs (operando a FP unitário constante) na rede de distribuição, obtendo assim uma redução da

injeção de potência ativa dos geradores FVs. Esta solução é desenvolvida mediante a implementação de um algoritmo iterativo, que corrige sucessivamente a tensão dos nós conectados aos geradores FVs aplicando sucessivos ajustes de potência nestes geradores até que não se deteta nenhum problema de tensão. Este algoritmo usa a sensibilidade de tensão de cada nó de conexão dos geradores FVs. Este controle de tensão só se aplica para redes que tem só geradores FVs monofásicos.

Neste trabalho estendeu-se o modo de trabalho dos geradores FVs, ou seja, estes geradores podem operar agora com FP constante e entre 0,95 indutivo até 0,95 capacitivo.

Para representar as variações de tensão dos nós conectados aos geradores FVs usamos as expressões das equações (29) até (31), obtendo como resultado a equação (49).

$$\Delta V^{RST} = S_{VPQ} \Delta P^{RST} \quad (49)$$

Cada gerador FV não considera a dependência cruzada entre as tensões em um nó/fase e a injeção de potência em outro nó/fase, ou seja, cada gerador FV observa e corrige sua própria tensão.

### 5.3.3.1. Algoritmo iterativo

O objetivo deste algoritmo iterativo é eliminar todas as violações de tensão através de mínimas reduções de potência ativa,  $-\Delta P_i^{RST}$ , e sua implementação é como segue:

Dados iniciais:  $V_i^{RST}$ ,  $P_i^{RST}$ ,  $Q_i^{RST}$ ,  $V_{i_{max}}^{RST}$ ,  $\epsilon_V$ ,  $\epsilon$ .

1. Calcular  $\Delta V_i^{RST*} = V_{i_{max}}^{RST} - V_i^{RST} - \epsilon_V$ ,  $\forall i \in \Omega_g$
2. Calcular  $\Delta P_i^{RST} = \Delta V_i^{RST*} \cdot S_{VPQ_{ii}}^{-1}$ ,  $\forall i \in \Omega_g$
3. Calcular  $\Delta Q_i^{RST} = \Delta P_i^{RST*} \cdot \tan[\theta]$ ,  $\forall i \in \Omega_g$
4. Atualizar  $P_i^{RST^{(iter+1)}} = P_i^{RST^{(iter)}} + \Delta P_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_g$
5. Atualizar  $Q_i^{RST^{(iter+1)}} = Q_i^{RST^{(iter)}} + \Delta Q_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_g$
6. Obter  $V_i^{RST^{(iter+1)}} = f(P_i^{RST^{(iter+1)}}, Q_i^{RST^{(iter+1)}})$   $\forall i \in \Omega_b$
7. Condição de parada. Se  $V_i^{RST^{(iter+1)}} - V_i^{RST^{(iter)}} > \epsilon$ ,  $\forall i \in \Omega_g$ , for verdadeira, então  $V_i^{RST^{(iter+1)}}$  foi obtido, caso contrario, volta para o passo 1.



Onde  $S_{VPQ_{ii}}$  refere-se ao elemento da diagonal da matriz  $S_{VPQ}$ ,  $f$  é uma função de fluxo de carga,  $\Omega_g$  o conjunto de geradores FVs e  $\Delta V_i^{RST*}$  representa a variação de tensão necessária para eliminar a tensão violada no nó  $i$  com uma tolerância de  $\epsilon_V$ .

Na prática só os cinco primeiros passos têm que ser implementados, já que o sexto passo representa a resposta de tensão da rede à atualização da injeção de potência.

### 5.3.2.2. Algoritmo da estratégia de controle local

A partir do desenvolvimento do algoritmo iterativo para a redução mínima de geração FV, pode-se elaborar o algoritmo da estratégia de controle local de tensão empregando um algoritmo iterativo, descrito pelos seguintes passos:

- Passo 1: Determinam-se os módulos das tensões do sistema  $V_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_b$
- Através do fluxo de carga *backward forward*.
- Passo 2: Teste de violação de tensão. Se  $\max(V_i^{RST} - V_{max}^{RST}) \geq 0$ ,  $\forall i \in \Omega_g$  segue-se para o passo 3. Caso contrário passa-se para o passo 5.
- Passo 3: Cálculo das sensibilidade de tensão  $S_{VP}$  e  $S_{VQ}$
- Passo 4: Desenvolvimento do algoritmo iterativo, implementado em Matlab, para determinar os seguintes:
  - Redução da potência ativa e reativa dos geradores FVs  $\Delta P_i^{RST}$ ,  $\Delta Q_i^{RST}$   $\forall i \in \Omega_g$
  - As novas tensões do sistema  $V_i^{RST}$ ,  $\forall i \in \Omega_b$
- Passo 5: Apresentar os resultados.

## 6 TESTES E RESULTADOS

---

Neste capítulo são expostos os resultados e análises obtidos das simulações das estratégias global e local de controle de tensão apresentadas no capítulo anterior. A apresentação deste capítulo está dividida em cinco partes:

1. Descrição do sistema teste: Descrição geral da rede secundária de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.
2. Sistema teste com três geradores FVs monofásicos: Neste sistema são comparadas as estratégias de controle global de tensão que empregam PL e PNL e a estratégia de controle local de tensão que emprega um algoritmo iterativo, eles aplicadas em um período de 24 horas.
3. Sistema teste com um gerador FV trifásico e um monofásico: Neste sistema é aplicada a estratégia de controle global de tensão empregando PNL em um período de 24 horas.
4. Sistema teste com um gerador FV trifásico e dois monofásicos: Neste sistema é aplicada a estratégia de controle global de tensão empregando PNL em um período de 24 horas.
5. Sistema teste com dois geradores FVs trifásicos: Neste sistema é aplicada a estratégia de controle global de tensão empregando PNL em um período de 24 horas.

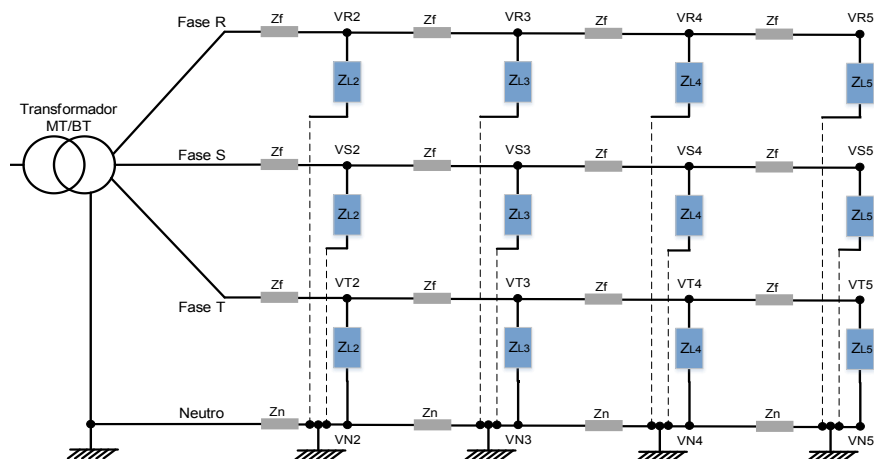
As estratégias de controle de tensão foram implementados na linguagem de programação Matlab R2016b. A resolução do problema de programação linear (PL) que procura a redução ótima de potência ativa dos geradores FVs foi resolvido usando o solver Linprog com o toolbox de otimização do MATLAB que é uma forma muito robusta e rápida de resolução de problemas lineares. A resolução do problema de programação não linear (PNL) que procura a redução ótima de potência ativa dos geradores FVs foi resolvido usando o solver Fmincon com o toolbox de otimização do MATLAB que é um otimizador capaz de resolver problemas com características não lineares em seu equacionamento.

É importante ressaltar que todas as simulações foram feitos com intervalos de tempo igual a 1 hora durante 24 horas, com o fim de obter o perfil de tensão em regime permanente ao longo do dia. E os limites de tensão adotados foram 1,05 pu para limite superior e 0,92 pu para limite inferior, estes limites são apresentados nos gráficos juntamente com os resultados.

## 6.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE

Para avaliar as estratégias de controle de tensão neste trabalho foi utilizada uma rede secundária de distribuição de energia elétrica em baixa tensão (BT) com 5 barras (sistema teste) adaptada de Ferreira et al. (2013) e mostrada na Figura 30. Para este sistema os dados da carga e geração foram modificados para os diferentes testes, com fim de avaliar as estratégias.

**Figura 30** - Rede secundária de distribuição em BT de 5 barras.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2013).

A potência do transformador de MT/BT é de 100 kVA e alimenta vários consumidores residenciais por meio da rede secundária de 400/230 V. Esta rede secundária é trifásica com quatro condutores, sendo três condutores de fase e um condutor neutro aterrado no transformador e nos consumidores. O comprimento total da linha de distribuição é de 120 metros, sendo a impedância de linha por trecho  $Z=0,125+j0,0125$  pu. Para as simulações, a tensão do secundário do transformador é assumido igual a 1,02 pu.

Este sistema teste possui cargas residenciais monofásicas e trifásicas distribuídas nas fases R, S e T do sistema, e suas potências contratadas são descritas em cada uma das seções seguintes. Para as análises das estratégias de controle de tensão foram introduzidos duas curvas diárias de demanda.

A primeira curva de demanda foi utilizada para o sistema teste com conexão de:

- Três geradores FVs monofásicos.

A segunda curva de demanda foi usada para o sistema teste com conexão de:

- Um gerador FV trifásico e um gerador FV monofásico.

- Um gerador FV trifásico e dois geradores FVs monofásicos.
- Dois geradores FVs trifásicos

Os dados destas duas curvas diárias de demanda são apresentados no apêndice A.

## 6.2 SISTEMA TESTE COM TRÊS GERADORES FVs MONOFÁSICOS

Neste sistema considerou-se só cargas residências monofásicas distribuídas nas fases R, S e T do sistema teste da Figura 30. As cargas monofásicas que estão conectadas nos nós 3T, 4S e 5R possuem geradores FVs monofásicos. As curvas de demanda das cargas foi especificada na seção 6.1, e a quantidade de potência contratada das residências e a quantidade de geração FV instalados no sistema teste são detalhados no Apêndice B.

Para analisar as diferenças das estratégias de controle global e local da tensão consideramos dois modos de trabalho do gerador FV que são:

- Com  $FP=1$ , neste modo de trabalho o gerador FV injeta apenas potência ativa à rede. A estratégia global empregando PNL começa trabalhando com este FP.
- Com  $FP=0,95$  indutivo, neste modo de trabalho o gerador FV injeta potência ativa à rede e consome potência reativa da rede. A estratégia global empregando PL e a estratégia local trabalham, neste caso, com este FP.

Para facilitar as análises, serão expostos os resultados de cada nó conectados aos geradores FVs.

### 6.2.1 Tensão em regime permanente antes dos controles de tensão

Nesta seção foram realizadas as simulações e análises do fluxo de carga para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede.

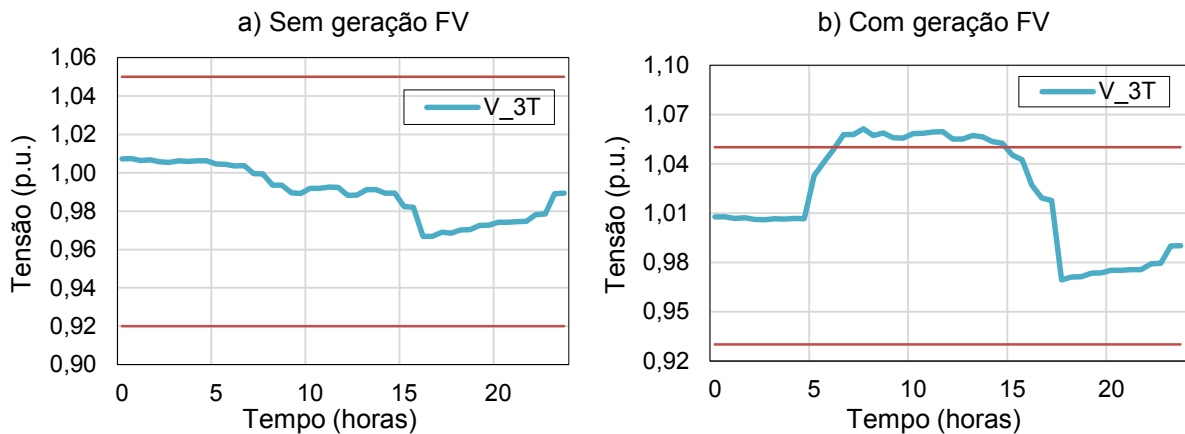
#### 6.2.1.1 *Geração FV trabalhando com $FP=1$*

Neste caso foi considerada apenas a injeção de potência ativa por parte dos geradores FVs, portanto o FP adotado foi unitário. Os resultados das simulações para este caso são apresentados desde a Figura 33 até a Figura 35 e as análises são detalhadas nos parágrafos seguintes.

A Figura 31 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3T para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso sem geração FV, observa-se da

Figura 31a que o perfil de tensão está dentro dos limites de tensão. No caso com geração FV observa-se na Figura 31b uma elevação no perfil de tensão no período em que os geradores FVs injetam potência ao sistema, aproximadamente 6h às 17h, e ocorre uma ligeira violação no limite superior de tensão.

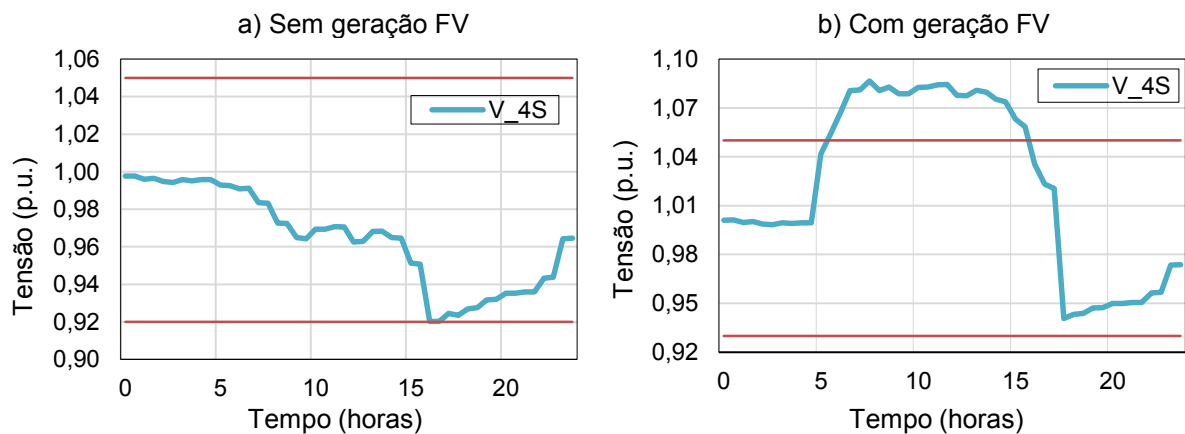
**Figura 31 - Perfil de tensão do nó 3T**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

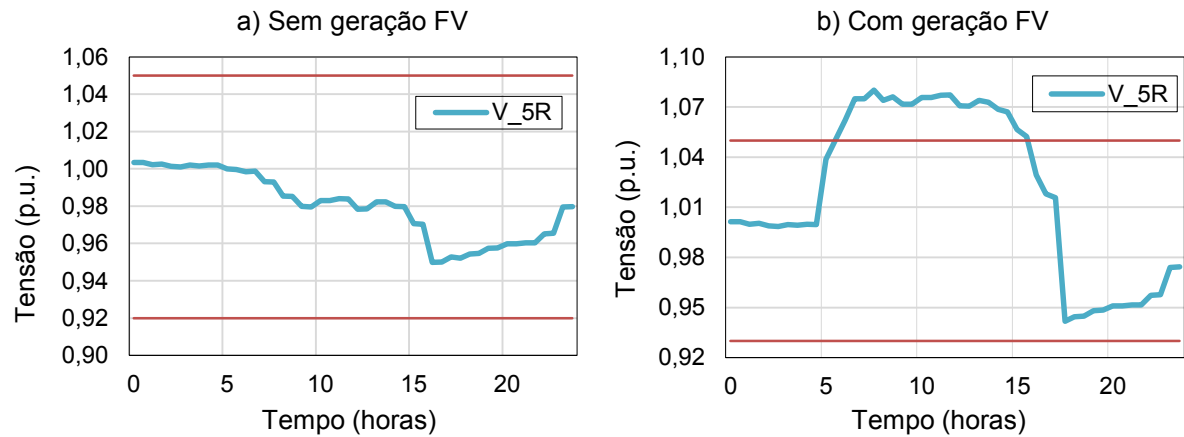
A Figura 32 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 4S para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. O comportamento das tensões foi semelhante ao observado para o nó 3T, portanto neste caso verifica-se que ocorre elevada violação no limite superior de tensão.

**Figura 32 - Perfil de tensão do nó 4S**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 33 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 5R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. O comportamento das tensões foi semelhante ao observado no nó 3S, portanto neste caso verifica-se também que ocorre elevada violação no limite superior de tensão.

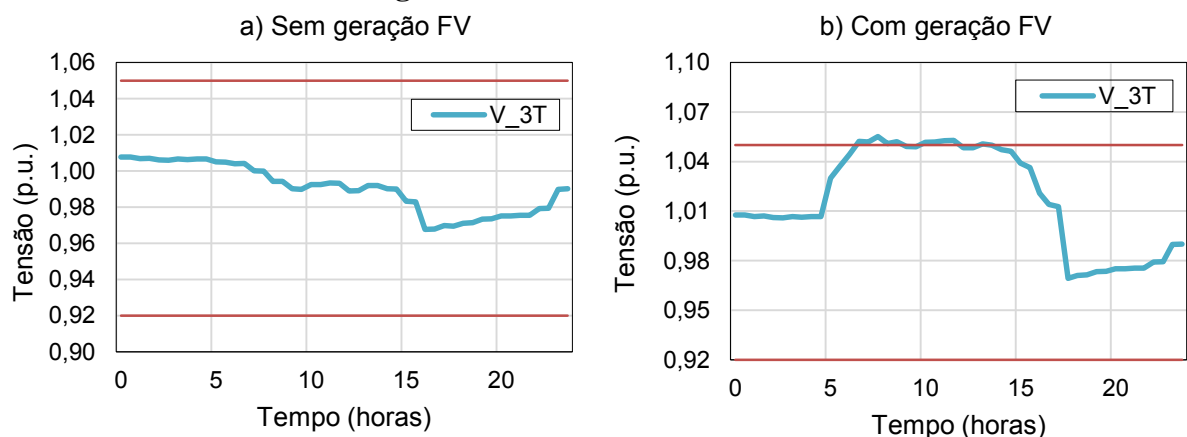
**Figura 33 - Perfil de tensão no nó 5R**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.2.1.2 Geração FV trabalhando com $FP=0,95$ indutivo

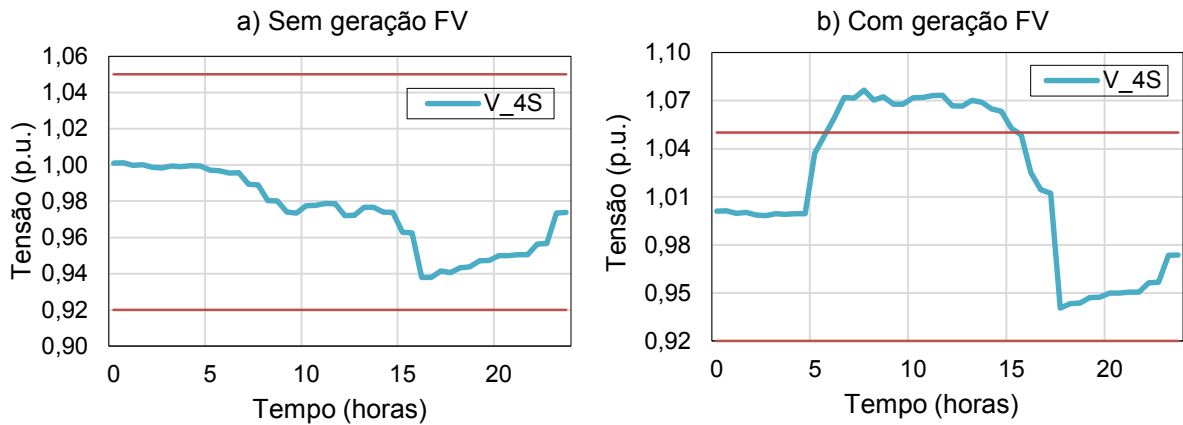
Neste caso foi considerado que o gerador FV injeta potência ativa à rede e consome potência reativa da rede, o FP adotado foi 0,95 indutivo. Os resultados das simulações para este caso foram similares ao caso anterior, onde a geração FV trabalha com FP igual a 1, e são apresentados desde a Figura 36 até a Figura 38 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.1, portanto aqui só serão detalhadas algumas das principais análises.

A Figura 34 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3T para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3T ocorre pequena violação no limite superior de tensão.

