



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E ENERGIA

Mariana Granzoto Lopes

ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS RESULTANTES DA
VARIABILIDADE DE GERAÇÃO DE CURTO PRAZO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS

CAMPINAS
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

Mariana Granzoto Lopes

ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS RESULTANTES DA
VARIABILIDADE DE GERAÇÃO DE CURTO PRAZO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Caseño Trindade Arioli

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pela aluna Mariana Granzoto Lopes e orientada pela professora Dr^a. Fernanda Caseño Trindade Arioli.
Assinatura da Orientadora:

CAMPINAS
2015

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizângela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

L881a Lopes, Mariana Granzoto, 1990-
Análise dos impactos técnicos resultantes da variabilidade de geração de curto prazo de sistemas fotovoltaicos / Mariana Granzoto Lopes. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Fernanda Caseño Trindade Arioli.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia elétrica - Distribuição. I. Arioli, Fernanda Caseño Trindade, 1984-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Analysis of technical impacts resultant from short-term photovoltaic generation

Palavras-chave em inglês:

Photovoltaic power generation

Electricity - Distribution

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestra em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Fernanda Caseño Trindade Arioli [Orientador]

Juan Carlos Cebrian

Marcelo Gradella Villalva

Data de defesa: 04-12-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidata: Mariana Granzoto Lopes RA: 092262

Data da Defesa: 04 de dezembro de 2015

Título da Tese: “Análise dos Impactos Técnicos Resultantes da Variabilidade de Geração de Curto Prazo de Sistemas Fotovoltaicos”.

Prof^a. Dr^a. Fernanda Caseño Trindade Arioli (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Dr. Juan Carlos Cebrian (USP)

Prof. Dr. Marcelo Gradella Villalva (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Fernanda Caseño Trindade Arioli, por todo apoio, orientação e ensinamentos que tornaram possíveis a realização deste trabalho, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Agradeço também aos professores Dr. Walmir Freitas Filho, Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva e Dr. Luis Ochoa, que contribuíram com inestimáveis sugestões para este trabalho durante o exame de qualificação.

Agradeço a todos meus colegas de laboratório, especialmente ao José Andrade e ao Thiago Ferreira, por todo o suporte nos momentos necessários.

Por fim, agradeço à minha mãe, aos meus familiares e amigos, que contribuíram com seu incentivo, apoio, paciência e compreensão durante toda a realização deste trabalho.

RESUMO

Apoiado por questões ambientais e incentivos fiscais, o uso de fontes renováveis de energia tem crescido consideravelmente, destacando-se o crescimento de geradores fotovoltaicos. Na última década, o total de energia solar fotovoltaica no mundo aumentou aproximadamente 4.500%. Os geradores solares fotovoltaicos são conhecidos por utilizarem uma fonte intermitente de energia e, por não possuírem inércia mecânica, alterações na irradiação solar podem causar rápidas e consideráveis variações na potência gerada. Estas variações resultam em desbalanço entre carga e geração, sendo que a subestação passa a fornecer o incremento de potência necessário para alimentar as cargas, o que pode refletir na tensão do sistema. Além dos aspectos relacionados à qualidade de energia, as variações de tensão causadas pela passagem de nuvens sobre os sistemas fotovoltaicos em dias parcialmente nublados podem fazer com que os reguladores de tensão atuem excessivamente, diminuindo sua vida útil. Nesta dissertação, investigam-se fatores como a caracterização do fenômeno de transitório de tensão causado pela passagem de nuvens sobre os painéis fotovoltaicos instalados em sistemas de distribuição de energia elétrica de média e de baixa tensão. Adicionalmente, avalia-se o aumento na quantidade de atuações dos transformadores reguladores de tensão, a partir de uma metodologia analítica que permite realizar uma estimativa preliminar do número de atuações dos reguladores, de modo que seja possível identificar o grau de intensidade do problema. Ao final, são discutidas algumas medidas que podem ser adotadas para mitigar ou mesmo solucionar os impactos técnicos apresentados.

Palavras-chave: geração fotovoltaica, regulação de tensão, sistemas de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

Due to environmental and tax incentives, the quantity of distributed generators exploring renewable energy sources in power generation market has considerably increased. In last decade, worldwide, photovoltaic generation has increased approximately 4,500%. Solar photovoltaic generators are known for using an intermittent source of energy and, because they do not have electromagnetic circuit, nor inertia, variations in irradiance can cause fast and deep variations in photovoltaic generator power output. These power changes create a load-generation imbalance and the missing (extra) power has to be supplied (absorbed) by the substation, possibly resulting in rapid voltage changes. Additionally, because of the high rate of occurrence of voltage changes during partial cloudy days, there can be excessive operations of voltage regulators. This work investigates factors such as the characterization of the transitory phenomenon caused by cloud transients over photovoltaic panels installed in medium and low voltage distribution systems. Furthermore, the increase in tap changes of voltage regulator transformers is evaluated. An analytical method is proposed to estimate the number of voltage regulator tap changes, allowing to identify the intensity of the problem for a given distribution feeder. Finally, potential solutions to mitigate or eliminate the impacts of cloud transients are introduced.

Keywords: *electric power distribution system, photovoltaic generation, voltage regulation.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Evolução da capacidade instalada acumulada global de energia FV de 2000 a 2013. Extraído de [1]. | 16 |
| Figura 3.1 – Exemplos de potência de saída para diferentes tipos de dia. | 27 |
| Figura 3.2 – Fenômenos físicos e sua relação com os parâmetros. | 29 |
| Figura 3.3 – Curva de potência de saída do sistema FV classificada. | 30 |
| Figura 3.4 – Mapa de cores com a porcentagem de variações de potência considerando sua amplitude e duração. | 31 |
| Figura 3.5 – Valores representativos para os parâmetros de caracterização, dados do Brasil. | 32 |
| Figura 3.6 – Perfil de geração FV, dia escolhido para ser utilizado nas simulações. | 33 |
| Figura 4.1 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de média tensão utilizado nas simulações. | 37 |
| Figura 4.2 – Perfil de carga utilizado no sistema-teste de distribuição de média tensão. | 37 |
| Figura 4.3 – Tensão na barra controlada e posição do <i>tap</i> do regulador ao longo de um dia. | 40 |
| Figura 4.4 – Detalhe da mudança de <i>tap</i> do regulador de tensão. | 41 |
| Figura 4.5 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de baixa tensão, com a localização dos geradores FVs. | 42 |
| Figura 4.6 – Exemplo de perfis de potência ativa e reativa de consumidores utilizados no sistema-teste de distribuição de baixa tensão. | 43 |
| Figura 5.1 – Exemplo de variação de tensão ao longo de um dia. | 45 |
| Figura 5.2 – Exemplo de resultado de variação máxima na tensão. | 46 |
| Figura 5.3 – Exemplo de resultado do número de variações de tensão acima de 0,5%. | 46 |
| Figura 5.4 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de média tensão utilizado nas simulações. | 47 |
| Figura 5.5 – Perfil de geração FV, dia escolhido para ser utilizado nas simulações. | 48 |
| Figura 5.6 – Perfil e variação de tensão, dados Brasil, sistema de média tensão. | 49 |
| Figura 5.7 – Variação de tensão para todos os casos simulados, dados Brasil, sistema de média tensão. | 50 |
| Figura 5.8 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Brasil, sistema de média tensão. | 52 |
| Figura 5.9 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Brasil, sistema de média tensão. | 55 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.10 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de baixa tensão, com a localização dos geradores FVs. | 57 |
| Figura 5.11 – Perfil e variação de tensão, dados Brasil, sistema de baixa tensão. | 59 |
| Figura 5.12 – Diferença entre os perfis de tensão de cada caso e o caso base, dados Brasil, sistema de baixa tensão..... | 61 |
| Figura 5.13 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Brasil, sistema de baixa tensão..... | 63 |
| Figura 5.14 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Brasil, sistema de baixa tensão. | 65 |
| Figura 6.1 – Potência de saída da geração FV do caso 1 (dia limpo) para as duas resoluções. | 70 |
| Figura 6.2 – Perfil de tensão com reguladores de tensão ativos, nível de penetração de 40%. | 71 |
| Figura 6.3 – Posição do <i>tap</i> de cada regulador ao longo de um dia, nível de penetração de 40%. | 72 |
| Figura 6.4 – Exemplo de cálculo de impedância total de caminho comum. | 75 |
| Figura 7.1 – Perfil de tensão e posição do <i>tap</i> para diferentes ajustes dos parâmetros dos reguladores de tensão..... | 82 |
| Figura 7.2 – Geração de potência por painéis FVs com inversores. | 87 |
| Figura 7.3 – Função de controle <i>droop</i> | 89 |
| Figura 7.4 – Resumo dos métodos tradicionais de regulação de tensão. | 92 |
| Figura 7.5 – Resumo dos métodos modernos de regulação de tensão. | 93 |
| Figura A.1 – Valores representativos para os parâmetros de caracterização, dados do NREL. | 101 |
| Figura A.2 – Valores representativos para os parâmetros de caracterização, dados do Canadá. | 102 |
| Figura A.3 – Variação de tensão para todos os casos simulados, dados NREL, sistema de média tensão. | 103 |
| Figura A.4 – Variação de tensão para todos os casos simulados, dados Canadá, sistema de média tensão. | 104 |
| Figura A.5 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados NREL, sistema de média tensão. | 105 |
| Figura A.6 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Canadá, sistema média tensão. | 106 |
| Figura A.7 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados NREL, sistema de média tensão. | 107 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A.8 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Canadá, sistema de média tensão..... | 108 |
| Figura A.9 – Diferença entre os perfis de tensão de cada caso e o caso base, dados NREL, sistema de baixa tensão..... | 109 |
| Figura A.10 – Diferença entre os perfis de tensão de cada caso e o caso base, dados Canadá, sistema de baixa tensão..... | 110 |
| Figura A.11 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados NREL, sistema de baixa tensão..... | 111 |
| Figura A.12 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Canadá, sistema de baixa tensão..... | 112 |
| Figura A.13 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados NREL, sistema de baixa tensão..... | 113 |
| Figura A.14 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Canadá, sistema de baixa tensão..... | 114 |
| Figura C.1 – Circuito do compensador tipo <i>line-drop</i> | 118 |
| Figura C.2 – Controle de tensão efetuado por um regulador de tensão..... | 119 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1.1 – Potenciais impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs segundo sua duração. Adaptado de [5]. | 18 |
| Tabela 3.1 – Número de dias em cada grupo de classificação. | 28 |
| Tabela 3.2 – Relação entre o estado anterior e o atual. | 30 |
| Tabela 3.3 – Parâmetros de caracterização, valores representativos (Dia Típico) e valores do dia utilizado nas simulações (Dia Escolhido), para cada um dos grupos de dados. | 33 |
| Tabela 4.1 – Limites de tensão, em p.u., para cada faixa de tensão. Extraído de [23]. | 38 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros dos reguladores de tensão. | 39 |
| Tabela 5.1 – Variação máxima de tensão no sistema-teste de média tensão registrada ao longo de um dia. | 53 |
| Tabela 5.2 – Número de variações de tensão acima de 0,5% durante um dia, sistema de média tensão. | 55 |
| Tabela 5.3 – Variação máxima de tensão no sistema-teste de baixa tensão registrada ao longo de um dia. | 63 |
| Tabela 5.4 – Número de variações de tensão acima de 0,5% durante um dia, sistema de baixa tensão. | 65 |
| Tabela 6.1 – Numero de alterações de <i>tap</i> , por regulador de tensão, ao longo de 2010 (carga total de 2,813 MVA). Extraído de [27]. | 67 |
| Tabela 6.2 – Número de alterações de <i>tap</i> por regulador, por fase. Extraído de [28]. | 68 |
| Tabela 6.3 – Parâmetros dos reguladores de tensão. | 69 |
| Tabela 6.4 – Número de alterações de <i>tap</i> , por regulador, para diferentes penetrações. | 73 |
| Tabela 6.5 – Aumento relativo do número de alterações de <i>tap</i> do regulador Reg. Alim. devido aos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs. | 73 |
| Tabela 6.6 – Número de alterações de <i>tap</i> durante um ano. | 74 |
| Tabela 6.7 – Parâmetros utilizados na estimação do número de atuações. | 77 |
| Tabela 6.8 – Valores de ΔV_{total} e ΔP_{min} para diferentes penetrações e barra de instalação. | 77 |
| Tabela 6.9 – Dados utilizados na estimação do número de atuações do regulador Reg. Alim. | 78 |
| Tabela 6.10 – Número estimado de atuações do regulador de tensão. | 78 |
| Tabela 6.11 – Número de atuações do regulador de tensão obtido nas simulações computacionais. | 78 |
| Tabela 6.12 – Erro relativo do número de atuações do regulador de tensão. | 78 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 7.1 – Parâmetros dos reguladores de tensão. | 81 |
| Tabela 7.2 – Opções de controle de inversores inteligentes. Extraído de [39]..... | 89 |
| Tabela 7.3 – Valores típicos de diferentes tecnologias de armazenamento utilizadas em sistemas de potência. Extraído de [44]..... | 91 |
| Tabela 7.4 – Valor Presente no Ano 1, com operação de 10 anos (U\$/kW). Extraído de [44]. | 91 |
| Tabela B.1 – Dados da carga original, sistema-teste de média tensão | 115 |
| Tabela B.2 – Dados de linhas, sistema-teste de média tensão..... | 116 |
| Tabela D.1 – Dados do transformador de distribuição..... | 120 |
| Tabela D.2 – Dados dos ramos, sistema-teste de baixa tensão..... | 121 |
| Tabela D.3 – Dados da carga original, sistema-teste de baixa tensão..... | 122 |

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| AGRADECIMENTOS | 5 |
| RESUMO | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| LISTA DE FIGURAS | 8 |
| LISTA DE TABELAS | 11 |
| SUMÁRIO | 13 |
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS..... | 17 |
| 2 IMPACTO DA IRRADIAÇÃO NA POTÊNCIA FORNECIDA PELOS GERADORES FOTOVOLTAICOS | 20 |
| 2.1 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO | 23 |
| 3 CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS | 24 |
| 3.1 CONJUNTO DE DADOS | 24 |
| 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FVS..... | 28 |
| 3.3 VALORES REPRESENTATIVOS PARA OS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FVS | 30 |
| 3.4 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO | 34 |
| 4 METODOLOGIA DOS ESTUDOS | 35 |
| 4.1 FERRAMENTA DE CÁLCULO DE FLUXO DE CARGA SÉRIE-TEMPORAL: OPENDSS | 35 |
| 4.2 SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO | 36 |
| 4.2.1 Regulador de Tensão | 38 |
| 4.3 SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO | 42 |
| 4.4 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO | 43 |
| 5 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA MAGNITUDE DE TENSÃO | 44 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1 FORMA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS | 44 |
| 5.2 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE MÉDIA TENSÃO | 47 |
| 5.3 RESULTADOS DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE MÉDIA TENSÃO..... | 48 |
| 5.3.1 Análise da Tensão | 48 |
| 5.3.2 Quantificação das Variações na Tensão..... | 51 |
| 5.3.2.1 Variação máxima | 51 |
| 5.3.2.2 Número de variações..... | 54 |
| 5.4 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE BAIXA TENSÃO | 56 |
| 5.5 RESULTADOS DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE BAIXA TENSÃO | 58 |
| 5.5.1 Análise da Tensão | 58 |
| 5.5.2 Quantificação das Variações na Tensão..... | 62 |
| 5.5.2.1 Variação máxima | 62 |
| 5.5.2.2 Número de variações..... | 64 |
| 5.6 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO | 65 |
| 6 ESTUDOS DOS IMPACTOS DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FVS NA ATUAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO..... | 67 |
| 6.1 ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ALTERAÇÕES DE <i>TAP</i> UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS..... | 69 |
| 6.1.1 Resultados dos Estudos Realizados para o Dia Típico | 70 |
| 6.1.2 Resultados dos Estudos Realizados com Horizonte de um Ano..... | 74 |
| 6.2 ESTIMATIVA ANALÍTICA DO NÚMERO DE ATUAÇÕES DE UM REGULADOR DE TENSÃO..... | 75 |
| 6.2.1 Resultado da Estimação do Número de Atuações do Regulador de Tensão | 78 |
| 6.3 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO | 79 |
| 7 METODOLOGIAS QUE PERMITEM MITIGAR OS IMPACTOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS..... | 80 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1 SOLUÇÕES TRADICIONAIS DE CONTROLE DE TENSÃO..... | 80 |
| 7.1.1 Reguladores de Tensão | 81 |
| 7.1.2 Bancos de Capacitores Chaveados | 84 |
| 7.2 SOLUÇÕES MODERNAS DE RESPOSTA RÁPIDA PARA CONTROLE DE TENSÃO | 85 |
| 7.2.1 Compensadores Estáticos de Energia Reativa (SVC) | 86 |
| 7.2.2 Inversores dos Geradores Fotovoltaicos | 86 |
| 7.2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia | 89 |
| 7.3 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO | 92 |
| 8 CONCLUSÕES | 94 |
| 8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 95 |
| REFERÊNCIAS..... | 96 |
| APÊNDICES | 100 |
| APÊNDICE A RESULTADOS DETALHADOS DOS ESTUDOS COM O GRUPO DO DADOS DO NREL E DO CANADÁ..... | 101 |
| A.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 101 |
| A.2 ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE MÉDIA TENSÃO | 102 |
| A.3 ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE BAIXA TENSÃO | 108 |
| APÊNDICE B DADOS DO SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO | 115 |
| APÊNDICE C MODELAGEM DO REGULADOR DE TENSÃO NO OPENDSS | 118 |
| APÊNDICE D DADOS DO SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO | 120 |

1 INTRODUÇÃO

Entre 2000 e 2013 a capacidade instalada de energia fotovoltaica (FV) em todo o mundo passou de 1,3 GW para 139 GW [1]. Por muito tempo, o mercado de energia FV esteve concentrado principalmente na Europa, devido aos expressivos incentivos governamentais, especialmente na Alemanha. Entretanto, nos últimos anos o mercado asiático, liderado pela China, tem experimentado um grande crescimento, como ilustrado pela Figura 1.1.

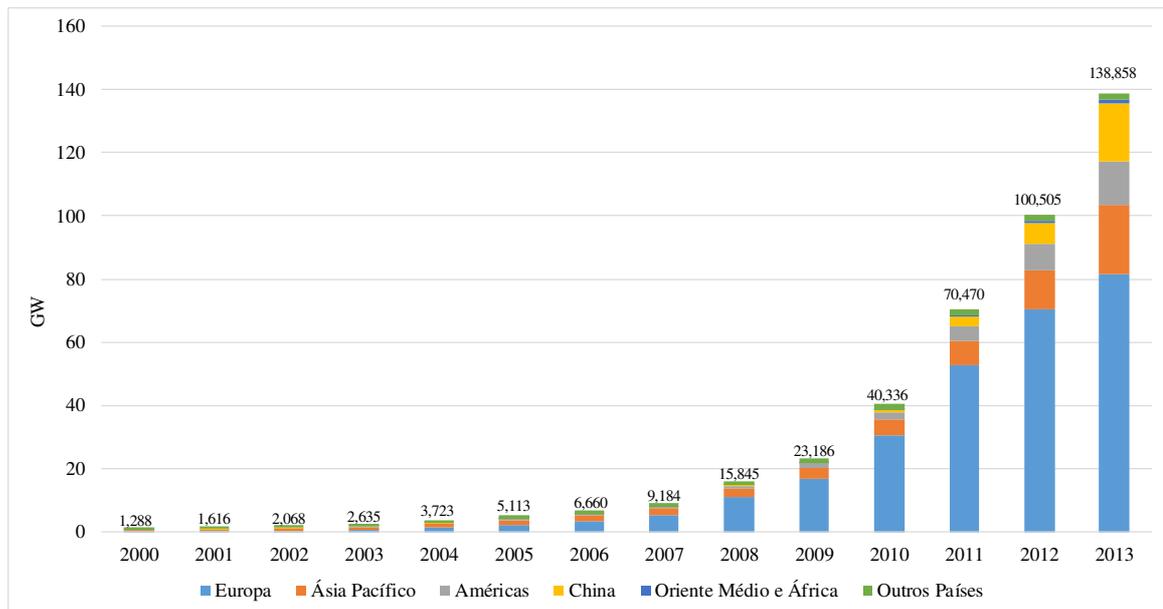


Figura 1.1 – Evolução da capacidade instalada acumulada global de energia FV de 2000 a 2013. Extraído de [1].

A geração FV tem sido incentivada pois, por ser uma tecnologia de baixa emissão de carbono, adequa-se à crescente preocupação da sociedade com questões ambientais, além de contribuir para a diversificação da matriz energética, aumentando a confiabilidade dos sistemas de potência. Devido aos incentivos, à expansão do mercado e aos avanços na tecnologia de fabricação dos painéis, os preços da tecnologia FV têm diminuído nos últimos anos, tornando-a economicamente viável.

No Brasil, a geração fotovoltaica corresponde a 0,02% da capacidade instalada, com 25,23 MW [2]. Apesar desta ser uma quantidade quase insignificante, espera-se que a participação da energia FV no mercado aumente, especialmente com a instalação de micro (abaixo de 75 kW) e minigeração (entre 75 kW e 5 MW) na baixa e na média tensão, devido à publicação da resolução número 687 de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regula a instalação de micro e minigeração no sistema de distribuição. A geração FV usualmente

é instalada nos sistemas de distribuição, o que traz alguns desafios técnicos, visto que estes sistemas são tradicionalmente operados de forma radial, sem a conexão de geradores.

Em [3] é avaliado o impacto da instalação de geração FV em duas redes reais de baixa tensão localizadas no Reino Unido. São avaliados os impactos na tensão e nos limites térmicos da rede, considerando uma resolução de 5 minutos tanto para a carga como para a geração FV e diferentes níveis de penetração (de 0 a 100%). O trabalho conclui que os problemas relacionados à tensão são os mais restritivos para as redes estudadas.

Diante dos desafios e do crescente aumento na instalação de geração solar FV, em 2008, uma pesquisa de opinião foi realizada com engenheiros das principais concessionárias norte-americanas [4]. Nesta pesquisa, os engenheiros foram convidados a compartilhar suas principais preocupações em relação aos impactos técnicos causados pela alta penetração de geração FV. As principais preocupações destacadas pelos engenheiros foram:

- *Necessidade de reduzir os impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs;*
- Excesso de distorção harmônica;
- Atuações indevidas da proteção;
- Necessidade de utilização dos inversores FVs para contribuir com a regulação de tensão;
- Necessidade de melhorar as ferramentas de modelagem para simplificar a análise e o planejamento dos sistemas de distribuição com geração FV;
- Necessidade das concessionárias de controlar os inversores FVs.

Esta pesquisa mostra as principais preocupações do setor no que diz respeito aos impactos causados pela conexão massiva de sistemas FVs na rede, enfatizando a importância de estudá-los e compreendê-los. Neste contexto, o foco principal deste trabalho é investigar um dos itens indicados nesta pesquisa como preocupação dos engenheiros: *os impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os painéis fotovoltaicos nos sistemas de distribuição de energia elétrica*, com foco principal nas variações de tensão. Mais detalhes sobre os objetivos e justificativas deste trabalho são apresentados a seguir.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Em geradores que possuem massa girante, como os geradores síncronos, a existência de inércia mecânica permite que a potência de saída fornecida seja mantida por alguns segundos

diante da diminuição da potência mecânica aplicada ao eixo do gerador. A duração deste fenômeno depende do coeficiente de inércia da máquina. No entanto, no caso dos painéis FVs, a potência de saída depende diretamente da intensidade da fonte primária (irradiação solar). Assim, variações na irradiação associadas à passagem de nuvens sobre os painéis FVs podem causar alterações significativas na potência de saída dos mesmos. Tais alterações causam um desbalanço de potência no sistema de modo que a subestação passa a absorver a potência que é produzida em excesso ou a suprir potência, de acordo com a necessidade do sistema, possivelmente resultando em variações expressivas de tensão.

De acordo com a duração da variação na potência de saída dos painéis, diferentes impactos podem ser observados no sistema, como apresentado na Tabela 1.1. Os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs geralmente são fenômenos rápidos, da ordem de segundos a minutos, impactando, por exemplo, a qualidade de energia, mais especificamente, a qualidade da tensão.

Tabela 1.1 – Potenciais impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs segundo sua duração. Adaptado de [5].

| Duração do transitório | Impacto potencial no sistema de potência |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| Segundos | Qualidade de energia |
| Minutos | Gerenciamento das reservas |
| Horas | Acompanhamento da carga |
| Horas a dias | Despacho das unidades de geração |

Estudos mostram que as variações na potência chegam a exceder 60% da potência de pico instalada (podendo ser tão altas quanto 80%) e podem ocorrer em segundos [6]. Por conseguinte, em alimentadores com alta penetração de geração FV, as rápidas flutuações causadas pela passagem de nuvens podem ocasionar problemas no perfil de tensão do alimentador, deteriorando a qualidade da tensão e levando a operações excessivas de reguladores de tensão. De acordo com [7], um regulador de tensão pode atingir 400 mudanças de *tap* em um dia parcialmente nublado. Com o objetivo de diminuir os impactos causados pelos transitórios relacionados à passagem de nuvens, as concessionárias, agências regulatórias e fabricantes estão estabelecendo novas práticas e regras. É possível citar, como exemplo destas novas práticas e regras, a Alemanha, que restringe as variações de curta duração no ponto de acoplamento comum de geradores conectados à média tensão em no máximo 2%, não podendo estas ocorrer mais de 1 vez a cada 3 minutos [8]. De fato, diversos procedimentos podem ser adotados para gerenciar o impacto dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre sistemas elétricos com elevada penetração de painéis fotovoltaicos. Um exemplo destes procedimentos é o uso de equipamentos que auxiliem no controle da tensão, como Compensadores Estáticos de Energia Reativa (SVCs) ou o uso de equipamentos de armazenamento, como bancos de baterias.

Neste contexto, este trabalho objetiva investigar os impactos na magnitude de tensão causados pela passagem de nuvens sobre sistemas fotovoltaicos, bem como se estas alterações podem causar a operação excessiva de reguladores de tensão. Um método analítico é proposto para avaliar estes impactos, fornecendo uma estimativa do número de atuações dos reguladores de tensão permitindo identificar os alimentadores com potencial de apresentar problemas relacionados aos transitórios causados pela passagem de nuvens. Por fim, a partir dos impactos encontrados nos estudos realizados, são sugeridas medidas que podem ser utilizadas para diminuir os impactos técnicos estudados. Estas medidas podem ser adotadas tanto pelas concessionárias, quanto pelos consumidores.

Os próximos capítulos deste trabalho estão divididos da seguinte forma:

- O Capítulo 2 trata de como relacionar a irradiação recebida pelos painéis FVs com sua potência de saída.
- O Capítulo 3 apresenta a caracterização do fenômeno sob estudo, utilizando três conjuntos de dados de medição relacionados à potência de saída dos geradores fotovoltaicos ou à irradiação recebida por painéis FVs. Esta caracterização permite a obtenção de curvas de geração representativas para serem empregadas nos estudos desta dissertação.
- O Capítulo 4 apresenta as metodologias adotadas nas investigações realizadas neste trabalho, bem como uma breve descrição do programa empregado nas simulações computacionais, e dos sistemas-teste de média e de baixa tensão utilizados.
- O Capítulo 5 trata da investigação dos impactos técnicos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs na magnitude da tensão dos sistemas-teste de média e de baixa tensão.
- O Capítulo 6 apresenta os estudos realizados para avaliar o impacto da passagem de nuvens sobre os painéis FVs no número de atuações dos reguladores de tensão.
- O Capítulo 7 discute potenciais medidas que podem ser adotadas para mitigar ou solucionar os impactos discutidos nos capítulos anteriores.
- O Capítulo 8 apresenta as principais conclusões deste trabalho.

2 IMPACTO DA IRRADIAÇÃO NA POTÊNCIA FORNECIDA PELOS GERADORES FOTOVOLTAICOS

A potência de saída de um sistema fotovoltaico depende diretamente da intensidade da irradiação recebida, o que a torna sensível a variações na irradiação. As variações na irradiação podem ser classificadas em três grupos [9], [10]:

- Variações sazonais: São causadas pela inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao seu eixo de translação, tendo relação direta com as estações do ano. São variações percebidas ao longo de meses.
- Variações diurnas: São causadas pela rotação da Terra, tendo relação direta com o ciclo solar ao longo de um dia. São simétricas em relação ao meio-dia solar, quando a irradiação atinge seu máximo.
- Variações causadas pela passagem de nuvens: São causadas pela passagem de nuvens e podem ser percebidas em curtos intervalos de tempo (minutos e/ou segundos). Não são facilmente previstas, pois são altamente dependentes dos fatores climáticos que regem o movimento das nuvens.

As variações sazonais e diurnas podem ser previstas com relativa precisão pelo uso de equações geométricas que descrevem o movimento relativo do Sol e do uso do “índice de claridade”. As equações geométricas fornecem a irradiação extraterrestre para uma dada localização geográfica e um dado instante de tempo. O “índice de claridade” considera o espalhamento e a absorção da irradiação pela atmosfera terrestre, resultando na irradiação recebida pela Terra em um dia de céu limpo. As variações sazonais e diurnas são mais suaves e podem ser comparadas com variações de carga com as quais as concessionárias já lidam em seu dia-a-dia, como o comportamento da carga da rede ao longo de um dia e as variações sazonais ao longo do ano. Devido a estas características, as variações sazonais e diurnas na produção de energia elétrica a partir de geradores fotovoltaicos podem ser mitigadas com as mesmas medidas adotadas para que o sistema suporte as variações da carga. As variações sazonais afetam o planejamento de médio prazo (meses, semanas e dias) e podem ser solucionadas com o sobre dimensionamento do sistema e com o uso de transmissão a longa distância. Variações diárias afetam o planejamento diário e podem ser controladas com o uso de armazenamento (hidráulico, baterias, etc.).

No entanto, as variações causadas pela passagem de nuvens são mais difíceis de serem previstas e modeladas, pois envolvem processos aleatórios. Além disso, tais variações podem provocar problemas de curto-prazo de regulação de tensão e frequência no sistema elétrico [10],

visto que alterações na irradiação solar recebida pelos painéis FVs são diretamente refletidas na potência de saída dos mesmos, por não possuírem inércia.

Um dos maiores desafios em se incluir grandes quantidades de geração intermitente, como a FV, consiste na habilidade do sistema em lidar com a variabilidade intrínseca destas fontes de energia. Em países como Alemanha e Dinamarca, que possuem uma quantidade significativa de sua demanda atendida por energia FV e eólica, o uso destas fontes é possível pois estes países possuem interconexões fortes com outros países nos quais a base da matriz energética é composta por fontes não-intermitentes, como a geração hidrelétrica e térmica, além de reservas de geração termelétrica que auxiliam o sistema a operar adequadamente. Ainda assim, a Alemanha tem estipulado regras para que os geradores fotovoltaicos auxiliem na regulação de tensão do sistema e limitem as variações no ponto de acoplamento comum, como exemplificado na Seção 1.1. Outras regras alemãs que podem ser aplicadas ao mesmo problema estão relacionadas a *flicker* de longa duração e à possibilidade de operação dos geradores com fator de potência diferente do unitário [8].

A intensidade do impacto da variação na potência produzida pelos geradores fotovoltaicos (resultante da variação na irradiação) na tensão do sistema elétrico de potência depende de vários fatores, como o nível de curto-circuito no ponto de acoplamento comum, a potência gerada pelos sistemas fotovoltaicos e a distribuição geográfica dos painéis. Desta forma, necessita-se realizar estudos para obter maior conhecimento deste fenômeno, avaliar os impactos associados e propor possíveis soluções. Em [5], uma série de estudos são desenvolvidos com o objetivo de avaliar se o impacto da elevada inserção de geradores fotovoltaicos nos sistemas de distribuição pode realmente ser um fator de preocupação das concessionárias australianas. Como conclusões principais é possível citar que este trabalho identifica que a quantidade de geração FV que pode ser integrada à rede sem comprometer aspectos como a estabilidade e a confiabilidade varia significativamente, pois depende de fatores como a variação da carga do sistema e a capacidade dos geradores convencionais instalados. Outra importante conclusão é que, apesar de causar impactos adversos no sistema, altas penetrações de geração FV podem ser utilizadas quando medidas corretivas estão disponíveis, como o controle da geração FV, especialmente quando há alta intermitência solar em períodos de demanda elevada.

Os estudos de impacto das variações causadas pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs basicamente utilizam ferramentas de cálculo de fluxo de carga (de preferência, fluxo de carga série-temporal) e dados de irradiação ou a potência gerada pelas fontes fotovoltaicas com resolução de segundos a minutos, visto que estas variações são fenômenos rápidos. No caso em

que os dados disponíveis são de irradiação, necessita-se transformá-los em potência para representar a potência injetada pelos geradores FVs instalados nos sistemas de distribuição de energia elétrica sob estudo.

Para se obter a potência de saída de um gerador fotovoltaico em um determinado instante de tempo ($P(t)$) a partir da irradiação ($IR(t)$) é possível utilizar a relação expressa em (2.1), extraída de [11], na qual:

- $P(t)$ é a potência de saída da planta FV em um dado instante de tempo t , em W;
- $IR(t)$ é a irradiação recebida pelos painéis em um dado instante de tempo t , em W/m^2 ;
- A é a área total da planta FV, em m^2 ;
- $\Delta T(t)$ é o módulo da diferença entre a temperatura na qual os parâmetros foram obtidos e a temperatura de operação do módulo FV em um dado instante de tempo t , em $^{\circ}C$;
- η é rendimento dos módulos FVs;
- γ é o coeficiente de temperatura, em $^{\circ}C^{-1}$.

$$P(t) = IR(t) \cdot A \cdot \eta \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta T(t)) \quad (2.1)$$

A formulação apresentada em (2.1), adotada neste trabalho, despreza o fator de dispersão geográfica dos painéis, fazendo com que a análise seja conservadora visto que, dependendo da área de cobertura dos painéis FVs, considerar a irradiação medida em um único ponto pode sobrestimar a ocorrência de variações. Quando se considera a dispersão geográfica da geração FV, a curva agregada resultante é mais suave que a obtida quando se considera um único ponto. Isto ocorre, pois, uma parte do sistema FV pode estar sob nuvens e outra parte não, fazendo com que o resultado agregado esteja entre os dois extremos. Em [12], afirma-se que observações de dados com intervalos de 1 minuto mostram que a variabilidade na potência gerada é essencialmente não-correlacionada a cada 1 MW de potência nominal de painéis, distantes 1 km entre si.

Uma abordagem comumente utilizada na literatura para caracterizar a variabilidade da potência de saída de sistemas FVs ou da irradiação medida por sensores é o uso do desvio padrão das variações da potência de saída, considerando-se uma janela de tempo [13]. As maiores variações podem ser selecionadas considerando-se o percentil 99,7, que corresponde a três desvios padrão da média em uma distribuição normal.

Em [10], a variabilidade de grandes plantas FVs (acima de 250 MW [10]) é analisada. Os estudos realizados mostram que a variabilidade destas plantas difere da registrada por sensores de irradiação e de plantas relativamente pequenas (menores que 5 MW) por causa da dispersão geográfica. Adicionalmente, os autores propõem o uso de uma taxa de variação (*ramp rate*), para caracterizar a potência de saída de uma planta FV ou a irradiação medida por um sensor. Os estudos utilizam dados de seis diferentes usinas solares com capacidade entre 5 e 80 MW, localizadas no Canadá e nos Estados Unidos.

Em [14] é analisada a severidade das variações na potência de saída de uma planta FV com mais de 2 MW de capacidade e das variações na irradiação medida em um ponto, através de um sensor. Para resoluções de 1 segundo, 10 segundos e 1 minuto, respectivamente, as variações na potência de saída da planta FV tiveram sua severidade reduzida de 60%, 40% e mais de 10%, respectivamente, quando comparadas às medições de irradiação no sensor.

Em [15], é proposto um modelo para quantificar a variabilidade utilizando imagens de satélite, permitindo o uso de dados em alta resolução. O modelo é desenvolvido partindo-se de um arranjo concentrado de geração FV para um disperso. Este modelo considera que as instalações FVs são unidimensionais e homogêneas, que são limitantes, porém o mesmo é capaz de fornecer uma relação entre a dispersão e o intervalo de medição para variações rápidas.

Embora a dispersão geográfica afete a variabilidade da geração FV, a mesma não é considerada ao longo deste trabalho, visando simplificar as análises e considerar o pior caso (referente aos maiores impactos técnicos). Ao se desconsiderar os efeitos do espalhamento geográfico, os casos analisados tornam-se conservativos, visto que a severidade das variações é maior que em casos nos quais o efeito da dispersão geográfica é considerada.

2.1 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo trouxe uma breve discussão sobre como as variações na irradiação solar recebida pelos painéis fotovoltaicos influenciam a potência gerada por eles. Neste trabalho, conforme a disponibilidade, são utilizados dados de medição de irradiação para obter a potência de saída destes geradores e medições da própria potência de saída de painéis FVs para caracterizar os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs. Esta caracterização é tratada no próximo capítulo e permite obter casos representativos e conservativos para a avaliação do impacto da variação da potência gerada na tensão de sistemas de distribuição.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para avaliar os impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs na tensão dos sistemas de distribuição é necessário, primeiramente, investigar o fenômeno físico envolvido. Neste contexto, este capítulo propõe a utilização de índices para caracterizar os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs. Estes índices são aplicados a conjuntos de medição de irradiação ou de potência de saída de geradores FVs, de forma a obter valores representativos que caracterizem o conjunto de dados. A partir destes valores representativos é possível escolher as medições de um dia que melhor represente o comportamento do conjunto, para ser utilizado nos estudos baseados em simulações computacionais. A seguir, apresenta-se a definição dos índices, bem como o processo de obtenção de cada um.

3.1 CONJUNTO DE DADOS

O primeiro passo consiste em selecionar um conjunto de dados com resolução apropriada. Os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs são fenômenos com duração na ordem de segundos ou minutos, o que requer uma base de dados com alta resolução de tempo. Neste trabalho são utilizadas três diferentes bases de dados:

- Dados NREL: Dados de irradiação disponíveis *online* no site do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) [16]. Possuem um minuto de resolução e estão disponíveis por longos períodos (dados coletados por mais de um ano). Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos com o uso de dados de 1º de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2014, no *Oak Ridge National Laboratory*¹. O período e a localização foram escolhidos arbitrariamente.
- Dados Brasil: Dados de irradiação medidos na cidade de Campinas, no estado de São Paulo, próximo a uma usina solar. Estes dados possuem 1 minuto de resolução e foram obtidos entre 1º de março de 2014 e 1º de dezembro de 2014.
- Dados Canadá: Potência de saída de um sistema FV instalado na cidade de Edmonton, na província de Alberta. Estes dados foram obtidos em dois diferentes

¹ Localizado no leste dos Estados Unidos, na cidade de *Oak Ridge* no estado do *Tennessee*.

períodos, de 25 de fevereiro a 12 de março de 2013 e de 17 de junho a 2 julho de 2013. Possuem resolução de 30 segundos.

Como discutido anteriormente, é desejado que os dados possuam a maior resolução possível, devido ao fato de que os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs têm duração de segundos a minutos. Assim, é importante que a resolução dos dados (irradiação ou potência de saída da planta FV) seja a maior possível, para caracterizar corretamente dos transitórios. Neste trabalho, são utilizados os grupos de dados disponíveis com as maiores resoluções. Apesar de as resoluções adotadas não serem ideais, em especial as de 1 minuto, elas são suficientes para os estudos realizados.

Para caracterizar o fenômeno na presença de dados irradiação, emprega-se a representação de uma planta fotovoltaica com 2,46 kWp como base, utilizando módulos FVs comerciais multicristalinos de 245 Wp [17]. A potência de saída escolhida é igual à da planta canadense, além de estar dentro da faixa na qual se concentra 70% dos geradores FVs já instalados no Brasil (atualmente há 713 instalações FVs, dentro das categorias e micro e minigeração, registradas no Brasil, sendo que 500 delas possuem potência instalada de até 5 kWp [18]). Para os módulos escolhidos e a planta definida, os parâmetros a serem utilizados em (2.1) são:

- Área: $A = 16,4 \text{ m}^2$;
- Eficiência: $\eta = 15\%$;
- Temperatura de operação: 46°C ;
- Coeficiente de temperatura: $\gamma = -0,45\%/^\circ\text{C}$.

Os parâmetros elétricos dos painéis FVs, como a potência e a eficiência, são obtidos sob determinadas condições ambientais, podendo ser adotadas as condições padrão de testes (STC – *Standart Test Conditions*) ou as condições normais de operação (NOCT – *Normal Operating Conditions*). Estas condições especificam valores de teste para parâmetros como a temperatura e a irradiação, que influenciam na obtenção dos parâmetros elétricos.

A potência e a eficiência apresentadas acima foram obtidas no manual do fabricante [17] para as condições STC, que consideram a temperatura do módulo é de 25°C , porém sua temperatura nominal de operação, segundo o manual do fabricante, é de 46°C . O aumento da temperatura faz com que os módulos FVs tenham uma redução na potência gerada, que é quantificada pelo parâmetro γ . Em (2.1), este fenômeno é contabilizado na parcela $(1 + \gamma \Delta T)$, na qual ΔT é o módulo da diferença entre a temperatura na qual os parâmetros foram obtidos e a temperatura de operação do módulo. Neste trabalho $\Delta T = 46^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 21^\circ\text{C}$.