**Figura 34 - Perfil de tensão do nó 3T**

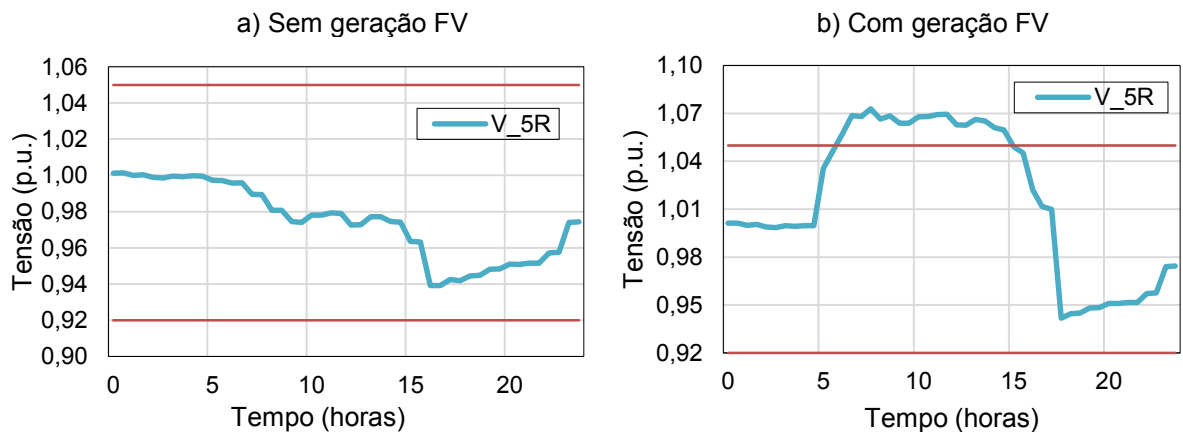
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 35 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 4S para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 4S ocorre elevada violação no limite superior de tensão.

**Figura 35 - Perfil de tensão do nó 4S**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 36 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 5R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 5R ocorre elevada violação no limite superior de tensão.

**Figura 36 - Perfil de tensão do nó 5R**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.2.2 Tensão em regime permanente depois dos controles global e local de tensão

Nesta seção são apresentados os resultados e análises de antes e depois de aplicar as estratégias de:

- Controle global empregando PNL
- Controle global empregando PL
- Controle local empregando algoritmo iterativo

Para o controle global empregando PNL os inversores dos geradores FVs podem regular o FP dentro da faixa de operação e começam operando com FP unitário. Para o

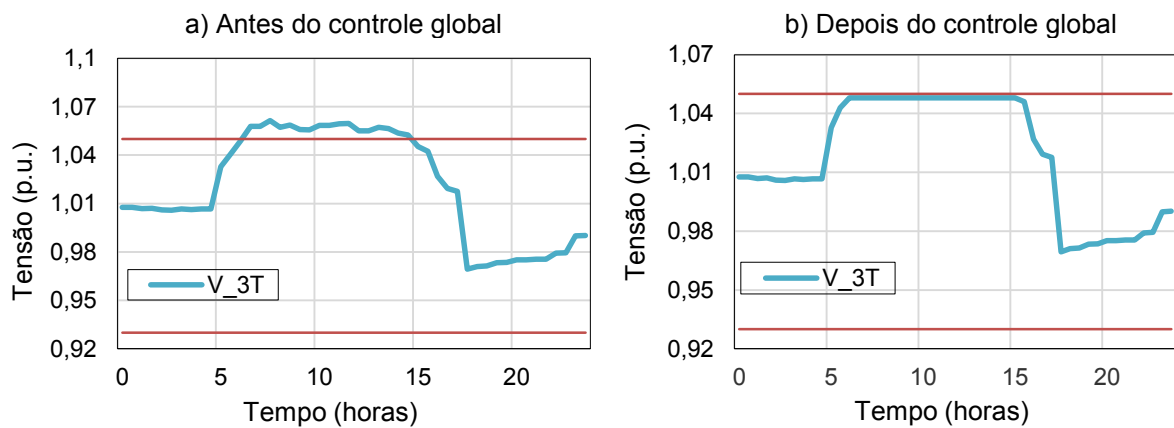
controle global empregando PL e controle local com algoritmo iterativo os inversores dos geradores FVs ficam sempre constantes e com FP de 0,95 indutivo, nestes casos.

### 6.2.2.1 *Estratégia global de controle de tensão empregando PNL*

Nesta primeira solução considera-se que todos os inversores dos geradores FVs começaram trabalhando com FP unitário, e que a estratégia de controle global empregando PNL procura um valor de FP adequado para os inversores dos geradores FVs. Os resultados são mostrados desde a Figura 37 até a Figura 40 e as análises são detalhadas nos parágrafos seguintes.

Na Figura 37a observa-se que antes do controle global o perfil de tensão do nó 3T no período de, aproximadamente, 6h às 16 h violava o limite superior de tensão. Depois de aplicar o controle global, o novo perfil de tensão do nó 3T fica dentro da faixa permitida, Figura 37b. Isto devido que o controle de tensão global retirou uma quantidade de potência da geração FV conectada no nó 3T para corrigir a violação de tensão.

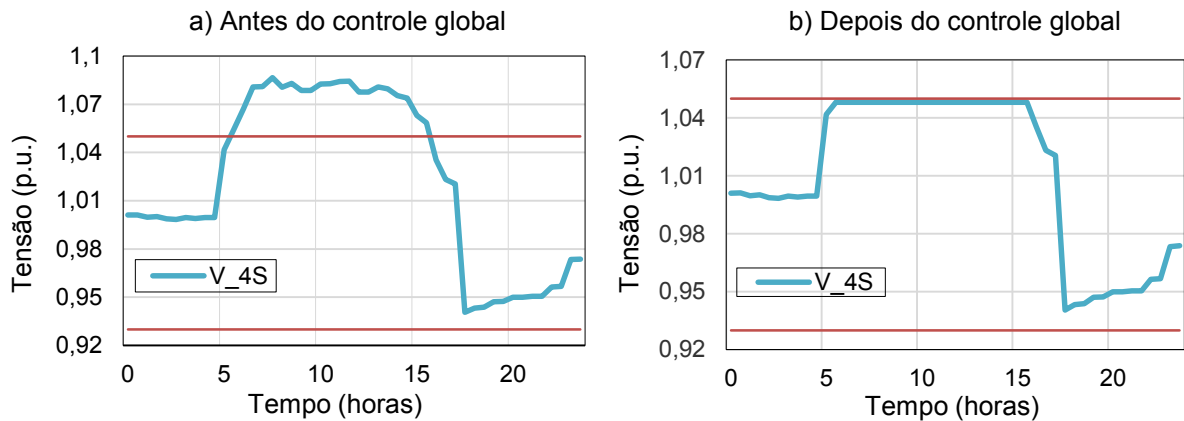
**Figura 37 - Perfil de tensão do nó 3T.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

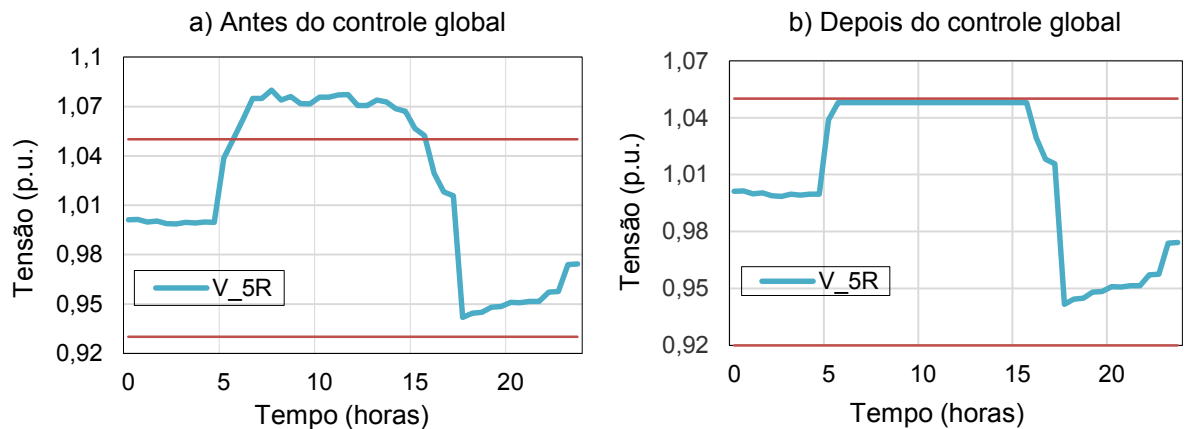
A Figura 38 mostra o perfil de tensão do nó 4S para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 3T, portanto ao aplicar o controle global de tensão o novo perfil de tensão do nó 4S fica dentro da faixa de tensão.



**Figura 38** - Perfil de tensão do nó 4S.

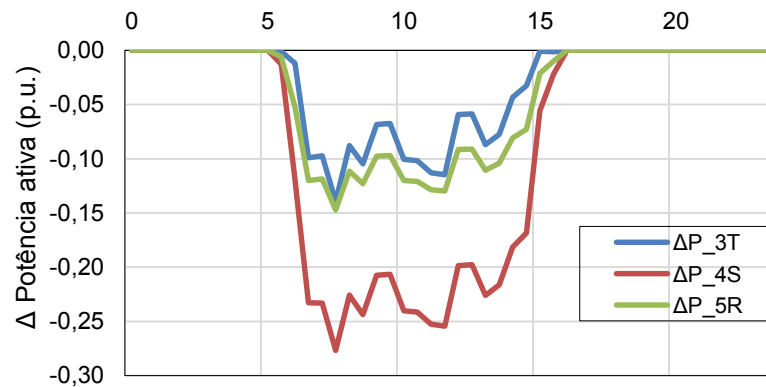
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 39 mostra o perfil de tensão do nó 5R para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 3T, portanto ao aplicar o controle global de tensão o novo perfil de tensão do nó 5R fica dentro da faixa de tensão.

**Figura 39** - Perfil de tensão do nó 5R

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 40 mostra-se o perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs ao longo do dia, obtido depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global retirou potência ativa dos geradores FVs conectados nos nós 3T, 4S e 5R. Sendo o total de energia retirada 371,7 kWh/dia.

**Figura 40** - Perfil de redução de potência ativa dos geradores FVs.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 12 mostra-se a quantidade de potência ativa e o FP final dos geradores FVs obtidos depois de aplicar o controle global de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global levou aos geradores FVs a funcionarem com um FP diferente do unitário no período de, aproximadamente, 6h até 16h. A parte sombreada das 6h e 16h significa que o gerador FV do nó 3T trabalho com FP capacitivo, e nos outros casos trabalho com FP indutivo.

**Tabela 12** - Potência ativa final em pu dos geradores FVs.

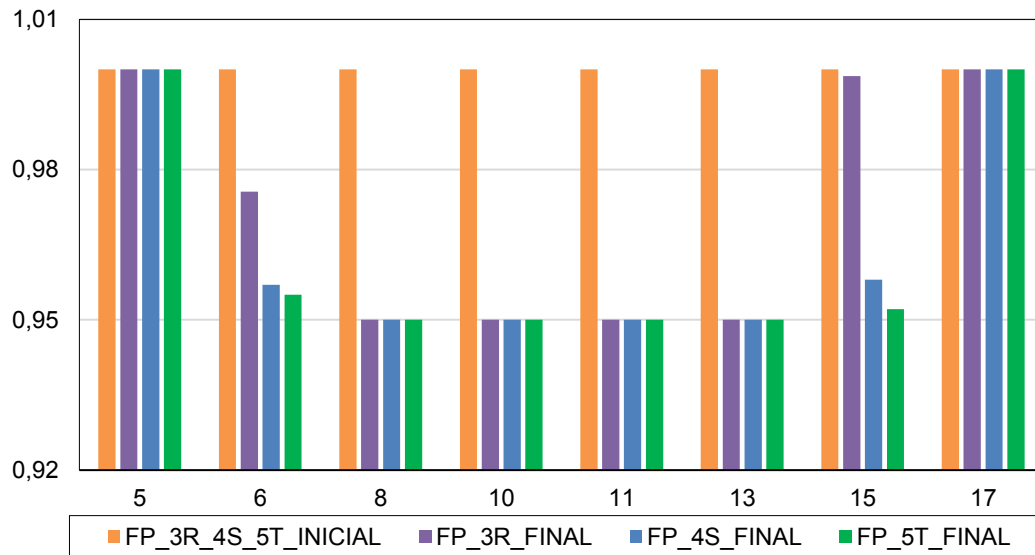
Hora	Estratégia Global PNL			Fator de Potência		
	FV_3T	FV_4S	FV_5R	FV_3T	FV_4S	FV_5R
5:30	0,296	0,296	0,197	1	1	1
6:00	0,385	0,373	0,251	0,998	0,966	0,977
6:30	0,474	0,367	0,272	0,976	0,957	0,953
7:00	0,486	0,352	0,270	0,950	0,950	0,950
7:30	0,531	0,395	0,300	0,950	0,950	0,950
8:00	0,532	0,394	0,300	0,950	0,950	0,950
8:30	0,594	0,456	0,343	0,950	0,950	0,950
9:00	0,594	0,455	0,343	0,950	0,950	0,950
9:30	0,638	0,499	0,373	0,950	0,950	0,950
10:00	0,641	0,502	0,375	0,950	0,950	0,950
10:30	0,612	0,473	0,355	0,950	0,950	0,950
11:00	0,612	0,473	0,355	0,950	0,950	0,950
11:30	0,604	0,464	0,349	0,950	0,950	0,950
12:00	0,605	0,466	0,350	0,950	0,950	0,950
12:30	0,651	0,512	0,382	0,950	0,950	0,950
13:00	0,649	0,510	0,381	0,950	0,950	0,950
13:30	0,619	0,480	0,360	0,950	0,950	0,950
14:00	0,619	0,480	0,360	0,950	0,950	0,950
14:30	0,638	0,500	0,374	0,950	0,950	0,950
15:00	0,639	0,503	0,375	0,952	0,950	0,950
15:30	0,658	0,603	0,418	0,999	0,958	0,952

Hora	Estratégia Global PNL			Fator de Potência		
	FV_3T	FV_4S	FV_5R	FV_3T	FV_4S	FV_5R
16:00	0,627	0,607	0,409	0,998	0,965	0,976
16:30	0,609	0,609	0,406	1	1	1
17:00	0,526	0,526	0,350	1	1	1
17:30	0,488	0,488	0,325	1	1	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 41 mostra-se o fator de potência inicial e final dos geradores FVs ao longo do dia. Observa-se que os geradores FVs começaram trabalhando com FP unitário e que depois de aplicar o controle de tensão que emprega PNL o FP foi diferente do unitário.

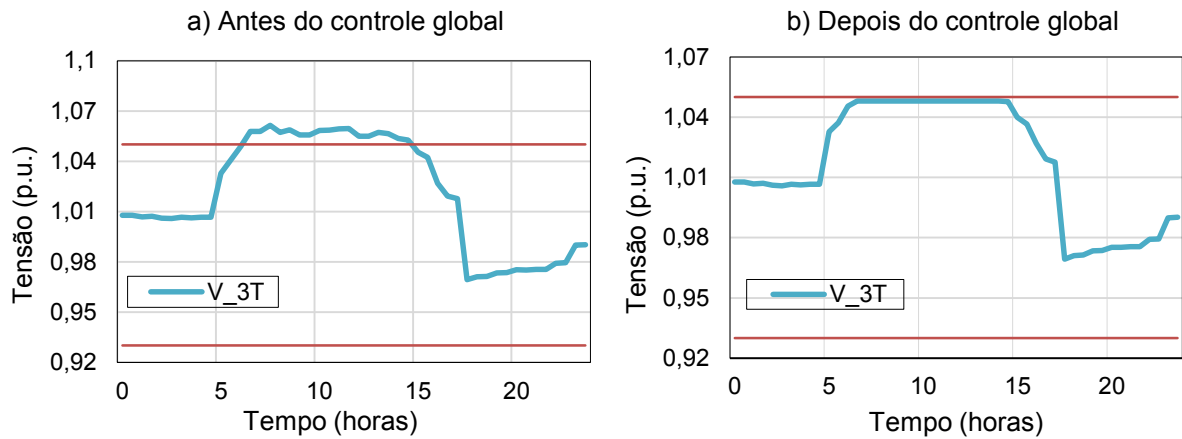
**Figura 41** - Fator de potência inicial e final dos geradores FVs.



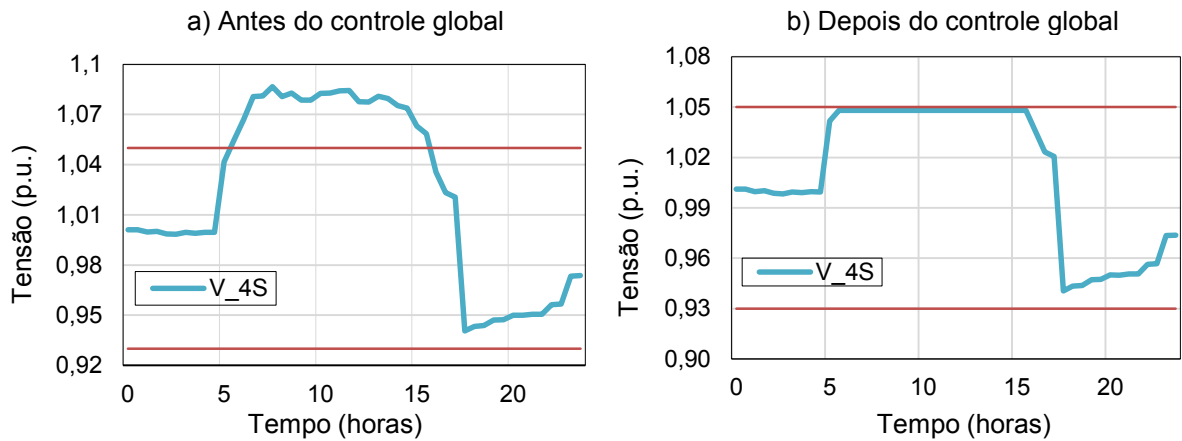
Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.2.2.2 *Estratégia global de controle de tensão empregando PL*

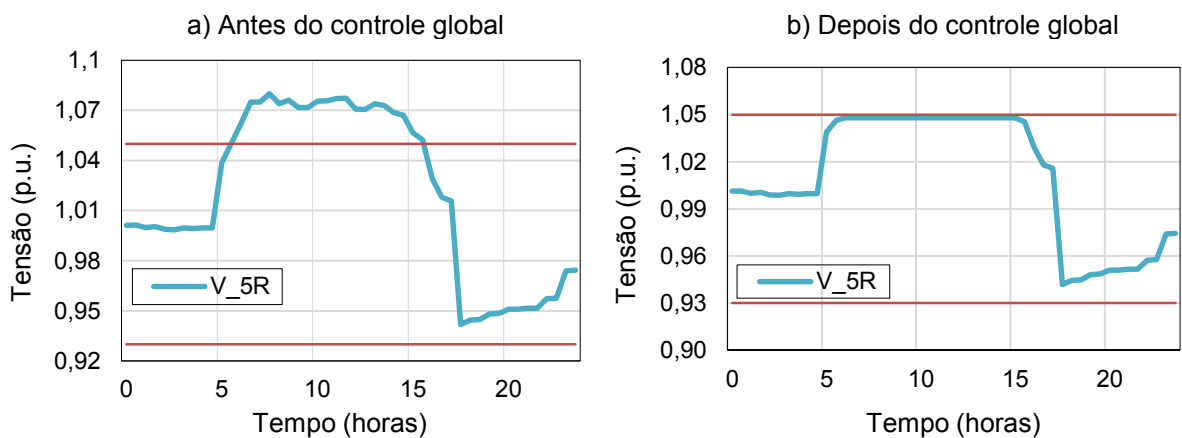
Nesta solução considera-se que todos os inversores dos geradores FVs trabalham o tempo todo com FP constante e igual a 0,95 indutivo. Os resultados são similares aos obtidos quando usamos a estratégia de controle de tensão empregando PNL, e são apresentados desde a Figura 42 até a Figura 45.

**Figura 42 - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

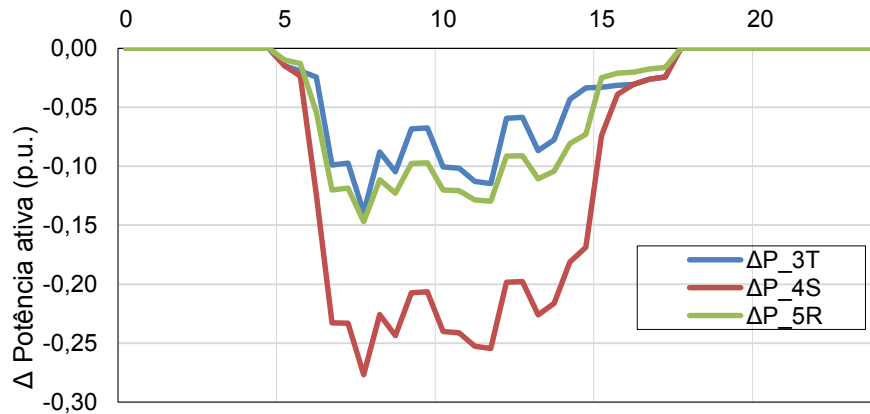
**Figura 43 - Perfil de tensão do nó 4S, com geração FV.**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 44 - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV.**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 45 mostra-se o perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs ao longo do dia, obtido depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PL. Sendo o total de energia retirada 392,9 kWh/dia.

**Figura 45** - Perfil de redução de potência ativa dos geradores FVs.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 13 mostra-se a quantidade de potência ativa final dos geradores FVs, trabalhando com FP constante, obtido depois de aplicar o controle global de tensão empregando PL.