Uma vez obtidas as curvas de potência de saída, é necessário selecionar os dias que são de interesse para o estudo. Considerando o padrão de nuvens, é possível classificar os dias em três diferentes categorias:

- Dia limpo: dias nos quais há pouca concentração de nuvens. Há poucas variações na irradiação, de modo que os dias desta categoria não são adequados para o estudo.
- Dia parcialmente nublado: dias com concentração mediana de nuvens, caracterizados pela alta intermitência na irradiação, adequados para o estudo.
- Dia nublado: dias que apresentam alta concentração de nuvens. A pouca irradiação faz com que a produção de energia pelos painéis FVs seja pequena praticamente durante todo o dia. Não são adequados para o estudo.

A Figura 3.1 apresenta um exemplo de potência de saída dos painéis FVs para cada tipo de dia. Nesta figura é possível observar que o dia limpo é caracterizado, principalmente, por poucas quedas abruptas na potência de saída e pela alta produção de energia, dada pela área sob a curva da potência de saída. O dia parcialmente nublado apresenta baixa produção de energia, sendo que a área sob a curva para este dia é consideravelmente menor que para os demais. O dia parcialmente nublado registra uma alta intermitência se comparado com os demais, e a produção de energia ao longo destes dias pode ser considerada alta, quando comparada com a de um dia nublado.

O máximo valor da curva de potência de saída utilizada como exemplo de um dia limpo não apresenta 1 p.u. pois o valor base é o maior valor de irradiação registrado em todo o período avaliado, sendo que este período abrange 1.461 dias e o pico varia, por exemplo, com as estações do ano.

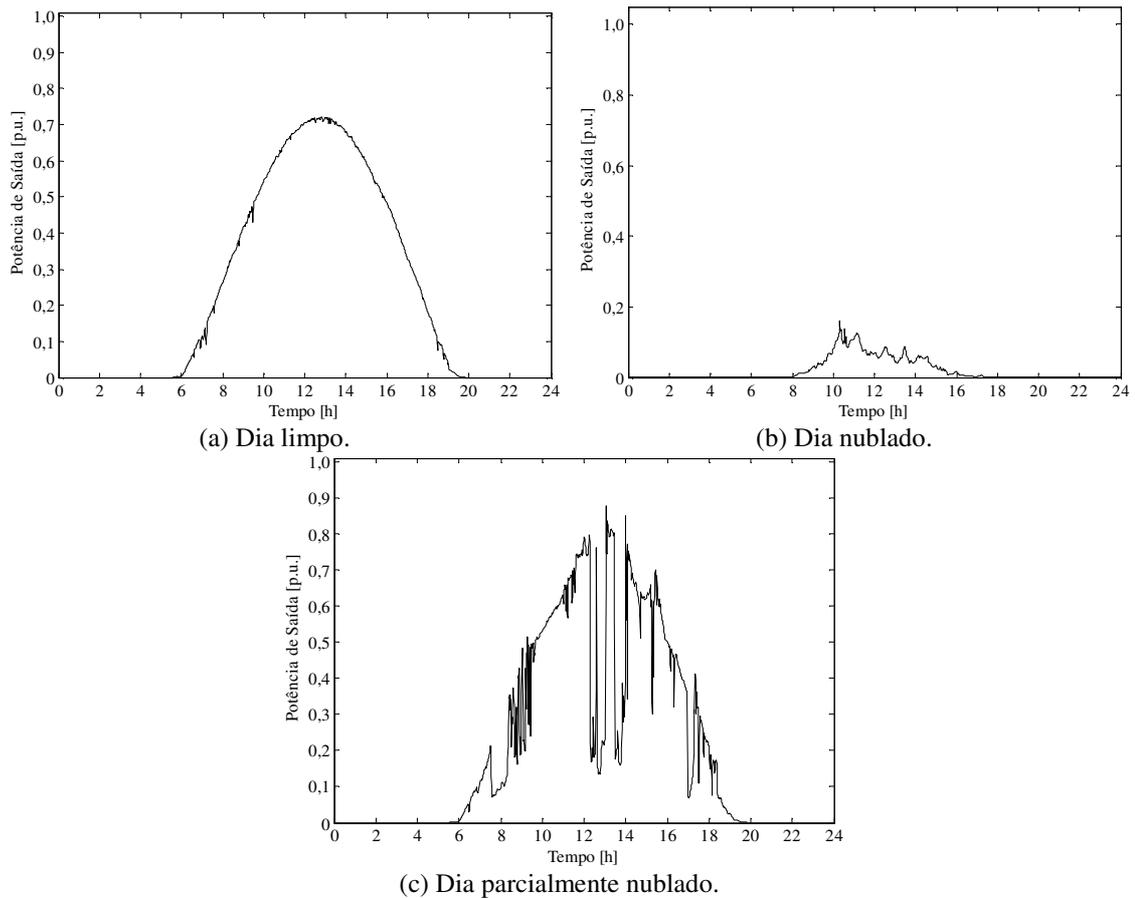


Figura 3.1 – Exemplos de potência de saída para diferentes tipos de dia.

O primeiro passo para o estudo de caracterização dos transitórios é separar os dias de interesse para o estudo (parcialmente nublados) dos demais presentes na base de dados. Esta separação pode ser feita visualmente com relativa simplicidade, porém, devido à quantidade de dados foram estabelecidos três critérios que permitem que esta separação seja feita computacionalmente. São avaliados a potência máxima produzida durante o dia, a área abaixo da curva de potência e o número de variações acima de 1% (este limiar foi escolhido após diversas análises de cada grupo de dados). Realizada esta filtragem na base de dados, apenas os dias parcialmente nublados são analisados pelo algoritmo de classificação (descrito na subseção seguinte) para obter as principais características dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs.

A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de dias classificados como limpos, parcialmente nublados e nublados para cada um dos conjuntos de dados utilizados neste trabalho.

Tabela 3.1 – Número de dias em cada grupo de classificação.

| Característica do dia | Quantidade de dias | | |
|-----------------------------|--------------------|------------|----------|
| | NREL | Brasil | Canadá |
| Limpo | 131 | 58 | 2 |
| Parcialmente nublado | 555 | 130 | 9 |
| Nublado | 775 | 87 | 4 |
| Total | 1.461 | 275 | 15* |

*Houve problemas de medição em alguns dias, que necessitaram ser descartados.

A Tabela 3.1 mostra a porcentagem de cada um dos tipos de dias (limpo, parcialmente nublado e nublado) para cada um dos grupos de dados. O grupo de dados do NREL apresenta 38% de dias parcialmente nublados, os dados brasileiros 47% e os dados canadenses 60%. Para os três casos, a ocorrência de dias parcialmente nublados é significativa se comparada ao total de dias medidos em cada grupo de dados. No entanto, ressalta-se que a base de dados do Canadá é pouco representativa, pois possui uma pequena quantidade de dias de interesse para o estudo se comparada com a quantidade de dias dos demais grupos de dados. Devido a esta pequena quantidade ela é menos adequada para conclusões sobre os impactos, pois esta amostra pode corresponder a dias atípicos. Entretanto, esta base foi mantida nas análises por se tratar da base de dados disponível com a maior resolução, permitindo ilustrar a influência da resolução dos dados nos estudos apresentados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FVS

Quando uma nuvem se aproxima do local no qual a geração FV está instalada, causa flutuações na irradiação recebida pelos painéis e, conseqüentemente, na potência de saída dos mesmos. Estas flutuações podem ser classificadas de acordo com três diferentes estados, referentes à área de cobertura dos painéis:

- Aproximação de nuvem;
- Permanência de nuvem;
- Saída de nuvem.

Quando a nuvem começa a se aproximar do sistema FV é possível observar uma queda na potência de saída; enquanto a nuvem permanece sobre o sistema FV, a potência de saída fica em níveis abaixo do esperado para um dia sem nuvens; e quando a nuvem começa a deixar o sistema FV há um aumento na potência de saída. Neste trabalho, toda a passagem da nuvem,

do momento no qual ela se aproxima da área de cobertura do sistema FV até quando ela o deixa completamente, é chamada de evento completo.

Em alguns casos é possível observar o efeito de borda de nuvem. Este efeito ocorre devido à refração da luz, que concentra a luz solar quando a borda da sombra passa, fazendo com que ocorra um pico na irradiação recebida pelo sistema FV. Este pico pode apresentar valores acima da irradiação total na superfície terrestre [19].

Os estados descritos acima podem ser representados através de três parâmetros, empregados para obter as características de irradiação de um dia típico, permitindo a escolha adequada do dia que será utilizado nas simulações computacionais (dias representativos). Os parâmetros utilizados são descritos a seguir e ilustrados na Figura 3.2.

- Variação de potência (ΔP): quantifica a variação de potência. Considera tanto variações (rampas) negativas (ΔP_{queda}) quanto positivas (ΔP_{subida}).
- Duração da variação de potência (Δt_{queda} e Δt_{subida}): quantifica a duração de uma variação de potência.
- Duração de um evento completo ($\Delta t_{evento} = \Delta t_{queda} + \Delta t_{permanência} + \Delta t_{subida}$): quantifica a duração de um evento completo.

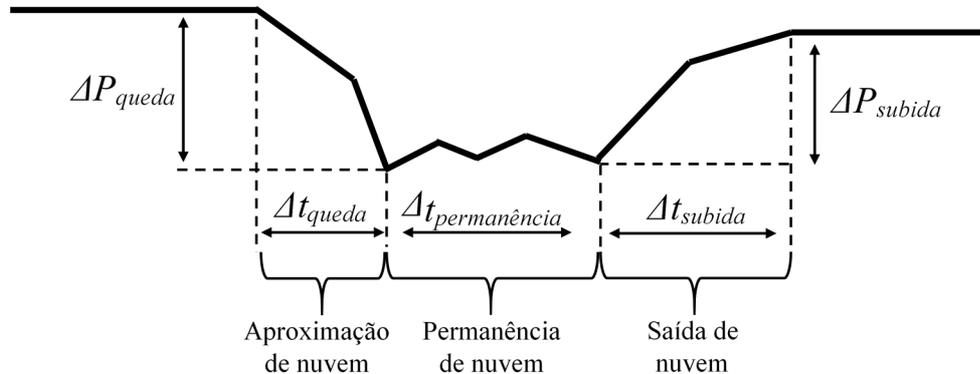


Figura 3.2 – Fenômenos físicos e sua relação com os parâmetros.

As curvas de potência de saída de todos os dias da base de dados que são considerados como parcialmente nublados são classificadas de acordo com os estados apresentados acima. Os trechos entre cada medição são classificados de acordo com a variação de potência entre cada intervalo de medição (é utilizada uma tolerância obtida após diversas análises realizadas nos dados) e com o estado do trecho anterior. Segmentos cuja variação de potência é maior que a tolerância adotada são classificados como aproximação ou saída de nuvem, dependendo se esta variação é positiva (saída) ou negativa (aproximação). Se a variação entre duas medições for menor que a tolerância adotada, a classificação do trecho é feita considerando o estado do segmento anterior, de acordo com a Tabela 3.2, que apresenta o estado do segmento atual para

cada possível estado do segmento anterior quando a variação registrada é menor que a tolerância.

Tabela 3.2 – Relação entre o estado anterior e o atual.

| Estado Anterior | Estado Atual |
|------------------------|-----------------------------------|
| Céu Limpo | Céu Limpo |
| Aproximação de Nuvem | Permanência de Nuvem |
| Permanência de Nuvem | Permanência de Nuvem |
| Saída de Nuvem | Céu Limpo ou Permanência de Nuvem |

A Figura 3.3 ilustra uma curva da potência de saída dos painéis FVs cujos pontos estão classificados de acordo com o estado definido na Tabela 3.2. Nesta figura, é possível observar três dos quatro estados associados à passagem de nuvens (no trecho selecionado não foram registrados trechos de permanência de nuvem). Após a classificação de todos os pontos da curva disponível no conjunto de dados, são extraídos valores representativos para os parâmetros que caracterizam os transitórios. Estes são discutidos de maneira mais aprofundada na próxima seção.

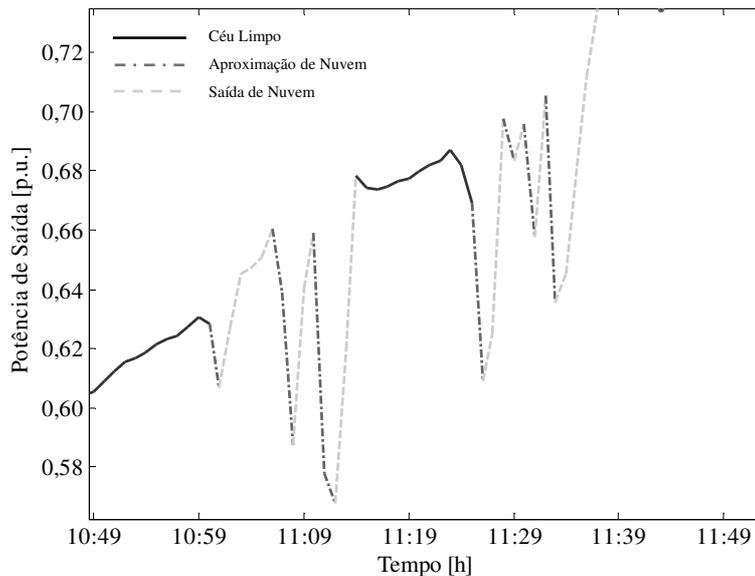


Figura 3.3 – Curva de potência de saída do sistema FV classificada.

3.3 VALORES REPRESENTATIVOS PARA OS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FVS

Após feita a classificação de todas as curvas de potência de saída dos dias parcialmente nublados, para cada um dos grupos de dados em estudo, é possível calcular valores representativos para os parâmetros de caracterização. Com base nos valores obtidos, um dia é escolhido

para representar o comportamento da geração FV nos estudos elétricos realizados nos próximos capítulos.

A Figura 3.4 apresenta gráficos que relacionam a quantidade de eventos registrados com determinada porcentagem de variações de potência (ΔP) e duração, Δt (constituída pela união dos conjuntos Δt_{queda} e Δt_{subida}).

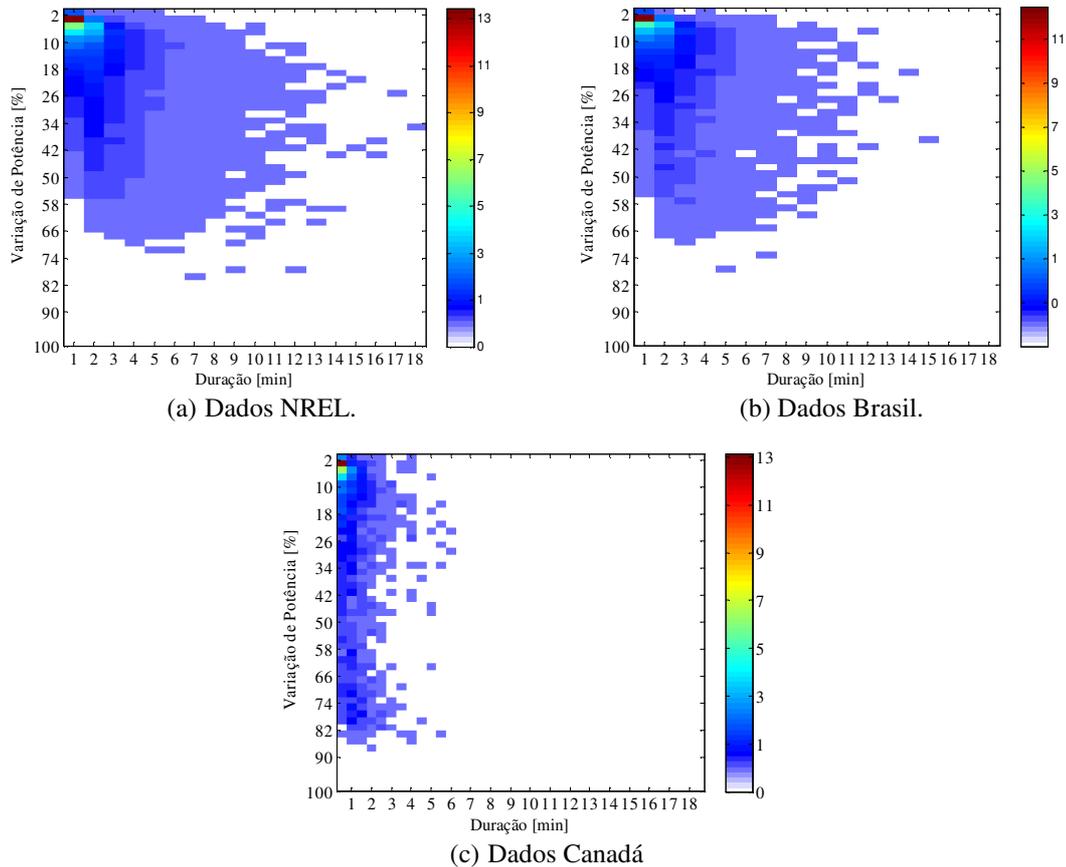


Figura 3.4 – Mapa de cores com a porcentagem de variações de potência considerando sua amplitude e duração.

É possível obter também as distribuições cumulativas para a variação de potência e para a duração da variação de potência, como apresentado na Figura 3.5 (a) e Figura 3.5 (b) para os dados do Brasil, e no Apêndice A para os dados do NREL (Figura A.1 (a) e Figura A.1 (b)) e do Canadá (Figura A.2 (a) e Figura A.2 (b)).

A Figura 3.5 apresenta a distribuição cumulativa de probabilidade para a variação de potência, ΔP , para a duração de uma variação de potência, Δt , e para a duração de um evento completo, Δt_{evento} , assim como o número de variações de potência por hora ao longo de um dia, para o conjunto de dados do NREL. O número de variações de potência ao longo de um dia não caracteriza a passagem de nuvens em si, mas permite quantificar a intermitência de cada um dos dias. Os dias parcialmente nublados podem possuir intermitência moderada ou intensa, sendo que o segundo possui um maior número de variações que o primeiro.

Os pontos destacados na Figura 3.5 (a), Figura 3.5 (b) e Figura 3.5 (c) correspondem ao percentil 95 da distribuição cumulativa de probabilidade, ou seja, eles representam um valor superior a 95% dos dados. O valor do percentil 95 é utilizado como valor representativo de caracterização da passagem de nuvens neste trabalho, eliminando casos muito extremos.

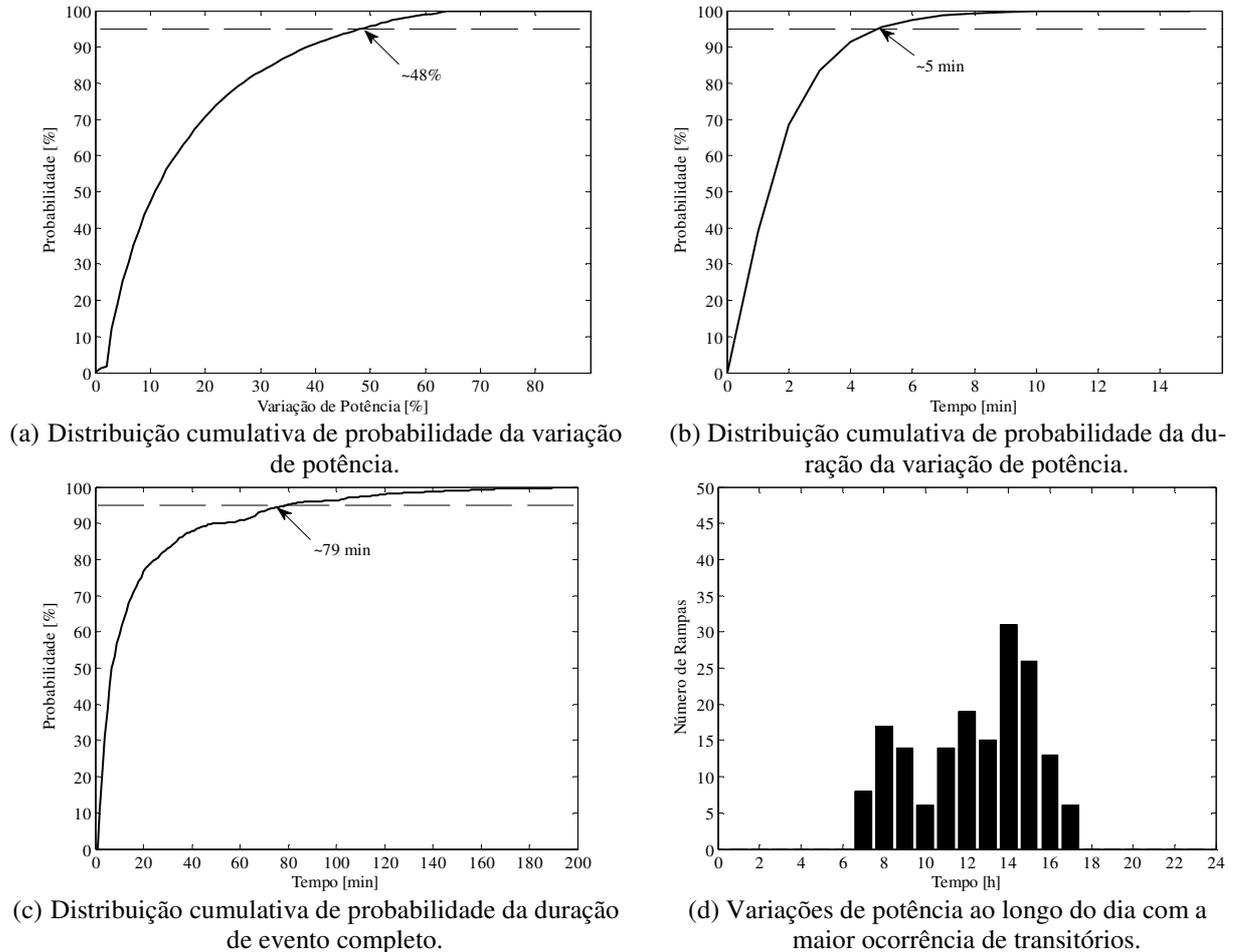


Figura 3.5 – Valores representativos para os parâmetros de caracterização, dados do Brasil.

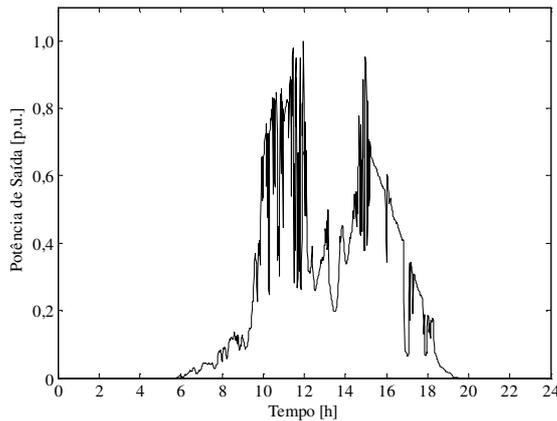
A mesma caracterização apresentada na Figura 3.5 é aplicada aos demais grupos de dados (NREL e Canadá). O resumo dos valores dos parâmetros para cada grupo de dados é apresentado na Tabela 3.3 e os gráficos detalhados para os grupos do NREL e do Canadá, no Apêndice A.

Na Tabela 3.3, ΔP é a variação de potência; Δt , a duração da variação de potência; Δt_{evento} , a duração de evento completo; e $N_{\Delta P}$ o número médio de variações de potência ao longo de um dia. Esta tabela resume os valores representativos encontrados para os parâmetros propostos, para cada um dos grupos de dados. Com base nestes valores, escolhe-se o dia, dentre os dias do conjunto de dados, cujos parâmetros mais se aproximam dos valores representativos. A potência de saída deste dia é utilizada para representar a intermitência causada pela passagem de nuvens sobre

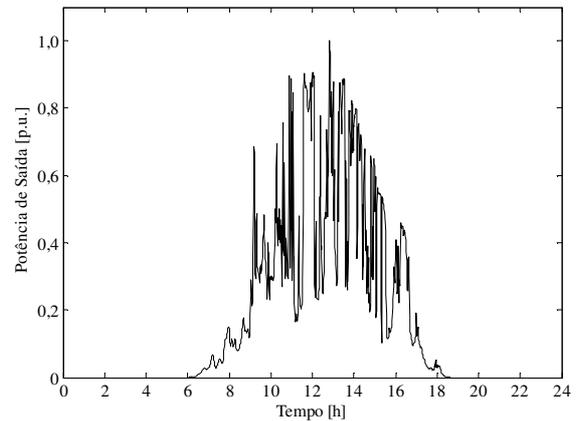
sistemas FVs na potência de saída dos mesmos nos estudos deste trabalho. Os valores dos parâmetros para um único dia são obtidos aplicando-se os mesmos critérios adotados para todo o conjunto de dados, na obtenção dos valores representativos. A potência de saída dos dias escolhidos para representar cada grupo de dados é apresentada na Figura 3.6.

Tabela 3.3 – Parâmetros de caracterização, valores representativos (Dia Típico) e valores do dia utilizado nas simulações (Dia Escolhido), para cada um dos grupos de dados.

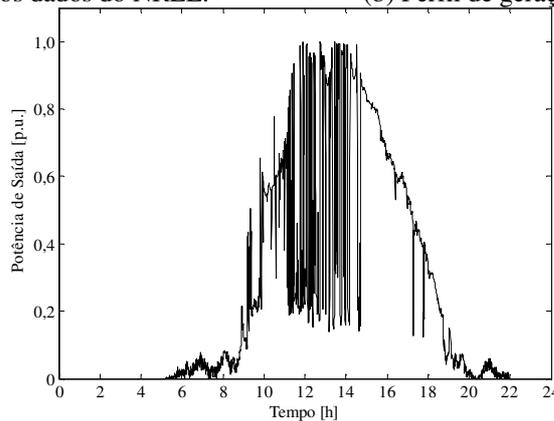
| Parâmetro | NREL | | Brasil | | Canadá | |
|-------------------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| | Dia Típico | Dia Escolhido | Dia Típico | Dia Escolhido | Dia Típico | Dia Escolhido |
| ΔP (%) | 47 | 56 | 48 | 53 | 75 | 78 |
| Δt (minutos) | 5 | 5 | 5 | 5 | 2,5 | 1,5 |
| Δt_{evento} (minutos) | 60 | 60 | 79 | 65 | 18 | 17,5 |
| $N_{\Delta P}$ | 100 | 112 | 83 | 137 | 213 | 195 |



(a) Perfil de geração para os dados do NREL.



(b) Perfil de geração para os dados do Brasil.



(c) Perfil de geração para os dados do Canadá.

Figura 3.6 – Perfil de geração FV, dia escolhido para ser utilizado nas simulações.

Um valor de Δt_{evento} igual a 60 minutos implica que, durante um dia, 95% dos eventos completos (a partir do momento no qual a nuvem inicia sua aproximação do sistema FV até quando ela deixa completamente a área de cobertura do sistema) ocorrem em, no máximo, 60 minutos.

É importante ressaltar que os valores representativos obtidos para os parâmetros são geograficamente dependentes, como pode ser visto na Tabela 3.3, comparando-se os dados obtidos no Canadá e nas demais localizações. Eles são válidos para a localização na qual os dados foram colhidos, caso não haja dados para a localização desejada é recomendado que sejam utilizados dados do local mais próximo possível, ou de locais que possuam características climáticas semelhantes. Este fato é exemplificado ao se considerar que o perfil de geração para os dados canadenses possui geração FV até as 22 horas (devido ao horário de pôr-do-sol em determinados períodos do ano), o que não ocorre para os outros grupos de dados.

No caso dos dados do Brasil e principalmente do Canadá, o valor típico dos parâmetros sofre influência da menor quantidade de dados disponíveis. Como os dados do NREL englobam um período de 4 anos, o valor representativo inclui mudanças de estações, o que não pode ser visto nos demais². No caso dos dados canadenses, como as medições foram feitas em um curto período de tempo existe a possibilidade de que os dias medidos não correspondam a dias típicos, com intermitência acima ou abaixo da média registrada quando se considera um registro histórico mais significativo.

3.4 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou índices importantes para auxiliar na escolha de curvas de potência de saída de sistemas FVs capazes de representar os dias parcialmente nublados nas análises dos impactos técnicos na regulação de tensão devido à passagem de nuvens sobre sistemas de distribuição com elevada penetração de geradores fotovoltaicos. Ressalta-se que quanto maior a quantidade de dados disponíveis e quanto menor o intervalo de amostragem destes dados, mais realistas podem ser as análises dos impactos técnicos na regulação de tensão. A seguir, a metodologia adotada para os estudos realizados nesta dissertação é apresentada.

² Outra abordagem que pode ser feita neste caso é a obtenção de dias típicos e dos respectivos parâmetros por estação do ano. Por exemplo, um dia típico para a primavera, verão, outono e inverno. Esta abordagem não foi adotada pois os dados brasileiros e canadenses não possuem um ano completo de medições.

4 METODOLOGIA DOS ESTUDOS

Os estudos de impactos técnicos realizados nesta dissertação são baseados na realização de fluxos de carga série-temporais em sistemas típicos ou reais de distribuição de energia elétrica (de média tensão e de baixa tensão). O fluxo de carga série-temporal é uma ferramenta de análise de sistemas elétricos que consiste na execução de fluxos de carga para instantes de tempo consecutivos – por exemplo, a cada 5 segundos – dentro de um intervalo pré-determinado, como um dia ou um ano. Neste trabalho, como a potência injetada pelos painéis FVs e a potência consumida pelas cargas variam ao longo do dia, são realizadas análises baseadas em simulações de fluxo de carga série-temporais, de modo a apresentar o comportamento das grandezas de interesse, como a tensão, ao longo do dia. A primeira seção deste capítulo apresenta a ferramenta computacional utilizada para a execução do fluxo de carga série-temporal (OpenDSS); a segunda e a terceira seções apresentam os sistemas-teste de média e de baixa tensão, respectivamente, utilizados nas simulações computacionais; e a quarta seção trata dos comentários finais referentes a este capítulo.

4.1 FERRAMENTA DE CÁLCULO DE FLUXO DE CARGA SÉRIE-TEMPORAL: OPENDSS

O OpenDSS (*Open Distribution System Simulator*) é uma ferramenta de simulação de sistemas de distribuição produzida pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*), gratuita e de código aberto [20]. Este software pode ser utilizado como um executável (*stand-alone*) ou utilizado por outros programas explorando sua interface COM (*Component Object Model*). Foi originalmente concebido para suportar análises de sistemas de distribuição, porém seu uso pode ser expandido dado que o mesmo pode ser facilmente modificado para suprir necessidades futuras.

Neste trabalho, o OpenDSS é utilizado para realizar cálculos de fluxo de carga série-temporal com o objetivo de obter o perfil de tensão das redes em estudo. Para facilitar a realização das simulações e o armazenamento dos dados para análise, explora-se a interface COM do programa, permitindo que os parâmetros de entrada sejam alterados com facilidade e que este seja executado pelo Matlab®.

Plataformas de análise de redes capazes de realizar análises quasi-estáticas, como o fluxo de carga série-temporal, foram desenvolvidas no âmbito acadêmico. O OpenDSS é um

exemplo deste tipo de plataforma cuja origem se deu voltada para pesquisas, mas que recentemente tem sido adotada para uso no cotidiano de concessionárias, tendo sido aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o cálculo das perdas elétricas. Ferramentas de análises quasi-estáticas são de interesse de concessionárias para a execução de estudos elétricos mais detalhados e têm sido incluídas em programas comerciais.

Os estudos estáticos, principalmente de fluxo de carga, foram utilizados por muitos anos pelas concessionárias para analisar a operação da rede e projetar a proteção, porém estes estudos são limitados a apenas um instante de tempo. Geralmente escolhe-se o instante de tempo no qual a carga é máxima e/ou mínima para avaliar diferentes impactos na rede de distribuição. A magnitude destes impactos é dada apenas para o instante de tempo escolhido. Este modelo de estudo não é adequado para analisar, por exemplo, os efeitos da geração FV, que possui grande variabilidade durante o dia, e suas possíveis interações com o controle da rede.

A maior vantagem dos estudos quasi-estáticos é a capacidade dos mesmos de capturar aspectos do fluxo de carga que são dependentes do tempo. Estas análises consistem em realizar uma série de estudos de fluxo de carga, executados para instantes de tempo consecutivos, dentro de um intervalo determinado, sendo que o estado convergido de um instante é utilizado para inicializar o fluxo de carga do próximo instante.

As alterações na carga e no controle dos sistemas de distribuição a cada minuto durante um dia são um exemplo de aspectos de dependência temporal que podem ser analisados com o fluxo de carga série-temporal. Os métodos quasi-estáticos permitem avaliar, além da magnitude, a frequência e a duração de um impacto, porém sua aplicação exige uma maior quantidade de dados, visto que são necessários dados sobre a potência de saída dos geradores FVs e sobre a carga para todo o período a ser analisado, com uma resolução de tempo adequada. Para que estes dados estejam disponíveis pode ser necessário, por exemplo, substituir os equipamentos de medição instalados nos consumidores, de forma que os mesmos sejam capazes de fornecer os dados necessários. Adicionalmente, dependendo da resolução e do período que se deseja analisar, o tamanho do conjunto de dados pode crescer rapidamente [21].

4.2 SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

Os impactos em uma rede de média tensão são analisados em um alimentador real de 25 kV, com carga original de 16,39 MW e 305 MVA de nível de curto-circuito na barra da subestação. Nos casos simulados sem considerar reguladores de tensão, a carga é multiplicada

por um determinado fator, para que no caso base as tensões permaneçam dentro dos limites de tensão adequada estabelecidos pela agência reguladora (ANEEL) apresentados de forma resumida na Tabela 4.1. A tensão na barra de referência, localizada à montante da impedância que representa o equivalente do sistema conectado à subestação, é definida como 1,05 p.u. e consideram-se apenas ramos e cargas trifásicos. A topologia simplificada da rede é apresentada na Figura 4.1. As cargas são representadas pela potência ativa e reativa nominal, além do perfil que indica o consumo em um determinado instante de tempo. É utilizado modelo de carga do tipo potência constante, conforme sugerido em [22]. O mesmo perfil de carga, apresentado na Figura 4.2, é utilizado para todas as cargas (potência ativa e reativa). Os dados da rede são apresentados no Apêndice A.

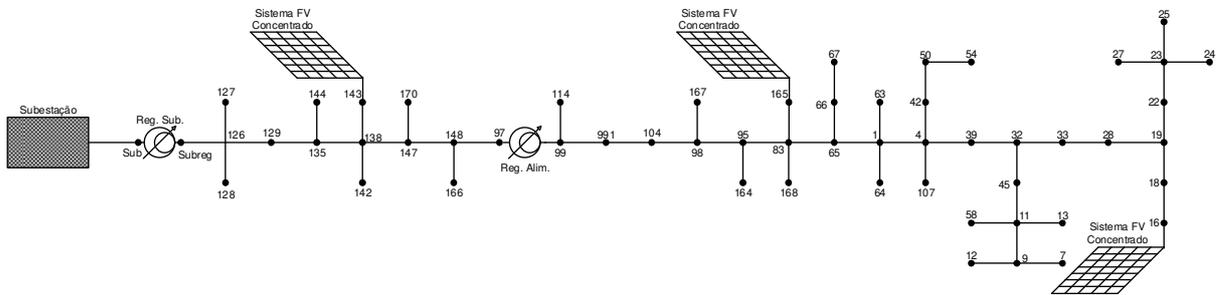


Figura 4.1 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de média tensão utilizado nas simulações.

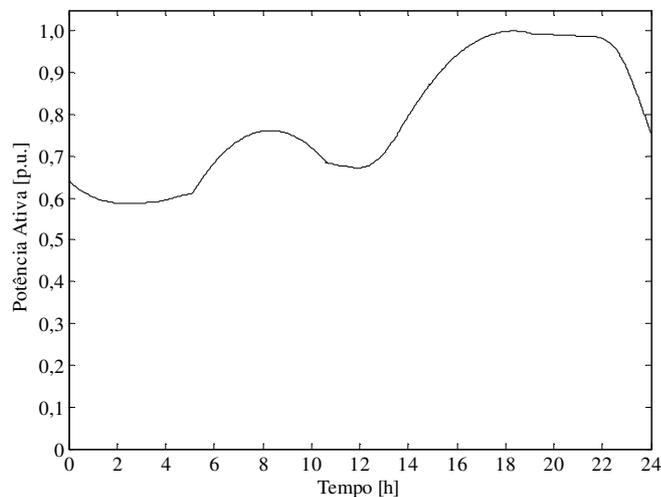


Figura 4.2 – Perfil de carga utilizado no sistema-teste de distribuição de média tensão.

Para os casos nos quais há geração FV instalada no alimentador, a mesma é modelada como uma injeção de potência com fator de potência unitário. Quando há mais de uma unidade de geração, é utilizado o mesmo perfil de geração para todas as unidades. Os geradores fotovoltaicos instalados no sistema de média tensão são considerados trifásicos. Os estudos foram realizados para três diferentes conjuntos de dados, utilizando o dia representativo obtido no Capítulo 3 para cada conjunto, conforme apresentado na Figura 3.6.

De acordo com o Capítulo 1, um dos objetivos deste trabalho é avaliar o impacto do transitório causado pela passagem de nuvens sobre os painéis na atuação dos reguladores de tensão. Assim, neste trabalho, são realizados dois diferentes tipos de estudos no sistema-teste de média tensão (MT). No primeiro, analisa-se o impacto da geração FV na tensão do sistema-teste, desconsiderando-se a presença de reguladores de tensão, enquanto no segundo estudo, analisa-se o impacto da geração FV no número de operações dos reguladores de tensão. A próxima subseção apresenta a modelagem e os parâmetros adotados para representar os reguladores de tensão.

4.2.1 Regulador de Tensão

Como forma de garantir a qualidade da tensão que é fornecida aos consumidores pelas distribuidoras, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Módulo 8 do PRODIST [23], classifica a tensão de fornecimento de acordo com a tensão nominal. A tensão pode ser classificada em três diferentes patamares:

- Adequada;
- Precária;
- Crítica.

A tensão deve ser fornecida dentro da faixa adequada e as concessionárias sofrem punições caso seja comprovada, através de medições, a não conformidade da tensão fornecida. Os limites que definem cada uma das faixas variam de acordo com a tensão nominal. A Tabela 4.1 reproduz estes limites, em p.u., para as duas faixas de tensão que são utilizadas neste trabalho. Para garantir que a tensão fornecida esteja dentro destes limites são utilizados equipamentos de regulação de tensão, como reguladores de tensão e bancos de capacitores. Maiores detalhes sobre o funcionamento de reguladores de tensão podem ser encontrados no Apêndice C. O uso dos bancos de capacitores para regular a tensão ocorre baseado na sensibilidade da tensão com a potência reativa. O uso do banco de capacitores é mais bem discutido na Seção 7.1.2.

Tabela 4.1 – Limites de tensão, em p.u., para cada faixa de tensão. Extraído de [23].

| Adequada | Precária | Crítica |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <i>Tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV</i> | | |
| $0,93 \text{ p.u.} \leq V < 1,05 \text{ p.u.}$ | $0,90 \text{ p.u.} \leq V < 0,93 \text{ p.u.}$ | $V < 0,90 \text{ p.u.}$ ou $1,05 \text{ p.u.} < V$ |
| <i>Tensão nominal inferior a 1 kV</i> | | |
| $0,92 \text{ p.u.} \leq V < 1,05 \text{ p.u.}$ | $0,87 \text{ p.u.} \leq V < 0,92 \text{ p.u.}$ ou $1,05 \text{ p.u.} \leq V < 1,06 \text{ p.u.}$ | $V < 0,87 \text{ p.u.}$ ou $1,06 \text{ p.u.} < V$ |

Nos estudos apresentados no Capítulo 6, é considerada a presença de dois reguladores de tensão no sistema-teste de média tensão. Um regulador (Reg. Sub.) é conectado entre a subestação e a barra *Subreg*, que conecta o secundário do regulador de tensão à barra 126 e um segundo regulador (Reg. Alim.) é conectado entre as barras 97 e 99. Ambos os reguladores são trifásicos, conectados em estrela, e possuem impedância de 9% (15 MVA de potência nominal e tensão nominal de 25 kV nos dois enrolamentos). Os dados referentes à rede e ao regulador de tensão correspondem a uma rede real do interior do estado de São Paulo. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros utilizados para cada um dos reguladores, sendo que V_{reg} é o valor da tensão regulada, *band* é a banda (zona) morta, e *ptratio* é a relação de transformação do transformador de potencial do regulador de tensão. Mais detalhes do modelo do regulador de tensão no *software* OpenDSS são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos reguladores de tensão.

| | <i>Vreg</i> (V) | <i>bus</i> | <i>delay</i> (s) | <i>band</i> (V) | <i>ptratio</i> | <i>winding</i> |
|-------------------------------------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Dados com resolução de 1 minuto | | | | | | |
| Reg. Sub. | 125 | Subreg | 120 | 2 | 120 | 2 |
| Reg. Alim. | 118 | 12 | 60 | 2 | 120 | 2 |
| Dados com resolução de 30 segundos | | | | | | |
| Reg. Sub. | 125 | Subreg | 60 | 2 | 120 | 2 |
| Reg. Alim. | 118 | 12 | 30 | 2 | 120 | 2 |

Os tempos de atraso foram escolhidos baseados em valores típicos, respeitando-se a resolução dos dados dos geradores FVs (1 minuto para os dados brasileiros e do NREL e 30 segundos para os dados canadenses). Além de evitar que os reguladores operem excessiva e desnecessariamente, o tempo de atraso permite coordená-los, neste fazendo com que possuam uma atuação local.

A Figura 4.3 apresenta, na parte superior, os limites de tensão do regulador (linha tracejada) e a tensão ao longo do tempo na barra que tem a tensão controlada pelo regulador ‘Reg. Alim.’ (barra 12), enquanto na parte inferior é mostrada a posição do *tap* do regulador de tensão ao longo de um dia.

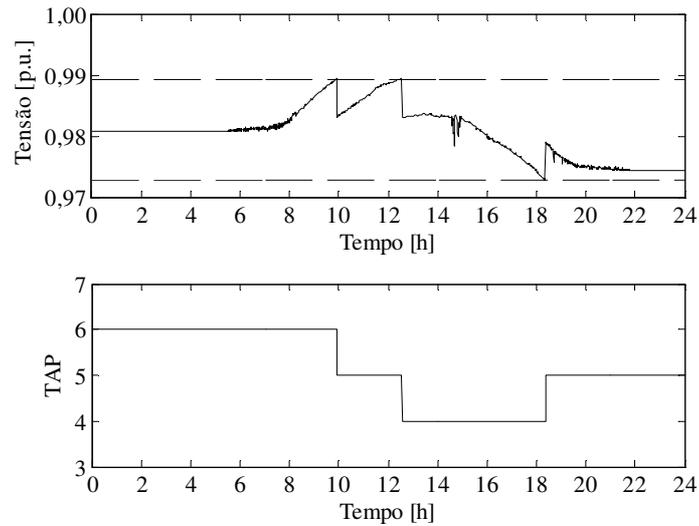


Figura 4.3 – Tensão na barra controlada e posição do *tap* do regulador ao longo de um dia.

Os limites superior e inferior correspondem à banda morta do regulador de tensão, definida no parâmetro *band*. Este parâmetro é definido em volts para o enrolamento controlado, sendo necessário utilizar o valor de *ptratio* para obter o valor referente à tensão do regulador, como mostrado em (4.1).

$$B_{\%} = \frac{band \cdot ptratio}{V_{nom}} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot 120}{14434} \cdot 100\% = 1,67\% \quad (4.1)$$

O regulador de tensão está ajustado para manter uma tensão de 0,9833 p.u. (118 V na base de 120 V) na barra 12 do sistema-teste. O valor da banda morta é dividido igualmente em torno desta tensão, ou seja, a tensão será considerada adequada pelo regulador se estiver entre 0,975 p.u. e 0,992 p.u. e o mesmo não atuará.

Na parte inferior da Figura 4.3 é mostrada a posição do *tap* do regulador ao longo do dia. Comparando-se a figura na parte inferior com a da parte superior é possível observar os degraus de tensão causados pela atuação do regulador. As figuras apresentadas são referentes a uma simulação realizada com os dados do Canadá, ou seja, a resolução é de 30 segundos, assim como o *delay* utilizado no regulador.

A Figura 4.4 consiste em uma ampliação de parte da Figura 4.3 e ilustra como ocorre a atuação do regulador de tensão, apresentando a tensão na barra 12 e as mudanças de *tap* em detalhe, próximo às 18 horas. Considerando a parte superior da figura, é possível observar que no instante indicado por 1 a tensão da barra 12 ultrapassa o limite inferior da banda morta do regulador, porém observa-se na parte inferior que não é registrada mudança no *tap* do regulador. Esta alteração de *tap* não é realizada devido ao *delay* do regulador. A mudança de *tap* só ocorre se a tensão permanece fora dos limites da banda morta por um tempo maior ou igual ao *delay*

do regulador (30 segundos). Para o ponto 1, às 18 horas e 21 minutos, é possível observar que no próximo instante (às 18 horas, 21 minutos e 30 segundos) a tensão volta naturalmente para dentro dos limites ajustados no regulador, não sendo necessária a mudança de *tap*. No ponto 2, às 18 horas e 22 minutos, a tensão novamente ultrapassa o limite inferior, porém neste caso há mudança de *tap*. Isto ocorre, pois, ao realizar o cálculo de fluxo de carga para 18 horas, 22 minutos e 30 segundos com *tap* na posição 4, a tensão calculada estaria novamente abaixo do limite inferior, de modo que a tensão se encontra abaixo do limite por um tempo maior ou igual ao *delay* do regulador. Assim, o OpenDSS aciona o controle do regulador, de forma que não ocorra violação de tensão por um tempo maior que o *delay* ajustado no regulador. Durante as iterações de controle, o *tap* do regulador é ajustado para a posição 5, solucionando a violação de tensão. O OpenDSS cessa as iterações de controle e é exibido apenas o estado da rede após o ajuste dos controles. Por isso, no instante 18 horas, 22 minutos e 30 segundos é apresentada a tensão já dentro dos limites e o *tap* na posição 5.

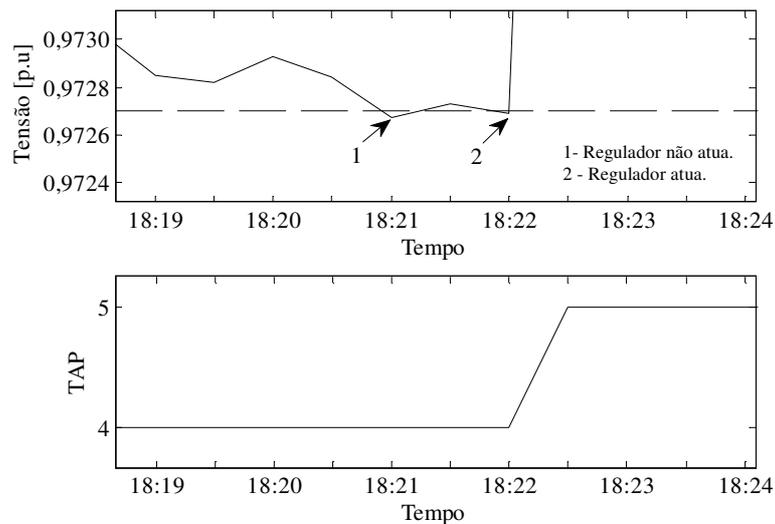


Figura 4.4 – Detalhe da mudança de *tap* do regulador de tensão.

Como o atraso do regulador e o tempo entre cada um dos fluxos de carga são de 30 segundos, se a tensão na barra controlada ultrapassar os limites da banda morta do regulador em duas simulações consecutivas é necessário que o regulador atue, pois, a tensão estará fora dos limites por um tempo maior ou igual ao *delay* estabelecido. Esta possibilidade de considerar o atraso na atuação dos equipamentos de controle do sistema é uma das vantagens da utilização do fluxo de carga série-temporal.

4.3 SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

Para os estudos em sistemas de distribuição de baixa tensão (BT) é utilizado um sistema-teste representativo baseado em dados reais brasileiros, obtidos de uma concessionária. Este sistema é alimentado por um transformador abaixador (11,9 kV (conexão Δ)/0,22 kV (conexão Y_g)) de 75 kVA e um equivalente de rede com nível de curto-circuito de 100 MVA no nó raiz, o qual representa a rede de média tensão. Há 37 unidades consumidoras na rede, sendo a maioria bifásica, conectadas de maneira que o sistema seja desequilibrado (característica de sistemas de distribuição, especialmente de baixa tensão). O pico máximo de carga na rede corresponde a 37 kVA e a tensão antes do equivalente do sistema é definida em 1 p.u. A Figura 4.5 apresenta a topologia da rede, maiores detalhes sobre os parâmetros da rede podem ser encontrados no Apêndice D.

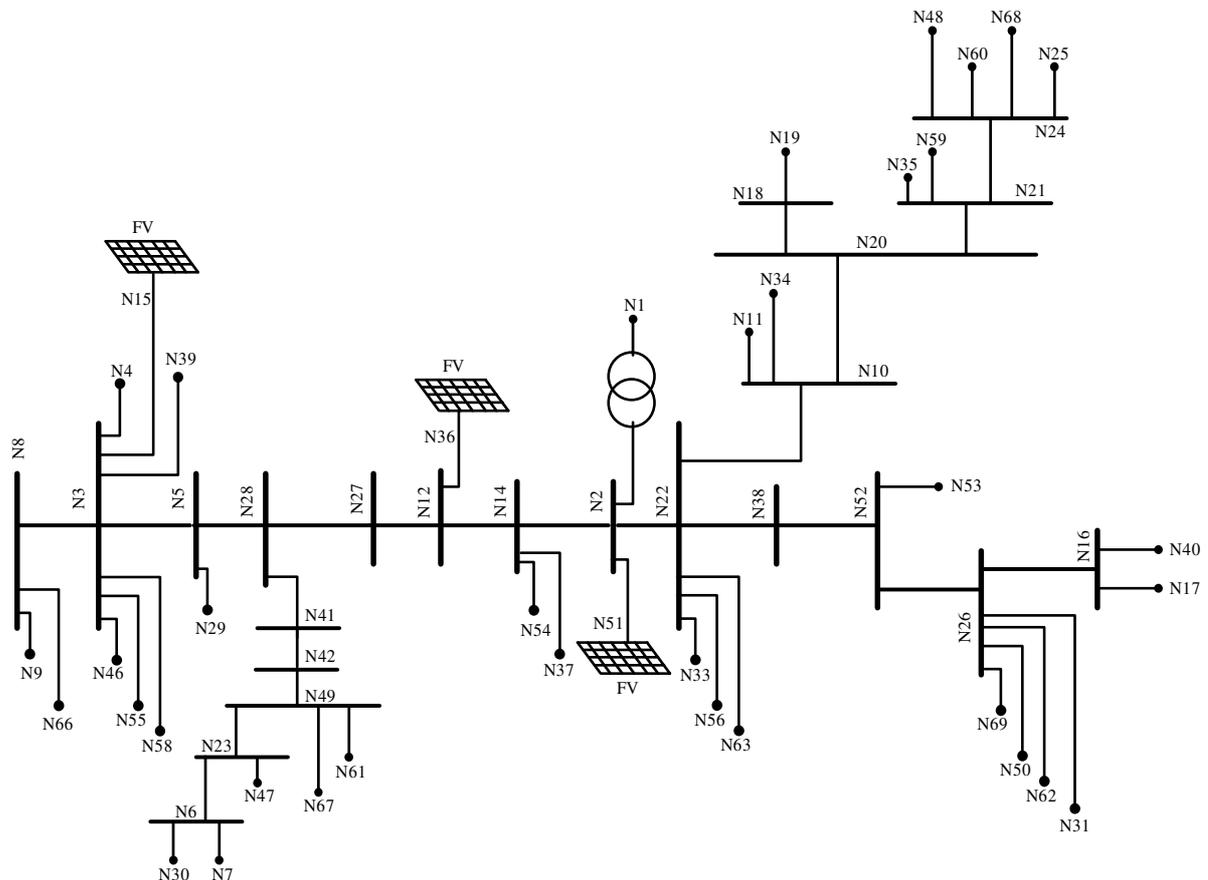


Figura 4.5 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de baixa tensão, com a localização dos geradores FVs.

Para a rede apresentada na Figura 4.5, foi alocado um perfil de consumo diferente para cada um dos 37 consumidores. Estes perfis de carga possuem resolução de 1 minuto (utilizados com os dados do Brasil e do NREL) ou 30 segundos (utilizados com os dados do Canadá) e são

obtidos pelo programa *Low Voltage Network Simulator* desenvolvido no Departamento de Sistemas e Energia da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas [24]. Este simulador modela o comportamento probabilístico de equipamentos elétricos domésticos, incluindo características do tempo de liga/desliga de cada equipamento e o número de ocupantes da casa. A Figura 4.6 apresenta um exemplo de curva de potência ativa e um de potência reativa utilizados nas simulações. As curvas de carga desta figura consistem em perfis de consumo normalizados (divididos pelo valor da potência nominal da carga, em kVA) e são baseados no perfil dos consumidores canadenses.

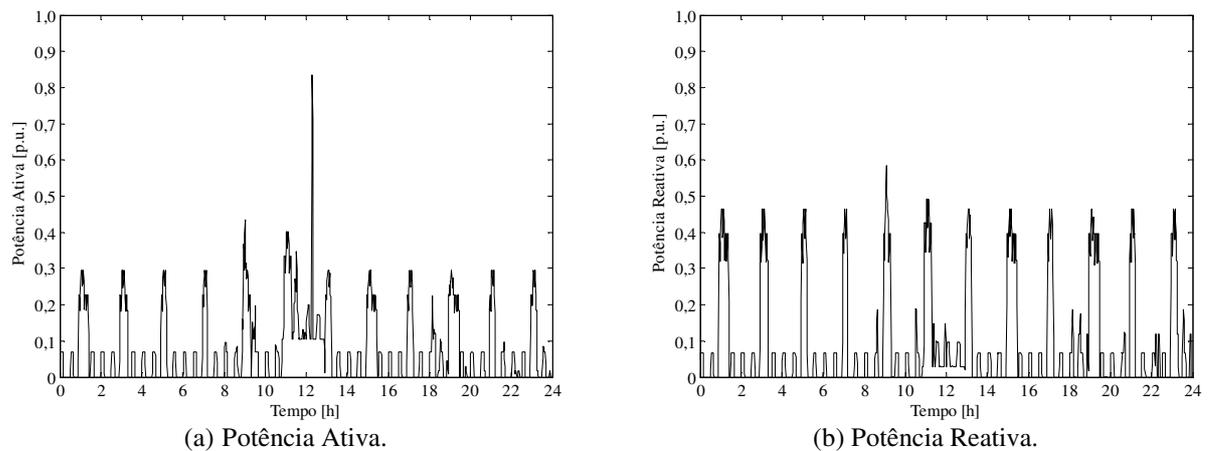


Figura 4.6 – Exemplo de perfis de potência ativa e reativa de consumidores utilizados no sistema-teste de distribuição de baixa tensão.

Nos casos nos quais há geração FV instalada no sistema-teste de baixa tensão, a modelagem é a mesma utilizada no sistema-teste de média tensão, ou seja, a geração é modelada como uma injeção de potência com fator de potência unitário e, para os casos nos quais há mais de um gerador instalado, é utilizado o mesmo perfil de geração para todas as unidades. Os geradores fotovoltaicos são bifásicos, instalados sempre entre as fases A e C.

4.4 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a metodologia adotada nos estudos realizados a seguir nesta dissertação. Destaca-se a apresentação do software utilizado e do tipo de simulação realizada nos sistemas-teste de MT e de BT descritos nas Seções 4.2 e 4.3, respectivamente. No próximo capítulo, iniciam-se os estudos de avaliação dos impactos técnicos causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs na magnitude de tensão tanto no sistema-teste de MT quanto no sistema-teste de BT.

5 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA MAGNITUDE DE TENSÃO

Os transitórios causados pela passagem de nuvens e seus impactos na potência injetada pelos geradores FVs nas redes de distribuição foram caracterizados no Capítulo 3. Conforme apresentado, as variações na potência ativa gerada por um sistema FV podem ser tão altas quanto 80% de sua potência nominal e terem duração de apenas algumas dezenas de segundos [25], além de centenas de rampas poderem ser registradas em um único dia. Estes fatores podem caracterizar variações excessivas na tensão. Neste capítulo, são realizados estudos para investigar estas variações na tensão. Estes estudos são divididos em duas categorias: 1) considera-se a passagem de nuvens sobre painéis que compõem uma (ou mais) usina(s) solar(es) em um sistema de distribuição de média tensão; e 2) considera-se a passagem de nuvens sobre painéis conectados a um sistema de baixa tensão.

Todos os estudos apresentados neste capítulo são realizados para os três grupos de dados caracterizados no Capítulo 3. Com o objetivo de tornar o texto mais objetivo, são apresentados em detalhe apenas os resultados obtidos para o grupo de dados do Brasil. Os resultados relativos aos demais grupos de dados são apresentados de forma reduzida ao longo deste capítulo e em detalhe no Apêndice A.

5.1 FORMA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O dia representativo de cada um dos grupos de dados apresentados na Seção 3.3 é utilizado em simulações computacionais para avaliar o impacto da intermitência da geração FV na tensão dos sistemas-teste de média e de baixa tensão. As simulações computacionais consistem na realização de fluxos de carga série-temporais, de modo a se obter o perfil de tensão da rede ao longo de um dia na(s) barra(s) a ser(em) estudada(s), respeitando-se a resolução dos dados de geração FV (1 minuto – ou 1440 pontos – para o grupo de dados do NREL e do Brasil, e 30 segundos – ou 2880 pontos – para o grupo de dados do Canadá).

A quantidade de geração FV que é instalada na rede é definida pelo nível de penetração. O nível de penetração, neste trabalho, é definido como a razão entre a potência ativa de pico de geração FV instalada e a potência ativa total da carga instalada no sistema. Ressalta-se que neste trabalho considera-se que a geração FV opera com fator de potência unitário.

Os resultados obtidos são apresentados, basicamente, de três maneiras distintas:

1. Variação de tensão ao longo de um dia: Este tipo de resultado está associado ao perfil diário de tensão (tensão ao longo de um dia) de uma barra específica da rede. Para as redes de MT, avalia-se a barra que apresenta a menor tensão registrada na rede durante todo o dia, enquanto para as redes de BT é utilizada uma barra com baixo nível de curto-circuito e a fase que apresenta as variações de tensão mais significativas. A variação de tensão é obtida subtraindo-se o perfil de tensão do caso base do perfil de tensão do caso em estudo. Esta abordagem exclui as variações na tensão que ocorrem devido às variações na carga, mostrando apenas as variações causadas pela geração FV, foco deste trabalho. Comparando-se a variação de tensão ao longo de um dia para os diversos casos é possível observar como algumas características de cada estudo de caso (variação do nível de penetração, localização da geração FV, concentração da geração FV, etc.) afetam a tensão da rede. A Figura 5.1 ilustra um exemplo deste tipo de resultado.

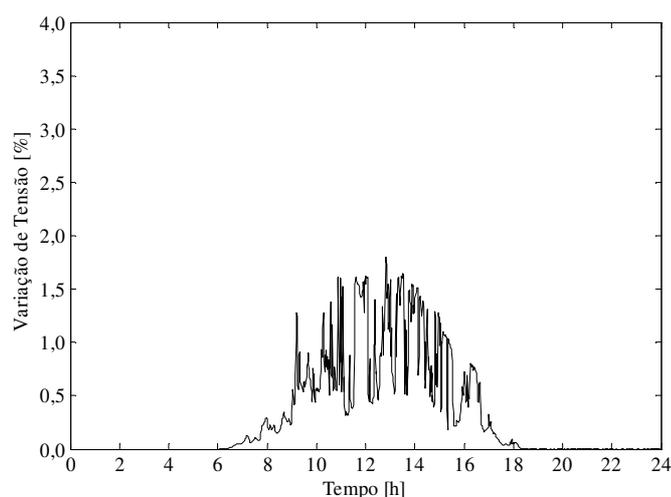


Figura 5.1 – Exemplo de variação de tensão ao longo de um dia.

2. Variação máxima de tensão em um intervalo: Este tipo de resultado mostra a maior variação de tensão que ocorre na rede em um dado intervalo de tempo (neste trabalho, este intervalo é de 15 minutos). Esta análise é feita considerando-se as variações de tensão em todas as barras do sistema, ou seja, em dado intervalo de tempo em nenhuma barra do sistema há variação maior que a apresentada neste gráfico. Em cada intervalo de tempo, caso as variações consecutivas possuam o mesmo sinal (positivo ou negativo), considera-se a variação acumulada. A Figura 5.2 ilustra um exemplo deste tipo de resultado.

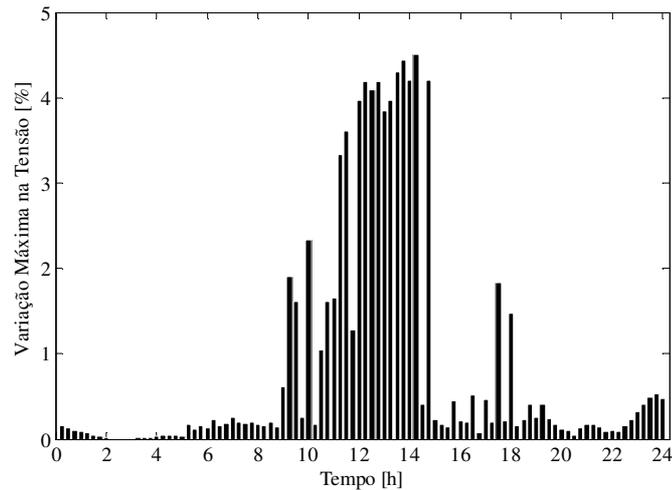


Figura 5.2 – Exemplo de resultado de variação máxima na tensão.

3. Número de variações de tensão: Este tipo de resultado apresenta o número de variações de tensão acima de determinado limiar (neste trabalho, o limiar considerado é de 0,5%) em um determinado intervalo de tempo (neste trabalho, o intervalo de tempo utilizado é de 15 minutos). As variações são contabilizadas em uma determinada barra do sistema, a barra na qual está instalada a geração FV ou, no caso de mais de uma barra possuir geração FV, a barra que tem menor nível de curto-circuito, dentre as que possuem geração FV instalada. São consideradas apenas as variações entre um ponto e outro, de modo que, dentro de um intervalo de 15 minutos podem ser registradas no máximo 15 (para dados com resolução de 1 minutos) ou 30 variações (para dados com resolução de 30 segundos). A Figura 5.3 ilustra um exemplo deste tipo de resultado.

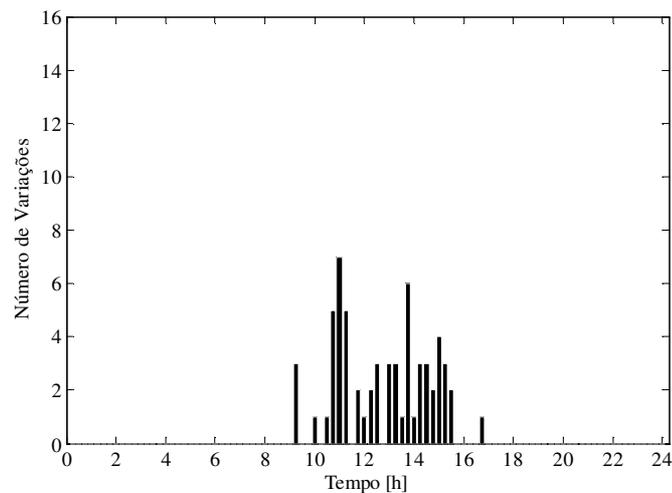


Figura 5.3 – Exemplo de resultado do número de variações de tensão acima de 0,5%.

5.2 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE MÉDIA TENSÃO

Para analisar o impacto da geração FV na magnitude de tensão do sistema-teste de média tensão, apresentado na Seção 4.2 (reapresentado na Figura 5.4), é utilizado o programa OpenDSS para realizar fluxos de carga série-temporais e obter o perfil de tensão nas barras do alimentador ao longo de um dia parcialmente nublado. Definindo-se o nível de penetração como a razão entre a potência nominal total de toda a geração FV instalada e a potência ativa total da carga, as simulações são realizadas para seis diferentes casos:

- Caso Base: Não há geração FV instalada no alimentador. Todas as cargas são atendidas pela subestação. Nível de penetração de 0%.
- Caso 1: 2,95 MWp de geração FV instalada na barra 143 (próxima à subestação). Nível de penetração de 20%.
- Caso 2: 2,95 MWp de geração FV instalada na barra 165 (localizada no meio do alimentador). Nível de penetração de 20%.
- Caso 3: 2,95 MWp de geração FV instalada na barra 16 (localizada no final do alimentador). Nível de penetração de 20%.
- Caso 4: 2,95 MWp de geração FV instalada nas barras 143, 165 e 16 (0,98 MWp em cada barra). Nível de penetração de 20%.
- Caso 5: 5,9 MWp de geração FV instalada na barra 16 (localizada no final do alimentador). Nível de penetração de 40%.

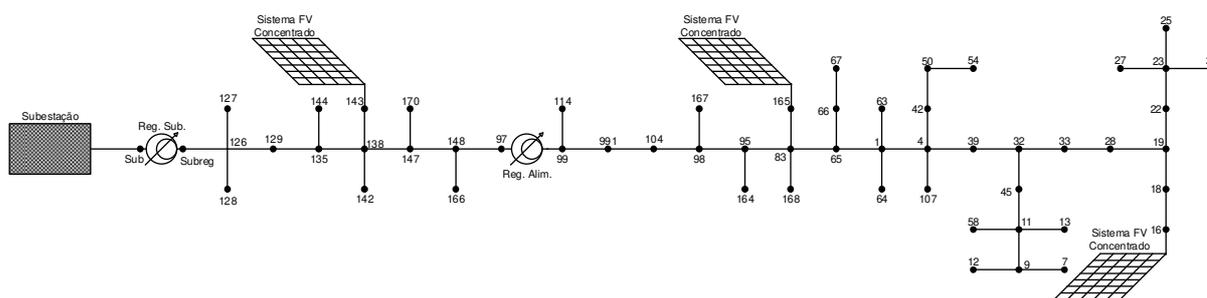


Figura 5.4 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de média tensão utilizado nas simulações.

Cada um dos casos é simulado para todos os grupos de dados (NREL, Brasil e Canadá). Para cada grupo de dados considera-se o perfil de geração FV representativo, apresentado na Figura 5.5 (mesmos gráficos da Figura 3.6), conforme procedimento apresentado no Capítulo

3. Para todos os casos simulados neste capítulo, os reguladores de tensão instalados no alimentador são desativados (desconsiderados).

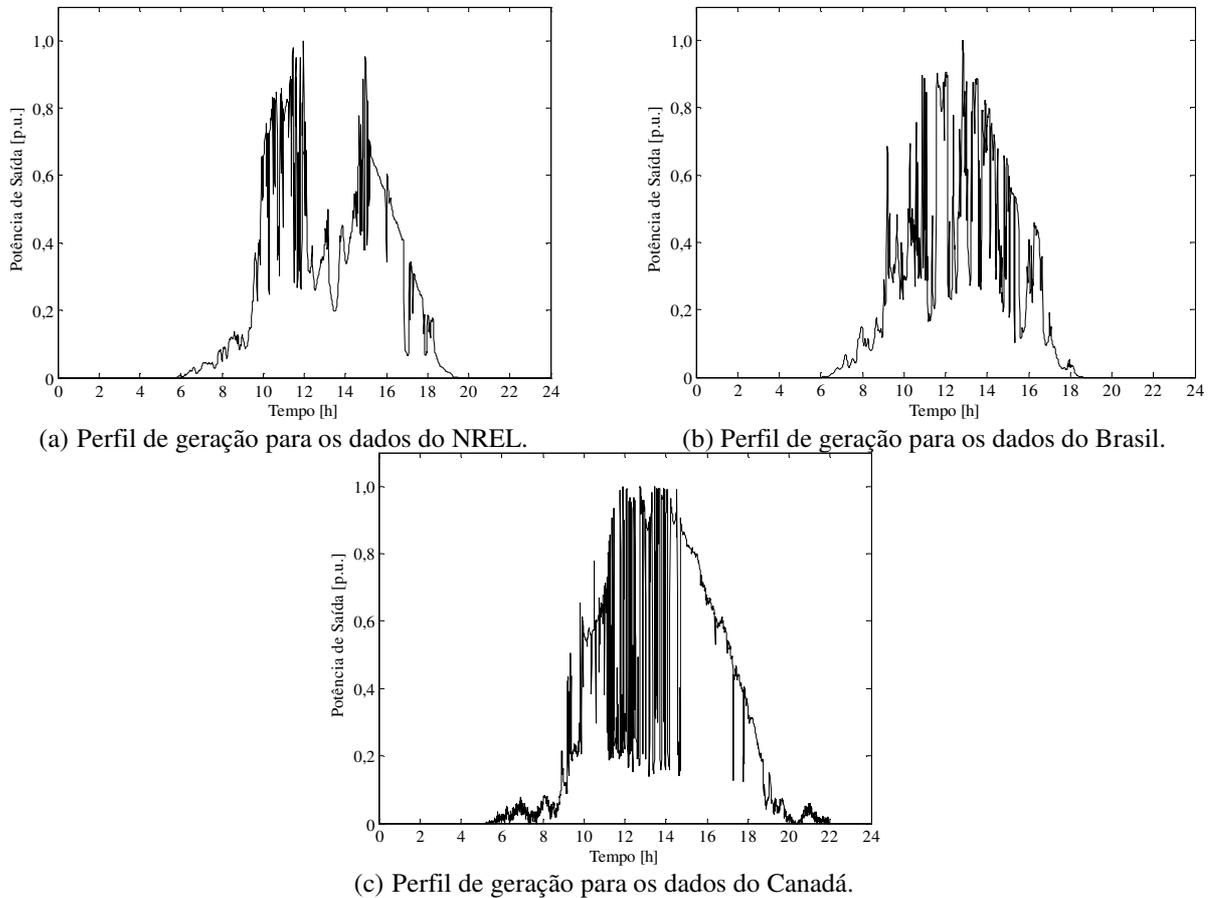


Figura 5.5 – Perfil de geração FV, dia escolhido para ser utilizado nas simulações.

5.3 RESULTADOS DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE MÉDIA TENSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nas simulações com o sistema-teste de média tensão. Primeiramente é apresentado o comportamento da tensão da rede na presença de geração FV e, em seguida, as variações de tensão são quantificadas.

5.3.1 Análise da Tensão

Cada um dos seis casos apresentados na Seção 5.2 é simulado utilizando-se o sistema-teste de média tensão apresentado na Seção 4.2 e o perfil de carga ilustrado na Figura 4.2. A Figura 5.6 mostra o perfil de tensão da barra que registrou, ao longo do dia, a menor tensão no sistema. É apresentado o perfil de tensão para o caso base e para o caso 5, bem como a variação de tensão ao longo de um dia. Os resultados para todos os casos são apresentados apenas na

forma de variação de tensão, pois este tipo de resultado enfatiza as variações de tensão causadas exclusivamente pela variação da geração FV.

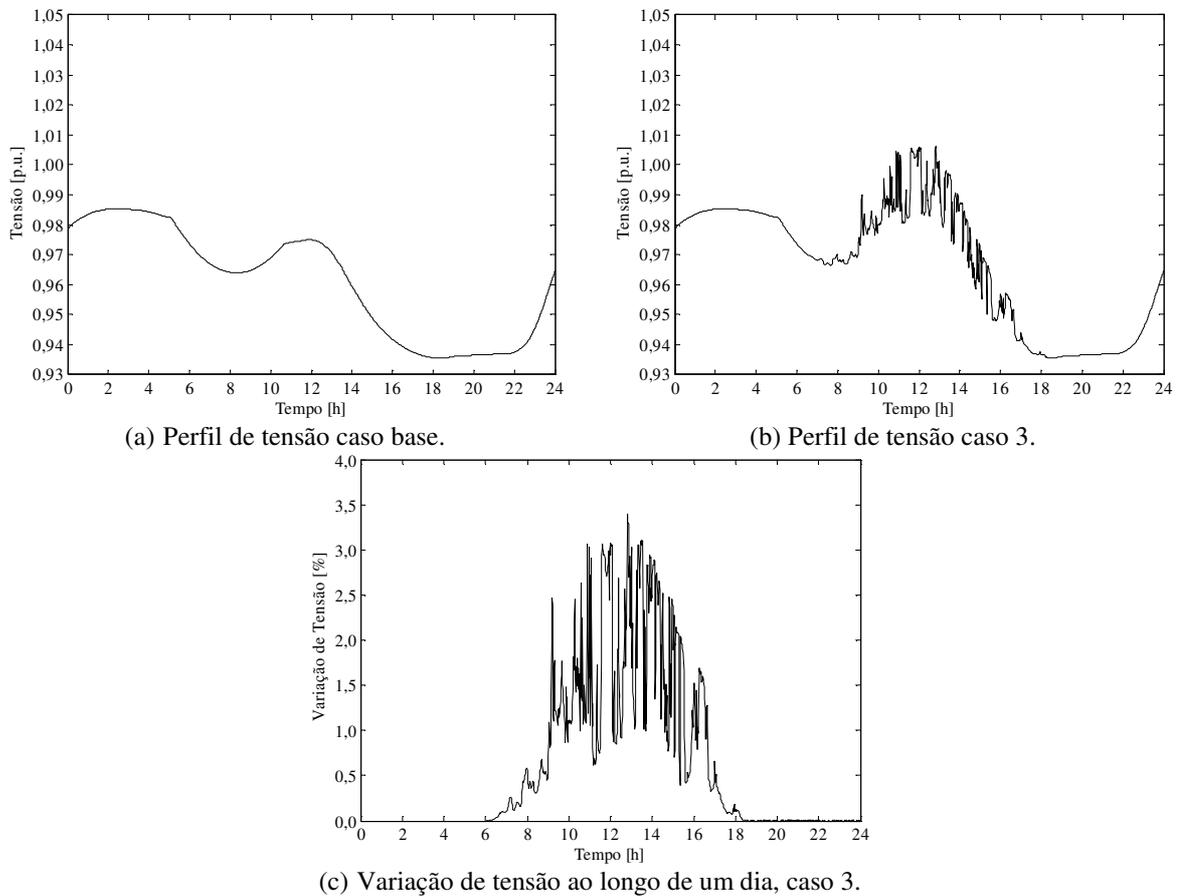


Figura 5.6 – Perfil e variação de tensão, dados Brasil, sistema de média tensão.

A Figura 5.7 apresenta a variação de tensão ao longo de um dia, considerando a barra que registrou a menor tensão na rede durante todo o dia, quando é utilizado o perfil de geração FV correspondente ao grupo de dados do Brasil. O sistema pode ser considerado balanceado, logo a magnitude de tensão nas três fases é idêntica, sendo mostrada apenas uma delas.

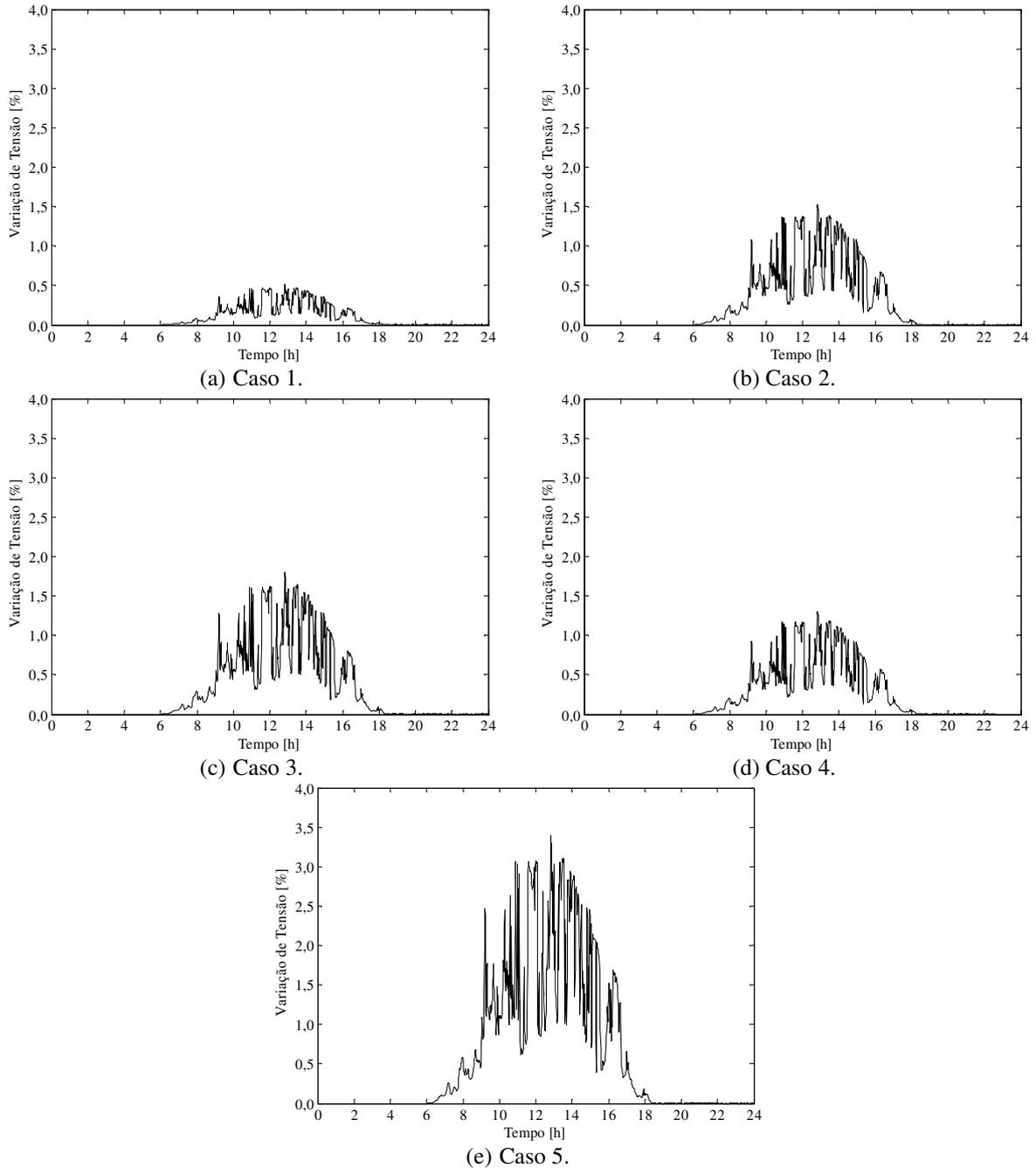


Figura 5.7 – Variação de tensão para todos os casos simulados, dados Brasil, sistema de média tensão.

Resultados semelhantes aos apresentados na Figura 5.7 são obtidos tanto para o grupo de dados do NREL, quanto para o grupo de dados do Canadá e são apresentados no Apêndice A.

Comparando a Figura 5.5 (b) com a Figura 5.7 é possível observar que as variações na tensão estão diretamente relacionadas com as variações da geração FV. Dentre os 4 casos simulados com a mesma penetração (casos 1 a 4), o caso 3 apresenta as maiores variações de tensão, para todos os grupos de dados, indicando que a instalação de geração FV afastada da subestação, ou seja, instalada em um ponto com menor nível de curto-circuito, contribui para o

aumento das flutuações de tensão devido aos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs. A instalação distribuída (em mais de uma barra) da geração FV (caso 4) contribui para diminuir estes impactos, já que é possível obter o mesmo nível de penetração (20%) com variações mais suaves que as apresentadas nos casos 2 e 3. O caso 5, que possui o maior nível de penetração dentre os casos simulados e tem a geração FV concentrada na barra com menor nível de curto-circuito, é o que apresenta as maiores variações, indicando que a severidade das variações está relacionada com a potência dos geradores FVs instalados na rede. As variações na tensão seguem os respectivos perfis de geração, de modo que a quantidade de variações na tensão depende do perfil de geração FV.

5.3.2 Quantificação das Variações na Tensão

Nesta seção é apresentada uma quantificação das variações na tensão da rede, que ocorrem devido à passagem de nuvens sobre os painéis FVs instalados no sistema-teste de média tensão. As variações são analisadas apresentando-se a maior tensão registrada na rede dentro de um intervalo de tempo definido e o número de variações acima de um determinado limiar, ocorridas dentro do mesmo intervalo de tempo.

5.3.2.1 Variação máxima

É considerada sempre a maior variação de tensão registrada, dentro do intervalo de tempo, em toda a rede, independentemente da barra na qual ela ocorra. Esta abordagem garante que, dentro do intervalo de tempo, todas as demais variações ocorridas na rede serão menores que o valor obtido.

A Figura 5.8 apresenta a maior variação na tensão, registrada em um intervalo de 15 minutos, para cada um dos casos simulados com o conjunto de dados do Brasil.