**Tabela 13** - Potência ativa final em pu dos geradores FVs.

Hora	Estratégia Global PL			Fator de Potência (cte)		
	FV_3T	FV_4S	FV_5R	FV_3T	FV_4S	FV_5R
5:30	0,281	0,281	0,188	0,950	0,950	0,950
6:00	0,367	0,364	0,244	0,950	0,950	0,950
6:30	0,462	0,363	0,256	0,950	0,950	0,950
7:00	0,486	0,352	0,270	0,950	0,950	0,950
7:30	0,531	0,395	0,300	0,950	0,950	0,950
8:00	0,532	0,394	0,300	0,950	0,950	0,950
8:30	0,594	0,456	0,343	0,950	0,950	0,950
9:00	0,594	0,455	0,343	0,950	0,950	0,950
9:30	0,638	0,499	0,373	0,950	0,950	0,950
10:00	0,641	0,502	0,375	0,950	0,950	0,950
10:30	0,612	0,473	0,355	0,950	0,950	0,950
11:00	0,612	0,473	0,355	0,950	0,950	0,950
11:30	0,604	0,464	0,349	0,950	0,950	0,950
12:00	0,605	0,466	0,350	0,950	0,950	0,950
12:30	0,651	0,512	0,382	0,950	0,950	0,950
13:00	0,649	0,510	0,381	0,950	0,950	0,950
13:30	0,619	0,480	0,360	0,950	0,950	0,950
14:00	0,619	0,480	0,360	0,950	0,950	0,950
14:30	0,638	0,500	0,374	0,950	0,950	0,950
15:00	0,638	0,505	0,357	0,950	0,950	0,950
15:30	0,626	0,589	0,411	0,950	0,950	0,950
16:00	0,597	0,593	0,398	0,950	0,950	0,950
16:30	0,578	0,578	0,386	0,950	0,950	0,950
17:00	0,499	0,499	0,333	0,950	0,950	0,950
17:30	0,464	0,464	0,309	0,950	0,950	0,950

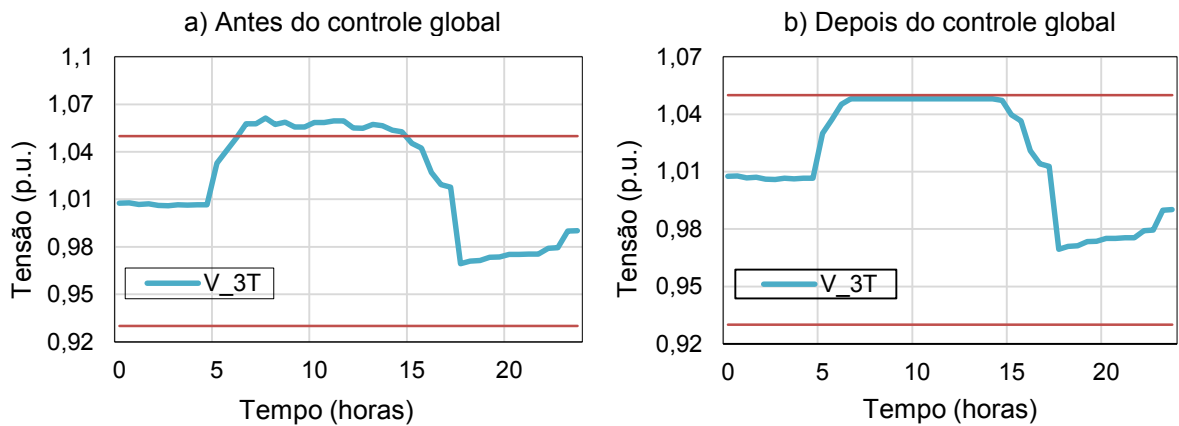
Hora	Estratégia Global PL			Fator de Potência (cte)		
	FV_3T	FV_4S	FV_5R	FV_3T	FV_4S	FV_5R
17:00	0,499	0,499	0,333	0,950	0,950	0,950
17:30	0,464	0,464	0,309	0,950	0,950	0,950

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.2.2.3 *Estratégia local de controle de tensão*

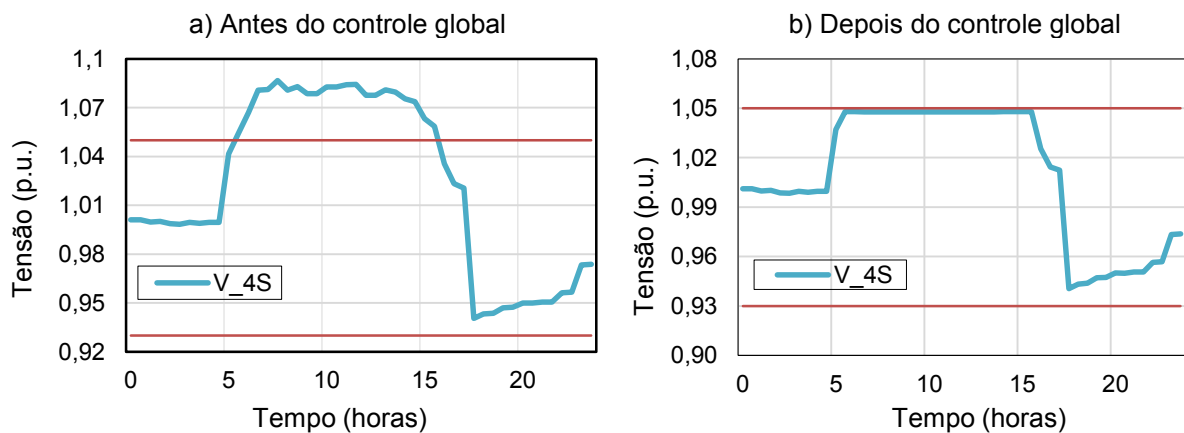
Neste tipo de estratégia de solução considera-se que todos os inversores dos geradores FVs trabalham o tempo todo com FP constante e igual a 0,95 indutivo. Esta solução faz ajustes sucessivos de potência dos geradores FVs para corrigir suas próprias tensões. Os resultados são similares aos obtidos quando usamos a estratégia global empregando PNL, e são apresentados desde a Figura 46 até a Figura 49.

**Figura 46** - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV

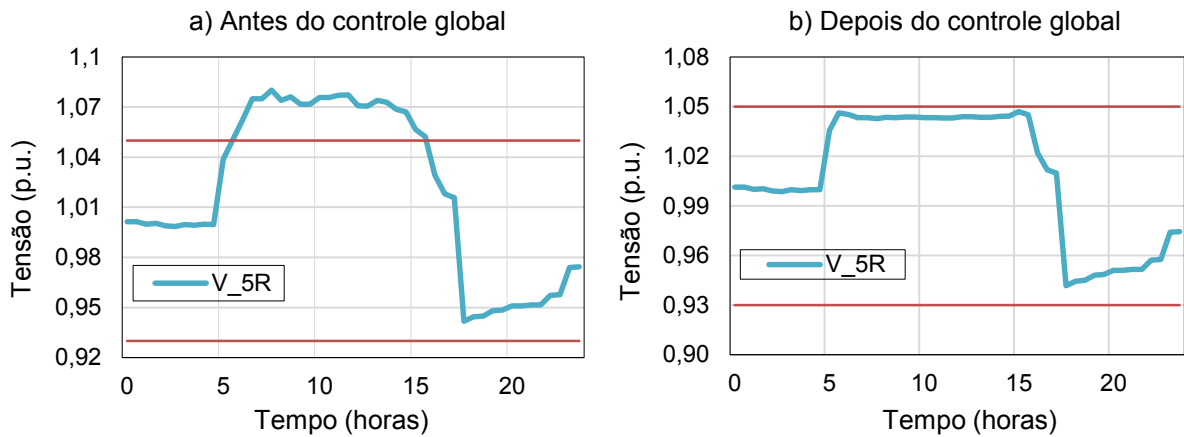


Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 47** - Perfil de tensão do nó 4S, com geração FV

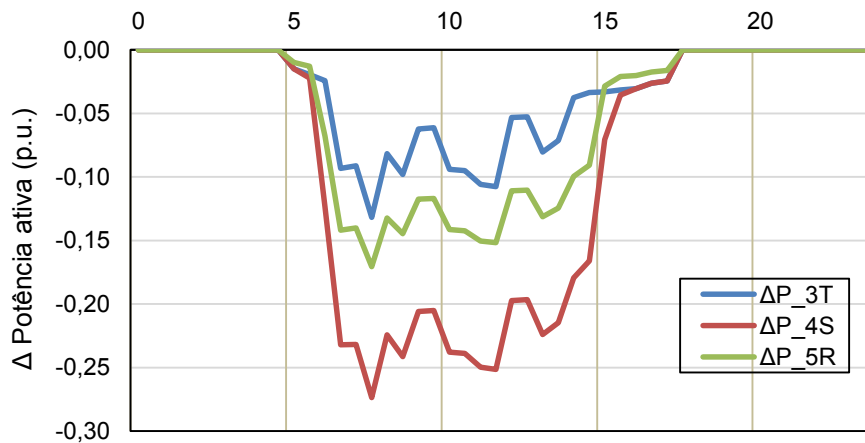


Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 48** - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 49 mostra-se o perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs ao longo do dia, obtido depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando algoritmo iterativo. Sendo o total de energia retirada 401,4 kWh/dia.

**Figura 49** - Perfil de redução de potência ativa dos geradores FVs.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 14 mostra-se a quantidade de potência ativa final dos geradores FVs, trabalhando com FP constante, e o número de iterações de convergência do algoritmo iterativo obtidos depois de aplicar o controle local de tensão.

**Tabela 14** - Potência ativa final em pu dos geradores FVs.

Hora	Estratégia Iterativo			Fator de Potência (cte)			N <sup>o</sup> Iterações
	FV_3T	FV_4S	FV_5R	FV_3T	FV_4S	FV_5R	
5:30	0,281	0,281	0,188	0,950	0,950	0,950	1
6:00	0,367	0,364	0,244	0,950	0,950	0,950	2
6:30	0,462	0,363	0,256	0,950	0,950	0,950	3
7:00	0,492	0,353	0,248	0,950	0,950	0,950	4
7:30	0,537	0,397	0,279	0,950	0,950	0,950	4
8:00	0,539	0,397	0,277	0,950	0,950	0,950	4
8:30	0,600	0,457	0,322	0,950	0,950	0,950	4
9:00	0,601	0,458	0,321	0,950	0,950	0,950	4
9:30	0,644	0,500	0,353	0,950	0,950	0,950	4
10:00	0,647	0,504	0,356	0,950	0,950	0,950	4
10:30	0,619	0,475	0,334	0,950	0,950	0,950	4
11:00	0,619	0,475	0,334	0,950	0,950	0,950	4
11:30	0,611	0,467	0,327	0,950	0,950	0,950	4
12:00	0,612	0,469	0,328	0,950	0,950	0,950	4
12:30	0,657	0,513	0,363	0,950	0,950	0,950	4
13:00	0,655	0,511	0,362	0,950	0,950	0,950	4
13:30	0,626	0,482	0,339	0,950	0,950	0,950	4
14:00	0,625	0,482	0,340	0,950	0,950	0,950	4
14:30	0,644	0,502	0,355	0,950	0,950	0,950	4
15:00	0,638	0,505	0,357	0,950	0,950	0,950	3
15:30	0,626	0,589	0,411	0,950	0,950	0,950	3
16:00	0,597	0,593	0,398	0,950	0,950	0,950	2
16:30	0,578	0,578	0,386	0,950	0,950	0,950	1
17:00	0,499	0,499	0,333	0,950	0,950	0,950	1
17:30	0,464	0,464	0,309	0,950	0,950	0,950	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.2.3 Conclusões parciais

Por meio das análises dos resultados apresentados na seção 2.2, as seguintes conclusões puderam ser efetuadas:

- No caso que os geradores FVs trabalham com FP unitário a elevação das tensões dos nós conectados aos geradores são maiores que no caso que trabalham com FP igual a 0,95 indutivo. Isto porque no primeiro caso se tem mais injeção de potência ativa que no segundo caso.
- Para a estratégia global de controle de tensão com PNL, foi possível concluir que eliminou as violações das tensões no sistema. Isto tirando a mínima quantidade de potência ativa dos geradores FVs conectados nos nós 3T, 4S e 5R.



- Para a estratégia global de controle de tensão com PL, foi possível concluir que também eliminou as violações das tensões no sistema. Isto tirando também a mínima quantidade de potência ativa dos geradores FVs ligados nos nós 3T, 4S e 5R.
- Para a estratégia local de controle de tensão com algoritmo iterativo, foi possível concluir que também eliminou as violações das tensões no sistema. Isto tirando a cada iteração potência ativa dos geradores FVs até verificar a não violação de tensão no sistema.
- A estratégia global de controle de tensão com PNL em relação às outras duas estratégias de controle retirou menos quantidade de energia ativa por dia.

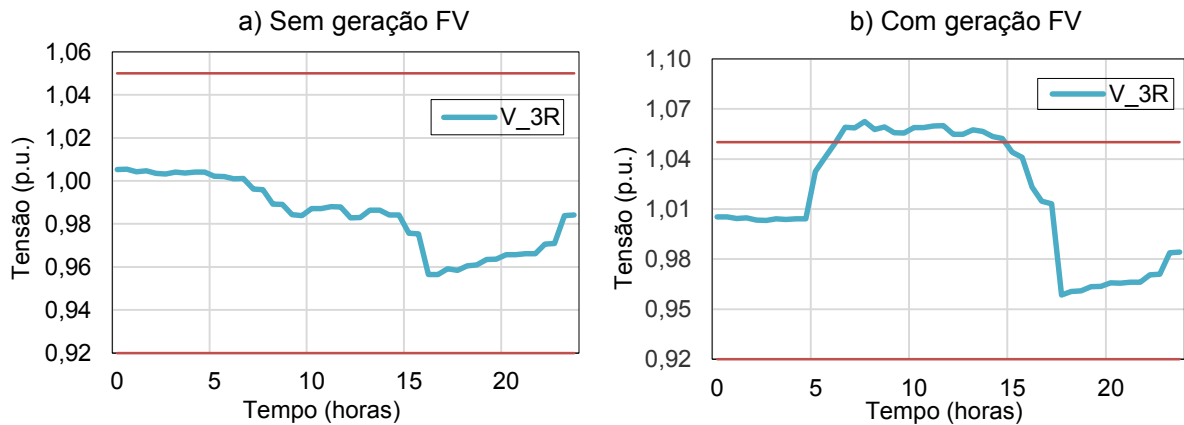
### 6.3 SISTEMA TESTE COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E UM MONOFÁSICO

Neste sistema considerou-se cargas residenciais monofásicas e trifásicas distribuídas nas fases R, S e T do sistema da Figura 30. As cargas trifásicas que estão ligadas na barra 3 possuem geradores FVs trifásicos e as cargas monofásicas que estão ligadas no nó 5R possuem geradores FVs monofásicos. As curvas de demanda das cargas foi especificada na seção 6.1, e a quantidade das potências contratadas das residências e a quantidade da geração FV instalados neste sistema teste são detalhados no Apêndice C.

#### 6.3.1 Tensão em regime permanente antes do controle de tensão

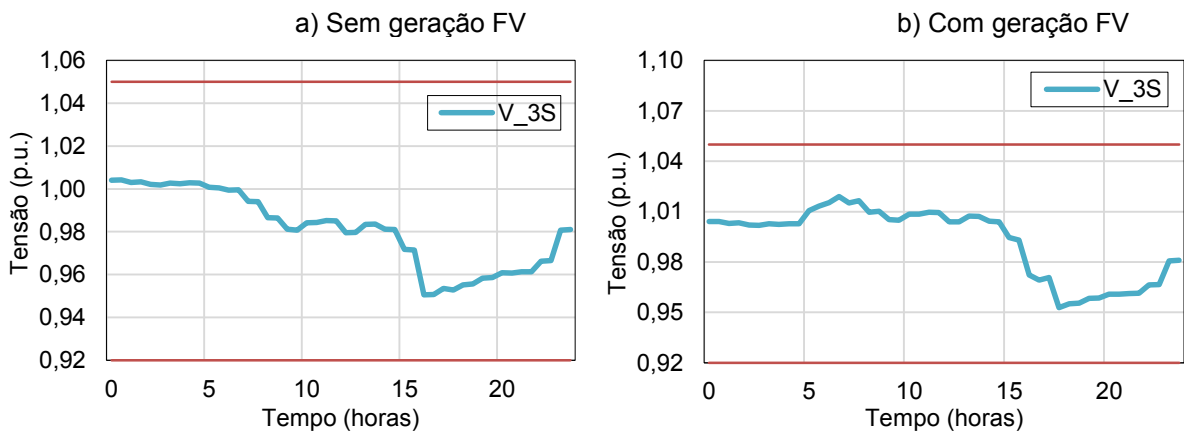
Nesta seção foram realizadas as simulações e análises do fluxo de carga para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede. Os resultados das simulações são mostrados desde a Figura 50 até a Figura 53 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.2.1, portanto aqui só serão detalhadas algumas das principais características encontradas nos testes.

A Figura 50 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3R ocorre violação no limite superior de tensão.

**Figura 50 - Perfil de tensão do nó 3R.**

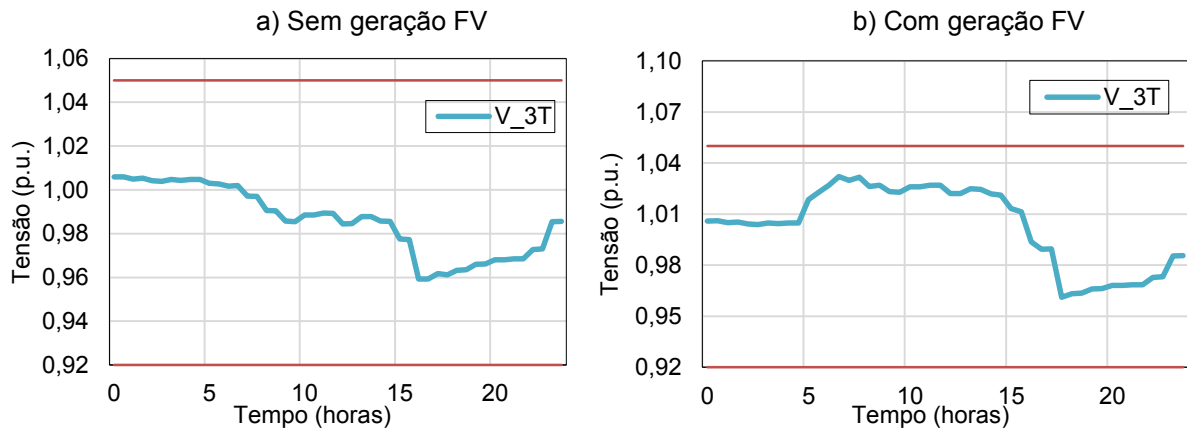
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 51 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3S para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3S não ocorre violação no limite superior de tensão.

**Figura 51 - Perfil de tensão no nó 3S.**

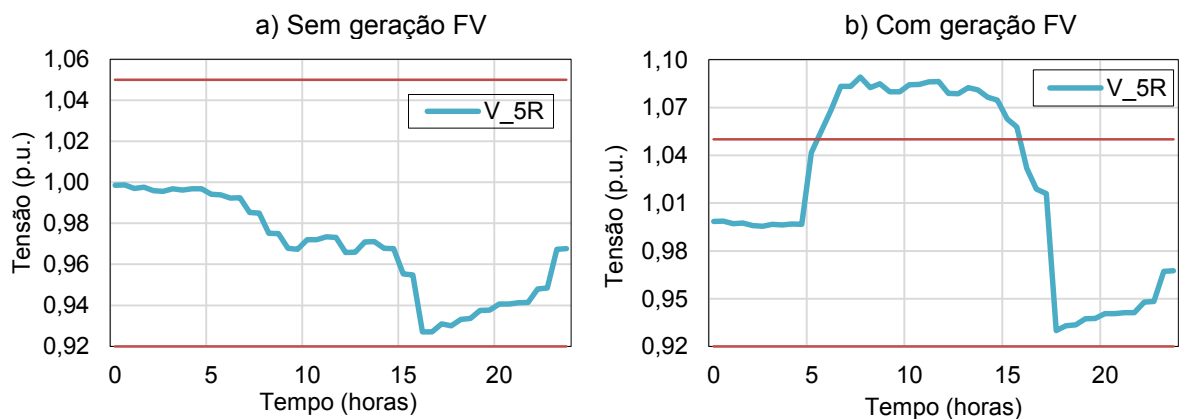
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 52 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3T para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3T não ocorre violação no limite superior de tensão.

**Figura 52 - Perfil de tensão do nó 3T**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 53 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 5R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 5R ocorre violação no limite superior de tensão.

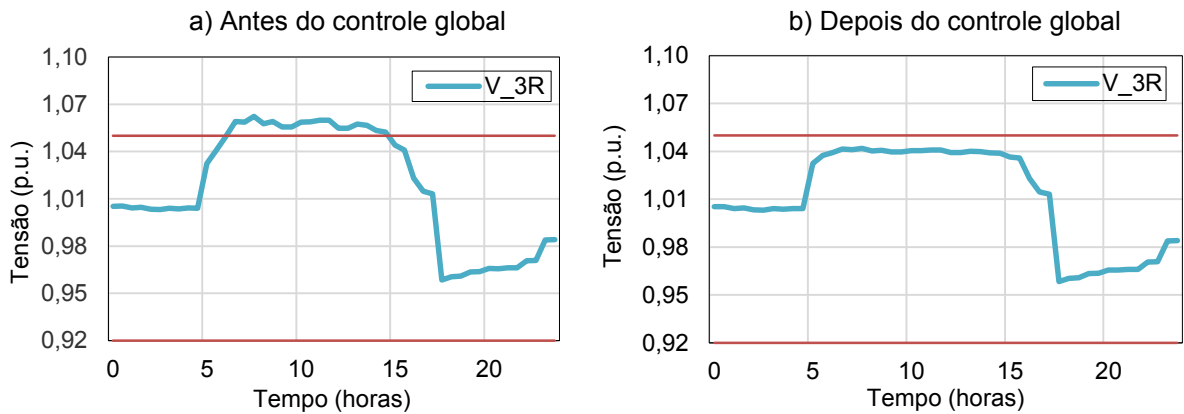
**Figura 53 - Perfil de tensão do nó 5R**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

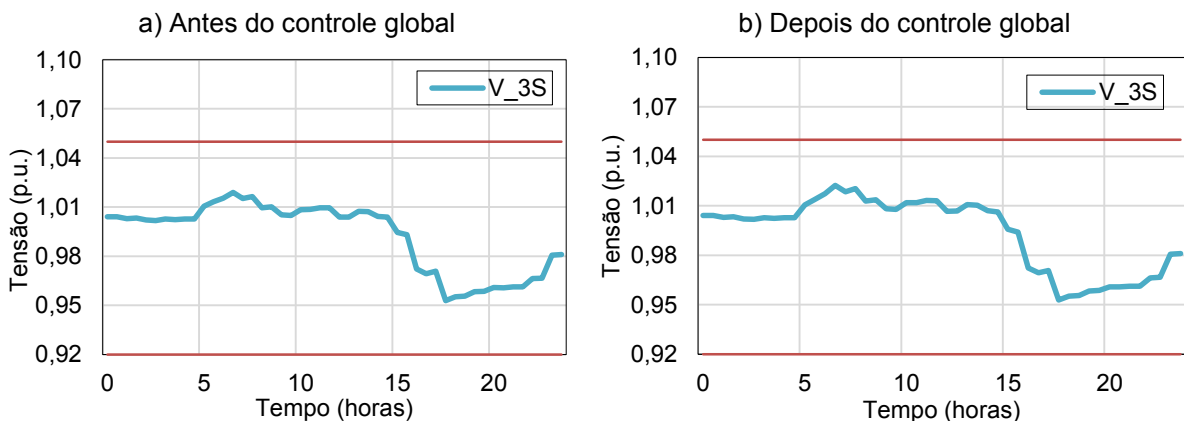
### 6.3.2 Tensão em regime permanente depois do controle global de tensão empregando PNL

Nesta seção são apresentados os resultados e análises para antes e depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL no sistema teste. Os resultados são mostrados desde a Figura 54 até a Figura 58 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.2.2.1, portanto aqui só serão detalhadas algumas das principais.

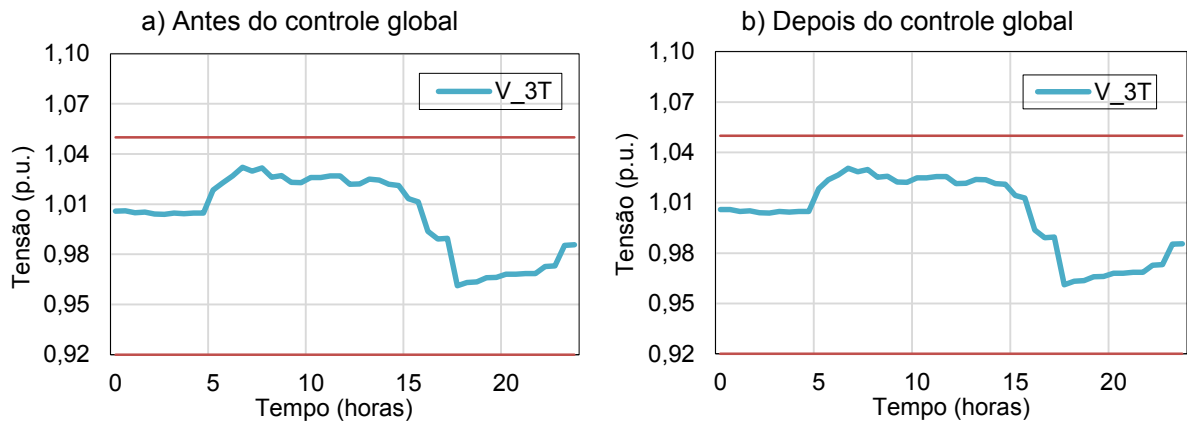
Na Figura 54 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 3R ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global reduziu uma quantidade de potência da geração FV do nó 5R para corrigir a violação de tensão nesse nó e, por conseguinte, a tensão do nó 3R diminuiu.

**Figura 54 - Perfil de tensão do nó 3R, com geração FV**

Na Figura 55 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 3S apresentou uma pequena elevação, enquanto que as tensões na fase R diminuíram devido que o controle global de tensão reduziu a potência da geração FV do nó 5R. Esta característica ocorre devido à tensão que surge no neutro em sistemas desbalanceados, tal como é explicado em Degroote, L. (2009). No entanto, também é explicado com os valores da matriz sensibilidade de tensão, que relacionam os nós de geração FV como o nó 3S como foi explicado no capítulo 5.

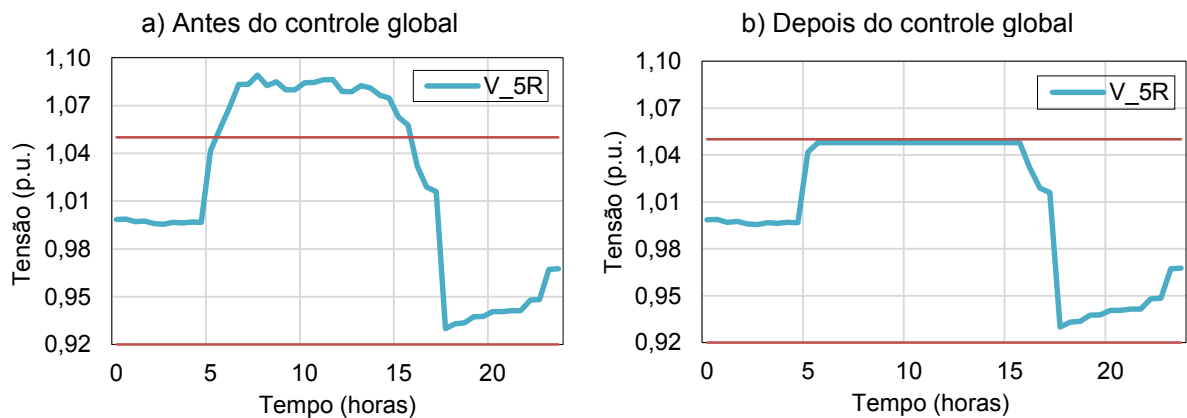
**Figura 55 - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV**

A Figura 56 mostra o perfil de tensão do nó 3T, antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 3S.

**Figura 56 - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV**

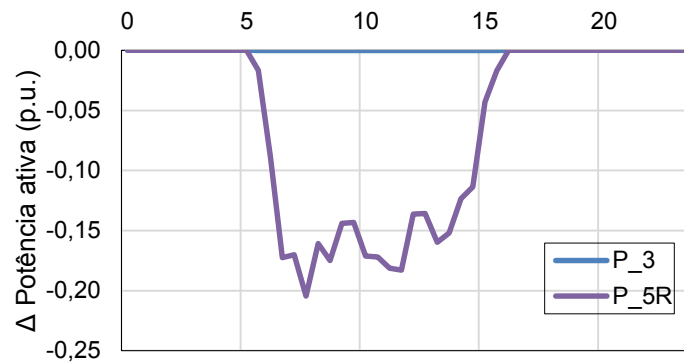
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 57 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 5R ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global reduziu uma quantidade de potência da geração FV do nó 5R para corrigir a violação de tensão nesse nó.

**Figura 57 - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 58 mostra-se o perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs ao longo do dia, obtido depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global só reduziu a potência ativa da geração FV conectado no nó 5R.

**Figura 58** - Perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 15 mostra-se a quantidade de redução de potência ativa e o FP final dos geradores FVs, obtidos depois de aplicar o controle global de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global levou os geradores FVs a trabalharem conectados no nó 5R com um FP diferente do unitário.

**Tabela 15** - Quantidade de redução de potência ativa em pu dos geradores FVs

Hora	Estratégia Global PNL		Fator de Potência	
	FV_3	FV_5R	FV_3	FV_5R
5:30	0,000	0,000	1,000	1,000
6:00	0,000	-0,017	1,000	0,950
6:30	0,000	-0,089	1,000	0,950
7:00	0,000	-0,173	1,000	0,950
7:30	0,000	-0,170	1,000	0,950
8:00	0,000	-0,205	1,000	0,950
8:30	0,000	-0,161	1,000	0,950
9:00	0,000	-0,175	1,000	0,950
9:30	0,000	-0,144	1,000	0,950
10:00	0,000	-0,143	1,000	0,950
10:30	0,000	-0,171	1,000	0,950
11:00	0,000	-0,172	1,000	0,950
11:30	0,000	-0,181	1,000	0,950
12:00	0,000	-0,183	1,000	0,950
12:30	0,000	-0,136	1,000	0,950
13:00	0,000	-0,136	1,000	0,950
13:30	0,000	-0,160	1,000	0,950
14:00	0,000	-0,152	1,000	0,950
14:30	0,000	-0,123	1,000	0,950
15:00	0,000	-0,114	1,000	0,950
15:30	0,000	-0,043	1,000	0,950
16:00	0,000	-0,017	1,000	0,952
16:30	0,000	0,000	1,000	1,000

Hora	Estratégia Global PNL		Fator de Potência	
	FV_3	FV_5R	FV_3	FV_5R
17:00	0,000	0,000	1,000	1,000
17:30	0,000	0,000	1,000	1,000
<b>Total energia</b>		<b>-2,869 pu /dia</b>		

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.3.3 Conclusões parciais

Os resultados da aplicação da estratégia global de controle de tensão com PNL mostraram resultados satisfatórios. As seguintes observações mereceram destaque:

- A injeção de potência ativa por parte dos geradores FVs trifásicos e monofásicos na barra 3 e no nó 5R, respectivamente, causaram a elevação das tensões.
- Em relação ao perfil de tensão em regime permanente, verificou-se a ocorrência de violações do limite superior só na fase R do sistema. Isto porque existiu a predominância de geração FV nessa fase.
- A estratégia global de tensão com PNL eliminou as violações de tensões no sistema, fez isto reduzindo só a mínima quantidade de potência ativa da geração FV monofásica ligada no nó 5R.
- Observou-se que quando a estratégia de controle retira potência só da fase R, provoca um aumento da tensão nas outras fases. Isso acontece devido ao deslocamento da posição do neutro causada pela existência do desbalanço entre as fases, tal como é explicado em Degroote, L. (2009). No entanto, também pode ser explicado com os valores da matriz da sensibilidade de tensão, que relacionam nós de geração FV como foi explicado no capítulo 1.

## 6.4 SISTEMA TESTE COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E DOIS MONOFÁSICOS

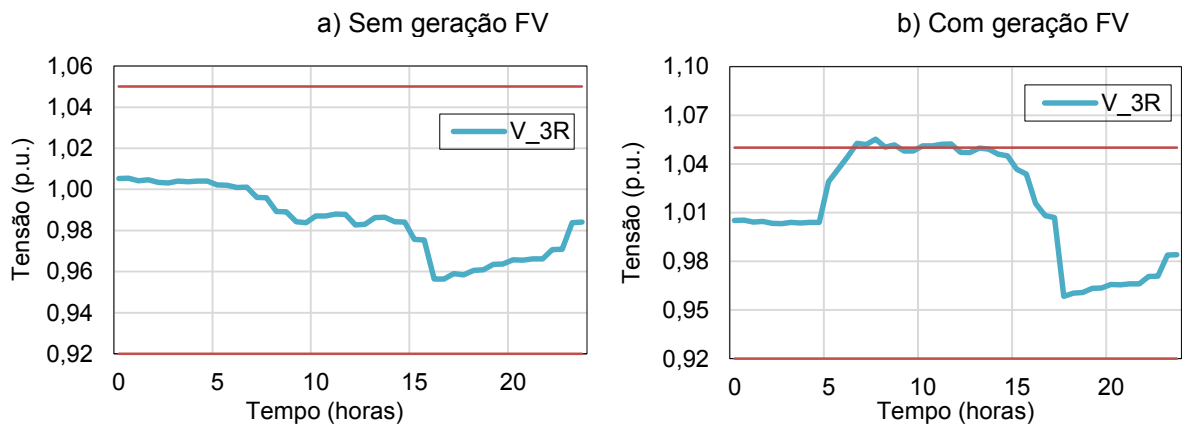
Neste sistema considerou-se cargas residências monofásicas e trifásicas distribuídas nas fases R, S e T do sistema da Figura 30. As cargas trifásicas que estão conectadas na barra 3 possuem geradores FVs trifásicos e as cargas monofásicas que estão conectadas nos nós 4T e 5R possuem geradores FVs monofásicos. As curvas de demanda das cargas foi especificado no seção 6.1, e a quantidade das potências contratadas das residências e a quantidade da geração FV instaladas neste sistema teste são detalhados no Apêndice D.

### 6.4.1 Tensão em regime permanente antes do controle de tensão

Nesta seção foram realizadas as simulações e análises do fluxo de carga para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede. Os resultados das simulações são mostrados desde a Figura 59 até a Figura 63 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.2.1, portanto aqui só serão detalhadas algumas das principais.

A Figura 59 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3R ocorre pequena violação no limite superior de tensão.

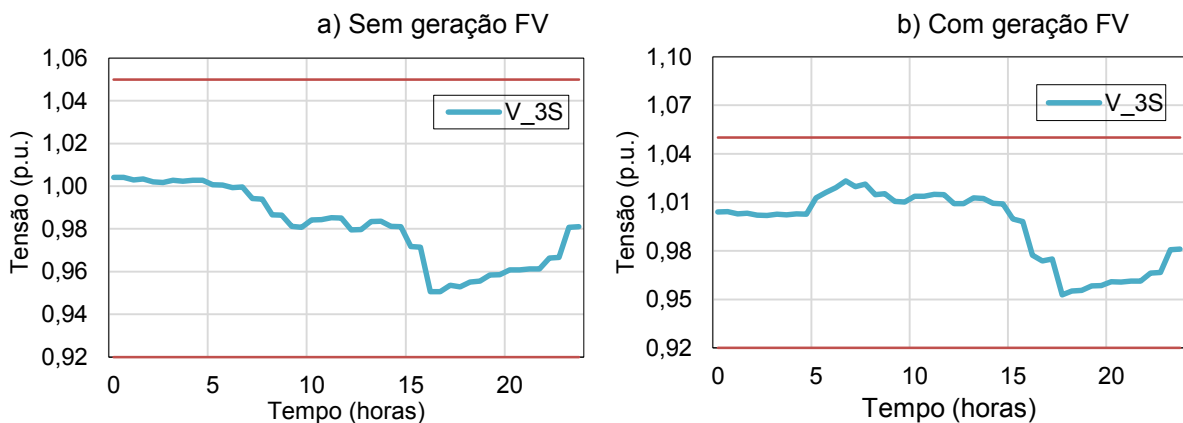
**Figura 59 - Perfil de tensão do nó 3R**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 60 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3S para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3S não ocorre pequena violação no limite superior de tensão.

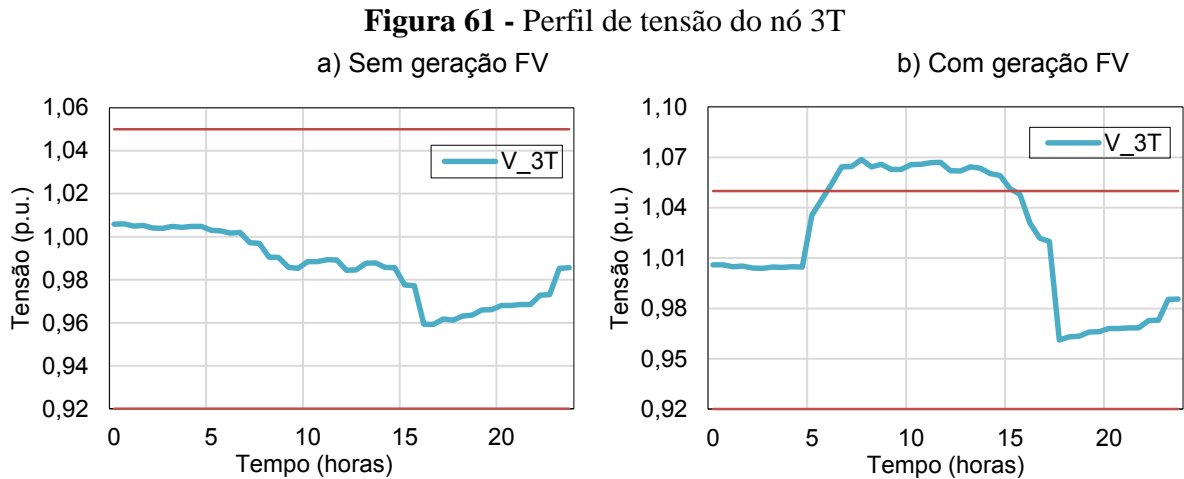
**Figura 60 - Perfil de tensão do nó 3S**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

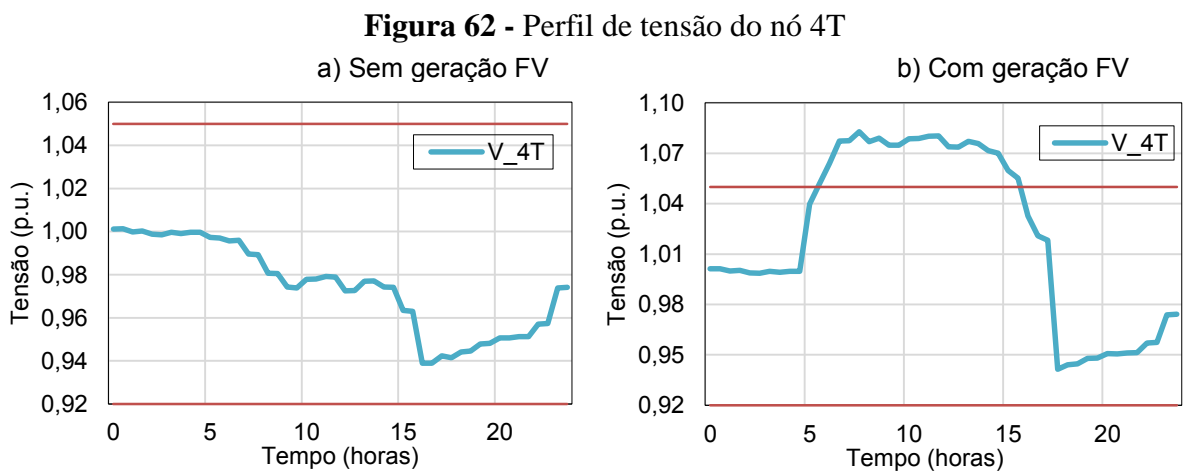


A Figura 61 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3T para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3T ocorre violação no limite superior de tensão.



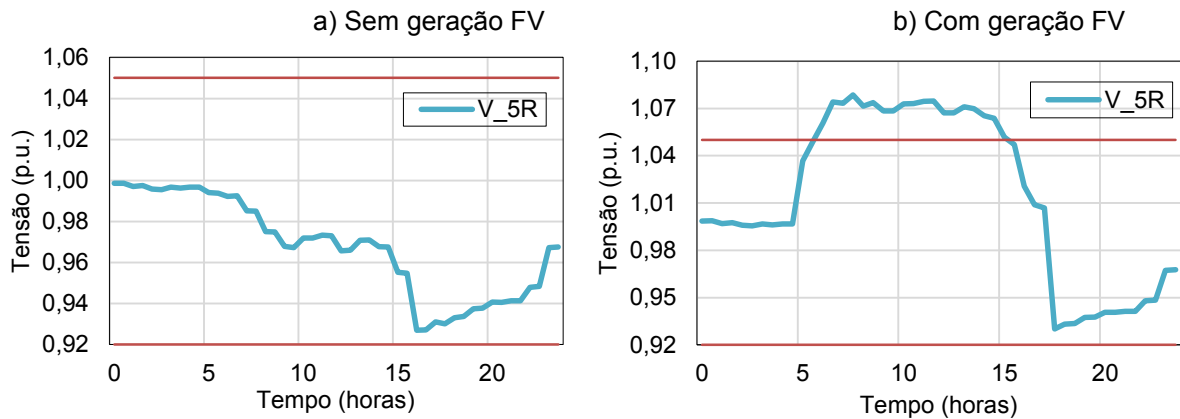
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 62 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 4T para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 4T ocorre violação no limite superior de tensão.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 63 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 5R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 5R ocorre violação no limite superior de tensão.

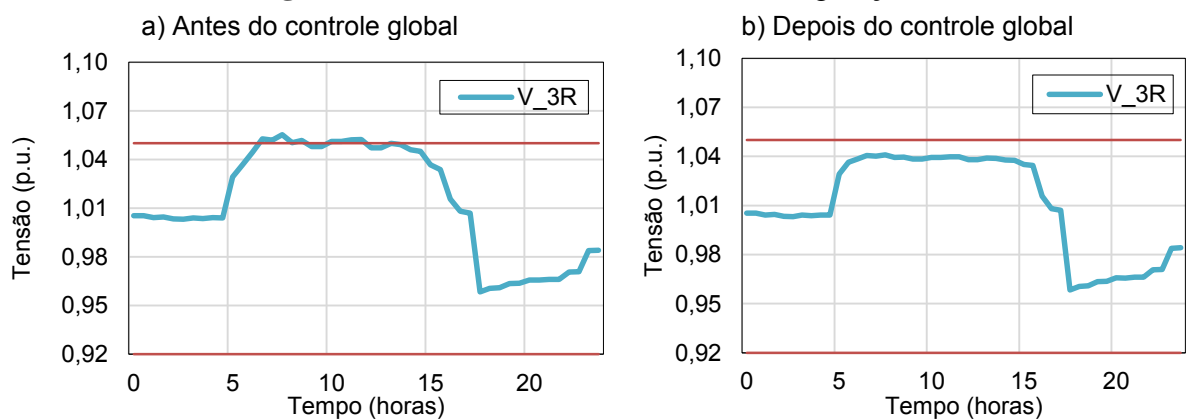
**Figura 63 - Perfil de tensão do nó 5R**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 6.4.2 Tensão em regime permanente depois do controle de global de tensão com PNL

Nesta seção são apresentados os resultados e análises para antes e depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL no sistema teste. Os resultados são mostrados desde a Figura 64 até a Figura 69 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.2.2.1, portanto aqui só serão detalhadas algumas das principais diferenças.