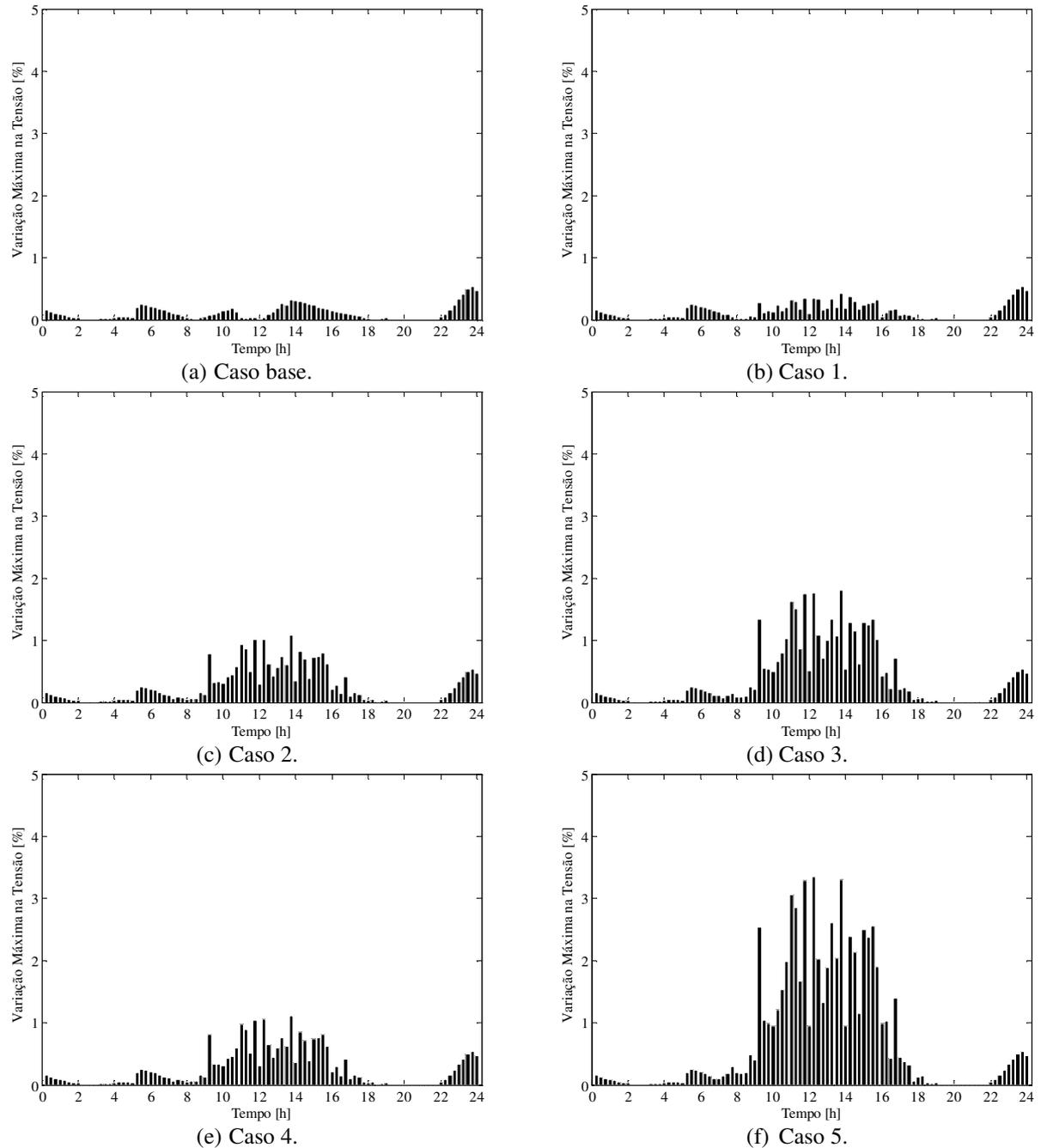


Figura 5.8 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Brasil, sistema de média tensão.

A maior variação registrada durante todo o dia, para cada um dos casos e cada um dos grupos de dados é apresentada na Tabela 5.1. Os resultados detalhados das maiores variações de tensão registradas no sistema a cada 15 minutos considerando os dados do NREL e do Canadá são apresentados no Apêndice A.

Tabela 5.1 – Variação máxima de tensão no sistema-teste de média tensão registrada ao longo de um dia.

| | Brasil | NREL | Canadá |
|------------------|---------------|-------------|---------------|
| Caso Base | 0,53% | 0,53% | 0,53% |
| Caso 1 | 0,53% | 0,53% | 0,63% |
| Caso 2 | 1,08% | 1,06% | 1,52% |
| Caso 3 | 1,80% | 1,84% | 2,46% |
| Caso 4 | 1,12% | 1,10% | 1,56% |
| Caso 5 | 3,34% | 3,49% | 4,51% |

A análise da maior variação de tensão registrada evidencia a discrepância entre as localidades nas quais os dados foram colhidos. Considerando-se os três grupos de dados analisados, as maiores variações ocorrem para o caso 5 (nível de penetração de 40%). No Brasil estas variações estão em torno de 3,5%, assim como para os dados do NREL, enquanto para os dados canadenses elas chegam a 4,5%. Esta análise é conservadora, pois, considerando o atual cenário brasileiro, seu nível de penetração é alto. O caso 4 permite uma análise mais próxima da realidade brasileira, pois seu nível de penetração é menor e a geração é instalada em mais de uma barra.

Comparando-se os resultados obtidos no caso 4 para os três grupos de dados é possível observar que as maiores variações para os dados do NREL e do Brasil estão em torno de 1,1%, enquanto os dados do Canadá registram variações de 1,5%. A diferença entre os grupos de dados é menos acentuada quando o nível de penetração é menor, porém ainda é possível observá-la.

É importante ressaltar que todos os casos apresentados podem ser considerados conservativos pois o fator de desagregação da potência gerada pelos painéis, resultante da dispersão geográfica, não é considerado nestes estudos. Embora o caso 4 considere que a geração está instalada em mais de uma barra, é atribuído o mesmo perfil de geração para todos os painéis, logo o fator de desagregação não é considerado.

Nos resultados dos três grupos de dados é possível observar a relação entre a severidade das variações e a localização da geração FV. Quanto mais afastada da subestação está a geração FV, maiores as variações registradas na tensão. A instalação da geração de forma distribuída (em mais de uma barra), apresenta variações próximas à instalação da geração FV na barra localizada no meio do alimentador. Além de depender da localização da geração FV e do perfil de geração adotado, quanto maior a penetração, maiores as variações registradas.

5.3.2.2 Número de variações

Outra maneira de se quantificar as variações de tensão causadas pela intermitência da geração FV é analisar o número de variações acima de determinado limiar em um dado intervalo de tempo. Para os três grupos de dados (Brasil, NREL e Canadá), é analisado o número de variações de tensão acima de 0,5% dentro de um intervalo de 15 minutos, registradas na barra na qual a geração FV está instalada, diferentemente do que ocorre com a maior variação de tensão na rede, que considera a variação de cada barra do sistema para selecionar a de maior valor. Para o caso 4, no qual a geração é instalada em três barras, o gráfico apresenta o número de variações acima de 0,5% para a barra que possui geração FV instalada e o menor nível de curto-circuito (barra 16). São simulados os mesmos casos apresentados na Seção 5.2, porém os resultados referentes ao caso 1 não são apresentados, pois para os três conjuntos de dados este caso não apresentou variações acima de 0,5%.

O resultado destes estudos considerando-se o grupo de dados do Brasil é apresentado na Figura 5.9, os resultados para os demais grupos de dados são apresentados na Tabela 5.2 e encontrados em detalhe no Apêndice A. Em todas as figuras é apresentado apenas o número de variações acima de 0,5% que ocorrem devido à geração FV, sendo que, para o caso base e o caso 1 (2,95 MWp de geração FV instalada na barra 143 (próxima à subestação)) não se registraram variações acima de 0,5%.

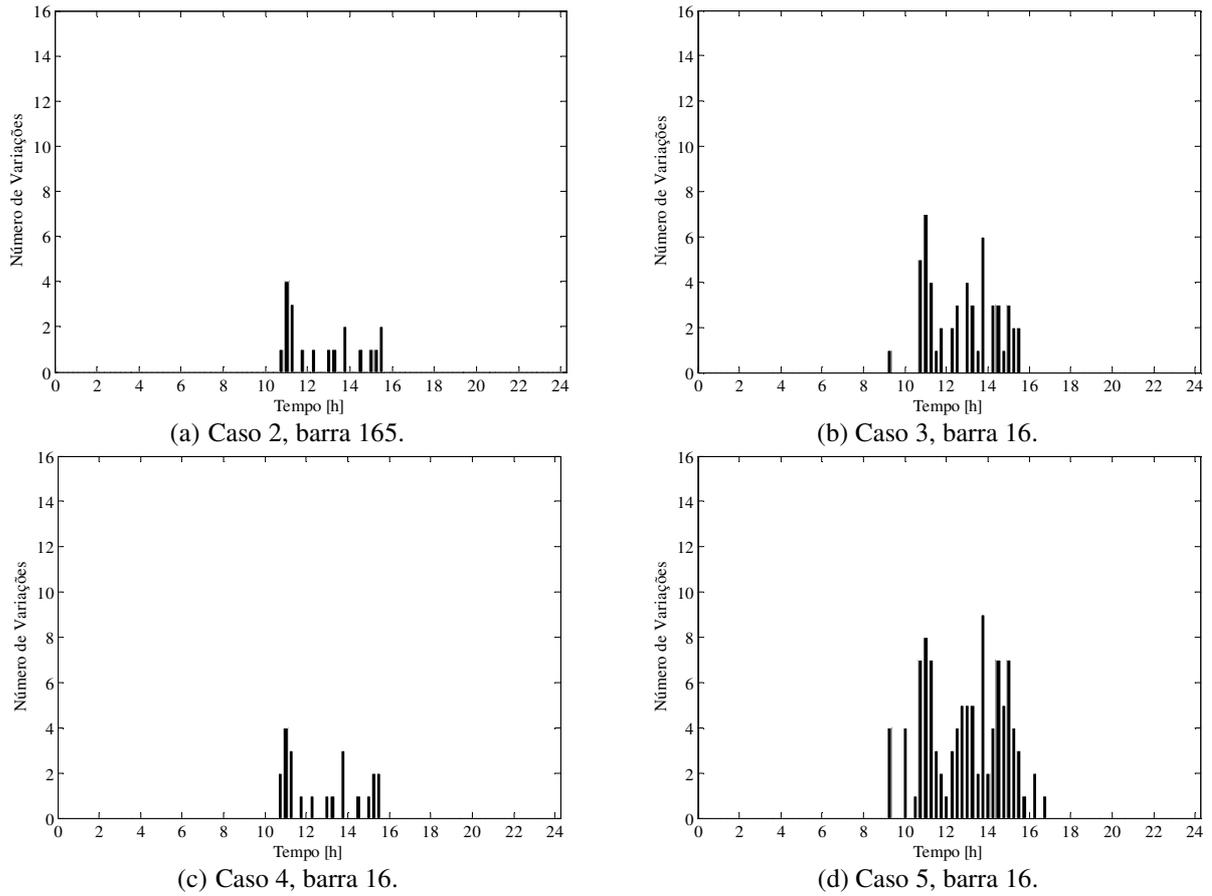


Figura 5.9 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Brasil, sistema de média tensão.

A Tabela 5.2 apresenta o número total de variações na tensão acima de 0,5% para cada um dos casos e para cada conjunto de dados. Embora a mesma evidencie a dependência geográfica da potência de saída dos painéis FVs, é importante ressaltar que os resultados obtidos para o grupo de dados do Canadá não podem ser diretamente comparados com os demais grupos pois este grupo de dados possui resolução diferente (30 segundos), afetando a contagem.

Tabela 5.2 – Número de variações de tensão acima de 0,5% durante um dia, sistema de média tensão.

| Conjunto de dados | Resolução (s) | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|-------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Brasil | 60 | 0 | 19 | 53 | 22 | 106 |
| NREL | 60 | 0 | 16 | 46 | 16 | 91 |
| Canadá | 30 | 0 | 70 | 118 | 74 | 166 |

De acordo com os valores da Tabela 5.2, observa-se que a instalação da geração FV próxima à subestação (caso 1) não resulta em um aumento no número de variações acima de 0,5% para nenhum dos grupos de dados utilizados. Para os demais casos, os aumentos mais significativos são registrados para o caso 5, que apresenta uma maior quantidade de geração FV instalada (nível de penetração de 40%) em uma barra com baixo nível de curto-circuito (barra 16). O caso 4, no qual a geração FV é instalada em três barras, apresenta um aumento no número de variações semelhante ao registrado para o caso 2, o qual possui o mesmo nível de

penetração, porém a mesma é instalada somente em uma barra localizada no meio do alimentador.

Exceto para o caso 1, os conjuntos de dados do Brasil e do NREL apresentam aumentos semelhantes no número de variações de tensão acima de 0,5%. O grupo de dados do Canadá registra aumentos mais significativos, porém não é possível afirmar que este aumento está relacionado apenas com as características climáticas, visto que a base de dados canadense possui resolução de 30 segundos, enquanto nas demais esta resolução é de 1 minuto, o que afeta a contagem do número de variações.

5.4 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE BAIXA TENSÃO

Para analisar o impacto dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre sistemas solares FVs na magnitude da tensão de sistemas de baixa tensão foi utilizado o sistema-teste apresentado na Seção 4.3 cuja topologia é rerepresentada na Figura 5.10. Assim como para o sistema-teste de média tensão, foram realizados fluxos de carga série-temporais para obter o perfil de tensão das barras do sistema-teste ao longo de um dia. Os resultados apresentados referem-se aos seguintes casos:

- Caso Base: Não há geração FV instalada na rede. Todas as cargas são atendidas pelo transformador. Nível de penetração de 0%.
- Caso 1: 3,7 kWp de geração FV instalada na barra 51 (próxima ao transformador). Nível de penetração de ~11%.
- Caso 2: 3,7 kWp de geração FV instalada na barra 36 (localizada no meio da rede). Nível de penetração de ~11%.
- Caso 3: 3,7 kWp de geração FV instalada na barra 15 (localizada no final da rede). Nível de penetração de ~11%.
- Caso 4: 3,7 kWp de geração FV instalada nas barras 51, 36 e 15 (1,2 kWp em cada barra). Nível de penetração de ~11%.
- Caso 5: 7,4 kWp de geração FV instalada na barra 15 (localizada no final da rede). Nível de penetração de ~21%.

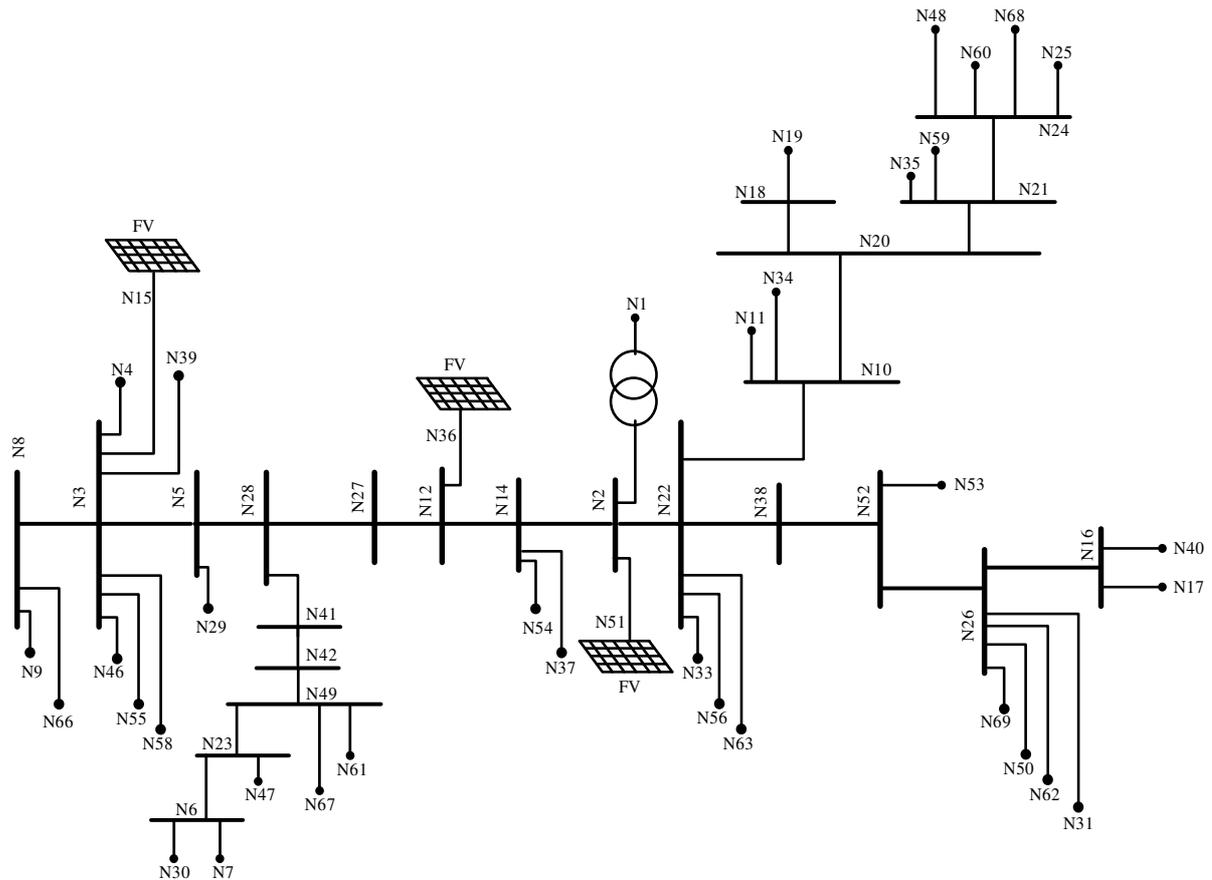


Figura 5.10 – Esquemático do sistema-teste de distribuição de baixa tensão, com a localização dos geradores FVs.

Embora a barra 15 não seja a barra com menor nível de curto-circuito da rede ela foi escolhida pois, considerando a estrutura da rede, ela permite que a geração FV seja instalada sempre entre as fases A e C, para todos os casos. Além de facilitar comparações, a instalação da geração FV sempre entre as mesmas fases representa o pior caso para o caso 4 (toda a geração FV instalada nas mesmas fases).

Como a geração FV instalada na rede é bifásica e está sempre instalada entre as mesmas duas fases (A e C), a tensão nestas fases apresenta um aumento, enquanto a tensão na fase que não possui geração FV (fase B) apresentará uma diminuição. Nos casos simulados a diminuição na tensão da fase B é menor que o aumento na tensão das fases A e C. O valor para o nível de penetração utilizado foi escolhido de maneira que os limites de tensão adequada de 1,05 e 0,92 p.u. apresentados na Tabela 4.1 não fossem ultrapassados para nenhum dos casos estudados.

Todos os casos foram simulados para os três grupos de dados (NREL, Brasil e Canadá), utilizando como saída de geração FV os perfis apresentados na Figura 3.6. O caso base é utilizado para facilitar as comparações, permitindo que as variações na tensão causadas pelas variações na carga sejam eliminadas da tensão final para os casos com geração FV. Os casos 1, 2 e

3 relacionam as variações da tensão devido à passagem de nuvens sobre os sistemas FVs com a localização desta geração na rede e o caso 4 trata da influência da dispersão da geração FV na rede.

5.5 RESULTADOS DOS ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE BAIXA TENSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nas simulações com o sistema-teste de baixa tensão. Primeiramente, apresenta-se o comportamento da tensão da rede na presença de geração FV e, em seguida, as variações de tensão são quantificadas. Assim como na seção anterior, apenas os resultados obtidos com os dados brasileiros são apresentados de forma detalhada. Os resultados para os demais grupos de dados são detalhados no Apêndice A.

5.5.1 Análise da Tensão

A Figura 5.11 apresenta o perfil de tensão da barra 9, fases B e C, ao longo de um dia. Os gráficos apresentados correspondem ao caso base e ao caso 3, para os dados do Brasil.

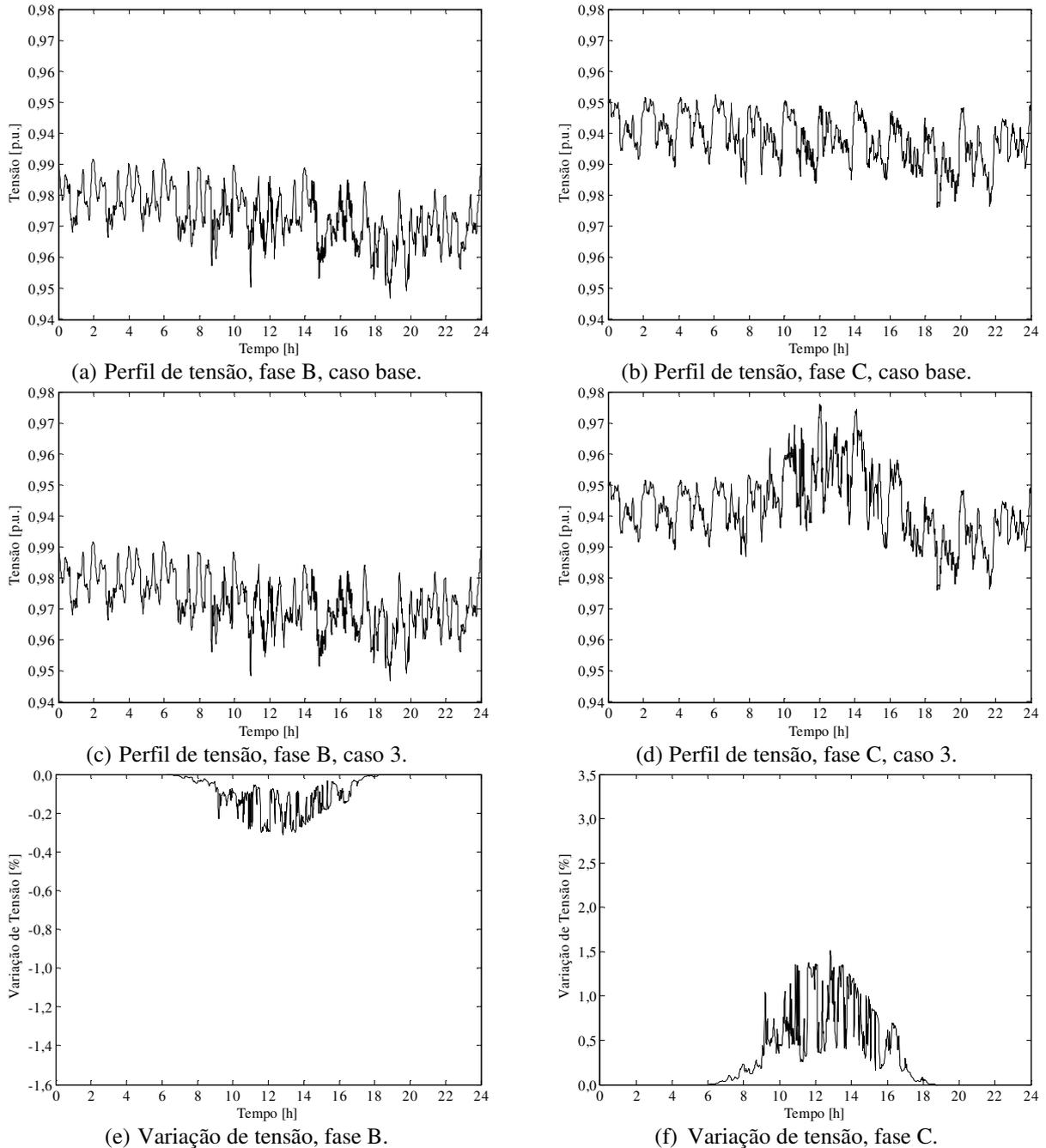


Figura 5.11 – Perfil e variação de tensão, dados Brasil, sistema de baixa tensão.

Os perfis de tensão da barra 9 foram escolhidos para análise por se tratar de uma barra com baixo nível de curto-circuito, de modo que sua tensão está sujeita a grandes variações. Para realizar as análises propostas é necessário observar o perfil de tensão para a mesma barra, em todos os casos.

É importante notar que a inclusão da geração FV causou um afundamento na tensão da fase B da barra 9 e um aumento na tensão da fase C. Isto ocorre porque a geração é bifásica, as fases A e C (nas quais a geração está conectada) sofrem um aumento na tensão quando há

geração FV, enquanto a fase B (que não possui geração conectada) sofre uma diminuição no perfil de tensão. Os próximos resultados apresentados são referentes à tensão na barra 9, fase C, pois as variações de tensão nesta fase foram mais significativas que na fase B.

As variações da carga provocam flutuações na tensão, assim como a geração FV. Para que seja possível analisar apenas as variações causadas pela geração FV não é apresentado o perfil de tensão da barra 9, fase C para cada caso, mas sim a diferença entre a tensão do caso com geração FV e o caso base, desta forma as variações causadas pela carga são desconsideradas.

A Figura 5.12 apresenta a diferença de tensão entre o caso base e cada um dos casos em estudo (descritos na Seção 5.4) para o conjunto de dados do Brasil. Resultados semelhantes foram obtidos para os demais grupos de dados e são apresentados no Apêndice A.

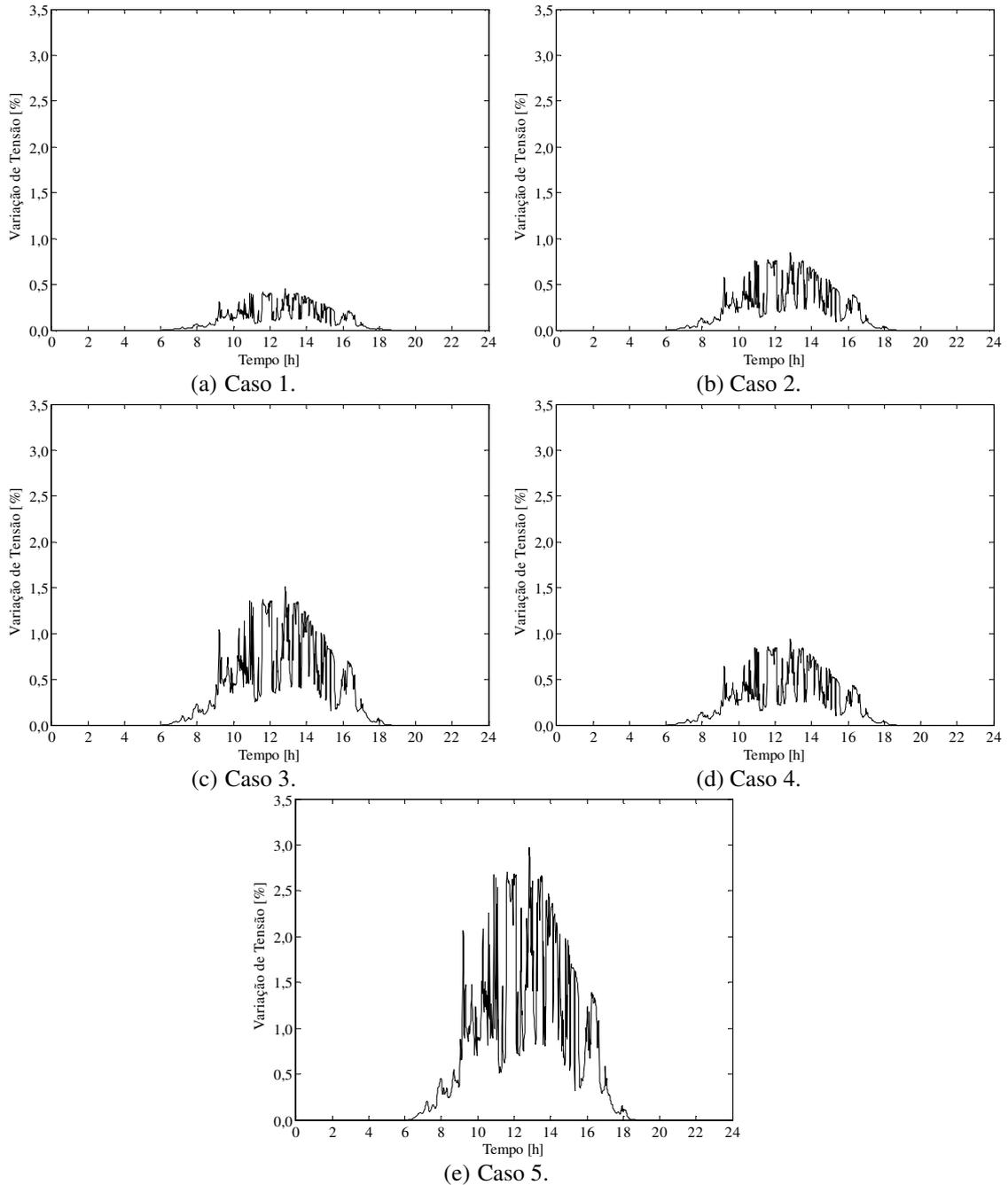


Figura 5.12 – Diferença entre os perfis de tensão de cada caso e o caso base, dados Brasil, sistema de baixa tensão.

Assim como nas simulações realizadas no sistema-teste de média tensão, as flutuações na tensão são maiores quanto mais afastada do transformador é a instalação da geração FV e quanto maior a penetração. Para os três grupos de dados as maiores variações são registradas, considerando-se os casos com a mesma penetração, quando a geração FV é instalada concentrada (em uma única barra) em barras mais afastadas do transformador (caso 3, barra com baixo nível de curto-circuito). A instalação da geração FV de maneira distribuída (caso 4, geração instalada em 3 barras) causa variações menores na tensão.

Nos casos estudados, as variações do caso distribuído (caso 4) são similares às variações registradas para a geração FV concentrada em uma barra no meio da rede (caso 2). No caso distribuído as variações podem ser suavizadas com o aumento das unidades de geração FV e de seu espalhamento geográfico. Novamente é possível observar que as variações possuem o mesmo perfil que o utilizado na geração FV e apresentado na Figura 3.6.

5.5.2 Quantificação das Variações na Tensão

Nesta seção é apresentada uma quantificação das variações na tensão da rede, que ocorrem devido à passagem de nuvens sobre os sistemas FVs instalados no sistema-teste de baixa tensão. As variações são analisadas apresentando-se a maior tensão registrada na rede dentro de um intervalo de tempo definido e o número de variações acima de um determinado limiar, ocorridas dentro do mesmo intervalo de tempo.

5.5.2.1 Variação máxima

Nestes resultados, considera-se sempre a maior variação de tensão registrada em cada barra do sistema sob estudo, dentro do intervalo de tempo analisado (15 minutos).

A Figura 5.13 apresenta a maior variação na tensão, registrada em um intervalo de 15 minutos, para cada um dos casos simulados com o conjunto de dados do Brasil. Estas variações podem ter duração maior que a resolução dos dados, pois na ocorrência de variações consecutivas com mesmo sinal (positivo ou negativo), é contabilizada a variação total (soma das variações ponto a ponto). Os resultados para os grupos de dados do NREL e do Canadá são apresentados em detalhe no Apêndice A e resumidamente na Tabela 5.3.

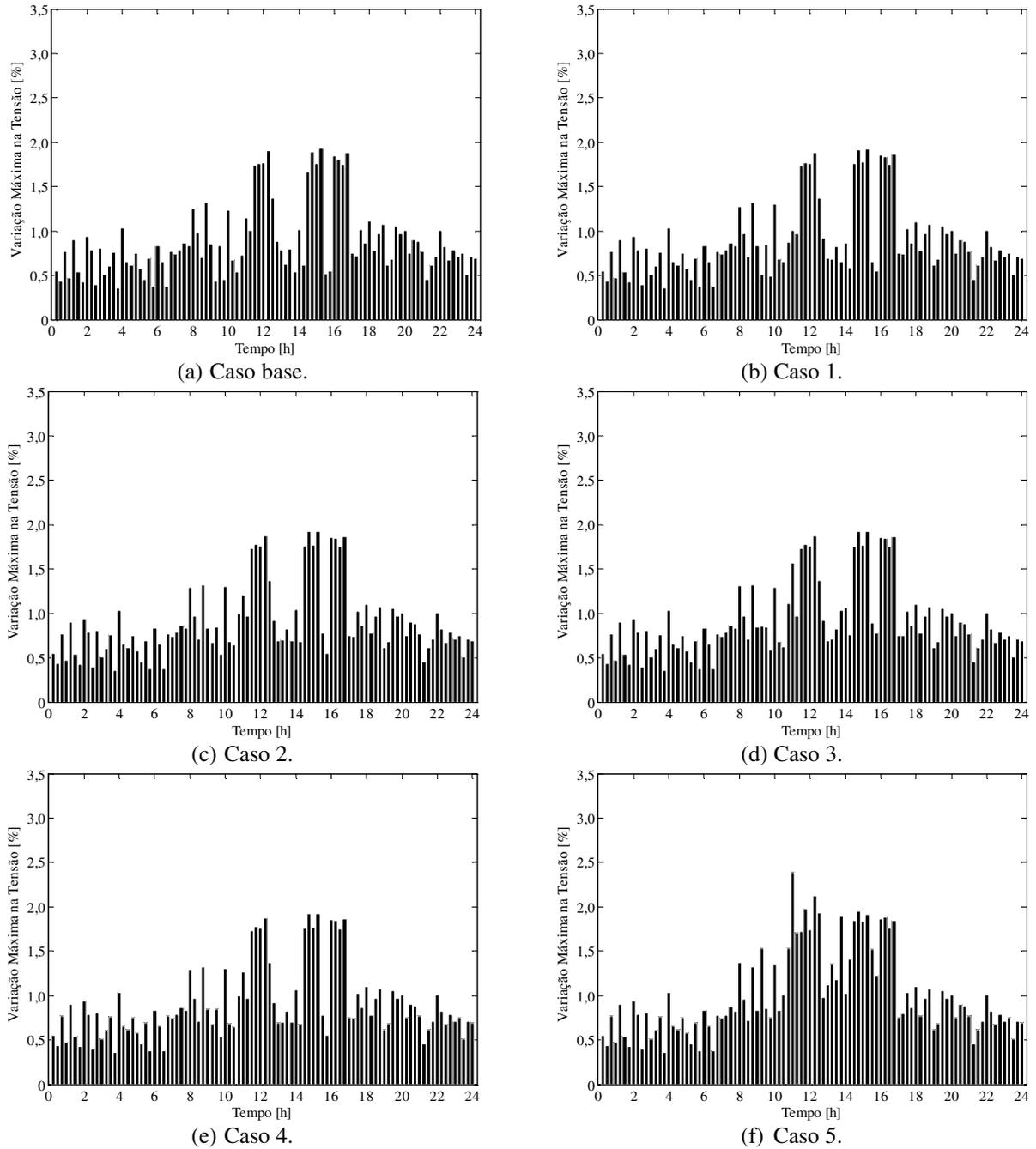


Figura 5.13 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Brasil, sistema de baixa tensão.

Tabela 5.3 – Variação máxima de tensão no sistema-teste de baixa tensão registrada ao longo de um dia.

| | Brasil | NREL | Canadá |
|------------------|---------------|-------------|---------------|
| Caso Base | 1,93% | 1,93% | 2,03% |
| Caso 1 | 1,92% | 1,93% | 2,09% |
| Caso 2 | 1,92% | 1,93% | 2,09% |
| Caso 3 | 1,93% | 1,93% | 2,08% |
| Caso 4 | 1,92% | 1,93% | 2,09% |
| Caso 5 | 2,39% | 2,19% | 2,89% |

A instalação de geração FV na rede praticamente não altera a máxima variação registrada no sistema-teste, considerando os casos de 1 a 4 (20% de nível de penetração), para nenhum dos grupos de dados analisados. Aumentos mais significativos são perceptíveis com maiores penetrações, como no caso 5. Considerando-se o caso base e o caso 5, as maiores variações passam de 1,9% para 2,4% para os dados do Brasil, de 1,9% para 2,2% para os dados do NREL e de 2% para 2,9% para os dados do Canadá. As variações na tensão também são influenciadas pela característica climática do local no qual a geração está instalada. Para os dados do Brasil e do NREL as maiores variações registradas são menores que 2,5% (caso 5), enquanto para os dados canadenses, registraram-se variações próximas a 3% (também considerando o caso 5).

5.5.2.2 Número de variações

Para todos os casos em estudo e os três grupos de dados (Brasil, NREL e Canadá), foi analisado o número de variações de tensão acima de 0,5% dentro de um intervalo de 15 minutos. As variações de tensão foram contabilizadas na fase C para a barra na qual está instalada a geração FV, ou seja, no caso 2 a barra 36, e nos casos 3, 4 e 5 a barra 15. Para o caso 4 foi escolhida, dentre as barras onde há geração FV instalada, a barra com o menor nível de curto-circuito. Em cada intervalo de tempo o número máximo de variações acima de 0,5% é de 15 para o grupo de dados do NREL e do Brasil e de 30 para o grupo do Canadá, totalizando, no máximo, 1440 e 2880 variações ao longo de um dia, respectivamente. A variação é considerada como a diferença de tensão entre dois instantes de tempo consecutivos, sendo considerado o módulo destas variações para as análises apresentadas.

O resultado para os dados do Brasil é apresentado na Figura 5.14, os resultados detalhados para os demais grupos de dados são apresentados no Apêndice A. Em todas as figuras é apresentado apenas o número de variações acima de 0,5% que ocorrem devido à geração FV, o número destas alterações que ocorrem normalmente na rede (sem geração FV) foi descontado. Não são mostrados resultados para o caso 1 pois não foram registradas variações acima de 0,5% para este caso.

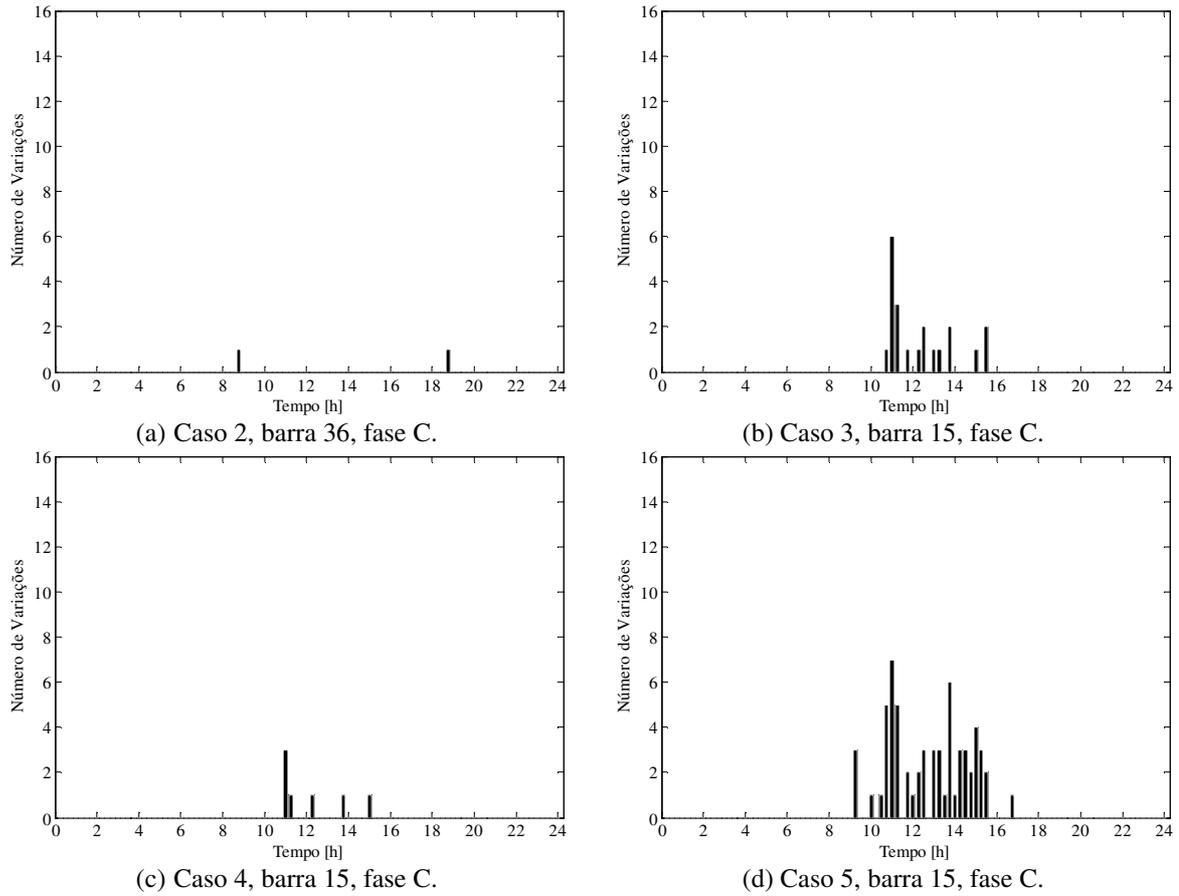


Figura 5.14 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Brasil, sistema de baixa tensão.

A Tabela 5.4 apresenta o número total de variações na tensão acima de 0,5% para cada um dos casos e para cada conjunto de dados. Embora ela evidencie a dependência geográfica da potência de saída dos painéis FVs. Ressalta-se que os resultados obtidos para o grupo de dados do Canadá não podem ser diretamente comparados com os demais grupos pois este grupo de dados possui resolução diferente (30 segundos), afetando a contagem. A análise da Tabela 5.4 permite chegar às mesmas conclusões que a análise da Tabela 5.2, apresentadas na Seção 5.3.2.2.

Tabela 5.4 – Número de variações de tensão acima de 0,5% durante um dia, sistema de baixa tensão.

| Conjunto de dados | Resolução (s) | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|-------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dados Brasil | 60 | 0 | 2 | 21 | 7 | 62 |
| Dados NREL | 60 | 0 | 2 | 18 | 2 | 52 |
| Dados Canadá | 30 | 0 | 11 | 68 | 33 | 128 |

5.6 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados estudos que evidenciam o impacto na magnitude da tensão dos sistemas-teste de média e de baixa tensão causados pela passagem de nuvens sobre

painéis FVs instalados nestes sistemas. Para os dois sistemas é possível observar que a magnitude da tensão é afetada pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs. Este impacto na tensão acentua-se conforme aumenta-se o nível de penetração da geração FV no sistema e ele também é dependente do local no qual a geração é instalada. Quanto menor o nível de curto-circuito da barra na qual a geração é instalada, maior o impacto que ela causará no sistema. Outro aspecto que influencia na severidade e na quantidade de variações registradas é a concentração das instalações FVs. Quando a geração FV está concentrada em uma única barra, os efeitos são mais severos do que quando a mesma quantidade de geração é distribuída em um maior número de barras. Estas conclusões podem ser observadas tanto pelo perfil de tensão de uma determinada barra da rede, quanto pelos índices de quantificação para as variações de tensão propostos neste trabalho.