Na Figura 64 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 3R ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global retirou uma quantidade de potência da geração FV do nó 5R para corrigir a violação de tensão nesse nó e, por conseguinte, a tensão do nó 3R diminuiu.

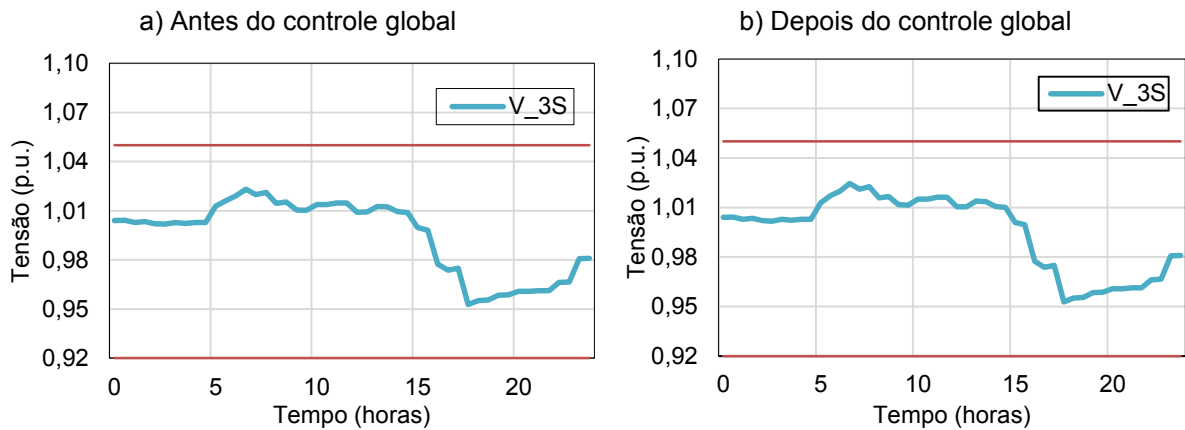
**Figura 64 - Perfil de tensão do nó 3R, com geração FV**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 65 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 3S apresentou uma pequena elevação, enquanto que as tensões nas fases R e T diminuíram devido que o controle global de tensão retirou potências das gerações FVs dos nós 5R e 3S. Esta característica ocorre devido à tensão que surge no neutro em sistemas

desbalanceados, tal como é explicado em Degroote (2009). No entanto, também é explicado com os valores da matriz sensibilidade de tensão, que relacionam os nós de geração FV com os nós 5R e 3S como foi explicado no capítulo 5.

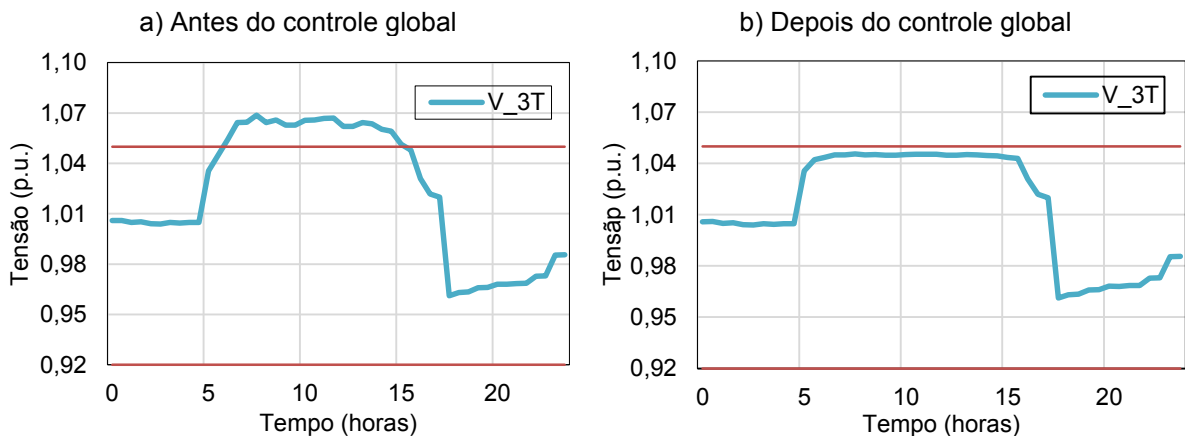
**Figura 65 - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

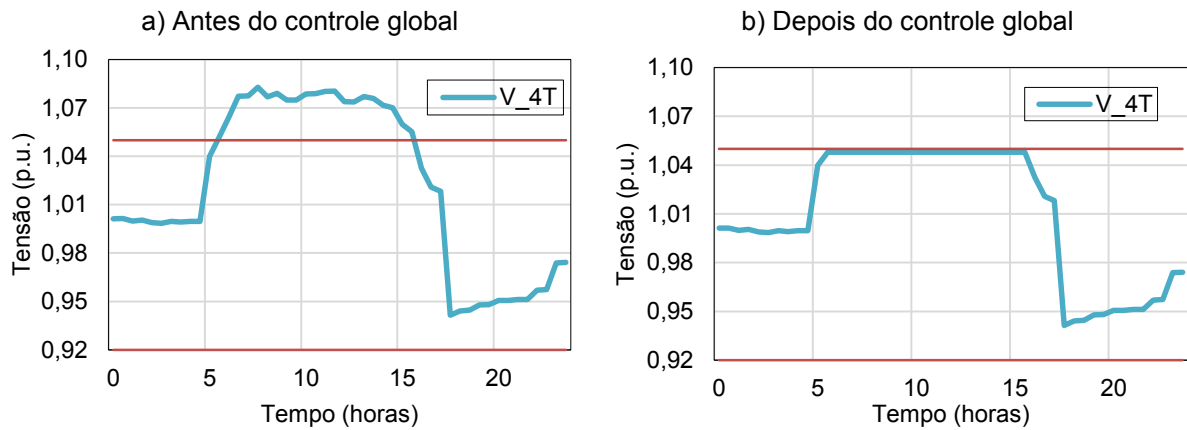
A Figura 66 mostra o perfil de tensão do nó 3T para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 3R.

**Figura 66 - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV**



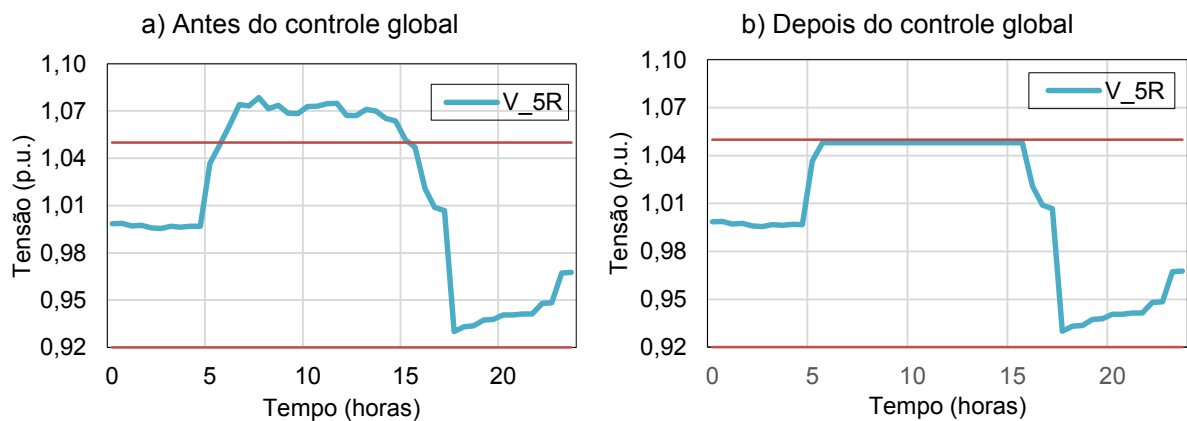
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 67 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 4T ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global retirou uma quantidade de potência da geração FV do nó 4T para corrigir a violação de tensão nesse nó.

**Figura 67** - Perfil de tensão do nó 4T, com geração FV

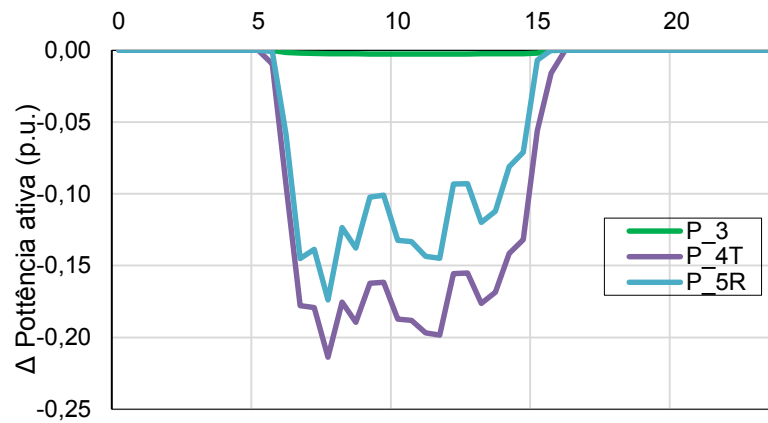
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 68 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 5R ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global retirou uma quantidade de potência da geração FV do nó 5R para corrigir a violação de tensão nesse nó.

**Figura 68** - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 69 mostra-se o perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs ao longo do dia, obtido depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global só retirou potência da geração FV monofásica conectados nos nós 4T e 5R.

**Figura 69** - Perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 16 mostra-se a quantidade de redução de potência ativa e o FP final dos geradores FVs, obtidos depois de aplicar o controle global de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global levou os geradores FVs a trabalharem conectados à rede a com FP diferente do unitário.

**Tabela 16** - Quantidade de redução de potência ativa em pu dos geradores FVs

Hora	Estratégia Global PNL			Fator de Potência		
	FV_3	FV_4T	FV_5R	FV_3	FV_4T	FV_5R
5:30	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000
6:00	0,000	-0,010	-0,001	1,000	0,956	0,996
6:30	-0,002	-0,094	-0,059	0,998	0,950	0,950
7:00	-0,002	-0,178	-0,145	0,998	0,950	0,950
7:30	-0,002	-0,179	-0,139	0,997	0,950	0,950
8:00	-0,002	-0,214	-0,174	0,997	0,950	0,950
8:30	-0,002	-0,175	-0,124	0,997	0,950	0,950
9:00	-0,002	-0,189	-0,138	0,997	0,950	0,950
9:30	-0,002	-0,162	-0,102	0,997	0,950	0,950
10:00	-0,002	-0,162	-0,101	0,997	0,950	0,950
10:30	-0,002	-0,187	-0,132	0,997	0,950	0,950
11:00	-0,002	-0,188	-0,133	0,997	0,950	0,950
11:30	-0,003	-0,197	-0,144	0,997	0,950	0,950
12:00	-0,003	-0,198	-0,145	0,997	0,950	0,950
12:30	-0,003	-0,156	-0,093	0,997	0,950	0,950
13:00	-0,002	-0,155	-0,093	0,997	0,950	0,950
13:30	-0,002	-0,176	-0,120	0,997	0,950	0,950
14:00	-0,002	-0,169	-0,112	0,997	0,950	0,950
14:30	-0,002	-0,142	-0,081	0,997	0,950	0,950
15:00	-0,002	-0,132	-0,071	0,997	0,950	0,950
15:30	-0,002	-0,056	-0,007	0,998	0,950	0,981
16:00	0,000	-0,016	0,000	1,000	0,954	1,000
16:30	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000

Hora	Estratégia Global PNL			Fator de Potência		
	FV_3	FV_4T	FV_5R	FV_3	FV_4T	FV_5R
17:00	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000
17:30	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000
<b>Total energia</b>	<b>-5,293 pu /dia</b>					

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.4.3 Conclusões parciais

Os resultados da aplicação da estratégia global de controle de tensão com PNL mostraram resultados satisfatórios. As seguintes observações mereceram destaque:

- A injeção de potência ativa por parte dos geradores FVs trifásicos e monofásicos na barra 3 e nos nós 4T e 5R respectivamente causaram a elevação das tensões.
- Em relação ao perfil de tensão em regime permanente, verificou-se a ocorrência de violações do limite superior nas fases R e T do sistema. Isto porque existiu a predominância de geração FV nessas fases.
- A estratégia global de tensão com PNL eliminou as violações de tensões no sistema, reduzindo a mínima quantidade de potência ativa da geração FV trifásica e monofásica.
- Observou-se que quando a estratégia de controle reduz a potência só das fases R e T, provoca um aumento da tensão na fase S. Isso acontece devido ao deslocamento da posição do neutro causada pela existência do desbalanço entre as fases, tal como é explicado em Degroote (2009). No entanto, também pode ser explicado com os valores da matriz sensibilidade de tensão, que relacionam nós de geração FV como foi explicado no capítulo 1.

### 6.5 SISTEMA TESTE COM DOIS GERADORES FVs TRIFÁSICOS

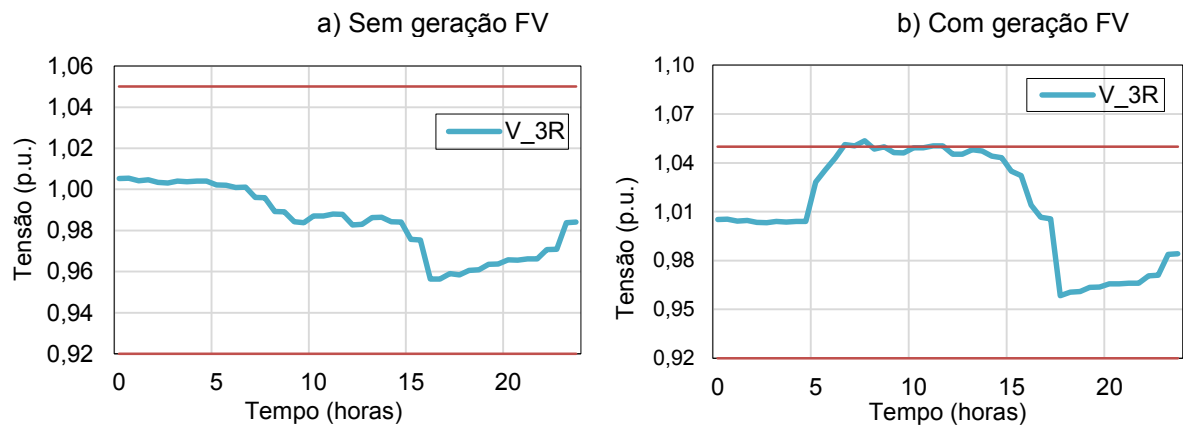
Neste sistema considerou-se cargas residenciais monofásicas e trifásicas distribuídas nas fases R, S e T do sistema teste da Figura 30. As cargas trifásicas que estão conectadas nas barras 3 e 5 possuem geradores FVs trifásicos. As curvas de demanda das cargas foi especificada na seção 6.1, e a quantidade das potências contratadas das residências e a quantidade da geração FV instalados neste sistema teste são detalhados no Apêndice E.

### 6.5.1 Tensão em regime permanente antes do controle de tensão

Nesta seção foram realizadas as simulações e análises do fluxo de carga para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede. Os resultados das simulações são mostrados desde a Figura 70 até a Figura 74 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.2.1, portanto aqui também serão detalhadas algumas das principais diferenças.

A Figura 70 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3R para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3R ocorre ligeira violação no limite superior de tensão.

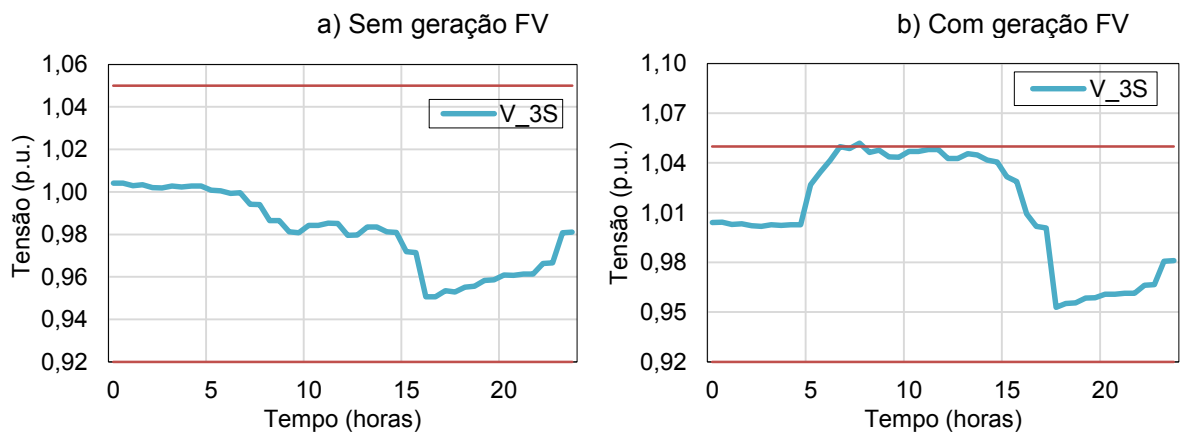
**Figura 70 - Perfil de tensão do nó 3R**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 71 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3S para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3S ocorre pequena violação no limite superior de tensão.

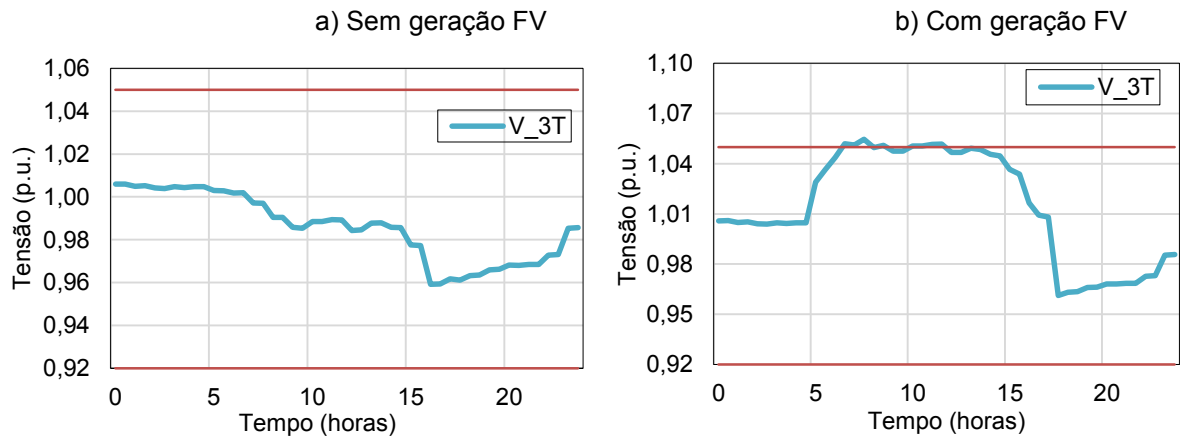
**Figura 71 - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 72 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3T para os casos sem geração FV e com geração FV conectadas à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 3T ocorre pequena violação no limite superior de tensão.

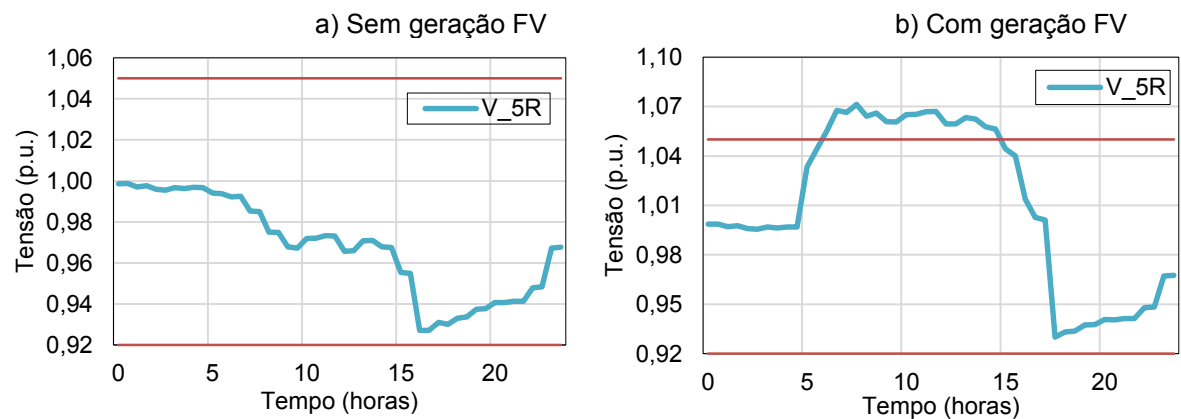
**Figura 72 - Perfil de tensão do nó 3T**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 73 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 5R para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 5R ocorre violação no limite superior de tensão.