6 ESTUDOS DOS IMPACTOS DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FVS NA ATUAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO

O regulador de tensão é um equipamento tradicionalmente presente em redes de distribuição com o objetivo de controlar a tensão em determinados pontos do alimentador. O seu uso é disseminado nas subestações e no meio de alimentadores longos, como é o caso de alimentadores rurais. Estes equipamentos são projetados para ajustar gradualmente a tensão da rede, acompanhando a variação da carga ao longo de um dia. Em sistemas modernos de distribuição de energia elétrica que possuem elevada penetração de fontes intermitentes, deve-se reavaliar a necessidade de instalação e os ajustes de parâmetros praticados nestes equipamentos. Isto porque, dependendo da duração e frequência das variações de tensão, a atuação do regulador pode ser ineficaz e excessiva, resultando no aumento da necessidade de realização de manutenção do equipamento e diminuindo sua vida útil [26]. Elevados níveis de penetração de geração FV combinados a variações bruscas na irradiação podem resultar no aumento indevido do número de operações destes equipamentos.

A Tabela 6.1 reproduz parcialmente os resultados de simulação obtidos em [27] e mostra o aumento no número de alterações de *tap* de dois reguladores instalados em uma rede de distribuição com carga total de 2,81 MVA, quando 1 MW de geração FV (~35% de nível de penetração) é instalado em uma única barra. Estes reguladores possuem atuação independente por fase, portanto, cada *tap* do regulador 1 é identificado como 1A, 1B e 1C e cada *tap* do regulador 2 é identificado como 2A, 2B e 2C.

Tabela 6.1 – Numero de alterações de *tap*, por regulador de tensão, ao longo de 2010 (carga total de 2,813 MVA). Extraído de [27].

| Regulador | Sistema sem geração FV | Sistema com 1 MW de geração FV | Aumento relativo* (%) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1A | 3.009 | 10.178 | 238,3 |
| 1B | 1.499 | 7.620 | 408,3 |
| 1C | 1.719 | 8.974 | 422,0 |
| 2A | 2.978 | 17.381 | 483,6 |
| 2B | 3.009 | 15.687 | 421,3 |
| 2C | 2.907 | 17.110 | 488,6 |
| Total | 15.121 | 76.950 | 408,9 |

*Razão entre a diferença no número de alterações de *tap*, com e sem geração FV, e o número de alterações sem geração FV.

Em [28] o sistema-teste do IEEE de 34 barras é utilizado para avaliar o aumento do número de mudanças de *tap* em reguladores. O perfil de carga utilizado corresponde ao obtido no transformador de uma subestação que atende basicamente cargas residenciais. No perfil de geração FV são utilizados dados reais coletados de uma planta de 6,4 kW instalada em um

telhado. A geração FV foi instalada em três diferentes barras do sistema, uma próxima à subestação (barra 812), uma no meio do alimentador (barra 828) e uma ao final do alimentador (barra 840). O sistema possui 2 reguladores de tensão, um instalado entre as barras 814 e 850 e outro entre as barras 832 e 852. São mantidos os parâmetros dos reguladores de tensão fornecidos como dados do sistema-teste. A Tabela 6.2 reproduz os resultados obtidos em [28], apresentando o número de alterações de *tap*, por fase, para cada regulador.

Tabela 6.2 – Número de alterações de *tap* por regulador, por fase. Extraído de [28].

| Localização do gerador FV | Potência do gerador FV (kWp) | Número total de alterações de <i>tap</i> (diárias) | | | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1A | 1B | 1C | 2A | 2B | 2C |
| Sem gerador FV | 0 | 4 | 1 | 2 | 6 | 6 | 4 |
| Barra 812 (início) | 750 | 26 | 3 | 14 | 43 | 12 | 28 |
| | 1.000 | 46 | 19 | 38 | 70 | 41 | 59 |
| Barra 828 (meio) | 750 | 59 | 45 | 63 | 93 | 68 | 84 |
| | 1.000 | 96 | 71 | 86 | 131 | 105 | 114 |
| Barra 840 (fim) | 750 | 76 | 45 | 60 | 167 | 140 | 150 |
| | 1.000 | 106 | 95 | 102 | 205 | 191 | 183 |

Ambas as referências citadas acima, [27] e [28], utilizam o sistema IEEE 34 barras e apenas um conjunto de dados/curvas de geração. A Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 mostram um aumento significativo no número de alterações de *tap* dos reguladores de tensão devido à presença da geração FV. De acordo com a Tabela 6.2, observa-se que este aumento é mais acentuado quanto maior a quantidade de geração FV presente na rede e quanto menor o nível de curto-circuito da barra na qual ela é instalada.

Como forma de quantificar e analisar os possíveis impactos da intermitência da geração FV causada pela passagem de nuvens sobre painéis FVs em reguladores de tensão de alimentadores reais e utilizando dados de geração FV de diferentes conjuntos de medição, neste capítulo são apresentadas simulações computacionais que visam verificar este efeito. Além das simulações computacionais, um método analítico para fazer uma estimativa preliminar do aumento das atuações dos reguladores é proposto. Esta estimativa não é precisa, porém pode ser utilizada em uma primeira análise para verificar se a instalação de um determinado sistema FV pode ser prejudicial à prática de regulação de tensão existente em determinado alimentador.

6.1 ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ALTERAÇÕES DE *TAP* UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Nesta seção, o aumento no número de alterações de *tap* dos reguladores de tensão instalados no sistema-teste de média tensão descrito na Seção 4.2 é obtido realizando-se simulações computacionais. Nestas simulações, a carga original do sistema (16,39 MW) é considerada e o módulo da tensão na barra antes do equivalente é alterado para 1,02 p.u., de modo que a tensão permaneça dentro dos limites para a faixa de tensão adequada apresentados na Tabela 4.1. Um regulador é conectado entre a saída da subestação e a barra *Subreg* (Reg. Sub.) e um segundo regulador é conectado entre as barras 97 e 99 (Reg. Alim.). Ambos os reguladores são trifásicos, com os enrolamentos primário e secundário conectados em estrela. Os parâmetros utilizados para cada um dos reguladores são apresentados na Tabela 6.3 (mesmos que na Tabela 4.2).

Tabela 6.3 – Parâmetros dos reguladores de tensão.

| | <i>Vreg</i> (V) | Barra controlada | Atraso (s) | <i>band</i> (V) | <i>ptratio</i> | Enrolamento |
|-------------------------------------------|-----------------|------------------|------------|-----------------|----------------|-------------|
| Dados com resolução de 1 minuto | | | | | | |
| Reg. Sub. | 125 | Subreg | 120 | 2 | 120 | 2 |
| Reg. Alim. | 118 | 12 | 60 | 2 | 120 | 2 |
| Dados com resolução de 30 segundos | | | | | | |
| Reg. Sub. | 125 | Subreg | 60 | 2 | 120 | 2 |
| Reg. Alim. | 118 | 12 | 30 | 2 | 120 | 2 |

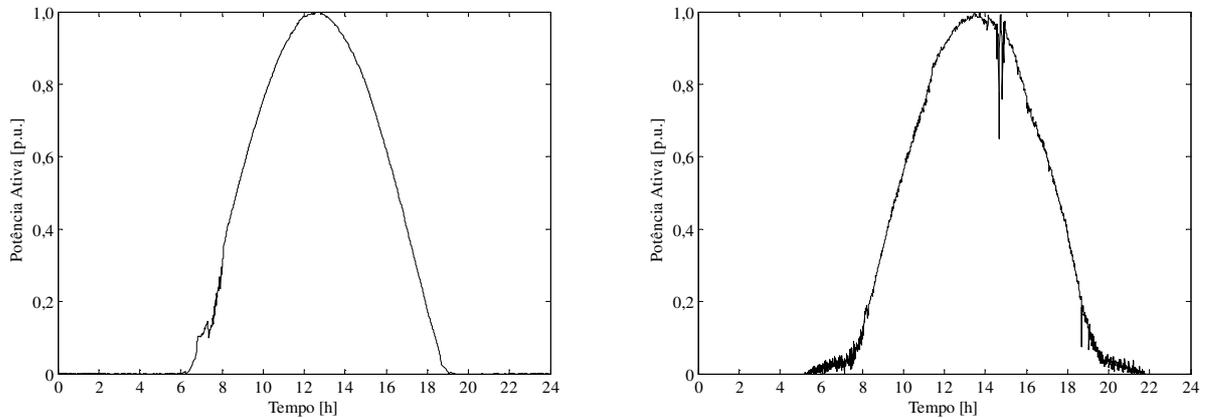
É desejado que o regulador tenha uma atuação local, atuando primeiro o regulador mais próximo ao ponto cuja tensão está fora dos limites. Tendo em vista este objetivo e o fato de que as simulações são realizadas a cada um minuto ou a cada 30 segundos, são escolhidos os tempos de atraso dos dois reguladores, sendo que estes tempos estão entre os valores utilizados em redes reais encontrados na literatura [29].

Para que apenas as mudanças de *tap* nos reguladores provocadas pela intermitência da geração FV possam ser identificadas, os seguintes casos são estudados para cada conjunto de dados:

- Caso 1 (caso base): É considerada a potência de saída dos painéis em um dia que não possui nuvens (dia limpo).
- Caso 2: É considerada a potência de saída dos painéis em um dia parcialmente nublado (dia representativo definido no Capítulo 3).

Em ambos os casos, para cada nível de penetração escolhido (20%, 40%, 60% e 80%) a geração FV é concentrada na barra 16 (pior caso encontrado nas simulações anteriores por ser o local de menor nível de curto-circuito entre os casos analisados no capítulo anterior).

Os perfis de geração FV para as simulações de dia parcialmente nublado são os mesmos dias representativos escolhidos anteriormente para cada grupo e apresentados na Figura 3.6. Devido à resolução dos dados optou-se por utilizar dois diferentes perfis de geração FV para o dia limpo (sem nuvens), sendo estes apresentados na Figura 6.1.



(a) Caso base: 1 minuto.

(b) Caso base: 30 segundos.

Figura 6.1 – Potência de saída da geração FV do caso 1 (dia limpo) para as duas resoluções.

6.1.1 Resultados dos Estudos Realizados para o Dia Típico

A Figura 6.2 apresenta o perfil de tensão para a barra com a menor tensão registrada no sistema durante o dia simulado, para cada um dos três conjuntos de medição. A Figura 6.3 apresenta a posição do *tap* para os dois reguladores (próximo da subestação e o outro ao longo do alimentador) durante um dia. Os resultados ilustrados na Figura 6.2 e na Figura 6.3 consideram um nível de penetração de 40% de geração FV.

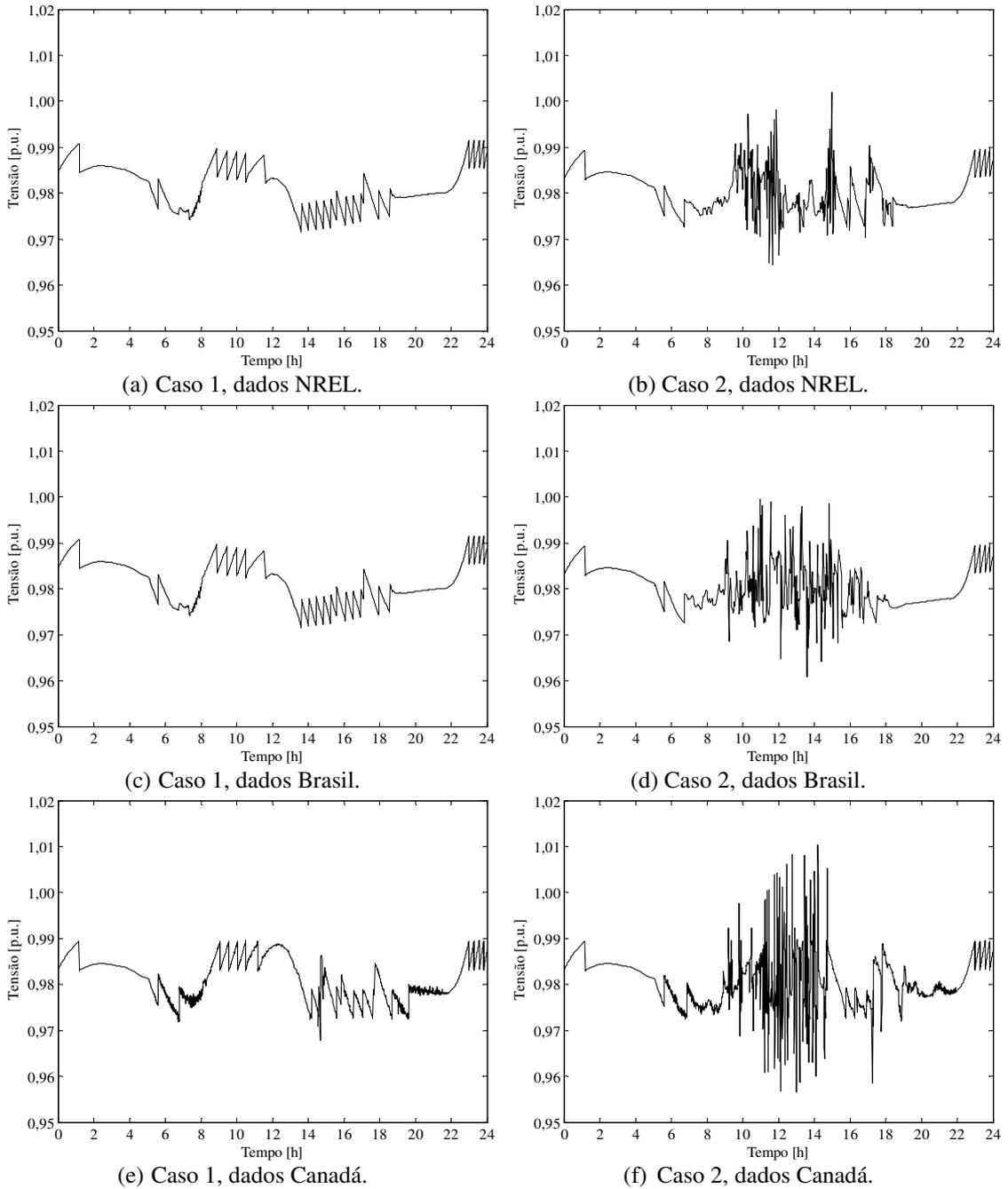
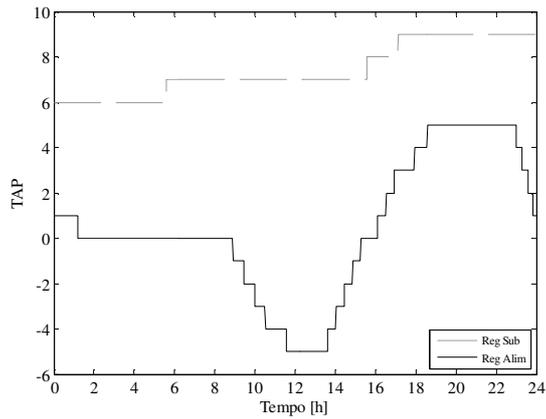
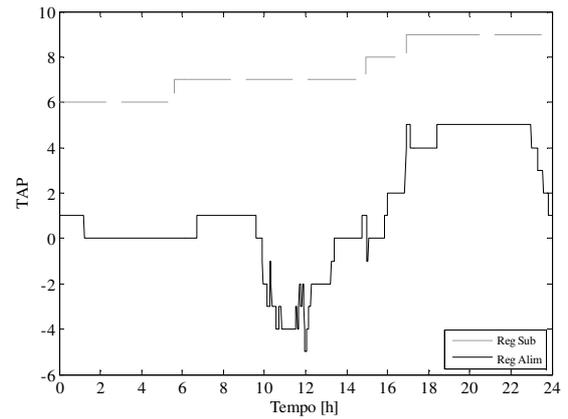


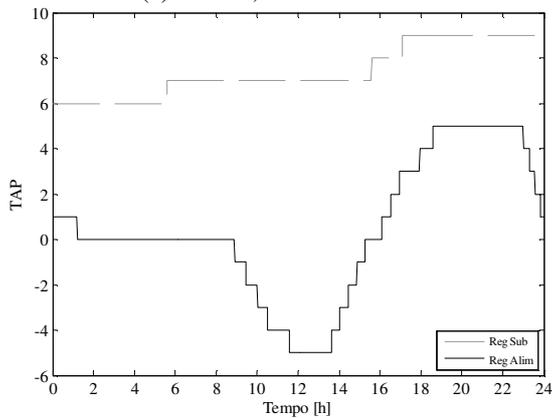
Figura 6.2 – Perfil de tensão com reguladores de tensão ativos, nível de penetração de 40%.



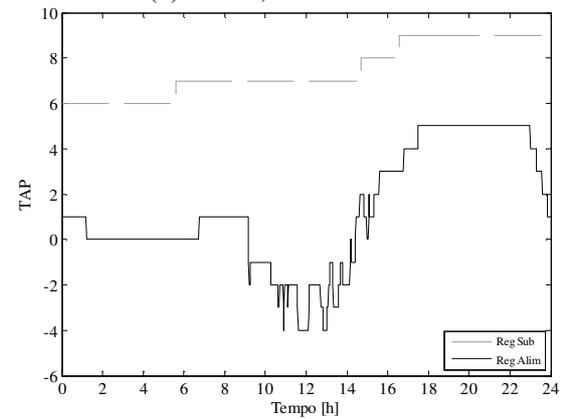
(a) Caso 1, dados NREL.



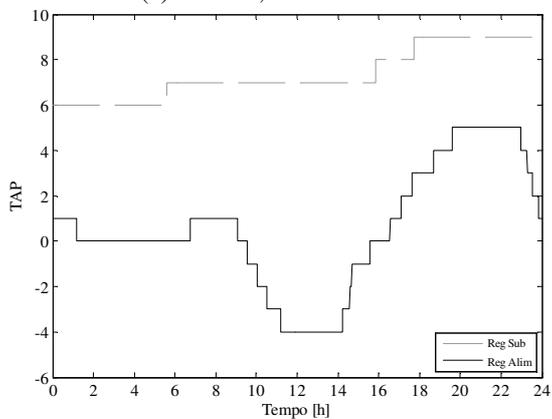
(b) Caso 2, dados NREL.



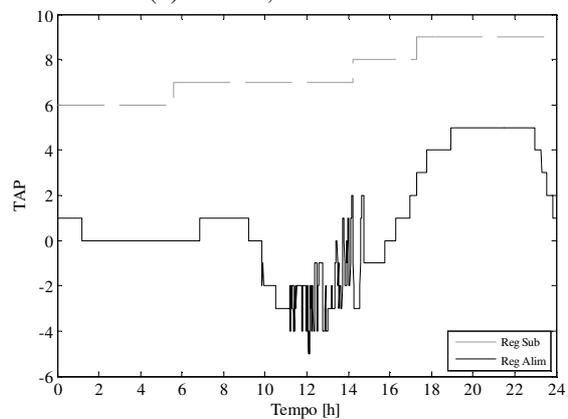
(c) Caso 1, dados Brasil.



(d) Caso 2, dados Brasil.



(e) Caso 1, dados Canadá.



(f) Caso 2, dados Canadá.

Figura 6.3 – Posição do tap de cada regulador ao longo de um dia, nível de penetração de 40%.

A Tabela 6.4 resume o número de variações de tap de cada um dos reguladores para os dois casos (dia limpo e dia parcialmente nublado), para diferentes níveis de penetração e para todos os grupos de dados utilizados neste trabalho. Na Tabela 6.5, encontra-se o valor do aumento relativo no número de atuações comparando-se ambos os casos, para o regulador instalado ao longo do alimentador (Reg. Alim). O regulador instalado próximo à subestação (Reg. Sub.) não é analisado pois não apresenta alterações significativas em seu número de atuações. O aumento relativo representa o quanto a mais o regulador opera devido somente aos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os sistemas FVs. Os dados canadenses não foram

simulados para nível de penetração de 80% pois neste caso a tensão viola os limites estabelecidos pela ANEEL, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 6.4 – Número de alterações de *tap*, por regulador, para diferentes penetrações.

| Nível de penetração | Caso | Número de alterações de <i>tap</i> por regulador | | | | | |
|---------------------|------|--------------------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | | Dados NREL | | Dados Brasil | | Dados Canadá | |
| | | Reg. Sub. | Reg. Alim. | Reg. Sub. | Reg. Alim. | Reg. Sub. | Reg. Alim. |
| 20% | 1 | 3 | 16 | 3 | 16 | 3 | 16 |
| | 2 | 3 | 22 | 3 | 18 | 3 | 46 |
| 40% | 1 | 3 | 20 | 3 | 20 | 3 | 20 |
| | 2 | 3 | 42 | 3 | 48 | 3 | 116 |
| 60% | 1 | 3 | 24 | 3 | 24 | 3 | 28 |
| | 2 | 3 | 60 | 3 | 78 | 3 | 168 |
| 80% | 1 | 5 | 28 | 5 | 28 | - | - |
| | 2 | 5 | 70 | 3 | 96 | - | - |

Tabela 6.5 – Aumento relativo do número de alterações de *tap* do regulador Reg. Alim. devido aos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs.

| Nível de penetração | Aumento Relativo (%) | | |
|---------------------|----------------------|--------------|--------------|
| | Dados NREL | Dados Brasil | Dados Canadá |
| 20% | 37,50 | 12,50 | 187,50 |
| 40% | 110,00 | 140,00 | 480,00 |
| 60% | 150,00 | 225,00 | 500,00 |
| 80% | 150,00 | 242,86 | - |

Enquanto no sistema-teste sem a presença de reguladores de tensão a maior penetração que pode ser atingida, sem que os limites de tensão sejam ultrapassados³, para os três grupos de dados é de cerca de 60%, para o grupo de dados do NREL e do Brasil, com a presença dos reguladores de tensão, esta quantidade aumenta para 80%.

A presença dos reguladores de tensão ajuda a suavizar a tensão, diminuindo as flutuações, como pode ser visto comparando-se a Figura 5.6 (b) e a Figura 6.2 (d). Enquanto na primeira a tensão apresenta variações entre 1,01p.u. e 0,94 p.u., na segunda estas variações estão entre 1,00 p.u. e 0,96 p.u.

A Tabela 6.4 e a Tabela 6.5 mostram que há um aumento significativo na quantidade de atuações dos reguladores de tensão devido aos transitórios causados pela passagem das nuvens sobre painéis FVs. Este aumento se torna mais significativo quanto maior o nível de penetração da geração FV, resultando em um custo extra para as concessionárias (associado com a manutenção destes equipamentos e com a diminuição de sua vida útil). Portanto, este aumento deve

³ Esta situação é observada para o valor de tensão controlada ajustado. A alteração deste valor pode resultar em diferentes condições de tensão.

ser evitado. Os fabricantes de reguladores de tensão recomendam a inspeção interna deste equipamento a cada 250.000 operações [30]. O aumento do número de comutações faz com que estas inspeções sejam mais frequentes, aumentando os custos de manutenção. A vida útil econômica de um regulador de tensão é estimada em 21 anos [31], sendo diretamente dependente da quantidade de atuações do mesmo.

É importante ressaltar que é esperado o registro de um maior número de atuações dos reguladores com o grupo de dados do Canadá pois, devido à resolução dos dados disponíveis e ao ajuste do tempo de atraso para este grupo de dados, o regulador tem a possibilidade de atuar 2880 vezes ao longo de um dia, enquanto para os outros grupos o número máximo de atuações é de 1440.

6.1.2 Resultados dos Estudos Realizados com Horizonte de um Ano

Foram realizadas simulações com nível de penetração variando de 20% a 80%, com a geração FV instalada na barra 16 (final do alimentador, pior caso). Nestas simulações é considerada a potência de saída obtida durante o ano de 2014, para o grupo de dados do NREL (único dos três grupos de dados que possui um ano completo de medições disponíveis).

A Tabela 6.6 apresenta o número total de variações de *tap* do regulador de tensão instalado ao longo do alimentador em um ano, considerando um dia limpo (Figura 6.1 (a)) e a geração FV do grupo de dados do NREL de 1º de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2014.

Tabela 6.6 – Número de alterações de *tap* durante um ano.

| Nível de Penetração | 20% | 40% | 60% | 80% |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|
| Dia Limpo | 5.840 | 7.300 | 8.760 | 10.220 |
| Dados NREL | 6.354 | 9.408 | 12.842 | 16.382 |
| Aumento Relativo | 8,80% | 28,88% | 46,60% | 60,29% |

Os aumentos relativos registrados para a simulação anual são menores que os obtidos considerando-se apenas a potência de saída do dia parcialmente nublado representativo. Isto ocorre pois durante um ano a diversidade de dias é maior, ou seja, a ocorrência de dias limpos e dias nublados contribui para um aumento menos significativo no número de operações dos reguladores de tensão. Nos dias nublados, a geração de potência pelos geradores FVs é baixa, resultando em menos variações de tensão. Ressalta-se que no caso dos dados utilizados (dados de 2014 da base de dados do NREL) foram registrados 31 dias limpos, 154 dias parcialmente nublados e 180 dias nublados.

6.2 ESTIMATIVA ANALÍTICA DO NÚMERO DE ATUAÇÕES DE UM REGULADOR DE TENSÃO

O número de atuações dos reguladores de tensão obtido utilizando-se simulação computacional exige a execução de diversos cálculos de fluxo de carga, de modo que não é um método prático e adequado para ser empregado no dia-a-dia das concessionárias. A seguir é proposto um método analítico que permite uma estimativa preliminar do número de atuações do regulador de tensão. Este método não fornece uma estimativa precisa do número de atuações devido a sua simplicidade (método não-iterativo), porém seus resultados podem ser utilizados para fazer uma pré-seleção de cenários que são mais preocupantes, que necessitam de estudos mais detalhados.

Para que uma mudança de *tap* ocorra, a variação de tensão deve resultar na violação dos limites da banda morta do regulador e permanecer fora destes limites por um tempo maior ou igual ao tempo de atraso. A equação (6.1) apresenta a relação entre a variação de tensão na barra monitorada (BM), ΔV , e a variação de potência, ΔP , onde N_{FV} é o número de instalações FVs, V_{nom} a tensão nominal de fase da barra monitorada, ΔP_i a potência por fase da instalação FV e $Z_{FV_i, BM}$ a impedância total do caminho comum entre a subestação e cada uma das barras que possui geração FV e o caminho entre a subestação e a barra monitorada pelo regulador de tensão. O conceito da impedância total de caminho comum está exemplificado na Figura 6.4.

$$\Delta V = \frac{1}{V_{nom}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{FV}} |Z_{FV_i, BM}| \cdot \Delta P_i \quad (6.1)$$

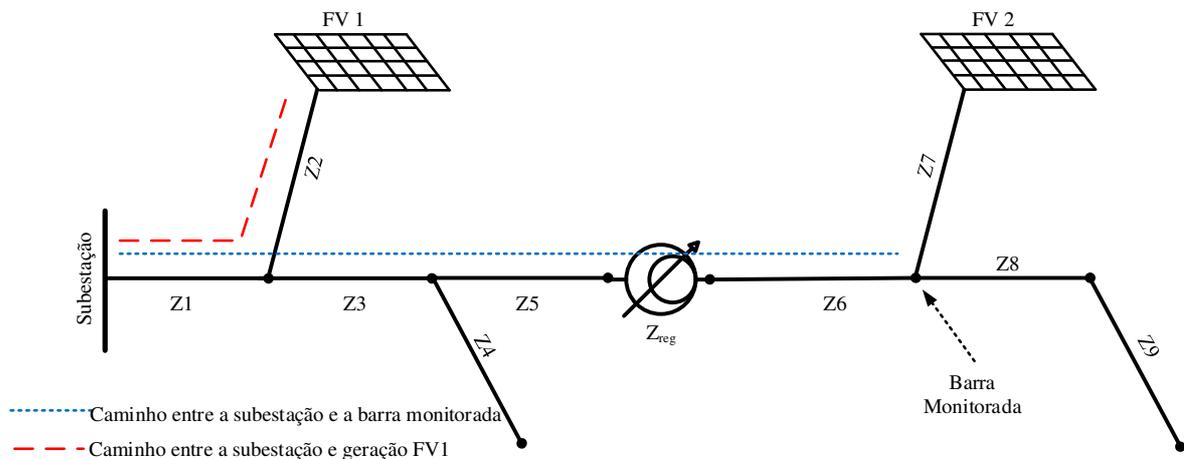


Figura 6.4 – Exemplo de cálculo de impedância total de caminho comum.

A Figura 6.4 ilustra a obtenção da impedância de caminho comum, conforme explicado a seguir. Considerando a instalação FV 1, o caminho entre ela e a subestação é dado pelas

impedâncias Z1 e Z2, já o caminho entre a subestação e a instalação FV 2 é dado por: Z1, Z3, Z5, Z_{reg}, Z6 e Z7. O caminho entre a subestação e a barra monitorada é dado por Z1, Z3, Z5, Z_{reg} e Z6. A impedância de caminho comum considerando-se FV 1 (Z_{FV_1BM}) é dada apenas pela impedância Z1, enquanto para FV 2 (Z_{FV_2BM}) esta impedância é dada por: Z1+Z3+Z5+Z_{reg}+Z6.

A equação (6.1) pode ser reescrita apresentando os valores em p.u., como mostra a equação (6.2).

$$\Delta V_{(pu)} = \frac{1}{V_{nom(pu)}} \cdot \sum_{i=1}^{NFV} |Z_{FV_iBM(pu)}| \cdot \Delta P_{i(pu)} \quad (6.2)$$

Considerando-se que, em p.u., a variação de potência que ocorre em cada um dos geradores FVs é a mesma (é necessário adotar uma base de potência adequada para cada um dos geradores FVs), é possível reescrever a equação (6.2), de forma que permita o cálculo da variação de potência, como é apresentado em (6.3).

$$\begin{aligned} \Delta P_{1(pu)} &= \Delta P_{2(pu)} = \Delta P_{3(pu)} = \dots = \Delta P_{NFV(pu)} = \Delta P_{(pu)} \\ \Delta V_{(pu)} &= \frac{1}{V_{nom(pu)}} \cdot \Delta P_{(pu)} \cdot \sum_{i=1}^{NFV} |Z_{FV_iBM(pu)}| \\ \Delta P_{(pu)} &= \frac{\Delta V_{(pu)} \cdot V_{nom(pu)}}{\sum_{i=1}^{NFV} |Z_{FV_iBM(pu)}|} \end{aligned} \quad (6.3)$$

O regulador de tensão atua apenas quando a variação de tensão é maior que metade de sua largura de banda morta. A mínima variação de tensão necessária para provocar a atuação do regulador de tensão ($\Delta V_{min(pu)}$) é dada por (6.4), onde *band* e *ptratio* são os parâmetros do regulador de tensão apresentados na Tabela 4.2. A equação (6.5) apresenta a mínima variação de potência necessária para provocar a atuação do regulador de tensão ($\Delta P_{min(pu)}$). Para que uma variação de potência cause efetivamente a atuação do regulador de tensão é necessário que esta variação seja maior que $\Delta P_{min(pu)}$ e que sua duração seja maior que o tempo de atraso do regulador de tensão.

$$\Delta V_{min(pu)} = \frac{band}{2 \cdot ptratio} \quad (6.4)$$

$$\Delta P_{min(pu)} = \frac{\Delta V_{min(pu)} \cdot V_{nom(pu)}}{\sum_{i=1}^{NFV} |Z_{FV_iBM(pu)}|} \quad (6.5)$$

Assim, a estimativa do número de atuações do regulador de tensão (N_{est}) pode ser obtido por (6.6), onde $N_{\Delta P}$ é o número de variações de potência registradas, $N_{\%(\Delta P > \Delta P_{min})}$ é a porcentagem de variações de potência maiores que a variação limite e $N_{\%(t > delay)}$ a porcentagem de variações de potência com duração maior que o atraso do regulador de tensão. Estes três valores são obtidos a partir da caracterização descrita no Capítulo 3.

$$N_{est} = N_{\Delta P} \cdot N_{\%(\Delta P > \Delta P_{min})} \cdot N_{\%(t > delay)} \quad (6.6)$$

A metodologia apresentada acima foi utilizada para estimar o número de atuações do regulador Reg. Alim. para a geração FV instalada nas barras 165 e 16, com diferentes níveis de penetração. Não foi considerada a geração instalada na barra 143 pois esta está localizada acima do regulador. Para a estimação foram utilizados os dados de caracterização dos três grupos (NREL, Brasil e Canadá). A Tabela 6.7 e a Tabela 6.8 apresentam o valor dos parâmetros utilizados nos cálculos da estimação, sendo que Z_{reg} corresponde a impedância do regulador de tensão.

Tabela 6.7 – Parâmetros utilizados na estimação do número de atuações.

| Parâmetro | Valor | |
|---------------------------|--------------------|------|
| V_{nom} (kV) | 14,722 (1,02 p.u.) | |
| $band$ (V) | 2 | |
| p_{ratio} | 120 | |
| Z_{reg} (Ω) | 3,75 | |
| Z_{FV_iBM} (Ω) | Barra 165 | 7,72 |
| | Barra 16 | 8,52 |

Tabela 6.8 – Valores de ΔV_{total} e ΔP_{min} para diferentes penetrações e barra de instalação.

| Nível de penetração | P_{nom} (MW) | ΔP_{min} (%) – Calculado | | ΔP_{min} (%) – Utilizado ⁴ | |
|---------------------|----------------|----------------------------------|----------|-----------------------------------------------|----------|
| | | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 |
| 20% | 1,09 | 21,3 | 19,3 | 21,5 | 19,5 |
| 40% | 2,18 | 10,7 | 9,7 | 10,5 | 9,5 |
| 60% | 3,28 | 7,1 | 6,4 | 7,0 | 6,5 |
| 80% | 4,37 | 5,3 | 4,8 | 5,5 | 5,0 |

A Tabela 6.9 apresenta, para cada valor de nível de penetração testado e cada grupo de dados, todos os dados necessários para estimar a quantidade de atuações do regulador de tensão, sendo os mesmos obtidos a partir da caracterização descrita no Capítulo 3. Para os dados do NREL e do Brasil é considerado o tempo de atraso de 1 minuto para o regulador e para os dados do Canadá este tempo é de 30 segundos.

⁴ Devido à resolução das curvas de probabilidade cumulativa foram utilizados os valores de ΔP_{lim} apresentados nas duas últimas colunas da Tabela 6.8. Como a curva apresenta valores com resolução de 1%, quando necessário foi utilizada a média entre os valores, por exemplo, para o valor de 21,5% foi utilizada a média das variações de potência de 22% e 21%.

Tabela 6.9 – Dados utilizados na estimação do número de atuações do regulador Reg. Alim.

| Parâmetro | Conjunto de dados | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | NREL | | Brasil | | Canadá | |
| N_{AP} | 112 | | 137 | | 195 | |
| $N_{\%(t>delay)}$ | 59,24% | | 60,93% | | 51,36% | |
| Porcentagem de variações de potência acima de ΔP_{lim} ($N_{\%(\Delta P > \Delta P_{lim})}$) | | | | | | |
| Nível de penetração | Localização do gerador FV | | | | | |
| | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 |
| 20% | 28,06% | 31,34% | 26,82% | 30,14% | 38,36% | 40,84% |
| 40% | 52,41% | 55,69% | 51,23% | 54,60% | 57,96% | 60,41% |
| 60% | 65,66% | 68,17% | 64,68% | 67,15% | 67,43% | 69,42% |
| 80% | 73,33% | 75,98% | 72,14% | 74,66% | 73,88% | 76,36% |

6.2.1 Resultado da Estimação do Número de Atuações do Regulador de Tensão

Utilizando os dados apresentados na Tabela 6.9 e (6.6), o número de atuações do regulador de tensão ‘Reg. Alim’ é estimado. Os resultados obtidos analiticamente e por meio de simulações computacionais são apresentados na Tabela 6.10 e na Tabela 6.11, respectivamente. A Tabela 6.12 apresenta o erro relativo entre o valor estimado analiticamente e o valor obtido nas simulações.

Tabela 6.10 – Número estimado de atuações do regulador de tensão.

| Nível de penetração | Conjunto de dados | | | | | |
|---------------------|-------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | NREL | | Brasil | | Canadá | |
| | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 |
| 20% | 19 | 21 | 22 | 25 | 38 | 41 |
| 40% | 35 | 37 | 43 | 46 | 58 | 61 |
| 60% | 44 | 45 | 54 | 56 | 68 | 70 |
| 80% | 49 | 50 | 60 | 62 | 74 | 76 |

Tabela 6.11 – Número de atuações do regulador de tensão obtido nas simulações computacionais.

| Nível de penetração | Conjunto de dados | | | | | |
|---------------------|-------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | NREL | | Brasil | | Canadá | |
| | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 |
| 20% | 16 | 22 | 14 | 18 | 22 | 46 |
| 40% | 34 | 42 | 34 | 48 | 98 | 116 |
| 60% | 50 | 60 | 68 | 78 | 148 | 168 |
| 80% | 68 | 70 | 90 | 96 | | |

Tabela 6.12 – Erro relativo do número de atuações do regulador de tensão.

| Nível de penetração | NREL | | Brasil | | Canadá | |
|---------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 | Barra 165 | Barra 16 |
| 20% | 16,36% | -5,48% | 59,88% | 39,75% | 74,63% | -11,08% |
| 40% | 2,27% | -12,03% | 25,78% | -5,06% | -40,77% | -47,84% |
| 60% | -12,87% | -24,62% | -20,60% | -28,14% | -54,37% | -58,62% |
| 80% | -28,46% | -27,98% | -33,09% | -35,08% | | |

O erro relativo é calculado tendo-se como base o valor simulado. Não são apresentados valores para o caso que utiliza os dados do Canadá e 80% de nível de penetração pois estes casos causam violações dos limites de tensão aceitáveis para a rede, definidos na Tabela 4.1. A

Tabela 6.12 mostra que o método proposto não é preciso, porém o mesmo é capaz de apresentar uma estimativa para o número de atuações do regulador de tensão suficiente para a realização de uma pré-seleção de redes que podem apresentar problemas em relação ao aumento do número de atuações dos reguladores de tensão. Em geral, o erro relativo encontrado para os dados do NREL foi menor que para os dados brasileiros e canadenses. Os dados do NREL apresentam o menor número de variações de potência e o grupo de dados mais abrangente, enquanto os dados canadenses, que possuem os maiores erros, o maior número de variações de potência e o grupo de dados menos abrangente.

6.3 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou estudos baseados em simulações computacionais que permitem avaliar o impacto das variações na potência de saída de geradores FVs causadas pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs no número de operações de reguladores de tensão. Os estudos, realizados considerando-se tanto um único dia quanto as medições de um ano inteiro, mostraram que a intermitência da geração FV causada pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs pode aumentar significativamente a quantidade de atuações dos reguladores de tensão. Este aumento pode ser verificado nos três grupos de dados apresentados neste estudo, sendo menor quando utilizados os dados referentes a um ano de medições (para o grupo que dispõe destas medições).

Também se apresentou um método que permite estimar preliminarmente o número de atuações dos reguladores de tensão. Apesar de sua estimativa não ser precisa, este método pode ser utilizado no dia-a-dia de concessionárias para realizar uma análise prévia, permitindo selecionar as redes que exigem estudos mais detalhados para que o aumento no número de atuações dos reguladores de tensão devido a passagem de nuvens sobre os sistemas FVs não seja excessivo.

7 METODOLOGIAS QUE PERMITEM MITIGAR OS IMPACTOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Há algumas medidas que podem ser adotadas para mitigar ou eliminar o impacto da variabilidade da geração FV devido à passagem de nuvens sobre os painéis FVs no módulo da tensão, bem como no aumento do número de atuações dos reguladores de tensão. Há soluções que podem ser realizadas por ações do lado da concessionária ou por ações do lado do consumidor. O objetivo deste capítulo é apresentar uma breve discussão das possíveis soluções identificadas durante o desenvolvimento deste trabalho de mestrado, de forma a auxiliar a tomada de decisão da concessionária sobre quais soluções podem ser úteis, considerando-se a prática de cada empresa. A Seção 7.1 apresenta as soluções tradicionalmente aplicadas no controle de tensão dos alimentadores de distribuição de energia elétrica e as principais implicações de seu uso em alimentadores com elevado nível de penetração de geração FV. A Seção 7.2 discute soluções modernas de resposta rápida e as principais implicações de seu uso para a solução deste tipo de problema. Ressalta-se a necessidade da realização de estudos para a avaliação da eficácia de cada solução.

7.1 SOLUÇÕES TRADICIONAIS DE CONTROLE DE TENSÃO

Os dois equipamentos mais utilizados na regulação de tensão são bancos de capacitores e reguladores de tensão, porém a alta variabilidade na tensão introduzida pela geração FV, devido à passagem de nuvens sobre os painéis FVs, pode afetar a operação destes dispositivos. Os bancos de capacitores são projetados para atender a demanda de potência reativa da carga, porém como esta tende a variar continuamente, e a potência reativa fornecida pelos bancos de capacitores varia com o quadrado da tensão, é possível que a compensação seja maior do que o necessário, o que eleva a tensão do alimentador e pode fazer com que os reguladores de tensão atuem [32]. De forma geral, as soluções de controle de tensão tradicionais, por exemplo, reguladores de tensão e bancos de capacitores, não são suficientes para solucionar as variações de tensão causadas pela intermitência da irradiação recebida pelos painéis fotovoltaicos, mas algumas medidas podem ser tomadas para diminuir a atuação indevida dos reguladores de tensão.

7.1.1 Reguladores de Tensão

Usualmente os reguladores de tensão têm seus parâmetros, como a largura de banda morta (*band*) e o tempo de atraso (*delay*), ajustados para a rede sem a presença de geração distribuída. Estes parâmetros podem ser reajustados quando há geração FV, a fim de evitar o aumento expressivo nas atuações do regulador. Uma das opções consiste em aumentar o tempo de atraso do regulador [21], pois as variações necessitam ter maior duração para provocarem a atuação dos reguladores. Ao se aumentar o tempo de atraso diminui-se o número de atuações dos reguladores, mas a magnitude das variações na tensão pode aumentar. Portanto, o aumento do tempo de atraso deve considerar o compromisso entre a qualidade da tensão e o desgaste dos reguladores de tensão.