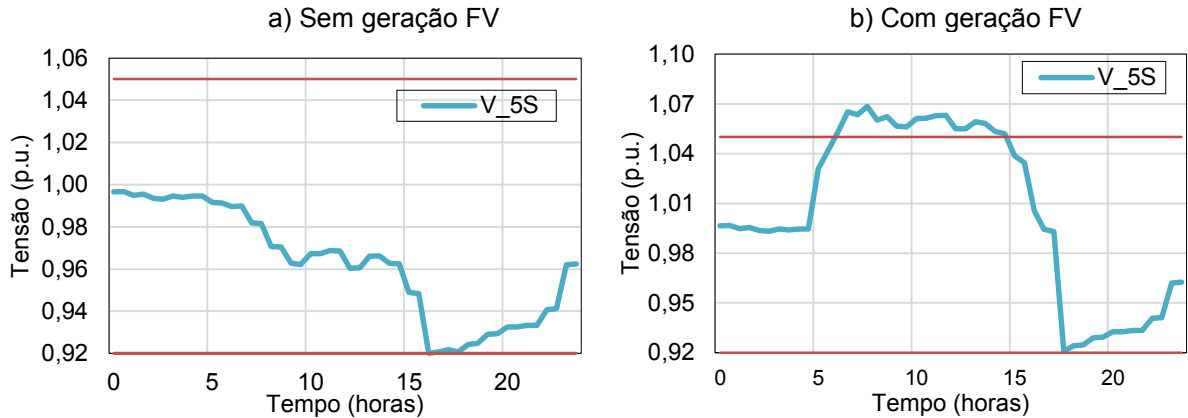
**Figura 73 - Perfil de tensão do nó 5R**



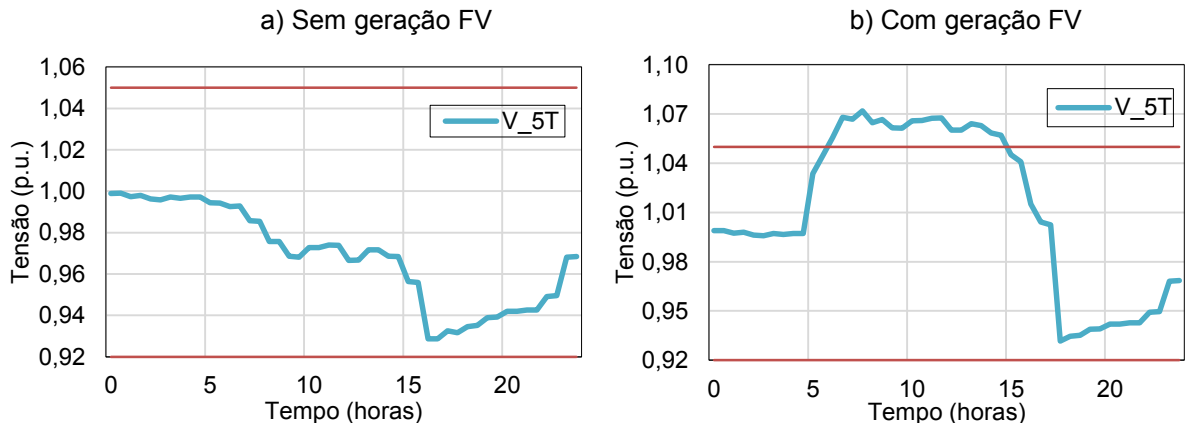
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 74 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 5S para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 5S ocorre violação no limite superior de tensão.



**Figura 74 - Perfil de tensão do nó 5S**

A Figura 75 mostra o perfil de tensão ao longo do dia do nó 3S para os casos sem geração FV e com geração FV conectada à rede. No caso com geração FV, verifica-se que no nó 5T ocorre violação no limite superior de tensão.

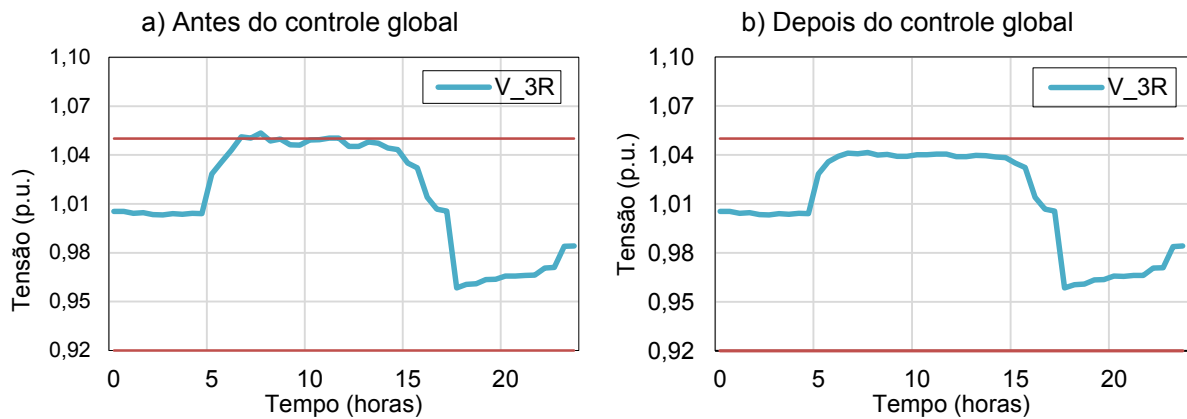
**Figura 75 - Perfil de tensão do nó 5T**

### 6.5.2 Tensão em regime permanente depois do controle de global de tensão empregando PNL

Nesta seção são apresentados os resultados e análises para antes e depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL no sistema teste. Os resultados são mostrados desde a Figura 76 até a Figura 82 e as análises são de forma similar às apresentadas na seção 6.2.2.1, portanto aqui só serão detalhadas algumas das principais.

Na Figura 76 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 3R ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global reduziu uma quantidade de potência da geração FV da barra 5 para corrigir a violação de tensão nessa barra e, por conseguinte, a tensão do nó 3R diminuiu.

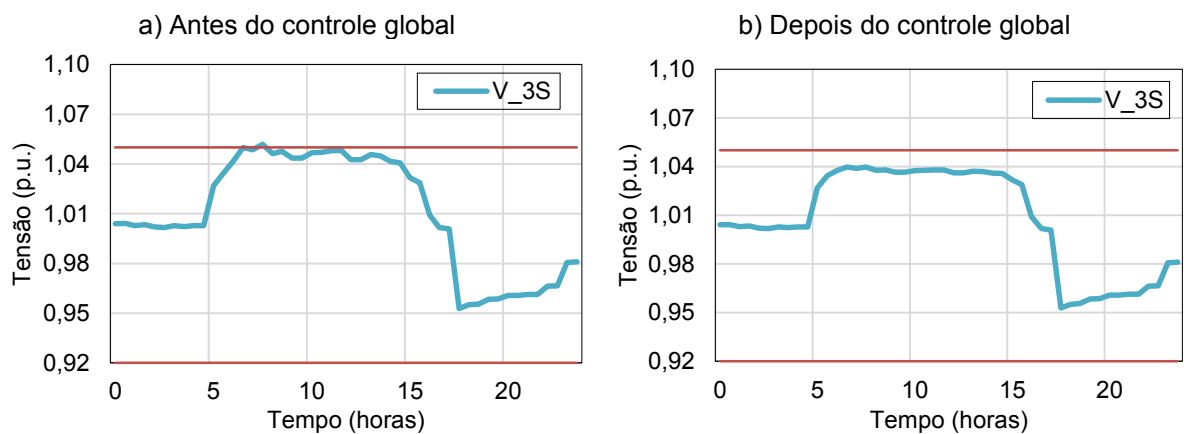
**Figura 76 - Perfil de tensão do nó 3R, com geração FV**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

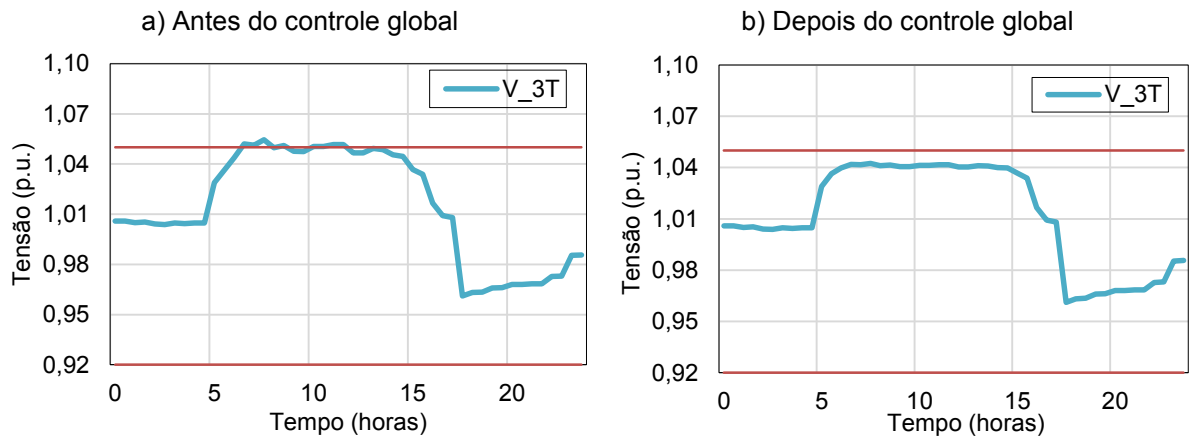
A Figura 77 mostra o perfil de tensão do nó 3S para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 3R.

**Figura 77 - Perfil de tensão do nó 3S, com geração FV**



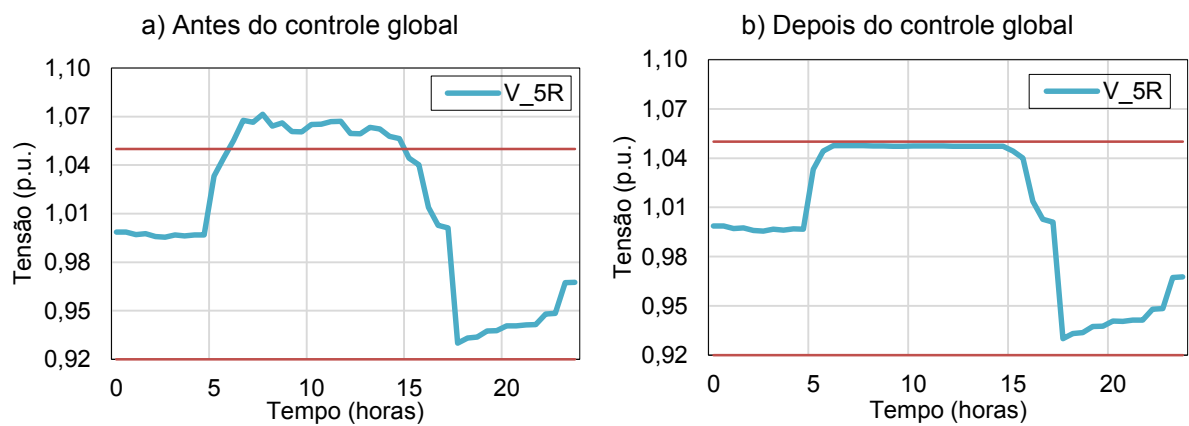
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 78 mostra o perfil de tensão do nó 3T para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 3R.

**Figura 78 - Perfil de tensão do nó 3T, com geração FV**

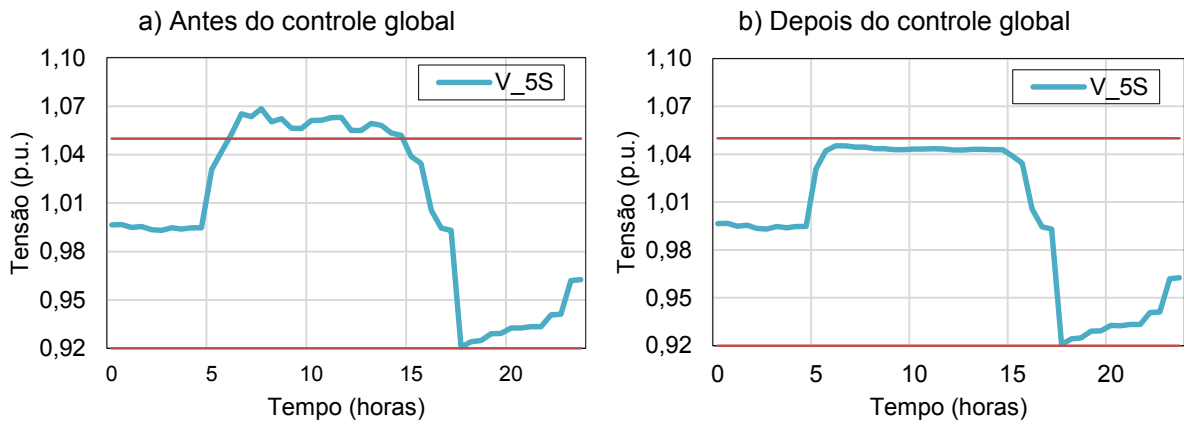
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 79 observa-se que depois de aplicar o controle global de tensão, o perfil de tensão do nó 5R ficou dentro da faixa permitida. Isto devido que o controle de tensão global reduziu uma quantidade de potência da geração FV da barra 5 para corrigir a violação de tensão nesse barra e, por conseguinte, nesse nó.

**Figura 79 - Perfil de tensão do nó 5R, com geração FV**

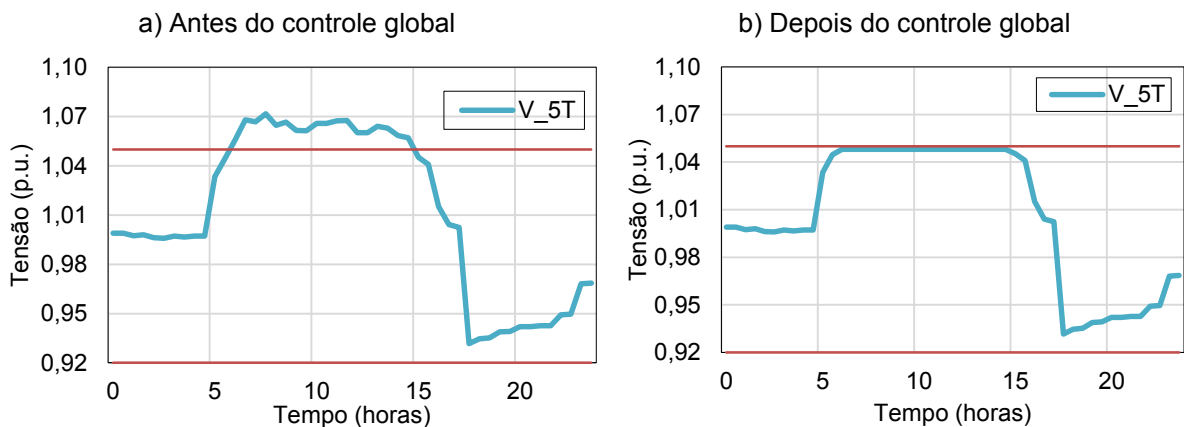
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 80 mostra o perfil de tensão do nó 5S para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 5R.

**Figura 80** - Perfil de tensão do nó 5S, com geração FV

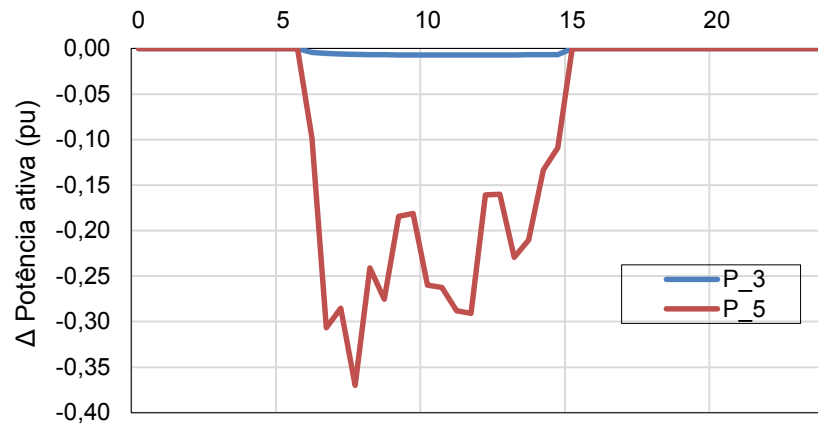
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 81 mostra o perfil de tensão do nó 5T para antes e depois de aplicar o controle global de tensão. O comportamento dos perfis de tensão foi semelhante ao observado no nó 5R.

**Figura 81** - Perfil de tensão do nó 5T, com geração FV

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 82 mostra-se o perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs ao longo do dia, obtido depois de aplicar a estratégia global de controle de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global só reduziu potência da geração FV trifásica conectada na barra 5.

**Figura 82** - Perfil da redução de potência ativa dos geradores FVs

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 17 mostra-se a quantidade de redução de potência ativa e o FP final dos geradores FVs, obtidos depois de aplicar o controle global de tensão empregando PNL. Observa-se que o controle global levou a trabalhar aos geradores FVs conectados na barras 5 a um FP diferente do unitário.

**Tabela 17** - Quantidade de redução de potência ativa em pu dos geradores FVs

Hora	Estratégia Global PNL		Fator de Potência	
	FV_3	FV_5	FV_3	FV_5
5:30	0,000	0,000	1,000	1,000
6:00	0,000	0,000	1,000	1,000
6:30	-0,001	-0,033	0,993	0,950
7:00	-0,002	-0,102	0,993	0,950
7:30	-0,002	-0,095	0,993	0,950
8:00	-0,002	-0,123	0,993	0,950
8:30	-0,002	-0,080	0,993	0,950
9:00	-0,002	-0,092	0,993	0,950
9:30	-0,002	-0,061	0,993	0,950
10:00	-0,002	-0,060	0,993	0,950
10:30	-0,002	-0,087	0,993	0,950
11:00	-0,002	-0,087	0,993	0,950
11:30	-0,002	-0,096	0,993	0,950
12:30	-0,002	-0,054	0,993	0,950
13:00	-0,002	-0,053	0,993	0,950
13:30	-0,002	-0,076	0,993	0,950
14:00	-0,002	-0,070	0,993	0,950
14:30	-0,002	-0,044	0,993	0,950
15:00	-0,002	-0,036	0,993	0,950
15:30	0,000	0,000	1,000	1,000

<b>Hora</b>	<b>Estratégia Global PNL</b>		<b>Fator de Potência</b>	
	<b>FV_3</b>	<b>FV_5</b>	<b>FV_3</b>	<b>FV_5</b>
16:30	0,000	0,000	1,000	1,000
17:00	0,000	0,000	1,000	1,000
17:30	0,000	0,000	1,000	1,000
<b>Total energia</b>		<b>-4,165 pu /dia</b>		

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.5.3 Conclusões parciais

Os resultados da aplicação da estratégia global de controle de tensão com PNL mostraram resultados satisfatórios. As seguintes observações mereceram destaque:

- A injeção de potência ativa por parte dos geradores FVs trifásicos na barra 3 e 5 causaram a elevação das tensões.
- Em relação ao perfil de tensão em regime permanente, verificou-se a ocorrência de violações do limite superior nas fases R, S e T do sistema. Isto porque os geradores FVs são trifásicos e injetam a mesma quantidade de potência nas três fases.
- A estratégia global de tensão com PNL eliminou as violações de tensões no sistema, fez isto reduzindo a mínima quantidade de potência ativa da geração FV trifásica.
- Observou-se que a estratégia de controle tira maior potência da geração FV conextada na barra 5. Isto acontece devido que a barra 5 têm maior efeito na tensão no sistema. Este efeito pode ser explicado com a comparação dos valores da matriz sensibilidade de tensão, das barras de geração FV como foi explicado no capítulo 1.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

Neste trabalho apresentou-se um panorama da integração de sistemas FVs na rede secundária de distribuição em BT, como também mostrou o problema de aumento de tensão na rede de distribuição que causam quando há elevado nível de penetração de geração FV. Dessa forma foi realizada uma pesquisa das principais estratégias de controle de tensão que empregam reduções de potência ativa dos geradores FVs. Em função dos trabalhos encontrados na literatura, foi possível direcionar os casos e simulações que foram abordados no capítulo de resultados.

Neste contexto, uma nova estratégia global de controle de tensão é apresentada para solucionar o problema de aumento de tensão, e otimizando a máxima geração FV. A modelagem é tratada como um problema de programação não linear (PNL) simples, empregando a matriz sensibilidade de tensão desenvolvida no capítulo 5.2. No problema, o algoritmo da estratégia de controle de tensão retorna a mínima redução de potência ativa dos geradores FVs, assim como o fator de potência (FP) destes geradores, indicando o novo modo de operação. Os resultados obtidos depois das simulações foram perfis de tensão em regime permanente dentro das faixas de tensões permitidas, e é mostrado que esta estratégia reduz a quantidade de energia FV menos que as outras estratégias de controle. De modo geral, pode-se dizer que a estratégia de controle de tensão empregando PNL é a proposta mais eficaz.

Neste trabalho também foi estendida a estratégia global de controle de tensão, encontrada na literatura, cujo modelagem é tratada como um problema de programação linear (PL) simples, empregando a matriz sensibilidade de tensão. No problema, o algoritmo desta estratégia soluciona o problema de aumento de tensão otimizado a máxima geração FV. Nesta estratégia considera-se em conta que os geradores FVs sempre vão trabalhar com FP constante.

Por último também foi estendida a estratégia local de controle de tensão, encontrada na literatura, cuja modelagem usa um algoritmo iterativo e emprega a matriz sensibilidade de tensão. No problema, o algoritmo desta estratégia soluciona o problema de aumento de tensão provocada pela penetração da geração FV na rede secundária de distribuição. Esta estratégia só trabalha com geradores FVs monofásicos e tem em conta que estes geradores sempre vão trabalhar com fator de potência constante.

## 7.1 TRABALHOS FUTUROS

Adicionalmente às formulações apresentadas neste trabalho, destacam-se algumas considerações que podem ser analisadas para tornar a avaliação da estratégia de controle de tensão com PNL mais completa, como segue:

- Analisar a matriz sensibilidade de tensão e a sua influência na estratégia global de controle de tensão ao estender o algoritmo para considerar as impedâncias mútuas entre as fases do sistema.
- Analisar a inclusão dos geradores FVs com capacidade de armazenamento. Devido à variabilidade desta fonte de geração FV, baterias são utilizadas para suprir a carga local em instantes de redução de geração oriundos, por exemplo, da passagem de nuvens. Existem diferentes estratégias para armazenar a energia na bateria e estas podem causar impactos distintos no sistema de distribuição.
- Avaliação econômica das estratégias de controle de tensão estudados, talvez o fator decisivo mais importante para a seleção da melhor estratégia candidata.



## REFERÊNCIAS

---

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Brasil ultrapassa 5 mil conexões de micro e minigeração.** Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa>>. Acesso em: 15 nov 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST).** Brasília, DF, 2017. (Qualidade de Energia Elétrica. Módulos, 8).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST).** Brasília, DF, 2016. (Acesso ao Sistema de Distribuição. Módulos, 3).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015.** Brasília, DF, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012.** Brasília, DF, 2012.
- ARYES, H. **Desenvolvimento de metodologias de análise de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2010 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5410:** instalações de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **Requisitos para a conexão de acessantes ao sistema de distribuição Cemig-D - conexão em baixa tensão:** manual de distribuição. Belo Horizonte: CEMIG. 2016. 43 p.
- CONSTANTIN, A.; LAZAR, R. D.; KJÆR, S. B. **Voltage control in low voltage networks:** danfoss solar inverters A/D2012. Heidelberg: Springer, 2012. 100 p.
- DEGNER, T.; ARNOLD, G.; REIMANN, T.; STRAUß, P.; ENGEL, B. AND BREEDE, M. Increasing the photovoltaic-system hosting capacity of low voltage distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 21., 2011, Germany. **Proceedings...** Frankfurt: [S. n.], 2011. p. 1-4.
- DEGROOTE, L.; RENDERS, B.; MEERSMAN, B.; VANDEVELDE, L. Neutral-point shifting and voltage unbalance due to single-phase DG units in low voltage distribution networks. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2., 2009, Romania. **Proceedings...** Bucharest: [S. n.], 2009. p. 1-8.
- DEMIROK, E.; CASADO GONZALEZ, P.; FREDERIKSEN, K. H. B.; SERA, D.; RODRIGUEZ, P. AND TEODORESCU, R. Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids, photovoltaics, **Journal of Photovoltaics IEEE**, Piscataway, v. 1, n. 2, p. 174-182, 2011.

D'HULST, R.; PEETERS, E. Distributed voltage control strategies in a LV distribution network. 2010. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 10., 2010, Spain. **Proceedings...** Granada: [S. n.], 2010. p. 1-5.

ENERGIAS DO BRASIL S.A. - EDP. **Procedimento para conexão de microgeradores ao sistema de distribuição em baixa tensão.** São Paulo, 2016. 25 p.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 50160:** voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Bruselas, Pilsen, 2010.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 50438:** requirements for micro-generating plants to be connected in parallel with public low-voltage distribution networks. Bruselas, Pilsen, 2013.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION - EPIA. Connecting the sun. Bruselas, 2012. 120 p.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION- EPIA. Global market outlook: for solar power 2016-2020. Bruselas, 2016. 40 p.

FERREIRA, P.; CARVALHO, P.; FERREIRA, L.; ILIC, M. Distributed energy resources integration challenges in low-voltage networks: voltage control limitations and risk of cascading. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, New York, v. 4, n. 1, p. 82–88, 2013.

FRANCISQUINI, A. **Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição.** 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

GEIBEL, D.; DEGNER, T.; REIMANN, T.; ENGEL, B.; BULO, T.; DA COSTA, J. P. Active Intelligent Distribution Networks: Coordinated voltage regulation methods for networks with high share of decentralised generation. In: WORKSHOP INTEGRATION OF RENEWABLES INTO THE DISTRIBUTION GRID (CIRED), 2012, Portugal, **Proceedings...** Lisboa: [S. n.], 2012. p. 1-4.

KORNER, C.; HENNIG, M.; HANDT, K.; SCHMID, R. Gaining experience with a regulated distribution transformer in a smart grid environment. In: INTEGRATION OF RENEWABLES INTO THE DISTRIBUTION GRID (CIRED), 2012, Portugal, **Proceedings...** Lisboa: [S. n.], 2012. p. 1-4.

MARRA, F.; FAWZY, Y. T.; BULO, T.; BLAZIC, B. Energy storage options for voltage support in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES (ISGT), 3., 2012, Germany, **Proceedings...** Berlin: [s. n.], 2012. p. 1-7.

MARTINS, M. **Trânsito de energia trifásico probabilístico.** 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

MELIPOULOS, A.; KENNEDY, J.; NUCCI, C.; BORGHETTI, A.; CONTAXIS, G. Power distribution practices in USA and Europe: impact on power quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 8., 1998, Grécia. **Proceedings...** Atenas: [S. n.], 1998. v. 1, p. 24–29.

MISHRA, S.; DAS, D.; PAUL, S. A. Simple algorithm for distribution system load flow with distributed generation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES AND INNOVATIONS IN ENGINEERING (ICRAIE), 2014, Índia. **Proceedings...** Jipur: [S. n.], 2014. p. 1-6.

MISHRA, S.; AND DAS, D. Evolution of distribution system load flow methods-a bibliographic review. **Journal of the Institution of Engineers**, Tokyo, v. 91, n. 3, p. 42-48, 2010.

NAVARRO, A.; OCHOA, L. Increasing the PV hosting capacity of LV networks: OLTC-fitted transformers vs. reinforcements. In: IEEE POWER ENERGY SOCIETY INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE (ISGT), Washington. **Proceedings...** Washington: [S. n.], 2015. p. 1-5.

OCHOA, L. **Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

PANTZIRIS, K. **Voltage support strategies in a rural low voltage network with high photovoltaic penetration**. 2014. 112 f. Thesis (Doutorado) - Delft University of Technology, Delft, 2014.

JOINT RESEARCH CENTRE. Institute for Energy Transport - IET. **Geographical Information System (PVGIS)**. Ispra, 2012. Disponível em: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>. Acesso em: 1 nov 2016.

SAMADI, A.; ERIKSSON, R.; SODER, L.; RAWN, B. AND BOEMER, J. Coordinated active power-dependent voltage regulation in distribution grids with PV systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 29, n. 3, p. 1454–1464, 2014.

SHAHNIA F.; CHANDRASENA, R. A three-phase community microgrid comprised of single-phase energy resources with an uneven scattering amongst phases. **Journal Electrical Power and Energy Systems**, Berlin, v. 84 , p. 267-283, 2016

STETZ, T.; MARTEN, F. AND BRAUN, M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, New York,, v. 4, p. 534-542, 2013.

TONKOSKI, R.; LOPES, L. A. C. AND EL-FOULY, T. H. M. Coordinated active power curtailment of grid connected pv inverters for overvoltage prevention. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, New York, v. 2, n. 2, p. 139-147, 2011.

VANDENBERGH, M.; CRACIUN, D.; HELMBRECHT, V.; HERMES, R.; LAMA, R.; MICHELE SONVILLA, P.; REKINGER, M.; CONCAS, G. **Prioritisation of technical solutions available for the integration of PV into the distribution grid, tech. rep., DERlab**. Roma: European Distributed Energy Resources Laboratories, 2013. 52 p.

VERBAND DEUTSCHER ELEKTROINGENIEURE – VDE. **AR-N 4105: generators connected to the lv distribution network - technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks**. Berlin, 2011.

VILLALVA, M. G. **Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2010 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

## APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE

### PRIMEIRA CURVA DE DEMANDA DO SISTEMA TESTE

Considerou-se que todas as cargas do sistema são de tipo potência constante. A Tabela 18 apresenta as potências ativas e reativas máximas de cada nó

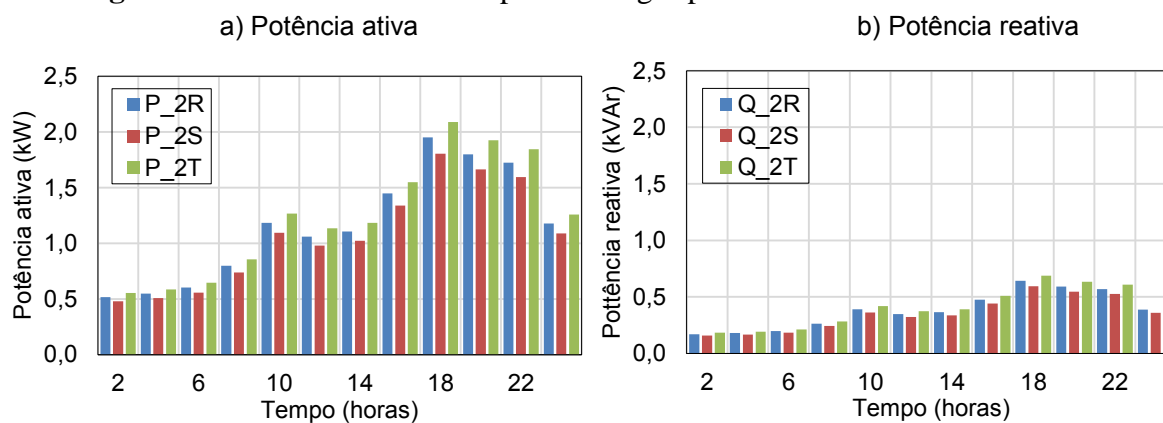
**Tabela 18** - Potências máximas das barras por fase para a primeira demanda.

Barra	P_R (kW)	Q_R (kVAr)	P_S (kW)	Q_S (kVAr)	P_T (kW)	Q_T (kVAr)
2	2,011	0,661	1,859	0,611	2,152	0,707
3	4,945	1,625	2,059	0,677	9,644	2,733
4	4,252	1,397	9,211	3,027	1,844	0,475
5	5,778	1,899	5,049	1,659	4,107	1,350

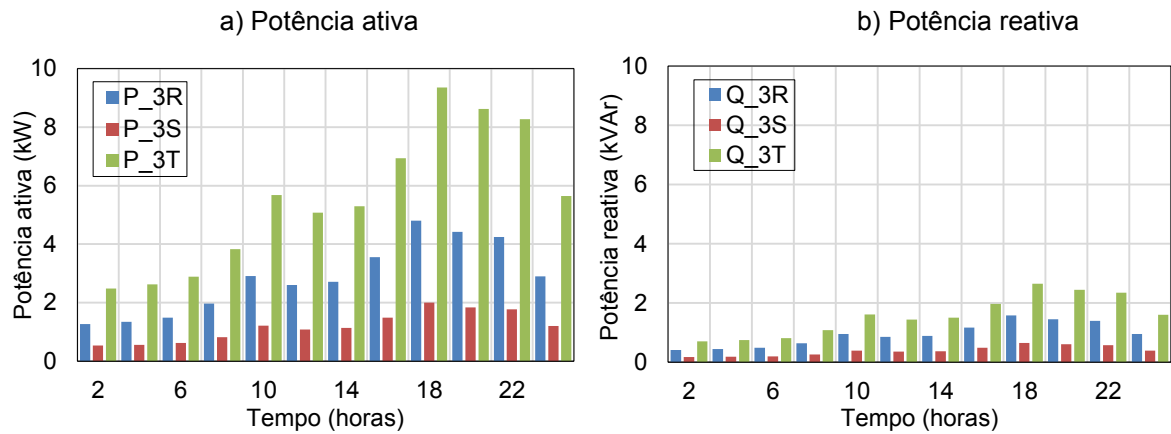
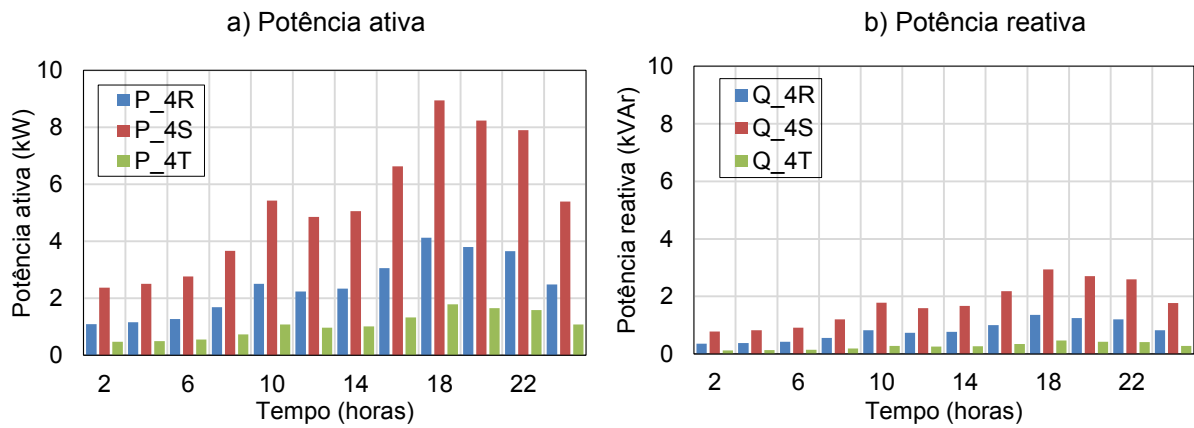
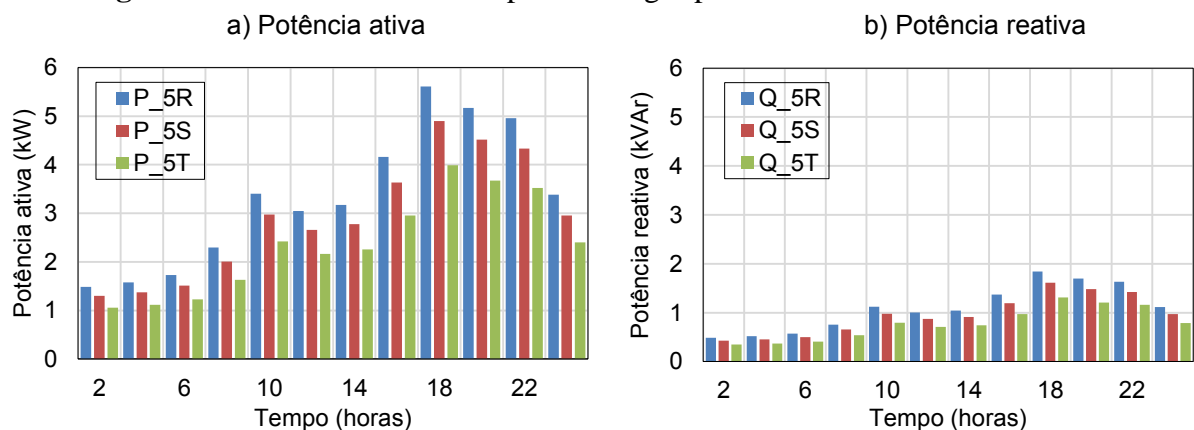
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A representação das curvas de demanda possuem um perfil típico de carga residencial (FRANCISQUINI, 2006) durante todo um dia. Os valores do perfil de carga são calculadas como especifica o capítulo 4.3. Da Figura 83 à Figura 86 são mostrados os perfis de carga total por fase de cada barra.

**Figura 83** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 2 – 1ª demanda.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 84** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 3 – 1ª demanda.**Figura 85** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 4 – 1ª demanda.**Figura 86** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 5 – 1ª demanda.

## SEGUNDA CURVA DE DEMANDA DO SISTEMA TESTE

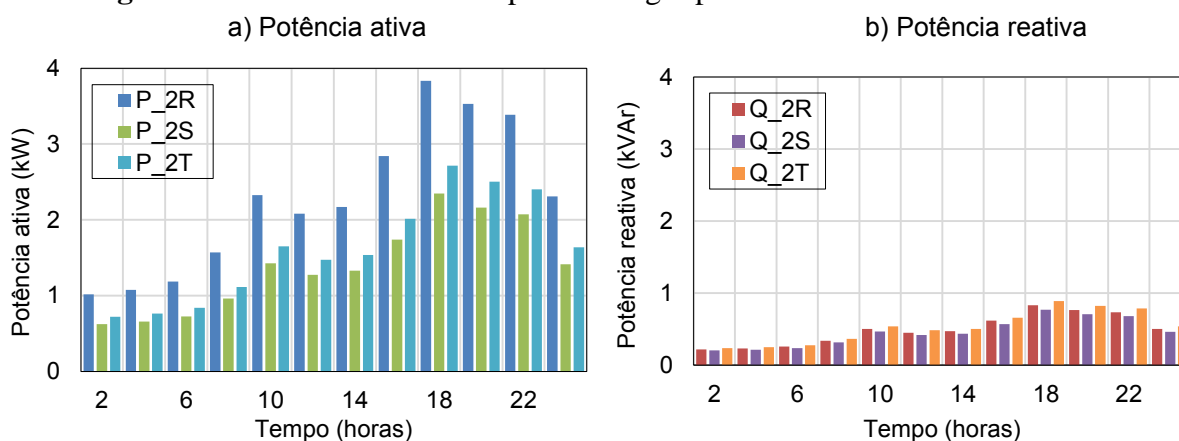
Considerou-se que todas as cargas do sistema são de tipo potência constante. A Tabela 19 apresenta as potências ativas e reativas máximas de cada nó

**Tabela 19** - Potências máximas das barras por fase para a segunda demanda.

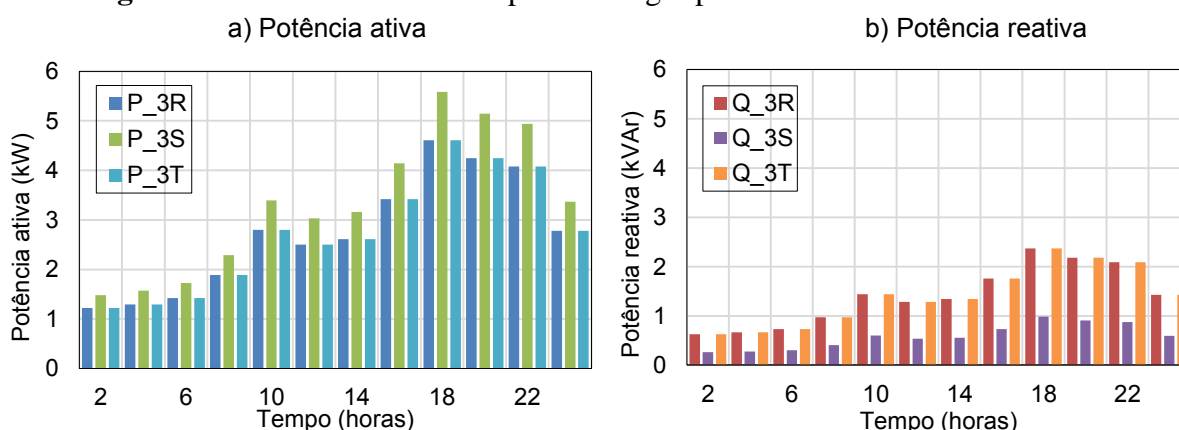
Barra	P_R (kW)	Q_R (kVAr)	P_S (kW)	Q_S (kVAr)	P_T (kW)	Q_T (kVAr)
2	3,948	0,859	2,417	0,795	2,798	0,919
3	4,750	2,438	5,755	1,015	4,750	2,438
4	6,702	1,677	8,386	2,897	7,013	0,570
5	5,632	1,480	5,403	1,588	5,914	1,944

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A representação das curvas de demanda possuem um perfil típico de carga residencial (FRANCISQUINI, 2006) durante todo um dia. Os valores do perfil de carga são calculadas como especifica o capítulo 4.3. Da Figura 87 à Figura 90 são mostrados os perfis de carga total por fase de cada barra.

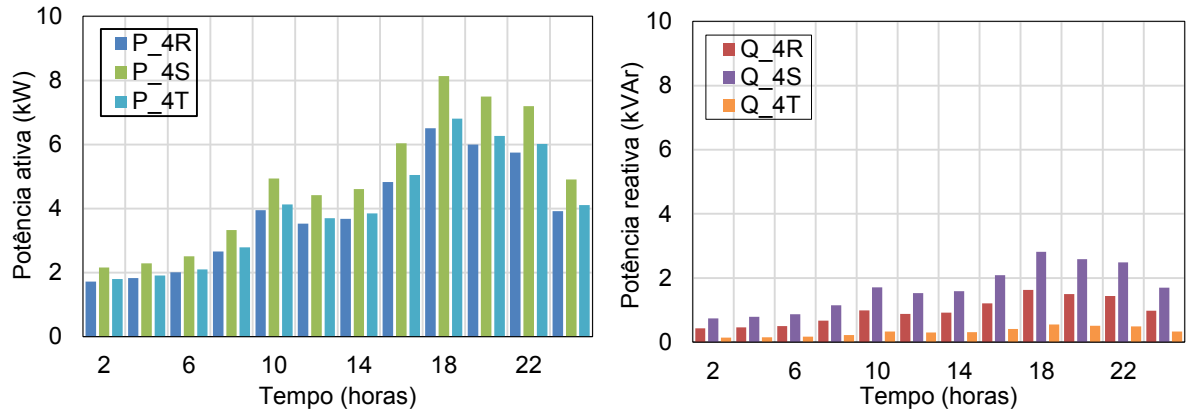
**Figura 87** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 2 – 2ª demanda.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 88** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 3 – 2ª demanda.