Outro parâmetro que pode ser alterado é a largura da banda morta dos reguladores de tensão. Quanto maior esta largura, maiores devem ser as variações na tensão para que provoquem a atuação do regulador. Assim como o aumento do tempo de atraso, esta solução diminui a atuação do regulador, porém pode não conter o aumento na magnitude das variações de tensão, fazendo com que a mesma exceda os limites regulatórios.

As duas soluções sugeridas (aumento do tempo de atraso e da largura de banda morta) são simples e reduzem o número de atuações dos reguladores de tensão, porém podem apresentar um aumento nas variações de tensão. O reajuste destes parâmetros deve considerar o compromisso entre manter a tensão em conformidade com os limites estabelecidos pelo PRODIST [23] e minimizar o número de atuações dos reguladores de tensão, de modo a preservar a vida útil e minimizar os custos de manutenção do equipamento.

Para ilustrar os efeitos de se alterar os parâmetros dos reguladores de tensão são apresentados os resultados de simulações com as mesmas condições apresentadas na Seção 6.1.1, utilizando o sistema-teste de média tensão, os dados canadenses e 40% de nível de penetração de geração FV, instalada na barra 16 (final do alimentador). Os ajustes dos reguladores de tensão utilizados nas simulações cujo perfil de tensão e posição do *tap* são mostrados na Figura 7.1 são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Parâmetros dos reguladores de tensão.

| Caso | Reg. Sub. | | Reg. Alim. | |
|------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | Atraso (s) | Banda morta (V) | Atraso (s) | Banda morta (V) |
| 1 | 60 | 2 | 30 | 2 |
| 2 | 120 | 2 | 60 | 2 |
| 3 | 60 | 3 | 30 | 3 |

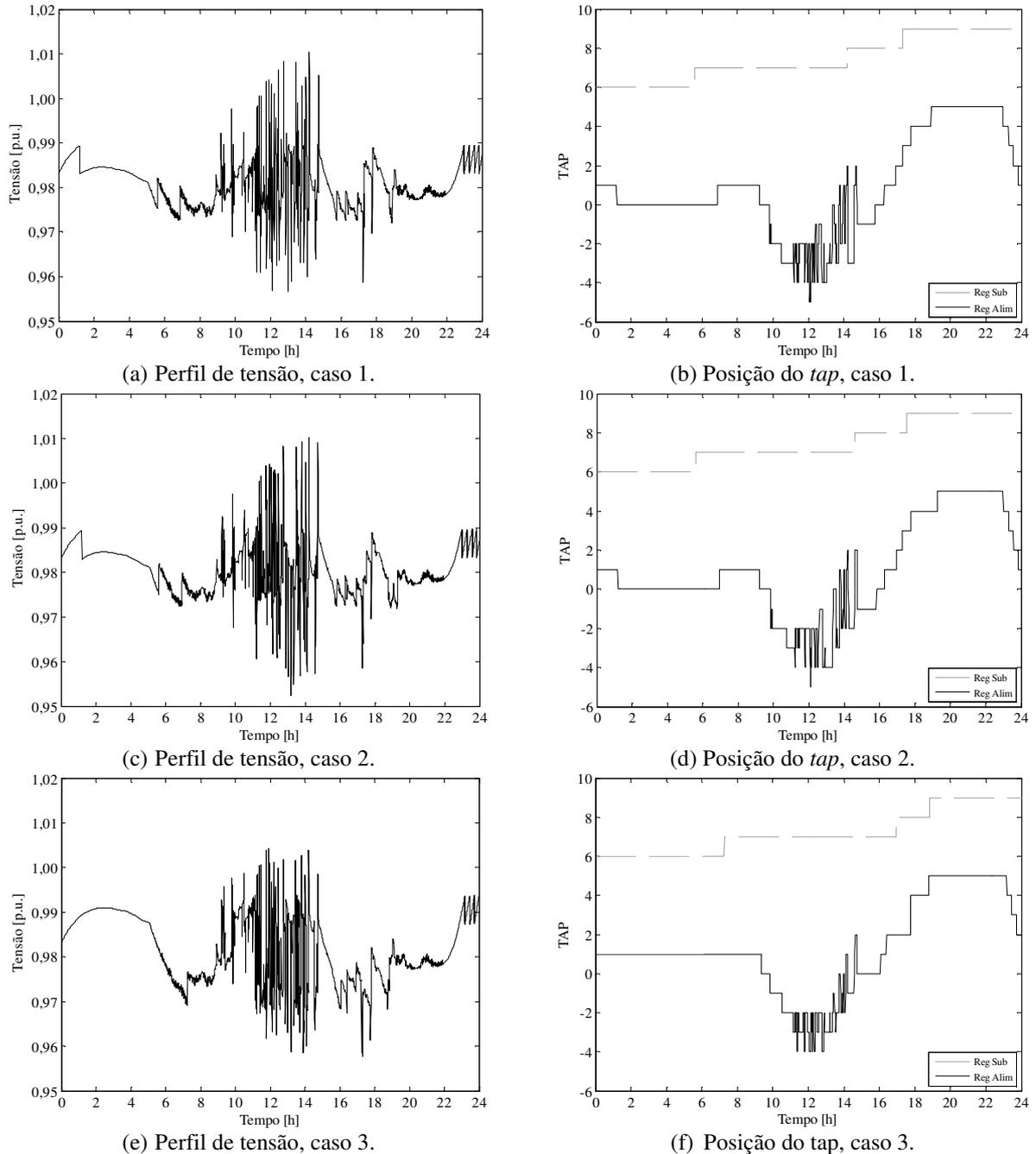


Figura 7.1 – Perfil de tensão e posição do *tap* para diferentes ajustes dos parâmetros dos reguladores de tensão.

O número de mudanças de *tap* registradas nas simulações da Figura 7.1 é:

- **Caso 1:** 116 mudanças de *tap* para o regulador instalado ao longo do alimentador (Reg. Alim) e 3 alterações de *tap* para o regulador instalado na subestação (Reg. Sub.);
- **Caso 2:** 94 mudanças de *tap* para o Reg. Alim., enquanto as alterações de *tap* do Reg. Sub. permaneceram inalteradas.
- **Caso 3:** 71 mudanças de *tap* para o Reg. Alim., enquanto as alterações de *tap* do Reg. Sub. permaneceram inalteradas.

O número de mudanças de *tap*, assim como a posição do *tap* apresentada na Figura 7.1 (b), (d) e (f), mostra que: *o aumento no atraso e na largura de banda dos reguladores de tensão (comparado com o caso 1) resulta na diminuição do número de atuações do regulador de tensão instalado no alimentador (mais próximo à geração FV).*

De fato, a alteração dos parâmetros contribui para reduzir o número de atuações dos reguladores de tensão, o que é desejado para preservar a vida útil dos mesmos e evitar o aumento do custo de manutenção, porém a alteração destes parâmetros implica em um aumento da variabilidade da tensão, tornando mais provável que em determinados instantes a mesma não se adeque aos limites estabelecidos pela agência reguladora⁵.

Outra medida que pode ser adotada pelas concessionárias é alterar o modo de operação dos reguladores de tensão. Alguns reguladores podem operar de dois modos diferentes: o modo sequencial e o modo que utiliza a média de uma determinada quantidade de medidas. No modo sequencial as mudanças de *tap* são realizadas com base no valor instantâneo da tensão, enquanto o modo baseado na média faz esta decisão baseado na média da tensão instantânea em um determinado período de tempo.

Se o regulador de tensão estiver operando no modo baseado na média, quando a tensão viola o valor da banda morta do regulador o modo é ativado e o microprocessador calcula a média da tensão durante o tempo de atraso (*delay*) do regulador. Passado o tempo de atraso, o microprocessador calcula de quantos *taps* deve ser a alteração para que a média da tensão volte para os níveis desejados e as alterações de *tap* são feitas, sem atraso entre elas.

Este método traz um erro intrínseco, devido ao cálculo da média, além de necessitar que o tempo de atraso seja de no mínimo 30 segundos, para que o microprocessador disponha de tempo suficiente para calcular a média da tensão. Caso o tempo de atraso seja menor que 30 segundos, o controle volta a operar em modo sequencial [33]. Assim como o ajuste dos parâmetros do regulador, este é um método de simples implementação, desde que os reguladores tenham a opção de operar neste modo, e que permite a redução do número de atuações dos reguladores de tensão. Porém, assim como as outras alterações no ajuste do regulador, esta redução nas operações implica em um aumento na magnitude das variações da tensão com relação à em que o regulador atua como no caso base.

⁵ Ressalta-se que no caso dos transitórios na tensão causados pela passagem de nuvens sobre os painéis fotovoltaicos o limite está relacionado a variações de tensão de curta duração e não em regime permanente.

7.1.2 Bancos de Capacitores Chaveados

Bancos de capacitores chaveados são, geralmente, instalados em barras-chave do sistema e podem ser ativados por desvios na tensão. O uso dos bancos de capacitores chaveados pode contribuir para diminuir o impacto da passagem de nuvens sobre sistemas FVs na tensão e também pode ajudar a diminuir o número de atuações dos reguladores de tensão. Porém, tais ações ocorrem em detrimento de atuações excessivas dos bancos de capacitores (analogamente ao que ocorre com os reguladores de tensão). Algumas características deste equipamento devem ser consideradas na sua utilização:

- Tempo de atraso: Geralmente o tempo de atraso utilizado nos bancos de capacitores é maior do que o dos reguladores de tensão o que, devido à natureza rápida das variações na tensão provocadas pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs, pode fazer com que os bancos de capacitores não diminuam as variações na tensão. Caso seja considerado um tempo de atraso muito pequeno, ou inexistente, o número de atuações do banco de capacitores aumenta, o que pode diminuir sua vida útil.
- Estágios discretos: Os bancos de capacitores são constituídos de diversos estágios discretos, por exemplo, um banco de 1 Mvar pode ser constituído de 4 estágios de 250 kvar cada, isto faz com que o banco possa injetar na rede apenas 5 diferentes valores de potência reativa (0 kvar, 250 kvar, 500 kvar, 750 kvar e 1.000 kvar), se a compensação necessária estiver entre dois destes valores, poderá faltar compensação ou a mesma ser feita em excesso. Quando em excesso a compensação pode, inclusive, fazer com o número de atuações dos reguladores de tensão aumente, visto que o excesso de compensação pode fazer com que a tensão aumente, levando os reguladores a atuarem.
- Custo: Outras desvantagens que devem ser consideradas em relação ao uso de bancos de capacitores é seu custo, em geral elevado (de acordo com [34], o preço de um banco de capacitores chaveado de média tensão é de U\$50/kvar), o fato de que o chaveamento de capacitores na rede provoca harmônicos devido ao seu transitório e ao efeito ressonante, e o fato de que os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre os painéis FVs podem causar chaveamento excessivo destes bancos, reduzindo sua vida útil.

Conforme apresentado, bancos de capacitores e reguladores de tensão podem ser empregados na regulação de tensão de sistemas de distribuição, porém a alta variabilidade na tensão introduzida pela geração FV, devido à passagem de nuvens sobre os painéis FVs, afeta a operação destes dispositivos que podem atuar de maneira ineficaz. Outras opções para o controle de tensão, em redes com grande variabilidade, são o uso de eletrônica de potência, condensadores síncronos e corte de geração ou carga. Estas opções são mais bem discutidas na próxima seção.

7.2 SOLUÇÕES MODERNAS DE RESPOSTA RÁPIDA PARA CONTROLE DE TENSÃO

Uma possível solução para o problema de variações de tensão tratado nesta dissertação consiste no emprego de dispositivos baseados em eletrônica de potência, que têm a capacidade de fornecer potência reativa para a rede para auxiliar na regulação de tensão. São estes: compensadores estáticos (SVC – *Static var Compensator*), compensadores estáticos síncronos (STATCOM – *Static Synchronous Compensator*) e reguladores de tensão a tiristores (TVR – *Thyristor Voltage Regulator*). Estes dispositivos permitem uma resposta rápida às variações de tensão, porém são dispositivos de alto custo.

É possível também permitir que as concessionárias façam acordos com clientes que possuem geradores para que, durante dias parcialmente nublados, estes ajudem no controle de tensão. A grande barreira para esta solução é de ordem econômica, pois ajudar no controle de tensão não é vantajoso para o proprietário do gerador, que é remunerado apenas pela potência ativa que injeta na rede, sendo necessário estabelecer novas regras de remuneração, que sejam vantajosas tanto para a concessionária quanto para o proprietário do gerador. O corte de geração ou carga é outra medida que pode ser adotada para controlar a tensão, podendo ser necessária em redes com pouca flexibilidade e alta penetração de geração FV. Em dias parcialmente nublados, é possível realizar o corte de geração FV, diminuindo assim a magnitude das variações de tensão. Ressalta-se que para que esta medida seja adotada, ela deve ser regulada pela agência responsável. As opções que envolvem o corte de geração ou carga não são desejadas pois representam perdas econômicas, porém em determinadas situações podem ser necessárias para evitar danos no sistema.

Finalmente, em alguns países, empregam-se sistemas de armazenamento de energia como uma forma de controlar a potência ativa fornecida pelos geradores fotovoltaicos, diminuindo o impacto da intermitência na potência gerada. A seguir, apresenta-se uma breve discussão destas possíveis soluções.

7.2.1 Compensadores Estáticos de Energia Reativa (SVC)

Compensadores estáticos são, em sua essência, capacitores e reatores chaveados com o uso de eletrônica de potência e são capazes de fornecer suporte reativo contínuo (diferentemente dos bancos de capacitores cujo suporte fornecido é discreto, em estágios) com variação de tensão e injeção de harmônicos reduzidos (uso de filtros), em comparação com os bancos de capacitores chaveados. São geralmente instalados próximos a cargas que possuem variações altas e rápidas, como fornos a arco.

Os SVCs são uma opção razoável para diminuir ou eliminar os impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre sistemas FVs na tensão, assim como o aumento na atuação dos reguladores de tensão. Requerem menos manutenção que reguladores de tensão ou bancos de capacitores, pois não possuem *taps*, dispensando a parte mecânica que faz esta comutação e que geralmente apresenta o maior desgaste. Em contrapartida às vantagens apresentadas, são equipamentos de alto custo (de acordo com [35], o preço estimado para se instalar um SVC com tensão nominal de 13,8 kV e potência reativa nominal de -40 a +60 Mvar é de U\$142.000/Mvar), o que inviabiliza seu uso em certos casos.

7.2.2 Inversores dos Geradores Fotovoltaicos

Como usualmente a geração FV é remunerada apenas pela potência ativa que é injetada na rede, é de interesse do proprietário da instalação injetar sempre a maior quantidade possível de potência ativa, de modo que a maioria dos sistemas FVs operam com fator de potência unitário. Porém, é possível que os inversores FVs operem com fator de potência diferente do unitário, contribuindo para a regulação de tensão. A Alemanha, por exemplo, exige que alguns geradores fotovoltaicos tenham comunicação e possam ser remotamente conectados pelo operador do sistema, permitindo operar em determinados limites de fator de potência. A faixa de operação que os geradores FVs devem atender varia de acordo com a potência nominal (S_{\max}) conforme segue [36]:

- $S_{\max} < 3,68 \text{ kVA}$ (microgerador) – devem operar com fator de potência na faixa de $\pm 0,95$ conectados em sistemas de BT;
- $3,68 \text{ kVA} \leq S_{\max} \leq 13,8 \text{ kVA}$ – devem aceitar qualquer ponto de operação de fator de potência determinado pelo operador na faixa de $\pm 0,95$.
- $S_{\max} > 13,8 \text{ kVA}$ – devem aceitar qualquer ponto de operação de fator de potência determinado pelo operador na faixa de $\pm 0,90$.

A máxima potência reativa que um inversor pode fornecer depende da potência ativa que é gerada, como pode ser visto em (7.1), onde Q é a potência reativa fornecida pelo inversor, S_{nom} a potência nominal do inversor, $P(Irr)$ a potência ativa fornecida pelo inversor para um dado valor Irr de irradiação solar e condições de operação, e ilustrado na Figura 7.2.

$$Q = \sqrt{S_{nom}^2 - P(Irr)^2} \quad (7.1)$$

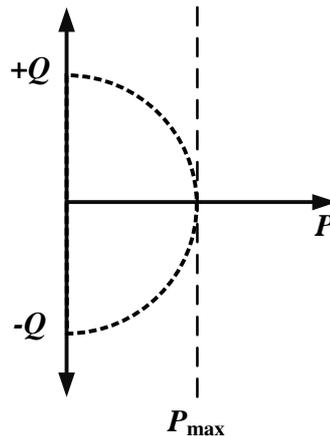


Figura 7.2 – Geração de potência por painéis FVs com inversores.

Os inversores FVs comerciais possuem, basicamente, quatro opções de controle de potência reativa [37]:

- Fator de potência unitário constante ($Q = 0$): como mencionado anteriormente, este método considera que as plantas FVs devem fornecer sempre a maior quantidade de potência ativa possível, conseqüentemente este modo não contribui ativamente para a regulação de tensão.
- Fator de potência constante ($Q = Q(P)$): a potência reativa fornecida depende da potência ativa, de modo a manter o fator de potência, previamente estabelecido, constante.

- Fator de potência variável: o fator de potência é obtido como uma função do desvio da potência ativa e da razão X/R no ponto de conexão. Esta função é baseada em uma tentativa de se zerar o erro de tensão no ponto de conexão.
- Controle volt/var: este controle é baseado em diferentes conceitos, como a função de controle do tipo *droop*.

O método que utiliza o fator de potência unitário constante não é de interesse para minimizar os transitórios causados pela passagem de nuvens sobre sistemas FVs pois ele não contribui ativamente para a regulação de tensão. Os métodos que utilizam fator de potência constante também não são interessantes pois as variações causadas pela passagem de nuvens sobre sistemas FVs são um problema intermitente, logo o fator de potência constante não é uma solução adequada.

No caso do fator de potência variável, o suporte reativo fornecido pelos inversores pode ser utilizado para cancelar as variações de tensão causadas pela passagem de nuvens sobre os sistemas FVs. Em (7.2), onde ΔV é a variação de tensão, ΔP e ΔQ as variações de potência ativa e reativa, respectivamente, e R e X a resistência e a reatância acumuladas na barra na qual a geração FV está instalada e V é a tensão na barra onde há geração FV, é apresentada a relação entre a variação de tensão e a variação nas potências ativa e reativa [38].

$$\Delta V = \frac{\Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X}{V} \quad (7.2)$$

Considerando $\Delta V = 0$, é possível obter o valor de ΔQ necessário para cancelar a variação na tensão:

$$\Delta Q \approx -\frac{\Delta P \cdot R}{X} = -\frac{\Delta P}{\left(\frac{X}{R}\right)} \quad (7.3)$$

O controle do tipo *droop* é baseado no princípio de que a potência ativa tem uma grande influência na frequência do sistema, enquanto a potência reativa tem grande influência no módulo da tensão. A relação entre a tensão e a potência reativa é dada por (7.4), onde V é a tensão medida, V_0 é a tensão de base, Q é a potência reativa da unidade, Q_0 a potência reativa de base da unidade e k_q a constante do controle *droop*:

$$V = V_0 - k_q \cdot (Q - Q_0) \quad (7.4)$$

A Figura 7.3 apresenta graficamente a equação (7.4) e permite analisar o funcionamento do *droop*. Quando a tensão aumenta de V_a para V_b , a potência reativa diminui de $+Q_{max}$ para 0, contribuindo para que a tensão não continue aumentando. É possível diminuir ou anular uma variação de tensão, variando-se adequadamente a potência reativa.

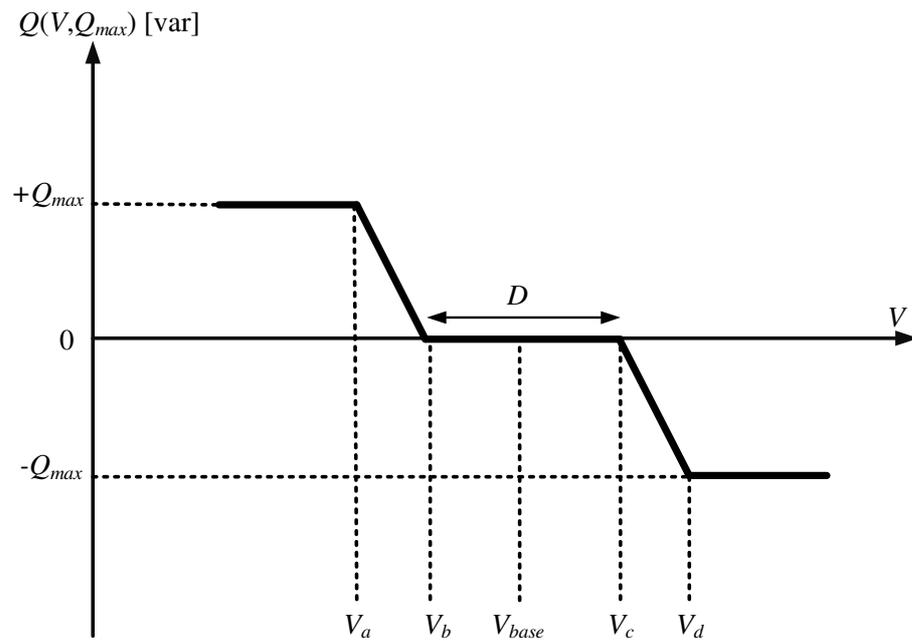


Figura 7.3 – Função de controle *droop*.

Adicionalmente, recentemente foram desenvolvidos alguns inversores, chamados de inversores inteligentes, que possuem opções de controle para o fornecimento de potência reativa. A Tabela 7.4, extraída de [39], apresenta o resumo de algumas das opções de controle de injeção de potência reativa disponíveis nos inversores inteligentes.

Tabela 7.2 – Opções de controle de inversores inteligentes. Extraído de [39].

| Opção | Descrição |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Off</i> | A potência reativa injetada é limitada em 0 kvar |
| <i>VarCltCom</i> | O valor desejado de potência reativa é recebido por uma unidade de controle externa e transmitida ao inversor |
| <i>VarCnst</i> | O valor desejado de potência reativa é constante e especificado, em kvar, no parâmetro <i>QVar</i> |
| <i>VarCnstNom</i> | O valor desejado de potência reativa é constante e especificado em % no parâmetro <i>QVarCnst</i> |
| <i>VarCnstNomAnIn</i> | A potência reativa desejada é importada de uma entrada analógica. O sinal analógico é convertido em um valor de potência reativa desejada |
| <i>VarCnstVol</i> | O valor desejado de potência reativa é especificado dependendo da tensão |
| <i>VarCnstVolHystDb</i> | O valor desejado de potência reativa é especificado de acordo com a tensão, utilizando-se uma curva característica |

7.2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia

A utilização de sistemas de armazenamento de energia, principalmente baterias, de resposta rápida, permite compensar a variabilidade da geração FV diretamente na potência ativa que é fornecida à rede. O sistema de armazenamento de energia pode ser conectado à rede no mesmo ponto no qual a geração FV está conectada de modo que, quando a variação na irradiação provoca uma variação na potência de saída dos painéis FVs, a potência fornecida a mais ou

a menos é absorvida ou fornecida à rede pelo sistema de armazenamento, prevenindo grandes variações na tensão.

Em [40], é proposto um esquema composto de:

- Ao menos um equipamento de armazenamento de energia;
- Um gerador FV;
- Um sistema de controle do sistema FV.

O sistema de controle é configurado para gerar um sinal de controle da taxa de variação da potência de saída. Este sinal é calculado baseado na taxa de variação da potência de saída da geração FV, que é monitorada, e na taxa de variação que se deseja. O controle é feito em malha fechada, com realimentação (*feedback*) e dividido em duas etapas, um mecanismo de controle lento e outro rápido. O controle lento é baseado na média da taxa de variação da potência em duas diferentes janelas de tempo, uma com aproximadamente 1 minuto e outra entre 10 e 15 minutos. O controle rápido compara a potência de saída medida com a desejada e ajusta a potência de saída com um controlador integral.

O aspecto mais importante dos sistemas de armazenamento de energia é o dimensionamento dos mesmos, que deve considerar a quantidade de energia necessária para diminuir ou eliminar as variações provocadas pela passagem de nuvens sobre os sistemas FVs. Outro aspecto importante é a escolha da tecnologia de armazenamento. Para sistemas FVs grandes é mais comum o uso de baterias de íon-lítio e chumbo-ácido [41]. Esta escolha geralmente depende dos seguintes fatores:

- Potência nominal do sistema;
- Capacidade de armazenamento de energia;
- Tempo de resposta do sistema (lento ou rápido);
- Ciclagem necessária;
- Espaço físico disponível;
- Preço.

Realizar o controle da variabilidade da geração FV provocada pela passagem de nuvens sobre os painéis requer mais potência que energia, sistemas de resposta rápida devido à duração dos transitórios e baterias capazes de realizar vários ciclos de carga e descarga ao longo de um dia, já que em dias parcialmente nublados podem ocorrer centenas de variações de potência, como apresentado no Capítulo 3.

As baterias de íon-lítio possuem como maior vantagem sua alta potência e densidade de energia, porém são baterias de custo elevado e que necessitam de mais circuitos de controle. As

baterias de chumbo-ácido são as mais econômicas para aplicações que exigem alta capacidade, porém são baterias pesadas, sendo necessário avaliar o espaço físico disponível para a instalação.

Os grandes obstáculos na implementação do uso de baterias para minimizar os impactos dos transitórios causados pela passagem de nuvens sobre sistemas FVs são o preço das mesmas e o fato de que sua vida útil é prejudicada por descargas frequentes e profundas. Uma bateria com descarga de 50% em cada ciclo tem uma vida útil duas vezes maior que uma bateria que tenha uma descarga de 80% em cada ciclo [42], [43]. A Tabela 7.3 extraída de [44], mostra alguns valores típicos para sistemas de armazenamento utilizados em aplicações de sistemas de potência.

Tabela 7.3 – Valores típicos de diferentes tecnologias de armazenamento utilizadas em sistemas de potência. Extraído de [44].

| Parâmetro | Íon-Lítio | Chumbo-Ácido | Sulfeto de Sódio | Zinco-Brometo | Volante de inércia (<i>Flywheel</i>) |
|----------------------------------------------|-----------|--------------|------------------|---------------|----------------------------------------|
| Eficiência (%) | 85 | 80 | 75 | 70 | 95 |
| Custo do Sistema de Condicionamento (U\$/kW) | 400 | 400 | 350 | 400 | 600 |
| Custo armazenamento (U\$/kW) | 600 | 330 | 350 | 400 | 1600 |
| Ciclos | 4.000 | 2.000 | 3.000 | 3.000 | 25.000 |

O custo de sistemas de armazenamento não depende somente do tipo de tecnologia adotada, mas também do modo de uso da mesma. O modo de uso pode ser representado pelo tempo de armazenamento (longo ou curto) e pela frequência de descargas (frequentes ou não). Em [44] é definido um índice, chamado de Valor Presente, que contabiliza o valor do pagamento futuro de um bem em um dado momento, considerando o valor do dinheiro ao longo do tempo. A Tabela 7.4 apresenta o Valor Presente no Ano 1 para as duas tecnologias de armazenamento, considerando uma vida útil de 10 anos e o modo de uso.

Tabela 7.4 – Valor Presente no Ano 1, com operação de 10 anos (U\$/kW). Extraído de [44].

| Modo de uso | Íon-Lítio | Chumbo-Ácido |
|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------|
| Armazenamento de longa duração e descargas frequentes | 2.899,41 | 2.839,26 |
| Armazenamento de longa duração e descargas não frequentes | 2.442,79 | 1.620,37 |
| Armazenamento de curta duração e descargas frequentes | 1.409,99 | 1.299,70 |
| Armazenamento de curta duração e descargas não frequentes | 960,48 | 704,18 |

Os sistemas de armazenamento de energia podem ser uma solução interessante para os problemas causados pela passagem de nuvens sobre painéis FVs já que, se corretamente dimensionados, podem suprir energia suficiente para diminuir, ou mesmo eliminar as variações de

tensão. As maiores desvantagens apresentadas são o alto custo e, no caso das baterias, o fato de que as descargas profundas diminuem sensivelmente sua vida útil.

7.3 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentaram-se algumas medidas que podem ser adotadas para diminuir ou solucionar os impactos apresentados nos capítulos anteriores (variações na tensão do sistema de distribuição e aumento do número de operações de reguladores de tensão). Os métodos de regulação de tensão tradicionalmente utilizados possuem, em geral, implementação simples e são capazes de operar de forma a reduzir a atuação excessiva dos reguladores de tensão, porém isto ocorre em detrimento da qualidade da tensão, como ilustrado na Figura 7.4.

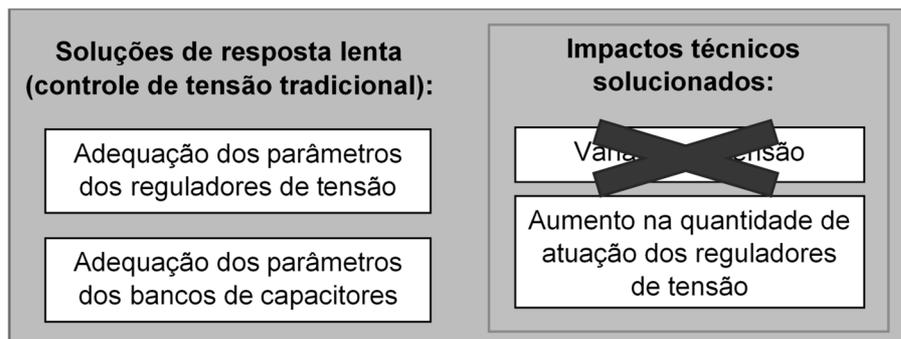


Figura 7.4 – Resumo dos métodos tradicionais de regulação de tensão.

Também foram apresentadas medidas modernas que podem ser adotadas para regular a tensão, como o uso de sistemas de armazenamento, dispositivos baseados em eletrônica de potência e funcionalidades do próprio inversor FV. Estas medidas, em geral, apresentam melhor desempenho, muitas vezes sendo capazes de eliminar as variações na tensão sem causar aumento no número de atuações dos reguladores, porém são soluções de alto custo e que, em alguns casos, ainda não possuem a regulamentação necessária para a implementação. A Figura 7.5 apresenta um resumo destas medidas. Ressalta-se que a opção de “controle de tensão de geradores síncronos instalados no mesmo alimentador” não foi discutida em mais detalhes pois só é apropriada em casos em que há gerador síncrono já instalado no alimentador.

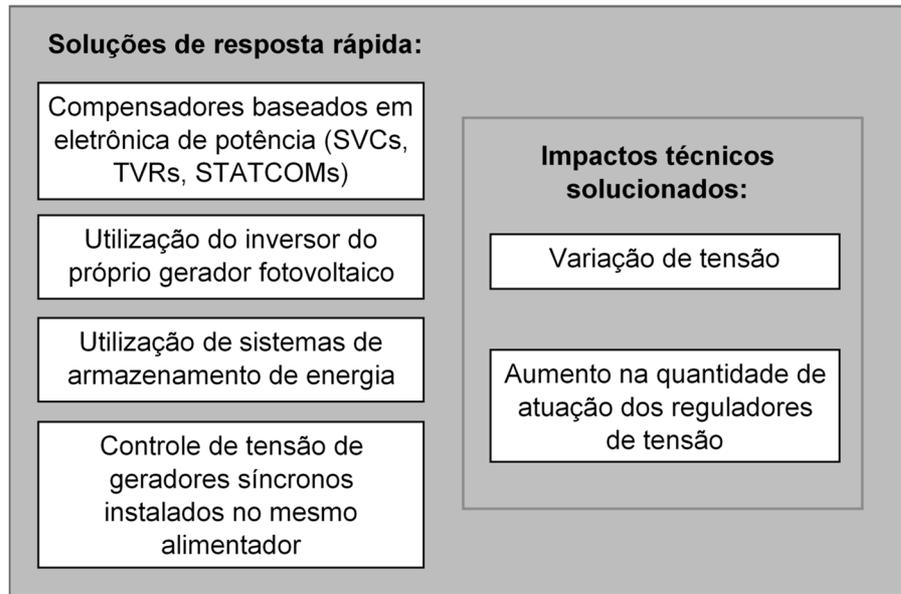


Figura 7.5 – Resumo dos métodos modernos de regulação de tensão.

8 CONCLUSÕES

O aumento na quantidade de geradores FVs instalados em sistemas de distribuição de energia elétrica demanda a realização de novos estudos com o objetivo de avaliar possíveis impactos técnicos nestes sistemas, visto que os mesmos não foram projetados para operar de forma radial. Como os geradores FVs não possuem inércia mecânica, a intermitência na irradiação causada pela passagem das nuvens sobre os painéis FVs afeta diretamente a potência de saída destes, o que pode causar flutuações indesejadas na tensão do alimentador. O aumento destas flutuações pode levar a um aumento excessivo no número de atuações dos reguladores de tensão presentes na rede, elevando os custos de manutenção do equipamento e diminuindo sua vida útil.

Neste contexto, este trabalho propôs índices e metodologias que podem ser empregados pelas concessionárias com o objetivo de avaliar tais impactos. Primeiramente, com o objetivo de diminuir a quantidade de estudos realizados, quatro índices foram propostos para a obtenção de uma curva diária de geração de energia que represente a variabilidade na potência de saída dos geradores FVs devido a passagem de nuvens sobre os painéis. Estes índices são: (1) variação de potência, (2) duração da variação de potência, (3) duração de um evento completo e (4) número de variações em um dia parcialmente nublado. Para a obtenção destes índices e, consequentemente, da curva diária representativa, necessita-se de dados históricos de irradiação ou potência de saída de painéis FVs. Neste trabalho, empregaram-se dados históricos coletados no Brasil, no Canadá e nos Estados Unidos (NREL).

Uma vez identificada a curva diária representativa, as variações na magnitude da tensão foram avaliadas tanto em redes de distribuição de média tensão, quanto em redes de baixa tensão. Nos estudos realizados, verificou-se um aumento significativo nas variações da tensão, especialmente em casos com elevada penetração de geração FV ou em casos em que a geração FV é instalada em pontos com baixo nível de curto-circuito (localizados no final do alimentador ou da rede).

Para o sistema-teste de média tensão utilizado neste trabalho, sem a presença de reguladores de tensão, o maior nível de penetração que pode ser atingido sem que os limites de tensão sejam ultrapassados é de cerca de 60% para o grupo de dados do NREL e do Brasil. Já, com a presença dos reguladores de tensão, esta quantidade aumenta para 80%⁶. Com este valor de

⁶ Esta situação é observada para o valor de tensão controlada ajustado. A alteração deste valor pode resultar em diferentes condições de tensão.

nível de penetração (80%) e para o dia representativo escolhido, o aumento no número de atuações do regulador de tensão em comparação a um dia sem nuvens (dia limpo) pode chegar a 240%. Neste trabalho, propôs-se um método analítico que, embora não forneça uma estimativa precisa do número de atuações, pode ser utilizado para fazer uma pré-seleção de cenários que são mais preocupantes, que necessitam de estudos mais detalhados.

Discutiu-se também que, com o objetivo de diminuir ou mitigar estes impactos técnicos tanto na tensão como nos equipamentos de regulação, é possível adotar algumas medidas, que podem ser divididas em dois grupos:

- Regulação de tensão tradicional: reguladores de tensão e bancos de capacitores.
- Regulação de tensão moderna: sistemas de armazenamento, equipamentos baseados em eletrônica de potência, uso dos inversores FVs, etc.

De maneira geral, os métodos de regulação de tensão tradicionais são de fácil implementação e contribuem para diminuir a atuação excessiva dos reguladores de tensão, porém são medidas ineficientes para diminuir a intensidade das variações na tensão.

As medidas apresentadas no segundo grupo são capazes de diminuir as variações na tensão, ou mesmo eliminá-las, sem afetar a operação dos reguladores de tensão. Contudo, a implementação destas medidas é mais complexa que a dos métodos tradicionais. Além de serem soluções de custo elevado, o que muitas vezes inviabiliza sua utilização, algumas delas, como uso dos inversores FVs, precisam que seja desenvolvida uma regulamentação apropriada, que obrigue ou remunere o suporte reativo dos inversores, de modo que oferecer este serviço seja atrativo para os proprietários dos geradores FVs.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, sugere-se, para trabalhos futuros:

- Avaliação de cada medida de solução proposta utilizando simulações computacionais;
- Avaliação do custo de cada medida de solução proposta (relação custo-benefício).

REFERÊNCIAS

- [1] European Photovoltaic Industry Association (EPIA), “Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018”. [Online]. Disponível em: <http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/44_epia_gmo_report_ver_17_mr.pdf>. Acessado em Março 2015.
- [2] ANEEL, “Banco de Informação da Geração”. [Online]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acessado em Outubro 2015.
- [3] Navarro, A.; Ochoa, L.; Randles D., “Monte Carlo-Based Assessment of Impacts on Real UK Low Voltage Networks”, *2013 IEEE Power and Energy Society Meeting*, Julho 2013.
- [4] Whitaker, C.; Newmiller, J.; Ropp, M.; Norris, B., “Renewable Systems Interconnection Study: Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology Requirements”, *Sandia Report SAND2008-0946 P*, Fevereiro 2008.
- [5] Sayeef, S., “Solar intermittency: Australia’s clean energy challenge – Characterizing the effect of high penetration solar intermittency on Australian electricity networks”, *CSIRO Report*, Junho 2012.
- [6] Mills, A.; Ahlstrom, M.; Brower, M.; Ellis, A.; George, R.; Hoff, T.; Kroposki, B.; Lenox, C.; Miller, N.; Stein, J.; Wan, Y., “Understanding Variability and Uncertainty of Photovoltaics for Integration with the Electric Power System”, *Berkeley Lab Report LBNL-2855E*, Dezembro 2009.
- [7] Rogers, D. J.; Green, T. C., “An Active-Shunt Diverter for On-load Tap Changers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.28, no.2, pp.649,657, Abril 2013.
- [8] BDEW Technical Guideline, “Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network: Guideline for generating plants’ connection to and parallel operation with the medium-voltage network”. [Online]. Disponível em: <[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/\\$file/BDEW_RL_EA-am-MS-Netz_engl.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/$file/BDEW_RL_EA-am-MS-Netz_engl.pdf)>. Acessado em Agosto 2015.
- [9] Kern, E. C. Jr.; Gulachenski, E. M.; Kern, G. A., “Cloud Effects on Distributed Photovoltaic Generation: Slow Transients at the Gardner, Massachusetts Photovoltaic Experiment”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 4, No.2, pp. 184-190, Junho 1989.

- [10] Van Haaren, R., “Utility Scale Photovoltaic Plant Variability Studies and Energy Storage Optimization for Ramp Rate Control”, *Columbia University Academic Commons*, 2014. [Online]. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.7916/D8H13022>>. Acessado em Agosto 2015.
- [11] Marcos, J.; Marroyo, L.; Lorenzo, E.; Alvira, D.; Izco, E., “Power output fluctuations in large scale PV plants: One year observations with one second resolution and a derived analytic model”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, Issue 2, pp. 218–227, Março 2011.
- [12] Fan, M.; Vittal, V.; Heydt, G. T.; Ayyanar, R., “Probabilistic Power Flow Studies for Transmission Systems With Photovoltaic Generation Using Cumulants”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, No 4, pg. 2251-2261, Dezembro 2012.
- [13] Mills, A.; Wiser R., “Implications of Wide-Area Geographic Diversity for Short-Term Variability of Solar Power”, *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*, Setembro 2010.
- [14] Mills, A.; Ahlstrom, M.; Brower, M.; Ellis, A.; George, R.; Hoff, T.; Kroposki, B.; Lenox, C.; Miller, N.; Milligan, M.; Stein, J.; Wan, Y., “Dark Shadows”, *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*, Janeiro 2011.
- [15] Hoff, T. E.; Perez, R., “Quantifying PV Power Output Variability”, *Solar Energy 84*, Elsevier, Setembro 2010.
- [16] National Renewable Energy Laboratory, “Oak Ridge National Laboratory: Rotating Shadowband Radiometer”. [Online]. Disponível em: <http://www.nrel.gov/midc/ornl_rsr/>. Acessado em Novembro 2014.
- [17] Yingli Solar, “YGE 60 Cell 40mm Series Datasheet”. [Online]. Disponível em: <http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf>. Acessado em Fevereiro 2015.
- [18] ANEEL, “Empreendimentos fotovoltaicos em funcionamento”. [Online]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=12&fase=3>>. Acessado em Dezembro 2015.
- [19] Solar Power Knowledge Project, “Edge-of-Cloud Effect, may not be what you think”. [Online]. Disponível em: <<https://solarhomenews.wordpress.com/2009/09/03/edge-of-cloud-effect-may-not-be-what-you-think-it-is/>>. Acessado em Dezembro 2015.
- [20] EPRI, “OpenDSS Manual”. [Online]. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/electricdss/>>. Acessado em: Abril 2015.