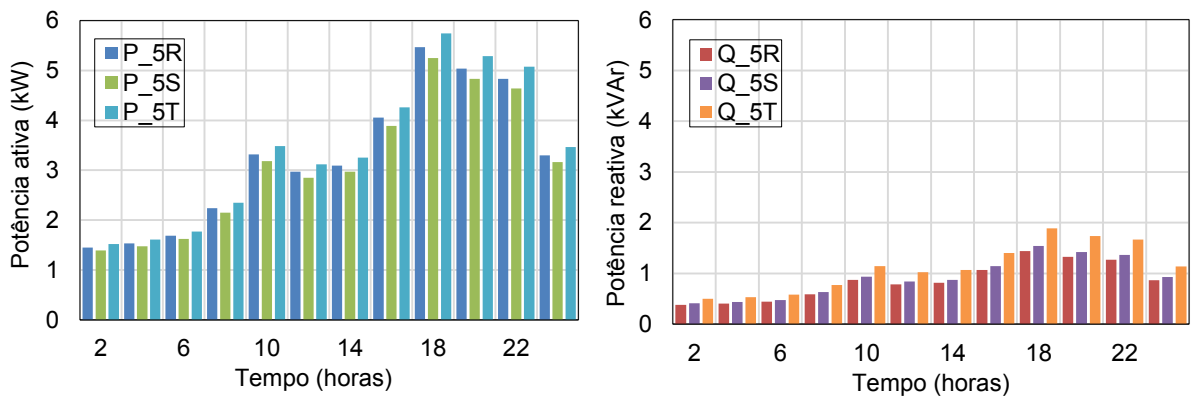
Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 89** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 4 – 2ª demanda.  
a) Potência ativa b) Potência reativa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 90** - Curvas de demanda para as cargas por fase da barra 5 – 2ª demanda.  
a) Potência ativa b) Potência reativa



Fonte: Elaboração do próprio autor.



## APÊNDICE B – SISTEMA COM TRÊS GERADORES FVS MONOFÁSICOS

Para este cenário o sistema teste em BT da Figura 30 possui 26 cargas residênciais monofásicas distribuídas nas fases R, S e T.

### CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

Na Tabela 20a mostra-se a distribuição do número de residências por nó, sendo 26 o número total, as partes sombreadas nos nós 3T, 4S e 5R significa que as cargas residências nesses nós têm geradores FVs monofásicos. As Tabelas 20b e 20c mostram as potências contratadas por residência antes e depois do aumento das potências contratadas (isto para que os geradores FVs geram mais potência), observa-se que as cargas dos nós 3T, 4S e 5R aumentaram o total de potência contratada de 5 a 6 kVA, de 5 a 6 kVA e de 2,5 a 4 kVA respectivamente. As Tabelas 20d e 20e mostram o total das potências contratadas por nó antes e depois do aumento das potências contratadas nas residências dos nós 3T, 4S e 5R.

**Tabela 20** - Quantidade de residências e de potências contratada – inicial e final.

a) Quantidade de residências por nó.			
Barra	Fase R	Fase S	Fase T
2	1	1	1
3	2	1	4
4	2	4	1
5	4	2	3

b) Potência contratada por residência - inicial				c) Potência contratada por residência - final			
Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)	Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,5
3	3	2,5	5	3	3	2,5	6
4	2,5	5	2	4	2,5	6	2
5	2,5	3	2	5	4	3	2

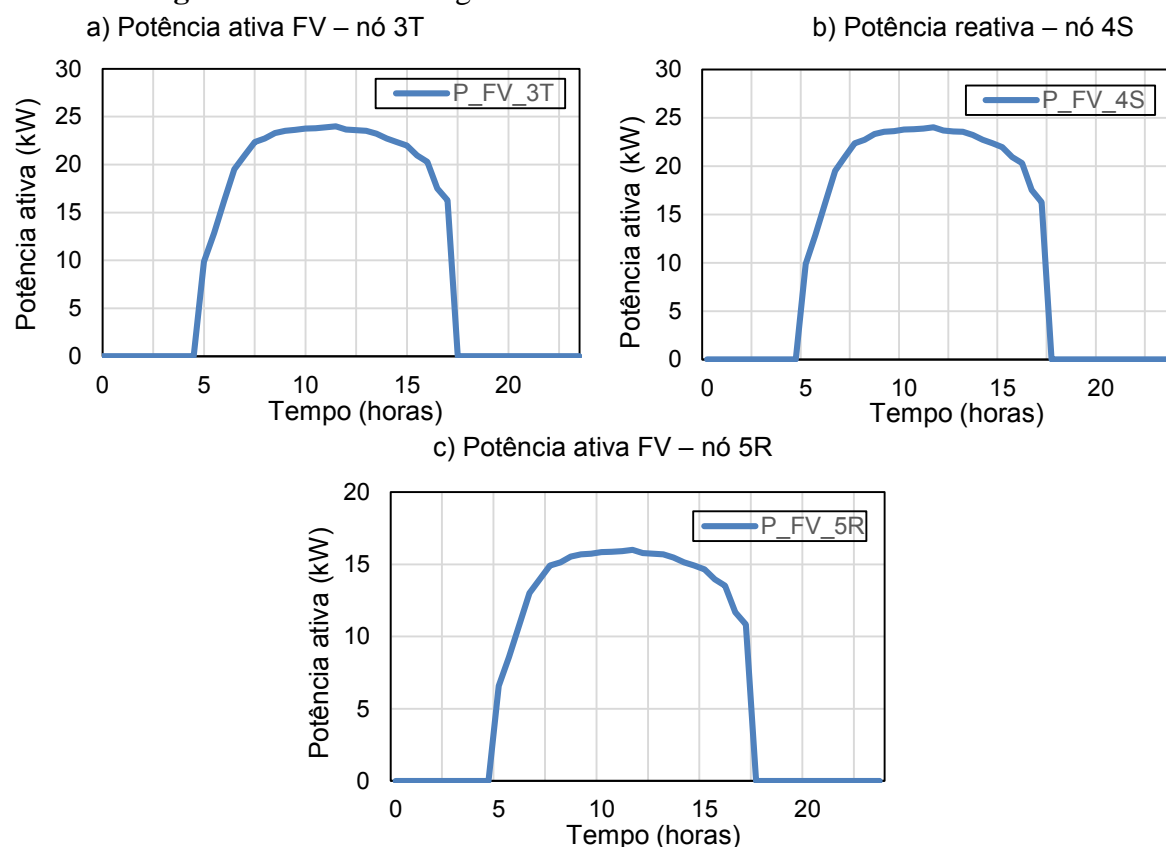
d) Potência contratada total por nó - inicial				e) Potência contratada total por nó - final			
Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)	Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,5
3	6	2,5	20	3	6	2,5	24
4	5	20	2	4	5	24	2
5	10	6	6	5	16	6	6

Fonte: Elaboração do próprio autor.

## CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES FVs

Na Figura 91 mostra-se as curvas da potência FV monofásico conectados nos nós 3T, 4S e 5R cujas potências máximas instaladas correspondem ao valor máximo de potência contratada por residência nesses nós, tendo como potência total máxima instalada por nó 24 kWp, 24 kWp, 16 kWp respectivamente. Os valores das curvas de potência FV foram calculados como se descreve no capítulo 4.4.

**Figura 91** - Curvas dos geradores FVs monofásicos a céu aberto – Perfil



Fonte: Elaboração do próprio autor

## APÊNDICE C – SISTEMA COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E UM MONOFÁSICO

O sistema teste em BT da Figura 30 possui 26 cargas residências, das quais 24 são cargas monofásicas e 2 são cargas trifásicas, todas elas distribuídas nas fases R, S e T.

### CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

Na Tabela 21a mostra-se a distribuição do número de residências por nó, sendo 26 o número total. A parte sombreada na barra 3 significa que temos dois residências trifásicas nessa barra e que só elas têm geradores FVs trifásicos. A parte sombreada no nó 5R significa que temos dois residências monofásicas nesse nó e que só elas têm geradores FVs monofásicos. As Tabelas 21b e 21c mostram as potências contratadas por residência antes e depois do aumento das potências contratadas (isto para que os geradores FVs geram mais potência), observa-se que as cargas trifásicas da barra 3 aumentaram o total de potência contratada de 12 a 15 kVA e as cargas monofásicas do nó 5R aumentaram de 2 a 3 kVA. As Tabelas 21d e 21e mostram o total das potências contratadas por nó antes e depois do aumento das potências contratadas nas residências da barra 3 e do nó 5R.

**Tabela 21** - Quantidade de residências e de potências contratadas – inicial e final

a) Quantidade de residências por nó.			
Barra	Fase R	Fase S	Fase T
2	2	1	2
3			
4	3	4	3
5	4	2	3

b) Potência contratada por residência - inicial				c) Potência contratada por residência - final			
Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)	Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	2,5	3	1,5	2	2,5	3	1,5
3				3			
4	2,5	2,5	2,5	4	2,5	2,5	2,5
5	2	3	2,5	5	3	3	2,5

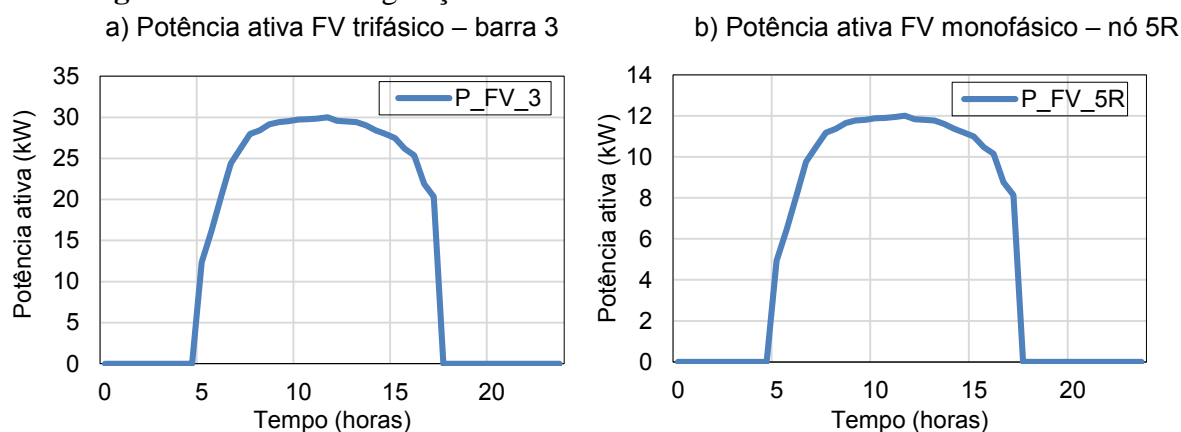
d) Potência contratada total por nó - inicial				e) Potência contratada total por nó - final			
Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)	Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	5	3	3	2	5	3	3
3	8	8	8	3	10	10	10
4	7,5	10	7,5	4	7,5	10	7,5
5	8	6	7,5	5	12	6	7,5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES FVS

Na Figura 92 mostra-se as curvas da potência FV trifásico e monofásico conectados à barra 3 e ao nó 5R cujas potências máximas instaladas correspondem ao valor máximo de potência contratada por residência nessa barra e nesse nó, tendo como potência total máxima instalada por barra 30 kW<sub>p</sub>, distribuídos nas três fases de forma igual, e por nó 12 kW<sub>p</sub> respectivamente. Os valores das curvas de potência FV foram calculados como se descreve no capítulo 4.4.

**Figura 92** - Curvas de geração FV trifásico e monofásico a céu aberto – Perfil



Fonte: Elaboração do próprio autor.

## APÊNDICE D – SISTEMA COM UM GERADOR FV TRIFÁSICO E DOIS MONOFÁSICOS

O sistema teste em BT da Figura 30 possui 26 cargas residências, das quais 22 são cargas monofásicas e 4 são cargas trifásicas, todas elas distribuídas nas fases R, S e T.

### CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

Na Tabela 22a mostra-se a distribuição do número de residências por nó, sendo 26 o número total. A parte sombreada na barra 3 significa que temos quatro residências trifásicas nessa barra e que só elas têm geradores FVs trifásicos. A parte sombreada nos nós 4T e 5R significa que temos residências monofásicas nesse nó e que só elas têm geradores FVs monofásicos. As Tabelas 22b e 22c mostram as potências contratadas por residência antes e depois do aumento das potências contratadas (isto para que os geradores FVs gerem mais potência), observa-se que as cargas trifásicas da barra 3 aumentaram o total de potências contratadas de 6 a 7,5 kVA e as cargas monofásicas dos nós 4T e 5R aumentaram de 3 a 4 kVA. As Tabelas 22d e 22e mostram o total das potências contratadas por nó antes e depois do aumento das potências contratadas nas residências da barra 3 e nas residências dos nós 4T e 5R.

**Tabela 22** - Quantidade de residências e de potências contratadas – inicial e final.

a) Quantidade de residência por nó.			
Barra	Fase R	Fase S	Fase T
2	2	1	2
3	4		
4	3	3	3
5	3	2	3

b) Potência contratada por residência - inicial			c) Potência contratada por residência - final				
Barra	S_R (kW)	S_S (kW)	S_T (kW)	Barra	S_R (kW)	S_S (kW)	S_T (kW)
2	2,5	3	1,5	2	2,5	3	1,5
3	2      2      2			3	2,5      2,5      2,5		
4	2,5	3	3	4	2,5	3	4
5	3	3	2,5	5	4	3	2,5

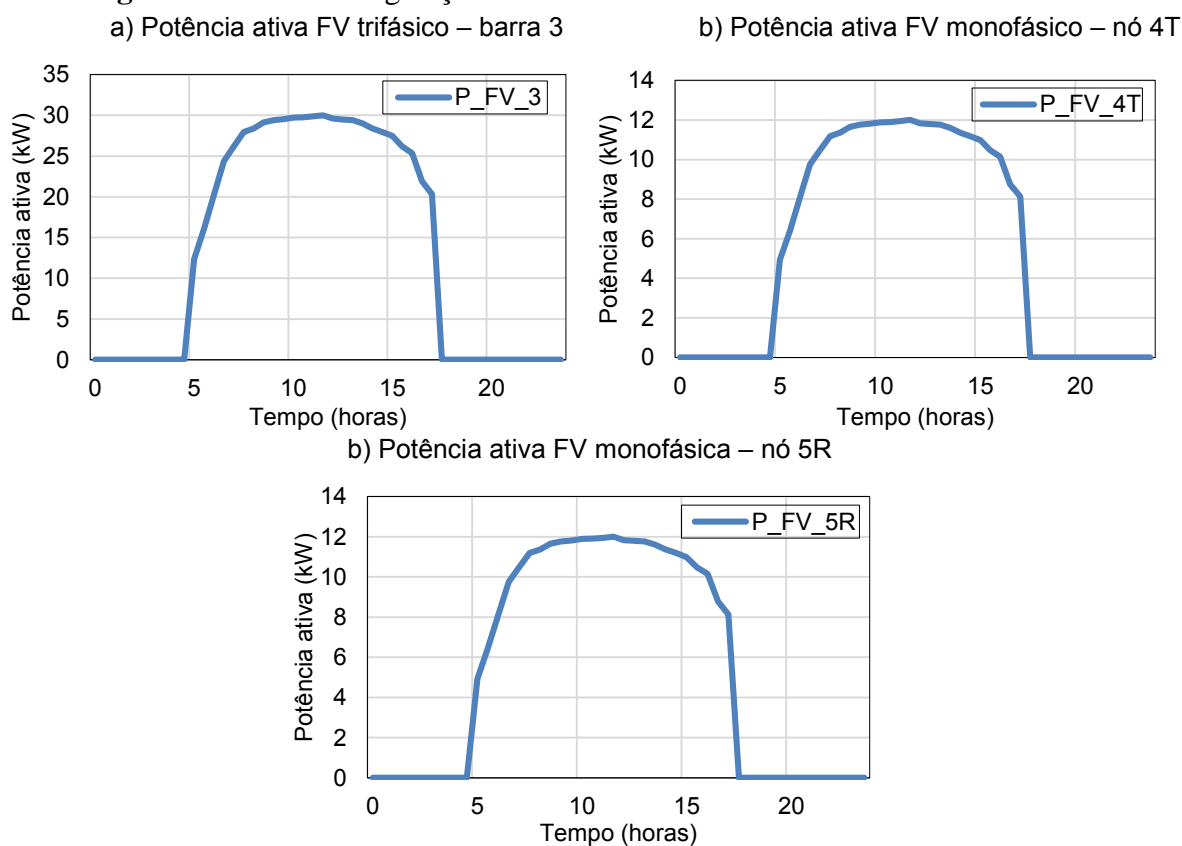
d) Potência contratada total por nó - inicial				e) Potência contratada total por nó - final			
Barra	S_R (kW)	S_S (kW)	S_T (kW)	Barra	S_R (kW)	S_S (kW)	S_T (kW)
2	5	3	3	2	5	3	3
3	8	8	8	3	10	10	10
4	7,5	9	9	4	7,5	9	12
5	9	6	7,5	5	12	6	7,5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES FVS

Na Figura 93 mostra-se as curvas da potência FV trifásico e monofásico conectados à barra 3 e aos nós 4T e 5R cujas potências máximas instaladas correspondem ao valor máximo de potência contratada por residência nessa barra e nesses nós, tendo como potência total máxima instalada por barra 30 kWp, distribuídos nas três fases de forma igual, e por nó 12 kW e 12 kWp. Os valores das curvas de potência FV foram calculados como se descreve no capítulo 4.4.

**Figura 93** - Curvas de geração FV trifásico e monofásico a céu aberto – Perfil



Fonte: Elaboração do próprio autor.

## APÊNDICE E – SISTEMA COM DOIS GERADOR FVS TRIFÁSICO

O sistema teste em BT da Figura 30 possui 23 cargas residenciais, das quais 15 são cargas monofásicas e 8 são cargas trifásicas, todas elas distribuídas nas fases R, S e T.

### CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

Na Tabela 23a mostra-se a distribuição do número de residências por nó, sendo 23 o número total. A parte sombreada nas barras 3 e 5 significam que temos residências trifásicas nessas barras e que só elas têm geradores FVs trifásicos. As Tabelas 23b e 23c mostram as potências contratadas por residência antes e depois do aumento das potências contratadas, observa-se que as cargas trifásicas das barras 3 e 5 aumentaram o total de potências contratadas de 6 a 7,5 kVA. As Tabelas 23d e 23e mostram o total das potências contratadas por nó antes e depois do aumento das potências contratadas nas residências trifásicas das barras 3 e 5.

**Tabela 23 - Quantidade de residência e de potências contratadas – inicial e final.**

a) Quantidade de residência por nó.

Barra	Fase R	Fase S	Fase T
2	2	1	2
3	4		
4	3	4	3
5	4		

b) Potência contratada por residência - inicial

Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	2,5	3	1,5
3	2      2      2		
4	2,5	2,5	2,5
5	2      2      2		

c) Potência contratada por residência - final

Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	2,5	3	1,5
3	2,5      2,5      2,5		
4	7,5	10	7,5
5	2,5      2,5      2,5		

d) Potência contratada total por nó - inicial

Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	5	3	3
3	8      8      8		
4	7,5	10	7,5
5	8      8      8		

e) Potência contratada total por nó - final

Barra	S_R (kVA)	S_S (kVA)	S_T (kVA)
2	5	3	3
3	10      10      10		
4	7,5	10	7,5
5	10      10      10		

Fonte: Elaboração do próprio autor.

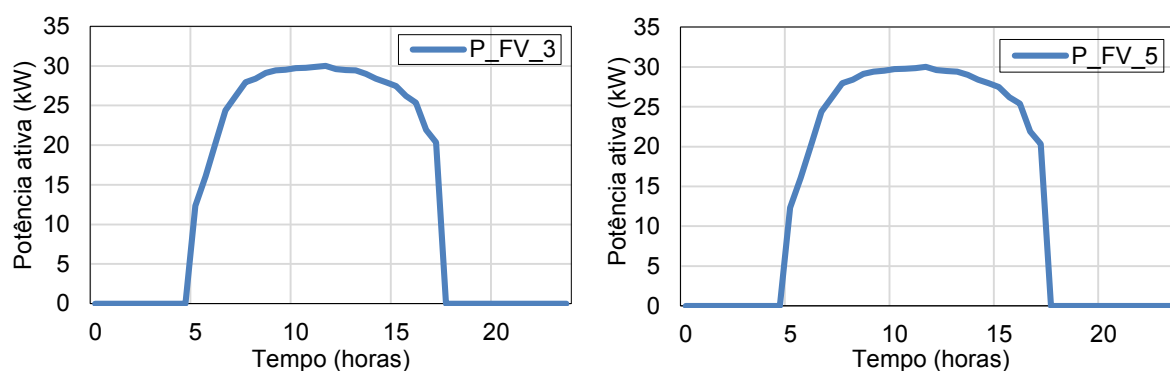
## CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES FVS

Na Figura 94 mostra-se as curvas da potência FV trifásicos conectados às barras 3 e 5 cujas potências máximas instaladas correspondem ao valor máximo de potência contratada por residência nessas barras, tendo como potência total máxima instalada em ambas barras 30 kWp, distribuídos nas três fases de forma igual. Os valores das curvas de potência FV foram calculados como se descreve no capítulo 4.

**Figura 94** - Curvas da geração FV trifásico a céu aberto – Perfil

a) Potência ativa FV trifásico – barra 3

b) Potência ativa FV trifásica – barra 5



Fonte: Elaboração do próprio autor.