- [21] Broderick, R. J.; Quiroz, J. E.; Reno, M. J.; Ellis, A.; Smith, J; Dugan, R., “Time Series Power Flow Analysis for Distribution Connected PV Generation”, *Sandia Report SAND2013-0537*, Janeiro 2013.
- [22] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1302-1313. Agosto 1995.
- [23] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_6_Retifica%C3%A7%C3%A3o_1.pdf>. Acessado em Junho 2015.
- [24] Torquato, R.; Shi, Q.; Xu, W.; Freitas, W., “A Monte Carlo Simulation Platform for Studying Low Voltage Residential Networks”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2766-2776, Julho 2014.
- [25] NERC, “Special Reliability Assessment: Interconnection Requirements for Variable Generation”. [Online]. Disponível em: <http://www.nerc.com/docs/pc/ivgtf/NERC_IVGTF_1-3_DRAFT.pdf>. Acessado em Setembro 2015.
- [26] Ari, G. K.; Baghzouz, Y., “Impact of high PV penetration on voltage regulation in electrical distribution systems,” *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, vol., no., pp. 744,748, 14-16, Junho 2011.
- [27] Mather, B. A., “Quasi-Static Time-Series Test Feeder for PV Integration Analysis on Distribution Systems,” *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, Julho 2012.
- [28] Ghosh, S.; Rahman, S.; Pipattanasomporn, M., “Local Distribution Voltage Control by Reactive Power Injection from PV Inverters Enhanced with Active Power Curtailment”, *2014 IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition*, Julho 2014.
- [29] Short, T. A.; “*Electric Power Distribution Handbook*”, CRC Press, 2004.
- [30] Toshiba, “Manual de Instrução para Reguladores de Tensão Monofásicos”. [Online]. Disponível em: <<http://www.toshiba-bhz.com.br/tic-bhz/downloads/EP-40021%20rev%203%20REGULADOR.pdf>>. Acessado em Setembro 2015.
- [31] CERNE, “Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação”. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/012/documento/relatorio_vida_util_volume_2.pdf>. Acessado em Setembro 2015.
- [32] Liu, E.; Bebic, J., “Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics,” *Subcontract Report NREL/SR-581-42298*, Fevereiro 2008.

- [33] COOPER, “Cooper Power System's VR-32 Regulator and CL-2A Control Installation, Operation and Maintenance Instructions Parts Replacement Information,” *COOPER Service Information S225-10-5*, Outubro, 1992.
- [34] Blooming, T. M.; Carnovale, D. J., “Capacitor Application Issues,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.44, no.4, pp.1013,1026, Julho - Agosto. 2008.
- [35] Pattani, N., “Transmission & Distribution Considerations For Distributed Generation,” [Online]. Disponível em: <http://www.appro.org/docs/HONIconnectionsJan2009/Naren_Pattani_%20-Tx_presentation_at_%20APPrO-CanWEA-OWA_workshop,Jan_22_2009.pdf>. Acessado em Setembro 2015.
- [36] Beach, T.; Kozinda, A.; Rao, V., “Advanced Inverters for Distributed PV: Latent Opportunities for Localized Reactive Power Compensation”, *Cal x Clean Coalition Energy C226*. [Online]. Disponível em: <http://www.clean-coalition.org/site/wp-content/uploads/2013/10/CC_PV_AI_Paper_Final_Draft_v2.5_05_13_2013_AK.pdf>. Acessado em Setembro 2015.
- [37] Smith, J. W.; Sunderman, W.; Dugan, R.; Seal, B., “Smart inverter volt/var control functions for high penetration of PV on distribution systems”, *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, vol., no., pp.1,6, 20-23 Março 2011.
- [38] Jenkins, N.; Allan, R.; Crossley, P.; Kirschen, D.; Strbac, G., “Embedded Generation”, *IEEE Power and Energy Series 31*, 2000.
- [39] SMA Solar Technologies Technical Information, “Q at Night”. [Online]. Disponível em: <<http://files.sma.de/dl/18858/Q-at-Night-TI-en-11.pdf>>. Acessado em Setembro 2015.
- [40] Liu, Y.; Garces, L. J.; Bose, S., “System and Method for Controlling Ramp Rate of Solar Photovoltaic system”, *U.S. Patent 20100057267*, Março 2010.
- [41] Zipp, K., “Ultracapacitor Storage Can Help Build a Reliable Solar Grid”. [Online]. Disponível em: <<http://www.solarpowerworldonline.com/2014/01/ultracapacitors-grid-scale-solar-smoothing/>>. Acessado em Setembro 2015.
- [42] Poonpun, P.; Jewell, W. T., “Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.23, no.2, pp.529,534, Junho 2008.
- [43] Dahl, T., “Photovoltaic Technology White Paper”. [Online]. Disponível em: <http://www.polarpower.org/static/docs/PVWhitePaper1_31.pdf>. Acessado em Setembro, 2015.
- [44] Schoenung, S., “Energy Storage Systems Cost Update, A Study for the DOE Energy Storage Systems Program,” *Sandia Report SAND2011-2730*, Abril 2011.

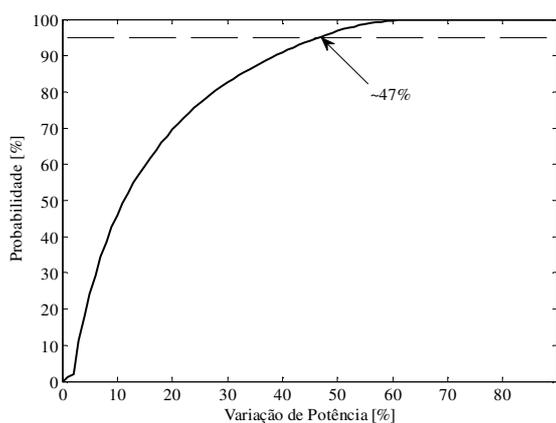
APÊNDICES

APÊNDICE A RESULTADOS DETALHADOS DOS ESTUDOS COM O GRUPO DO DADOS DO NREL E DO CANADÁ

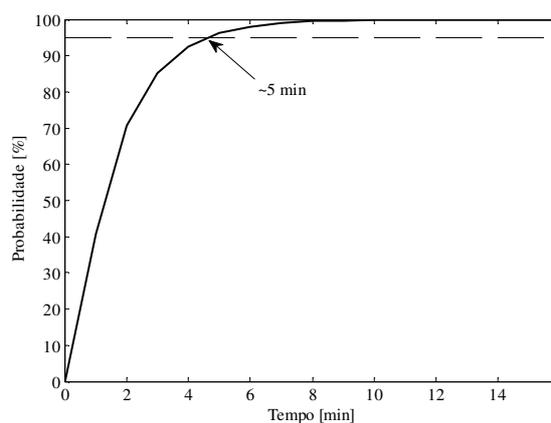
Neste apêndice são apresentados os resultados detalhados para os grupos de dados do NREL e do Canadá, para todos os estudos realizados neste trabalho. As informações contidas neste apêndice foram apresentadas de forma resumida ao longo desta dissertação, em geral, na forma de tabelas.

A.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA PASSAGEM DE NUVENS SOBRE OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

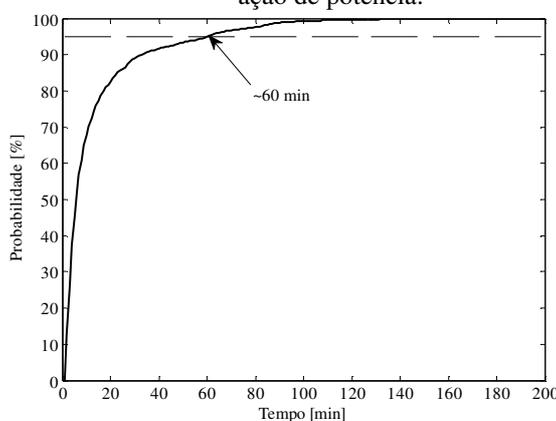
Nesta seção, são apresentadas as distribuições cumulativas de probabilidade da variação de potência, da duração da variação de potência e da duração de um evento completo para os dados do NREL (Figura A.1) e do Canadá (Figura A.2), bem como o número de variações de potência ao longo do dia com a maior ocorrência de transitórios.



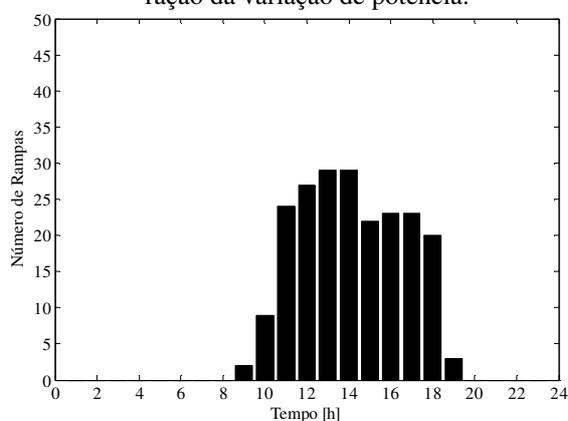
(a) Distribuição cumulativa de probabilidade da variação de potência.



(b) Distribuição cumulativa de probabilidade da duração da variação de potência.

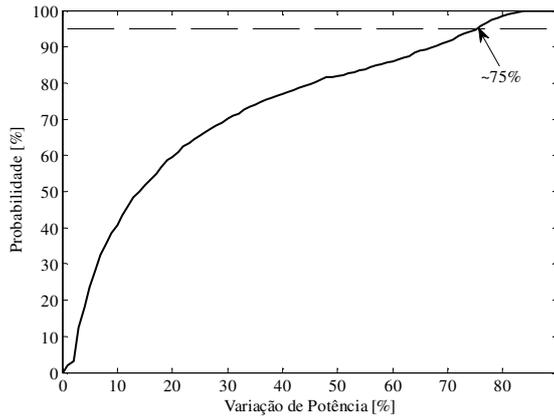


(c) Distribuição cumulativa de probabilidade da duração de evento completo.

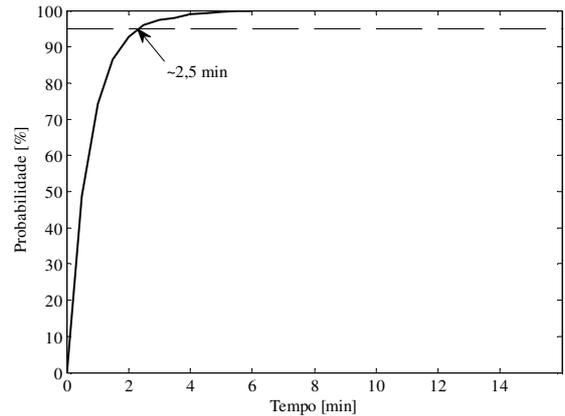


(d) Variações de potência ao longo do dia com a maior ocorrência de transitórios.

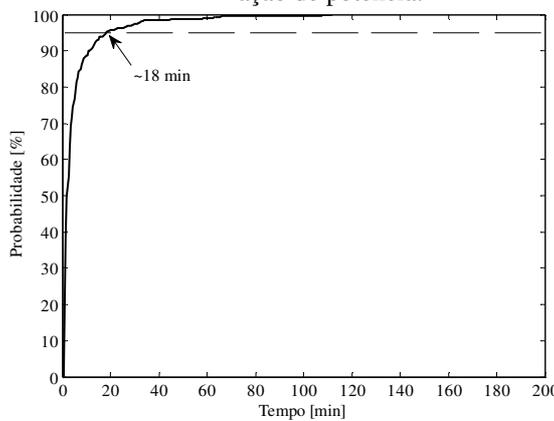
Figura A.1 – Valores representativos para os parâmetros de caracterização, dados do NREL.



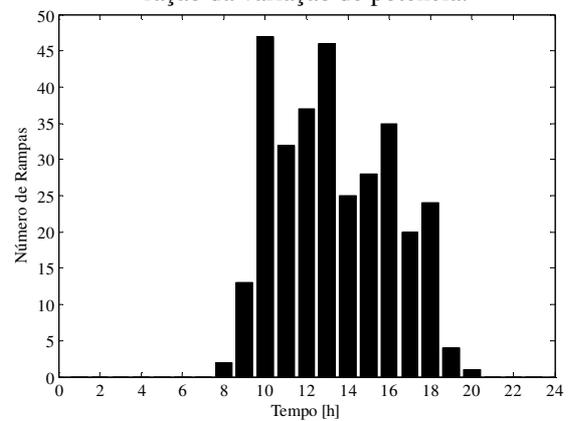
(a) Distribuição cumulativa de probabilidade da variação de potência.



(b) Distribuição cumulativa de probabilidade da duração da variação de potência.



(c) Distribuição cumulativa de probabilidade da duração de evento completo.



(d) Variações de potência ao longo do dia com a maior ocorrência de transitórios.

Figura A.2 – Valores representativos para os parâmetros de caracterização, dados do Canadá.

A.2 ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE MÉDIA TENSÃO

Nesta seção, é apresentado o detalhamento dos resultados obtidos nos estudos realizados no sistema-teste de média tensão, quando utilizado o dia representativo para o grupo de dados do NREL e do Canadá.

A Figura A.3 apresenta a variação da tensão na barra que registrou a menor tensão ao longo do dia para cada um dos casos estudados na Seção 5.2, considerando os dados do NREL, enquanto a Figura A.4 considera os dados canadenses.

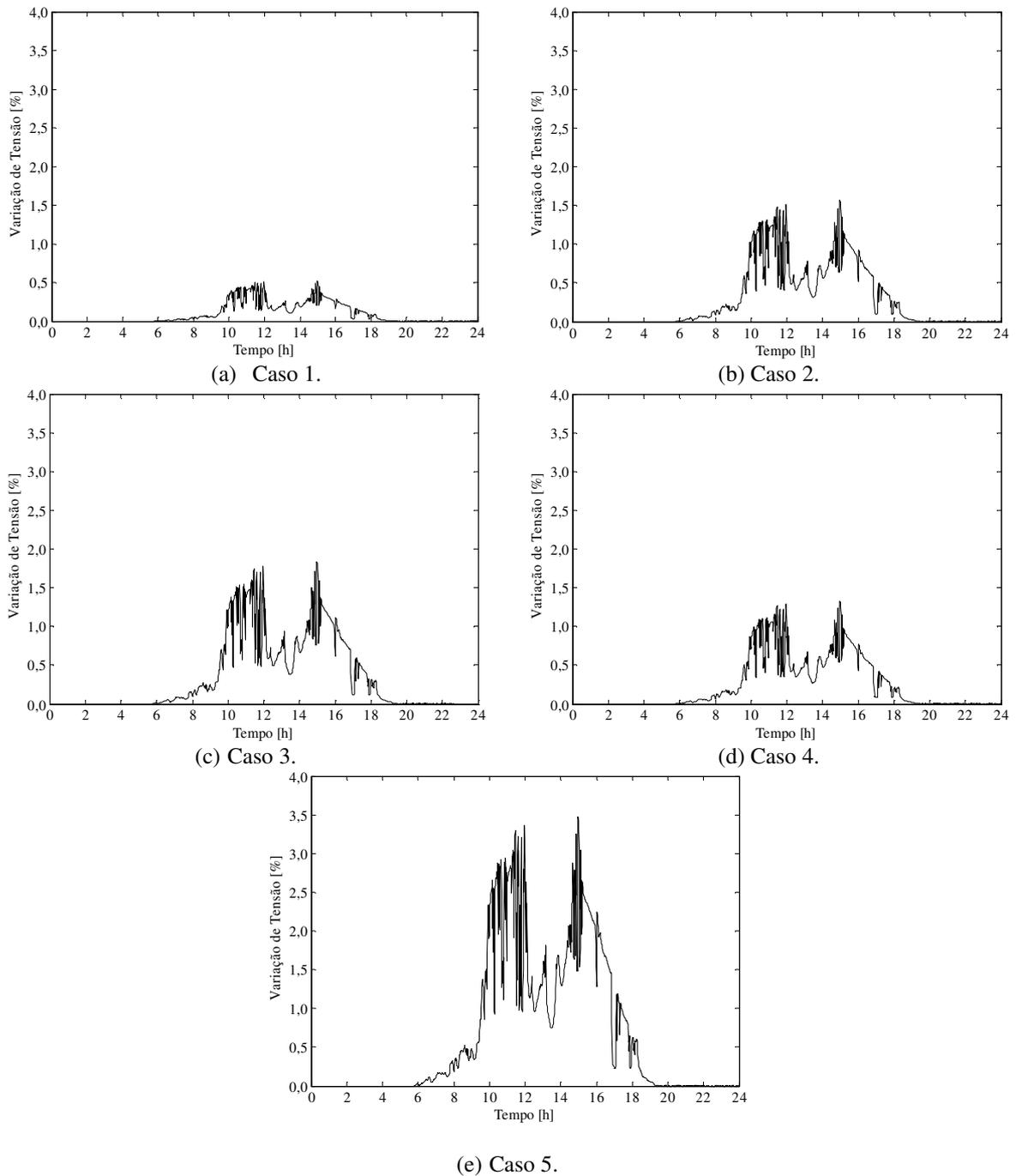


Figura A.3 – Variação de tensão para todos os casos simulados, dados NREL, sistema de média tensão.

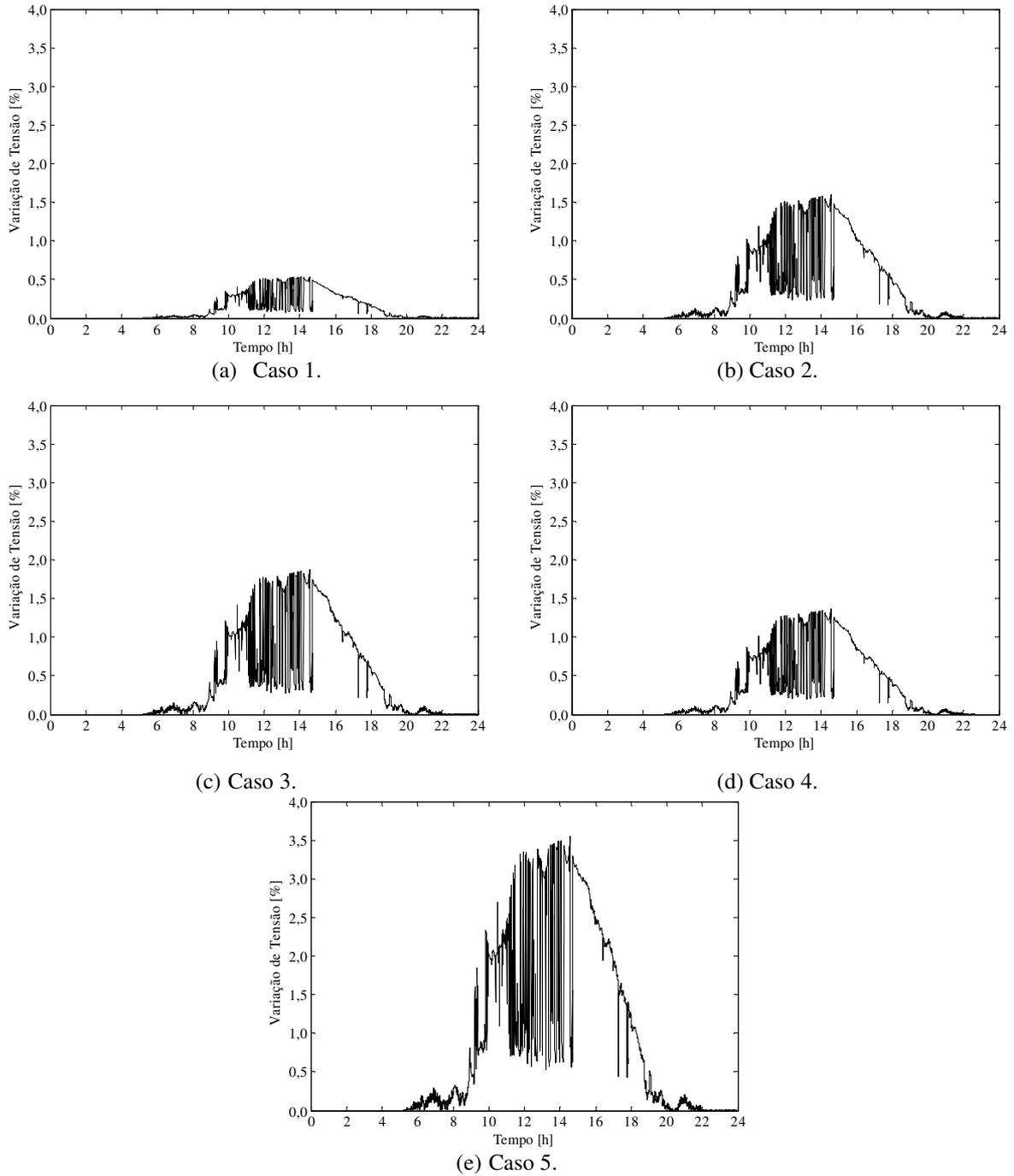


Figura A.4 – Variação de tensão para todos os casos simulados, dados Canadá, sistema de média tensão.

A Figura A.5 (NREL) e a Figura A.6 (Canadá) apresentam a maior variação de tensão registrada no sistema-teste a cada 15 minutos, independentemente da barra na qual ela variação ocorra. Estes resultados são referentes aos estudos da Seção 5.3.2.

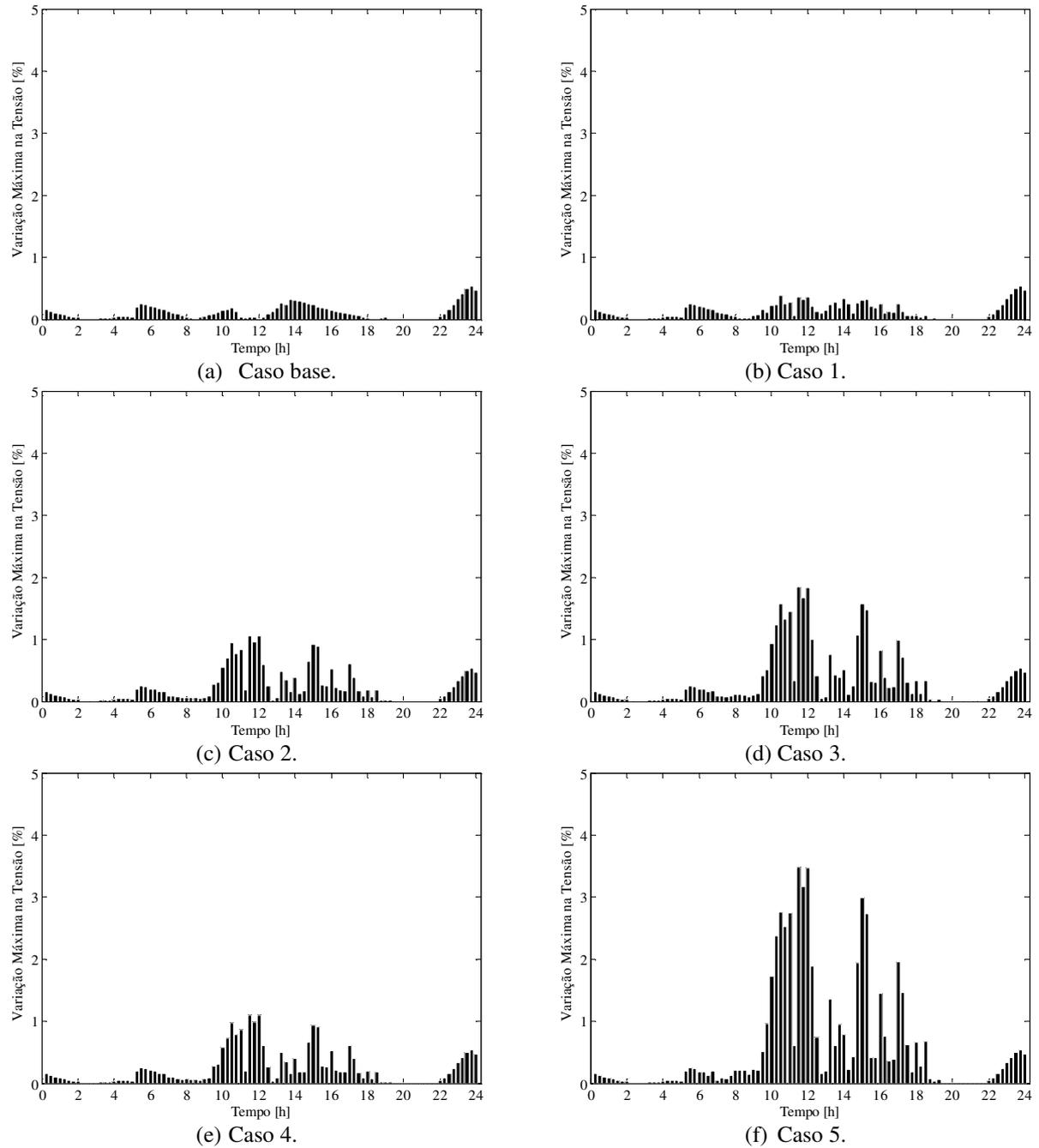


Figura A.5 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados NREL, sistema de média tensão.

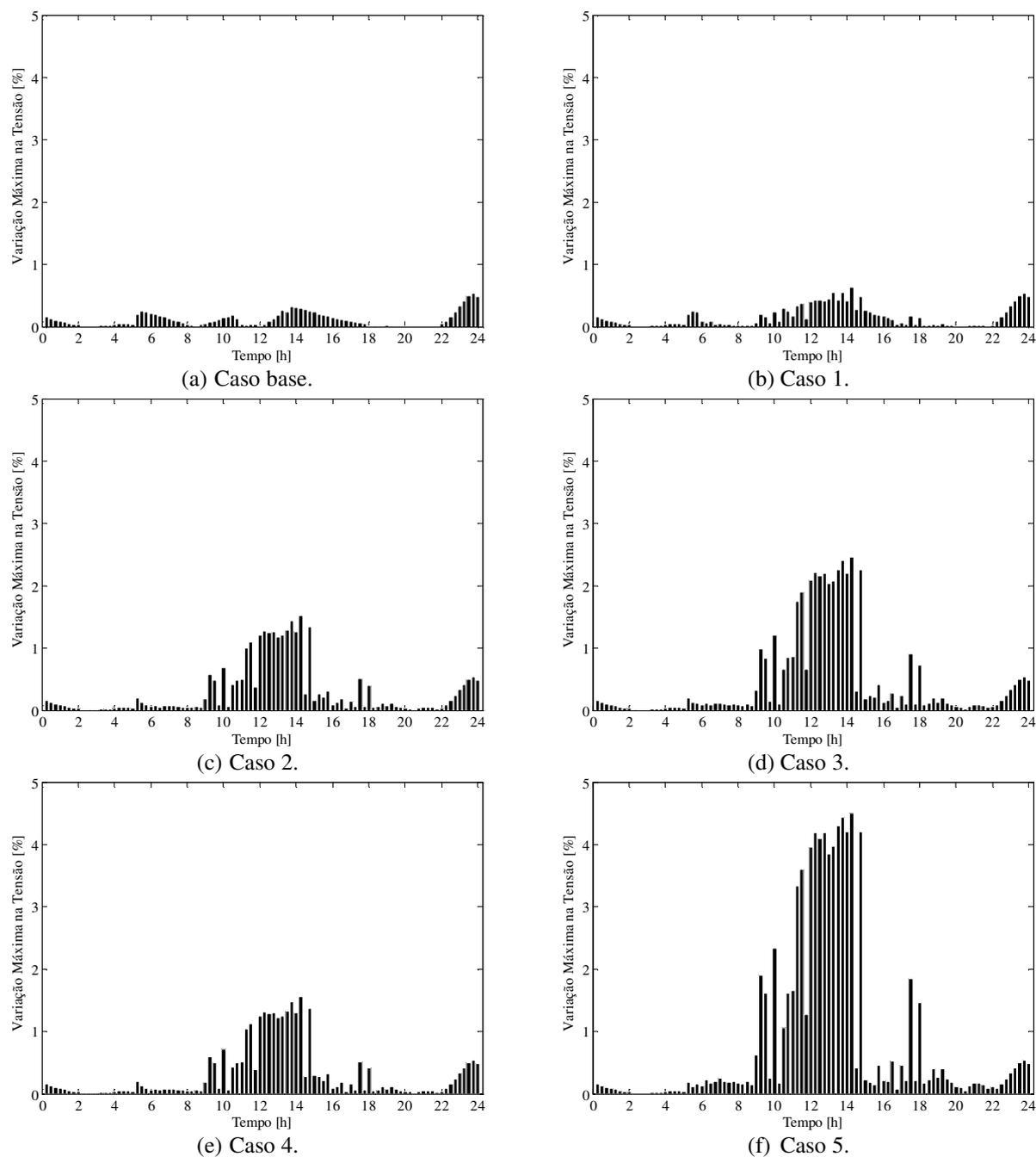
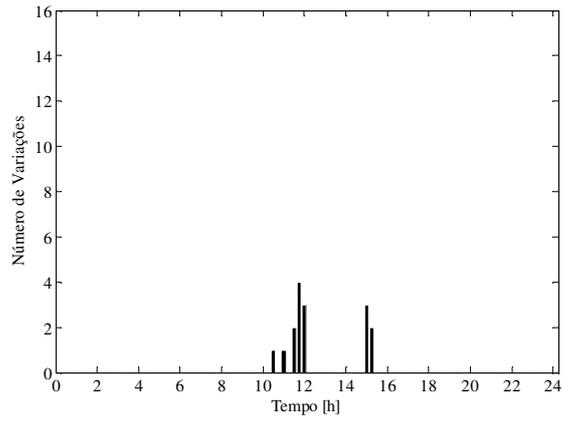
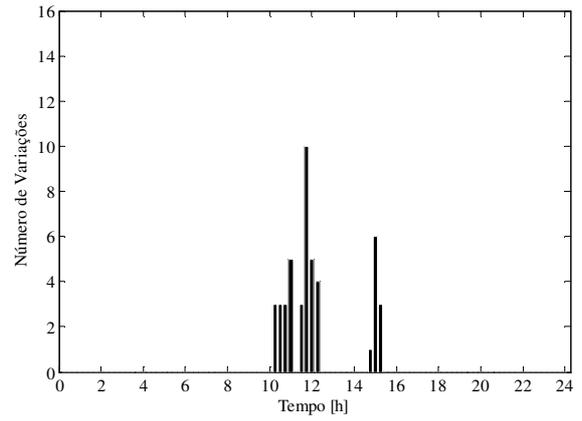


Figura A.6 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Canadá, sistema média tensão.

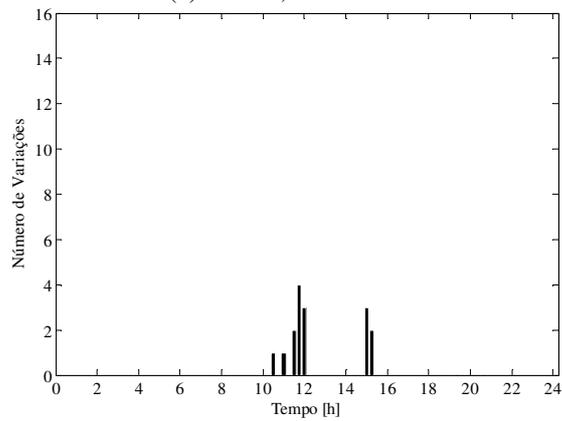
A Figura A.7 e a Figura A.8 apresentam, para os dados do NREL e do Canadá, respectivamente, o número de variações de tensão acima de 0,5% que foi registrado em um intervalo de 15 minutos. Estas variações correspondem somente às variações provocadas pela passagem de nuvens sobre os sistemas FVs. Os resultados para o caso 1 não são apresentados pois não foram registradas variações maiores que 0,5% devido à passagem de nuvens sobre os sistemas FVs.



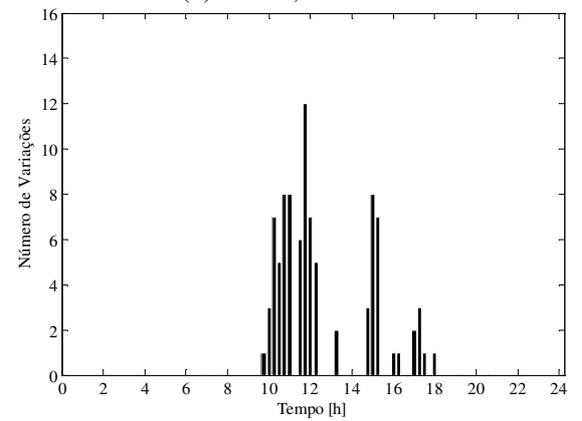
(a) Caso 2, barra 165.



(b) Caso 3, barra 16.

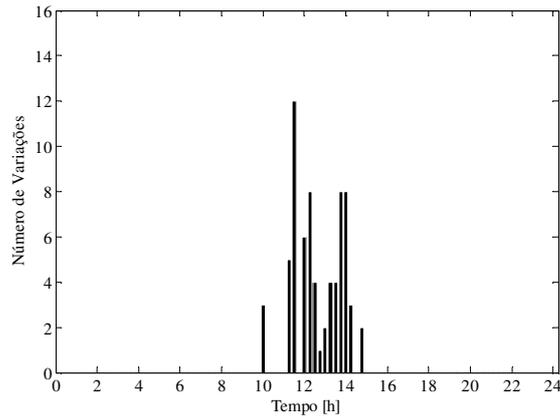


(c) Caso 4, barra 16.

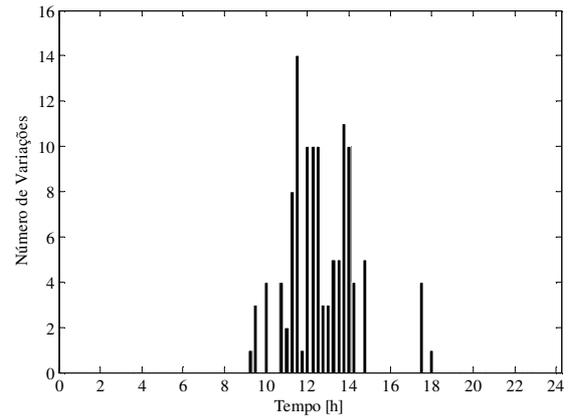


(d) Caso 5, barra 16.

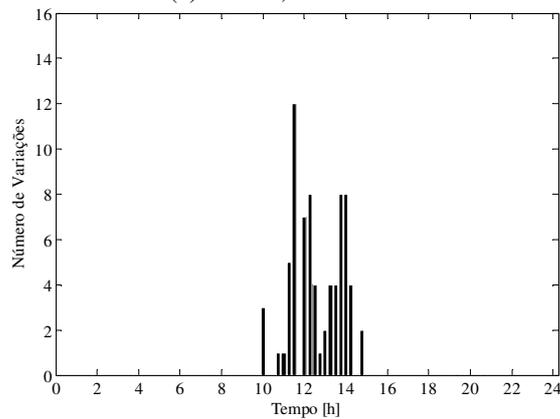
Figura A.7 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados NREL, sistema de média tensão.



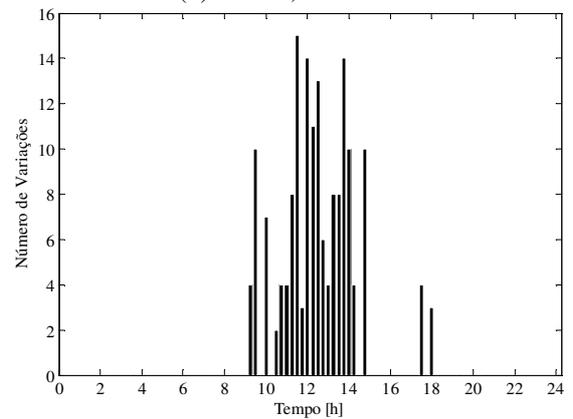
(a) Caso 2, barra 165.



(b) Caso 3, barra 16.



(c) Caso 4, barra 16.



(d) Caso 5, barra 16.

Figura A.8 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Canadá, sistema de média tensão.

A.3 ESTUDOS REALIZADOS NO SISTEMA-TESTE DE BAIXA TENSÃO

Nesta seção é apresentado o detalhamento dos estudos realizados na Seção 5.5, para os dados do NREL e do Canadá.

A Figura A.9 (NREL) e a Figura A.10 (Canadá) apresentam a variação da tensão, provocada pela passagem de nuvens sobre sistemas FVs, do sistema-teste de baixa tensão, para cada um dos casos analisados.

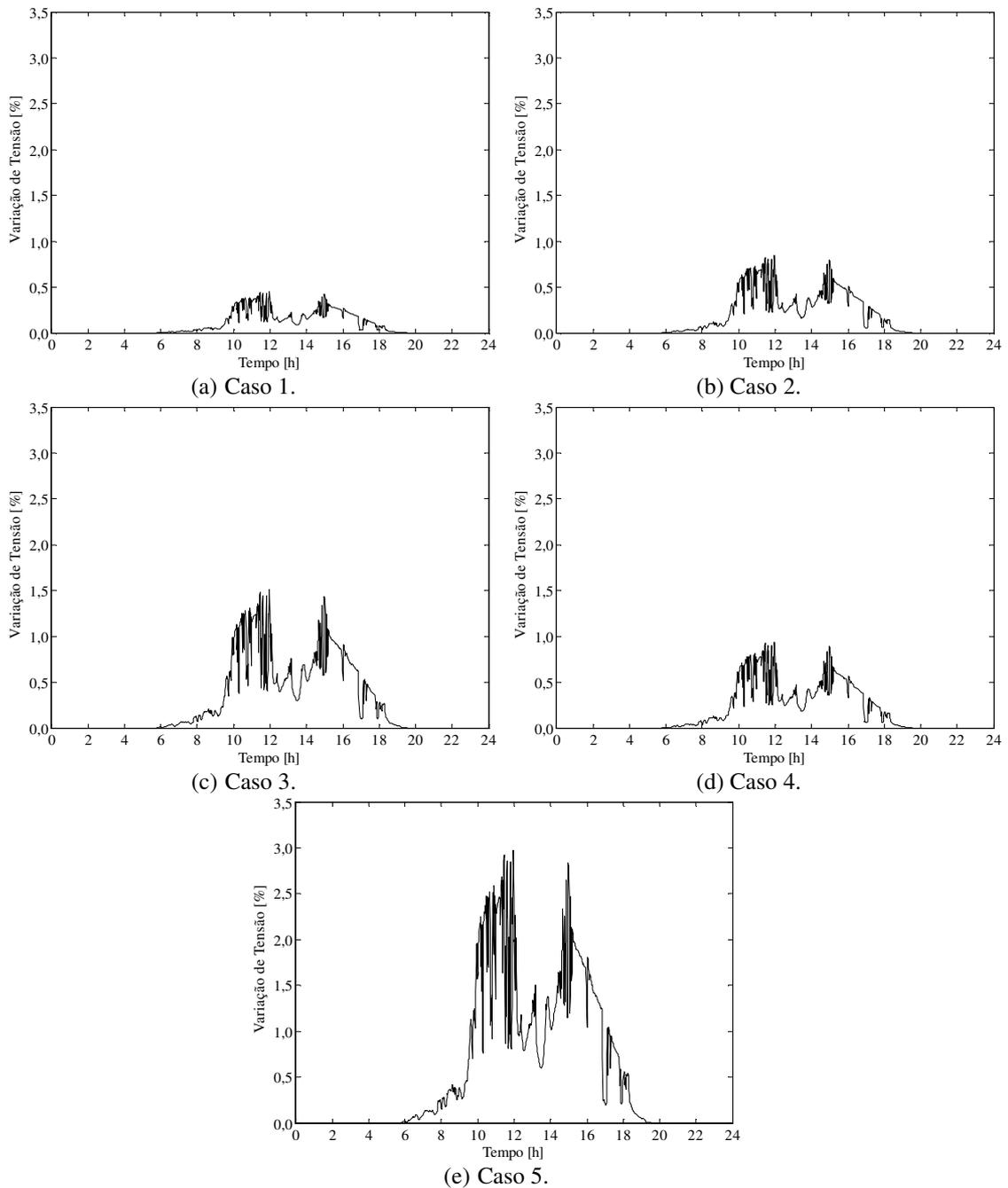


Figura A.9 – Diferença entre os perfis de tensão de cada caso e o caso base, dados NREL, sistema de baixa tensão.

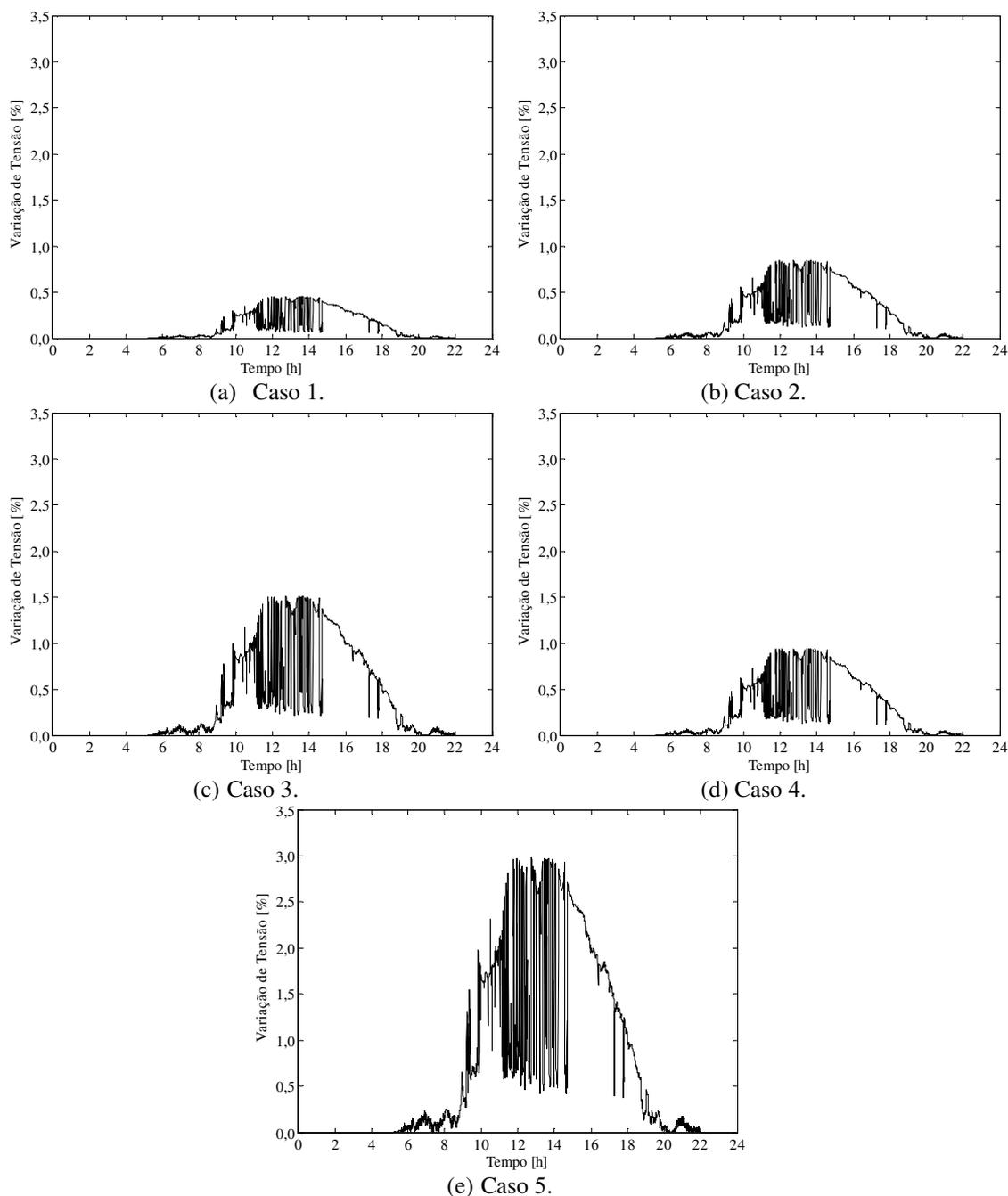
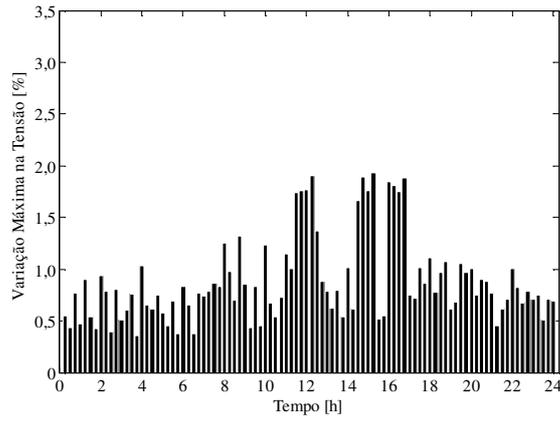
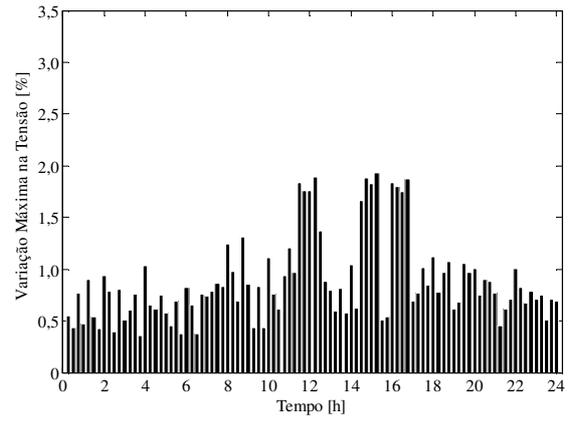


Figura A.10 – Diferença entre os perfis de tensão de cada caso e o caso base, dados Canadá, sistema de baixa tensão.

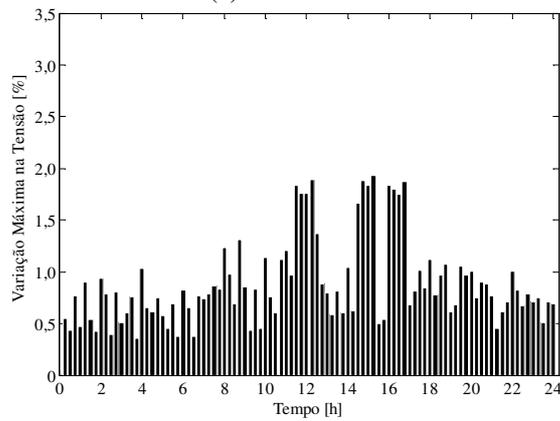
A máxima variação de tensão que ocorre no sistema-teste de baixa tensão, considerando um intervalo de tempo de 15 minutos, é apresentada na Figura A.11 considerando-se os dados do NREL e na Figura A.12 considerando-se os dados do Canadá. Esta análise considera, para cada intervalo de tempo, as variações de tensão em cada uma das barras do sistema, mostrando qual a maior.



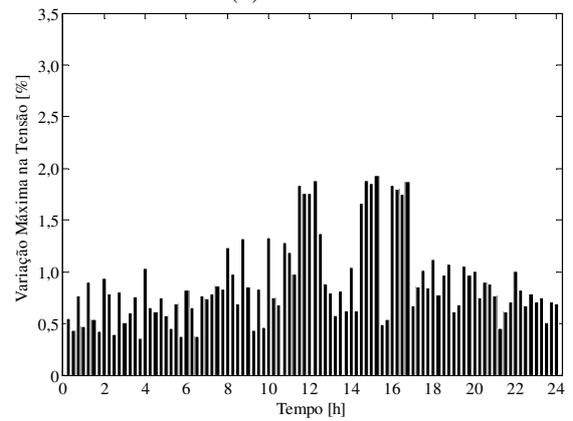
(a) Caso base.



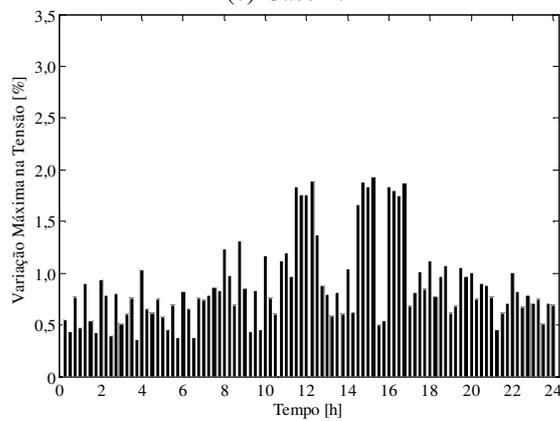
(b) Caso 1.



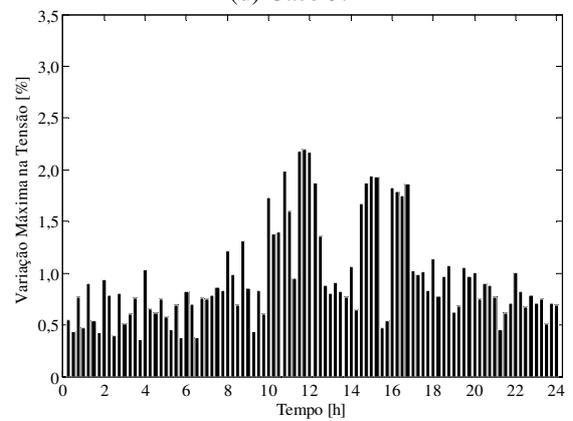
(c) Caso 2.



(d) Caso 3.



(e) Caso 4.



(f) Caso 5.

Figura A.11 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados NREL, sistema de baixa tensão.

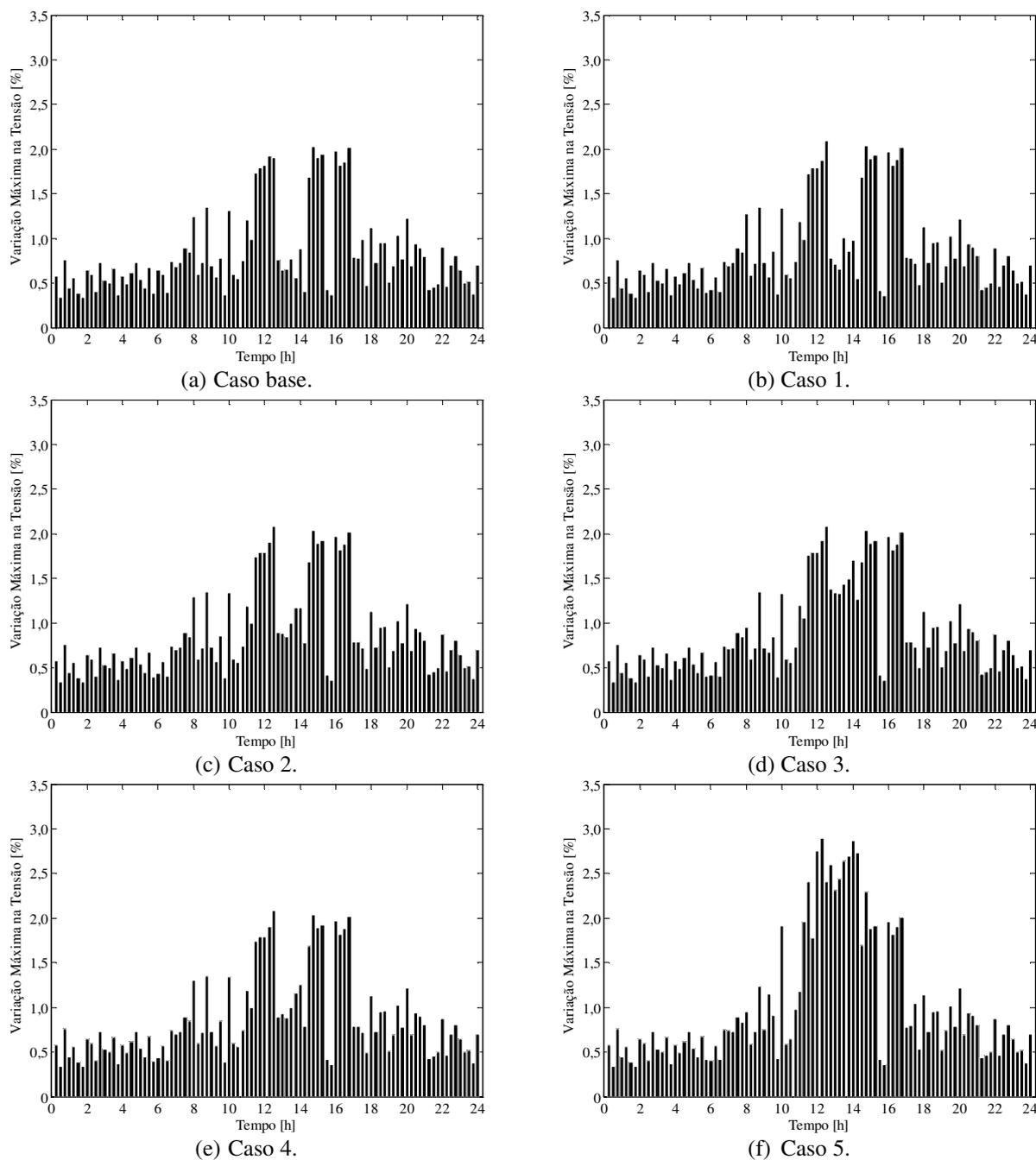
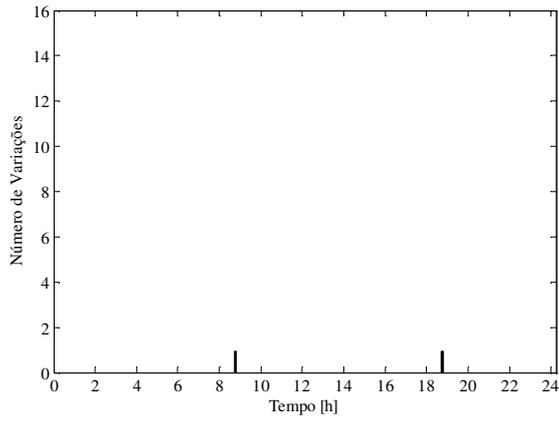
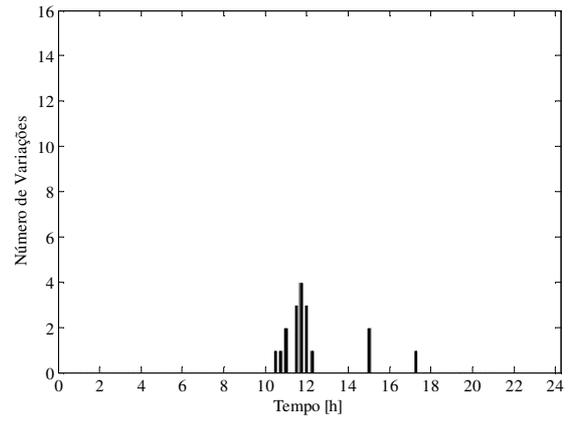


Figura A.12 – Maiores variações de tensão registradas a cada 15 minutos, dados Canadá, sistema de baixa tensão.

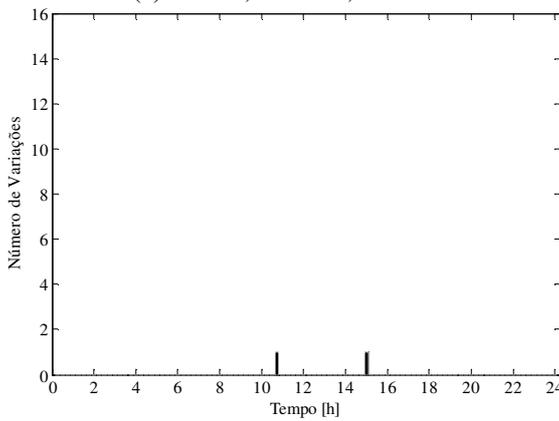
A Figura A.13 e a Figura A.14 apresentam, para os dados do NREL e do Canadá respectivamente, o número de variações de tensão acima de 0,5%, a cada intervalo de 15 minutos, para cada um dos casos estudados neste trabalho. Não são apresentados resultados referentes ao caso 1 pois este não apresentou nenhuma variação de tensão acima de 0,5% para os dois grupos de dados.



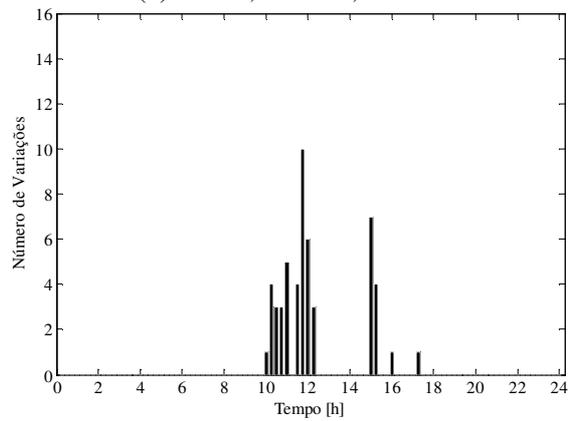
(a) Caso 2, barra 36, fase C.



(b) Caso 3, barra 15, fase C.

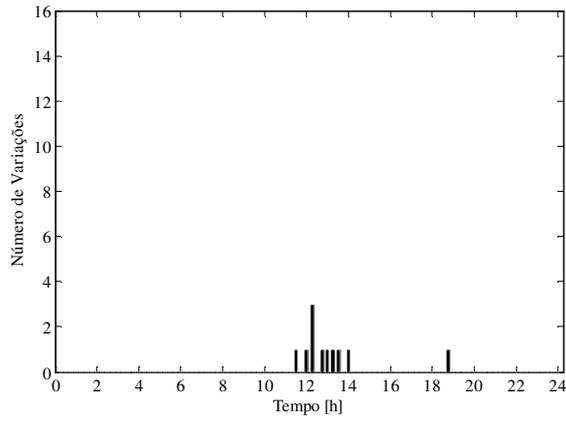


(c) Caso 4, barra 15, fase C.

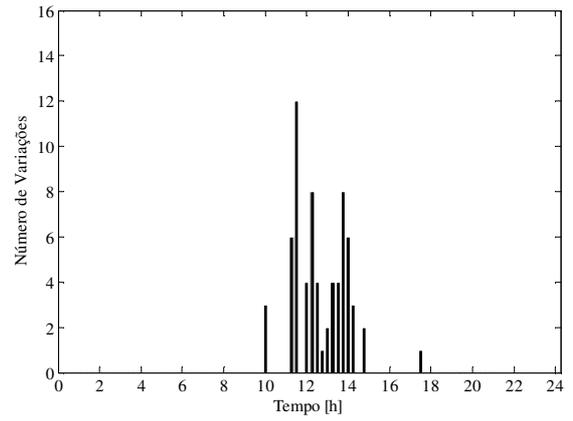


(d) Caso 5, barra 15, fase C.

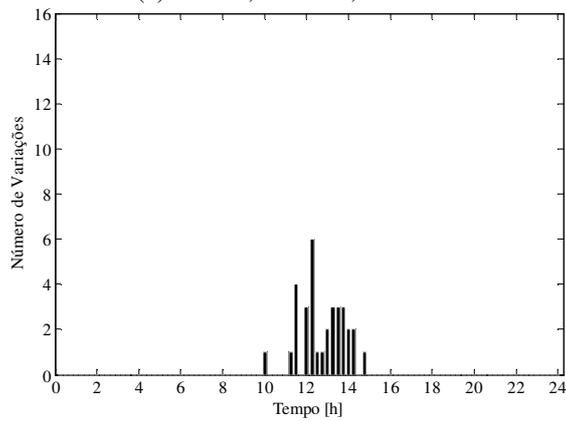
Figura A.13 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados NREL, sistema de baixa tensão.



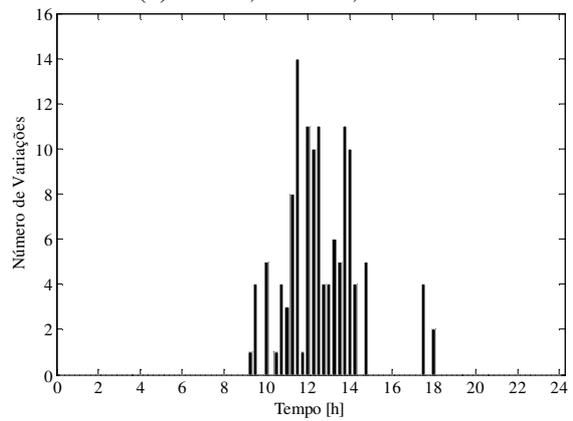
(a) Caso 2, barra 36, fase C.



(b) Caso 3, barra 15, fase C.



(c) Caso 4, barra 15, fase C.



(d) Caso 5, barra 15, fase C.

Figura A.14 – Número de variações de tensão acima de 0,5%, dados Canadá, sistema de baixa tensão.

APÊNDICE B DADOS DO SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

A Tabela B.1 apresenta os dados da carga original do sistema-teste de média tensão, enquanto a Tabela B.2 apresenta os dados das linhas da rede.

Tabela B.1 – Dados da carga original, sistema-teste de média tensão

| Barra | Potência Ativa (kW) | Potência Reativa (kvar) |
|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| 7 | 101,40 | 48,60 |
| 12 | 253,60 | 121,50 |
| 13 | 169,00 | 81,00 |
| 16 | 50,70 | 24,30 |
| 18 | 25,40 | 12,20 |
| 22 | 25,40 | 12,20 |
| 24 | 50,70 | 24,30 |
| 25 | 50,70 | 24,30 |
| 27 | 25,40 | 12,20 |
| 28 | 38,00 | 18,20 |
| 39 | 5,10 | 2,40 |
| 42 | 3.160,00 | 1.530,00 |
| 45 | 2.110,00 | 1.020,00 |
| 54 | 169,00 | 81,00 |
| 58 | 76,10 | 36,50 |
| 63 | 25,40 | 12,20 |
| 64 | 25,40 | 12,20 |
| 66 | 15,20 | 7,30 |
| 67 | 25,40 | 12,20 |
| 107 | 25,40 | 12,20 |
| 114 | 25,40 | 12,20 |
| 127 | 50,70 | 24,30 |
| 128 | 50,70 | 24,30 |
| 129 | 1.409,00 | 682,00 |
| 142 | 530,00 | 256,70 |
| 143 | 50,70 | 24,30 |
| 144 | 1.103,80 | 534,60 |
| 164 | 551,90 | 267,30 |
| 165 | 1.690,00 | 810,00 |
| 166 | 700,00 | 200,00 |
| 167 | 1.000,00 | 300,00 |
| 168 | 1.690,00 | 810,00 |
| 170 | 1.108,90 | 214,00 |
| Total | 16.388,4 | 7.264,50 |

Tabela B.2 – Dados de linhas, sistema-teste de média tensão.

| De | Para | Resistência (Ω) | Reatância (Ω) |
|-----------|-------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| Subreg | 126 | 0,2370 | 0,3367 |
| 126 | 127 | 0,0489 | 0,0122 |
| 126 | 128 | 0,0167 | 0,0042 |
| 126 | 129 | 0,0098 | 0,0102 |
| 129 | 135 | 0,0804 | 0,0841 |
| 135 | 144 | 0,0025 | 0,0010 |
| 135 | 138 | 0,1165 | 0,1218 |
| 138 | 142 | 0,0031 | 0,0012 |
| 138 | 143 | 0,0597 | 0,0148 |
| 138 | 147 | 0,1075 | 0,2103 |
| 147 | 170 | 0,1117 | 0,2375 |
| 147 | 148 | 0,1406 | 0,2988 |
| 148 | 166 | 0,0653 | 0,1387 |
| 148 | 97 | 0,5265 | 1,1081 |
| 99 | 114 | 0,2633 | 0,5596 |
| 99 | 991 | 0,0980 | 0,1026 |
| 991 | 104 | 0,0000000273 | 0,000000089 |
| 104 | 98 | 0,1205 | 0,1260 |
| 98 | 167 | 0,0413 | 0,0432 |
| 98 | 95 | 0,1147 | 0,1767 |
| 95 | 164 | 0,1316 | 0,2797 |
| 95 | 83 | 0,5247 | 1,1103 |
| 83 | 165 | 0,0964 | 0,0375 |
| 83 | 168 | 0,0866 | 0,1007 |
| 83 | 65 | 0,1429 | 0,3038 |
| 65 | 66 | 0,0263 | 0,0086 |
| 66 | 67 | 0,2333 | 0,0760 |
| 65 | 1 | 0,0489 | 0,0676 |
| 1 | 63 | 0,2455 | 0,1139 |
| 1 | 64 | 0,2709 | 0,0956 |
| 1 | 4 | 0,1173 | 0,1227 |
| 4 | 107 | 0,4139 | 0,1965 |
| 4 | 42 | 0,0094 | 0,0098 |
| 42 | 50 | 0,0021 | 0,0022 |
| 50 | 54 | 0,0836 | 0,0757 |
| 4 | 39 | 0,1414 | 0,1166 |
| 39 | 32 | 0,1276 | 0,0463 |
| 32 | 45 | 0,0514 | 0,0652 |
| 45 | 11 | 0,1791 | 0,1864 |
| 11 | 58 | 0,2341 | 0,0911 |

| De | Para | Resistência (Ω) | Reatância (Ω) |
|-----------|-------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 11 | 13 | 0,0687 | 0,0267 |
| 11 | 9 | 0,0446 | 0,0467 |
| 9 | 12 | 0,0759 | 0,0189 |
| 9 | 7 | 0,0451 | 0,0434 |
| 32 | 33 | 0,0386 | 0,0202 |
| 33 | 28 | 0,8670 | 0,2826 |
| 28 | 19 | 0,1512 | 0,0493 |
| 19 | 18 | 0,1093 | 0,0356 |
| 18 | 16 | 0,7807 | 0,2983 |
| 19 | 22 | 0,1034 | 0,0337 |
| 22 | 23 | 0,1103 | 0,0360 |
| 23 | 25 | 0,1161 | 0,0378 |
| 23 | 27 | 0,3507 | 0,1143 |
| 23 | 24 | 0,0273 | 0,0089 |

APÊNDICE C MODELAGEM DO REGULADOR DE TENSÃO NO OPENDSS

O OpenDSS oferece uma opção de controle capaz de simular o comportamento de reguladores de tensão e de transformadores que realizam mudança de *tap* com carga (OLTC – *On Load Tap Changer*). No OpenDSS, este modelo contempla um tipo de compensação de queda de tensão conhecido como *line-drop*, ou seja, o regulador compensa a queda de tensão ao longo da linha, permitindo que seja controlada a tensão em uma outra barra da rede, e não somente na saída do regulador.

Este tipo de compensação utiliza um modelo interno, em menor escala, de uma linha de distribuição, que é ajustado para corresponder à impedância da linha. O usuário ajusta os valores de R e X para ajustar adequadamente a compensação. O controlador ajusta os *taps* baseado na tensão medida após a compensação, ou seja, na tensão na saída do regulador descontada a queda no circuito de compensação, como pode ser visto na Figura C.1 [29].

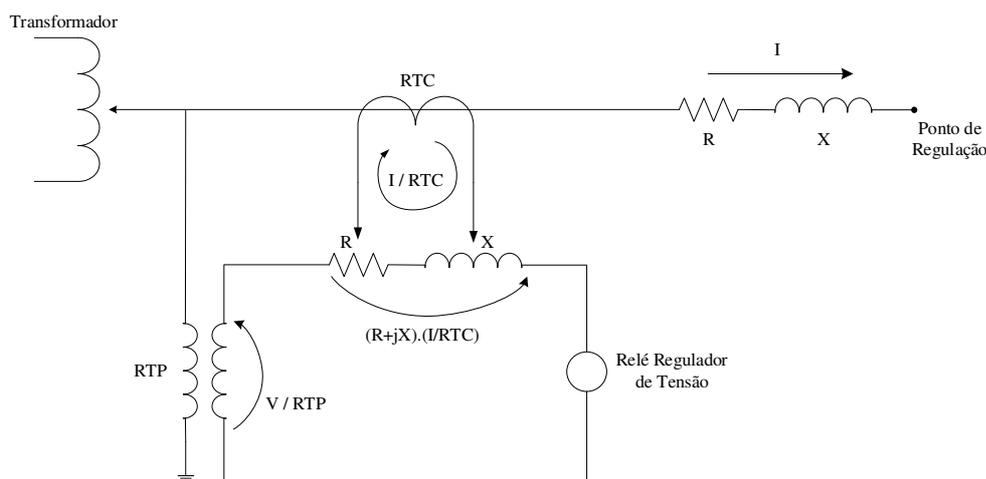


Figura C.1 – Circuito do compensador tipo *line-drop*.

Ao se definir o regulador de tensão no OpenDSS é necessário definir os seguintes parâmetros [20]:

- ***Vreg***: tensão, em volts, que se deseja atingir no enrolamento controlado. Ao multiplicar este valor pelo valor de *ptratio* tem-se a tensão no enrolamento controlado.
- ***bus***: barra cuja tensão será controlada.
- ***delay***: tempo de atraso, em segundos, entre o momento no qual a tensão sai da faixa controlada e o instante no qual a mudança de *tap* se inicia. Este tempo é utilizado para coordenar reguladores em série e para evitar alterações excessivas de *taps*.
- ***band***: banda morta (ou zona morta), em volts, da tensão na barra controlada.

- *ptratio*: razão de conversão da tensão do enrolamento que está sendo monitorado para a tensão do regulador (relação de transformação do transformador de potencial do regulador de tensão).
- *winding*: indica qual enrolamento está sendo monitorado pelo controle (tipicamente, o enrolamento 2).

A influência de alguns destes parâmetros na atuação do regulador de tensão é ilustrada na Figura C.2.

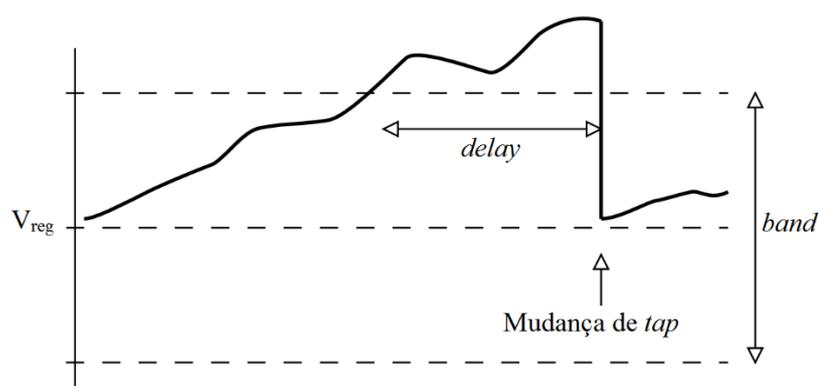


Figura C.2 – Controle de tensão efetuado por um regulador de tensão.

APÊNDICE D DADOS DO SISTEMA-TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

A Tabela D.1 apresenta os dados do transformador de distribuição do sistema-teste de baixa tensão, enquanto na Tabela D.2 podem ser encontrados os dados relativos às linhas. A Tabela D.3 apresenta os dados referentes à carga original do sistema. Para a realização das simulações, o valor das cargas foi multiplicado por um fator de 4,5, de modo que o carregamento máximo registrado na rede durante o dia fosse de aproximadamente 37 kVA. Ressalta-se que, como foi atribuído um perfil aleatório de carga para cada um dos consumidores, a demanda máxima que ocorre na rede durante o dia é menor que o total da carga original. Três diferentes tipos de linhas são utilizados nesta rede. A impedância por unidade de comprimento de cada um destes tipos é dada por:

Tipo 1: 4 condutores (3 fases + 1 neutro)

$$Z_{tipo_1} = \begin{bmatrix} 0,51 + j0,99 & & & \\ 0,06 + j0,72 & 0,51 + j0,99 & & \\ 0,06 + j0,66 & 0,06 + j0,72 & 0,51 + j0,99 & \\ 0,06 + j0,72 & 0,06 + j0,66 & 0,06 + j0,63 & 0,71 + j0,98 \end{bmatrix} \Omega/km$$

Tipo 2: 3 condutores (2 fases + 1 neutro)

$$Z_{tipo_2} = \begin{bmatrix} 0,71 + j0,98 & & \\ 0,06 + j0,72 & 0,71 + j0,98 & \\ 0,06 + j0,66 & 0,06 + j0,72 & 0,71 + j0,98 \end{bmatrix} \Omega/km$$

Tipo 3: 2 condutores (1 fase + 1 neutro)

$$Z_{tipo_3} = \begin{bmatrix} 0,91 + j0,98 & \\ 0,06 + j0,71 & 0,91 + j0,98 \end{bmatrix} \Omega/km$$

Tabela D.1 – Dados do transformador de distribuição.

| Potência Nominal [kVA] | Tensão Primária [kV] | Tensão Secundária [kV] | Enrolamento Primário | Enrolamento Secundário | R [%] | X [%] |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|-------|-------|
| 75 | 11,9 (nó N1) | 0,220 (nó N2) | Delta | Estrela aterrado por uma resistência de 15 Ω | 0,78 | 3,08 |

Tabela D.2 – Dados dos ramos, sistema-teste de baixa tensão.

| Ramo | ID# (Condutores) | Nó Inicial | Nó Final | Tipo de Linha | Comprimento [m] |
|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------|
| L1 | 19489510 (ABN) | N3 | N4 | 2 | 10,00 |
| L2 | 19489626 (ABCN) | N5 | N3 | 1 | 37,64 |
| L3 | 19490231 (ACN) | N6 | N7 | 2 | 10,00 |
| L4 | 19489423 (BCN) | N8 | N9 | 2 | 10,00 |
| L5 | 19490013 (BCN) | N10 | N11 | 2 | 10,00 |
| L6 | 19489761 (ABCN) | N12 | N13 | 1 | 34,48 |
| L7 | 19489817 (ABCN) | N14 | N12 | 1 | 29,73 |
| L8 | 19489511 (ABCN) | N3 | N15 | 1 | 10,00 |
| L9 | 19489287 (AN) | N16 | N17 | 3 | 10,00 |
| L10 | 19489941 (AN) | N18 | N19 | 3 | 10,00 |
| L11 | 19490037 (ABCN) | N20 | N21 | 1 | 25,96 |
| L12 | 19489877 (ABCN) | N2 | N22 | 1 | 28,86 |
| L13 | 19490076 (ABCN) | N23 | N6 | 1 | 21,19 |
| L14 | 19490482 (BCN) | N24 | N25 | 2 | 10,00 |
| L15 | 19489546 (ABCN) | N26 | N16 | 1 | 29,12 |
| L16 | 19489674 (ABCN) | N27 | N28 | 1 | 11,18 |
| L17 | 19489627 (ACN) | N5 | N29 | 2 | 10,00 |
| L18 | 19490232 (ABCN) | N6 | N30 | 1 | 10,00 |
| L19 | 19489542 (ACN) | N26 | N31 | 2 | 10,00 |
| L20 | 19489638 (ABCN) | N28 | N32 | 1 | 12,53 |
| L21 | 19489945 (ABCN) | N22 | N33 | 1 | 10,00 |
| L22 | 19490014 (BCN) | N10 | N34 | 2 | 10,00 |
| L23 | 19490228 (ABCN) | N21 | N35 | 1 | 10,00 |
| L24 | 19489762 (ACN) | N12 | N36 | 2 | 10,00 |
| L25 | 19489818 (BCN) | N14 | N37 | 2 | 10,00 |
| L26 | 19489946 (ABCN) | N22 | N38 | 1 | 1,00 |
| L27 | 19489512 (BCN) | N3 | N39 | 2 | 10,00 |
| L28 | 19489288 (ABN) | N16 | N40 | 2 | 10,00 |
| L29 | 19489747 (ABCN) | N41 | N42 | 1 | 21,84 |
| L30 | 19489942 (CN) | N18 | N43 | 3 | 10,00 |
| L31 | 19490092 (ABCN) | N44 | N45 | 1 | 24,35 |
| L32 | 19489508 (BCN) | N3 | N46 | 2 | 10,00 |
| L33 | 19490077 (ABCN) | N23 | N47 | 1 | 10,00 |
| L34 | 19490483 (ABCN) | N24 | N48 | 1 | 10,00 |
| L35 | 19490073 (ABCN) | N49 | N23 | 1 | 1,00 |
| L36 | 19489543 (BN) | N26 | N50 | 3 | 10,00 |
| L37 | 19489639 (ABCN) | N28 | N41 | 1 | 15,30 |
| L38 | 19489878 (ACN) | N2 | N51 | 2 | 10,00 |
| L39 | 19490229 (ABCN) | N21 | N24 | 1 | 35,74 |
| L40 | 19489763 (BN) | N52 | N53 | 3 | 10,00 |
| L41 | 19489819 (ACN) | N14 | N54 | 2 | 10,00 |
| L42 | 19489947 (ABCN) | N22 | N10 | 1 | 23,09 |
| L43 | 19489513 (ACN) | N3 | N55 | 2 | 10,00 |
| L44 | 19489943 (ABCN) | N22 | N56 | 1 | 10,00 |
| L45 | 19489879 (ABCN) | N2 | N57 | 1 | 10,00 |
| L46 | 19489509 (BCN) | N3 | N58 | 2 | 10,00 |
| L47 | 19490227 (ABCN) | N21 | N59 | 1 | 10,00 |
| L48 | 19490484 (ACN) | N24 | N60 | 2 | 10,00 |

| | | | | | |
|-----|-----------------|-----|-----|---|-------|
| L49 | 19490035 (ABCN) | N20 | N18 | 1 | 12,08 |
| L50 | 19490074 (ABN) | N49 | N61 | 2 | 10,00 |
| L51 | 19489544 (BCN) | N26 | N62 | 2 | 10,00 |
| L52 | 19489640 (ABCN) | N28 | N5 | 1 | 21,21 |
| L53 | 19489764 (ABCN) | N52 | N26 | 1 | 30,36 |
| L54 | 19489948 (ABCN) | N38 | N52 | 1 | 26,93 |
| L55 | 19489514 (ABCN) | N3 | N8 | 1 | 34,48 |
| L56 | 19489760 (ABCN) | N12 | N27 | 1 | 33,84 |
| L57 | 19489944 (ABN) | N22 | N63 | 2 | 10,00 |
| L58 | 19489880 (ABCN) | N2 | N64 | 1 | 10,00 |
| L59 | 19490012 (ABCN) | N10 | N20 | 1 | 17,46 |
| L60 | 19490485 (ABCN) | N24 | N65 | 1 | 31,62 |
| L61 | 19489891 (ABCN) | N42 | N49 | 1 | 23,09 |
| L62 | 19489422 (BCN) | N8 | N66 | 2 | 10,00 |
| L63 | 19489876 (ABCN) | N2 | N14 | 1 | 28,46 |
| L64 | 19490036 (ABCN) | N20 | N44 | 1 | 15,65 |
| L65 | 19490075 (ABCN) | N49 | N67 | 1 | 10,00 |
| L66 | 19490481 (ACN) | N24 | N68 | 2 | 10,00 |
| L67 | 19489545 (BCN) | N26 | N69 | 2 | 10,00 |

Tabela D.3 – Dados da carga original, sistema-teste de baixa tensão.

| Nó | Potência Ativa (kW) | Potência Reativa (kvar) |
|------|---------------------|-------------------------|
| 04 A | 0,009207 | 0,003922 |
| 04 B | 0,009207 | 0,003922 |
| 07 A | 0,161308 | 0,068717 |
| 07 C | 0,161308 | 0,068717 |
| 09 B | 0,246406 | 0,104969 |
| 09 C | 0,246406 | 0,104969 |
| 11 B | 0,080111 | 0,034127 |
| 11 C | 0,080111 | 0,034127 |
| 15 A | 0,171922 | 0,073238 |
| 15 B | 0,070968 | 0,030232 |
| 15 C | 0,242890 | 0,103471 |
| 17 A | 0,289786 | 0,123448 |
| 19 A | 0,194491 | 0,082853 |
| 25 B | 0,293207 | 0,124906 |
| 25 C | 0,321594 | 0,136998 |
| 29 A | 0,018477 | 0,007871 |
| 29 C | 0,018477 | 0,007871 |
| 30 A | 0,008695 | 0,003704 |
| 30 B | 0,087655 | 0,037341 |
| 30 C | 0,078960 | 0,033637 |
| 31 A | 0,315840 | 0,134547 |
| 31 C | 0,315840 | 0,134547 |
| 33 A | 0,565144 | 0,240751 |
| 33 B | 0,565144 | 0,240751 |
| 33 C | 0,565144 | 0,240751 |

| Nó | Potência Ativa (kW) | Potência Reativa (kvar) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 34 B | 0,301966 | 0,128637 |
| 34 C | 0,301966 | 0,128637 |
| 35 A | 0,142000 | 0,060492 |
| 35 C | 0,142000 | 0,060492 |
| 36 A | 0,211434 | 0,090070 |
| 36 C | 0,211434 | 0,090070 |
| 37 B | 0,247621 | 0,105486 |
| 37 C | 0,247621 | 0,105486 |
| 39 B | 0,230039 | 0,097996 |
| 39 C | 0,230039 | 0,097996 |
| 40 A | 0,182343 | 0,077678 |
| 40 B | 0,182343 | 0,077678 |
| 46 B | 0,142192 | 0,060573 |
| 46 C | 0,142192 | 0,060573 |
| 47 B | 0,339496 | 0,144625 |
| 47 C | 0,339496 | 0,144625 |
| 48 A | 0,034461 | 0,014680 |
| 48 B | 0,104278 | 0,044422 |
| 48 C | 0,069817 | 0,029742 |
| 50 B | 0,178763 | 0,076153 |
| 51 A | 0,050253 | 0,021408 |
| 51 C | 0,050253 | 0,021408 |
| 53 B | 0,172625 | 0,073538 |
| 54 A | 0,118967 | 0,050680 |
| 54 C | 0,118967 | 0,050680 |
| 55 A | 0,000831 | 0,000354 |
| 55 C | 0,000831 | 0,000354 |
| 56 A | 0,035612 | 0,030341 |
| 56 B | 0,069817 | 0,029742 |
| 56 C | 0,105429 | 0,060083 |
| 58 B | 0,078960 | 0,033637 |
| 58 C | 0,078960 | 0,033637 |
| 59 A | 0,917736 | 0,390954 |
| 59 B | 1,006558 | 0,260165 |
| 59 C | 0,610720 | 0,260165 |
| 60 A | 0,053194 | 0,022661 |
| 60 C | 0,080047 | 0,034100 |
| 61 A | 0,429708 | 0,183055 |
| 61 B | 0,429708 | 0,183055 |
| 62 B | 0,098268 | 0,041862 |
| 62 C | 0,098268 | 0,041862 |
| 63 A | 0,183302 | 0,078086 |
| 63 B | 0,183302 | 0,078086 |
| 66 B | 0,089126 | 0,037967 |

| Nó | Potência Ativa (kW) | Potência Reativa (kvar) |
|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| 66 C | 0,089126 | 0,037967 |
| 67 A | 0,281762 | 0,120030 |
| 67 B | 0,281762 | 0,120030 |
| 68 A | 0,207022 | 0,088191 |
| 68 C | 0,207022 | 0,088191 |
| 69 A | 0,250946 | 0,106902 |
| 69 C | 0,250946 | 0,106902 |
| Total | 15,729830 | 6,562594 |