

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DE INVERSORES EM FLUXO DE  
POTÊNCIA CONSIDERANDO SUPORTE DE POTÊNCIA  
REATIVA COMO SERVIÇO ANCILAR NA  
DISTRIBUIÇÃO**

JONATTAN EMANUEL SARMIENTO

FOZ DO IGUAÇU

2016



Jonattan Emanuel Sarmiento

**MODELAGEM DE INVERSORES EM FLUXO DE POTÊNCIA  
CONSIDERANDO SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA COMO  
SERVIÇO ANCILAR NA DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Manuel Carreño Franco

Foz do Iguaçu

2016

Catálogo na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UNIOESTE

Sarmiento, Jonattan Emanuel  
S246m Modelagem de inversores em fluxo de potência considerando  
suporte de potência reativa como serviço ancilar na distribuição. /  
Jonattan Emanuel Sarmiento. – Foz do Iguaçu, 2016.  
73 f.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Manuel Carreño Franco.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação)  
– Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Foz do  
Iguaçu, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, 2016.

1. Inversores elétricos. 2. Transistores de potência. I. Franco,  
Edgar Manuel Carreño. II. Título.

CDD 20. ed. – 621.381044

Sandra Regina Mendonça CRB – 9/1090

# **MODELAGEM DE INVERSORES EM FLUXO DE POTÊNCIA CONSIDERANDO SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA COMO SERVIÇO ANCILAR NA DISTRIBUIÇÃO**

Jonattan Emanuel Sarmiento

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 23 / 06 / 2016

---

Prof. Dr. **Edgar Manuel Carreño Franco** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

---

Prof. Dr. **Carlos Roberto Mendonça da Rocha**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

---

Prof. Dr. **Antonio Carlos Zambroni de Souza**  
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI



# Resumo

Nos últimos anos verificou-se um grande aumento no uso de geradores distribuídos. Isso ocorreu não apenas pelos avanços nas tecnologias de produção de pequenos geradores e inversores de frequência, mas também pelos benefícios que estes trazem aos sistemas de distribuição e pelas políticas de incentivos. Nas análises desses sistemas é fundamental calcular o fluxo de potência e, para resolvê-lo adequadamente, deve-se revisar a modelagem do inversor e sua implementação no método empregado, atentando-se ao fato de que os inversores estão começando a utilizar funções avançadas passíveis de fornecer serviços ancilares. Neste trabalho são revisadas as modelagens dos inversores com funções avançadas, tais como o controle *Basic Intelligent Volt-Var* (BIVV) e *Intelligent Volt-Var With Hysteresis* (IVVH), além de propor métodos de implementação para o método da varredura. Nas implementações propostas se faz uso de elementos da matriz de sensibilidade dos nós PV definida no método da compensação. Nos casos analisados, as implementações tiveram eficácia, conseguindo atingir soluções em valores convergentes e em concordância às estratégias de controle. Já nos resultados das simulações, ilustram-se as diferenças dos pontos operativos do inversor atuando em um nó do sistema de distribuição comparando-se as diferentes modelagens analisadas em distintas condições de carga do sistema e diversos níveis de fornecimento de potência ativa. Ao comparar-se os perfis de tensão das diversas modelagens, em geral, nota-se que há uma variação maior quando se tem maior capacidade de potência reativa. Se no futuro a geração distribuída evoluir para prestar suporte de potência reativa como um serviço ancilar, é necessário tomar precauções para modelar adequadamente o inversor, de modo a evitar obter resultados equivocados que afetarão os planejamentos das concessionárias.

**Palavras-chaves:** Modelagem de inversores, inversores com funções avançadas, serviços ancilares, geração distribuída, fluxo de potência, método da varredura.

# Abstract

In recent years there has been a great increase in the use of distributed generators. This occurred not only by advances in production technologies of small generators and frequency inverters, but also by the benefits that brings to the distribution systems and the incentive policies. In the analysis of these systems is essential to calculate the power flow and properly solve it and the modeling of the inverter should be reviewed together with its implementation in the method employed, attempting to the fact that the inverters are beginning to use advanced functions that can to provide ancillary services. In this work the modelling of inverter with advanced functions such as Basic Intelligent Volt-Var Control (BIVV) and Intelligent Volt-Var With Hysteresis (IVVH) are reviewed, therefore it is propose methods the implements this models in the method sweep. In proposal implementation it is use of elements of the sensitivity matrix of nodes PV defined in the compensation method. In the analyzed cases, the implementations were effectiveness achieving solutions in convergent values and in accordance to the control strategies. In the results of simulations there were differences in the operating points of the inverter acting on a node of the distribution system comparing the different modeling analyzed in different system load conditions and different levels of active power supply. When comparing the voltage profiles of the various modeling, in general notice that there is a greater variation when it has large reactive power capacity. If in the future of distributed generation evolve to provide reactive support as the ancillary service, it shall be careful properly modelling the inverter avoiding mistaken results that will affect the plans of the concessionaires.

**Keywords:** Modeling inverters, inverters with advanced functions, ancillary services, distributed generation, power flow, forward backward sweep.



A mis padres y hermanas.



# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Daniel e Mirta, que têm sido meus primeiros e grandes professores e às minhas irmãs por estarem me incentivando a todo momento.

Ao meu orientador, Dr. Edgar Manuel Carreño Franco, por seu grande empenho e dedicação na orientação deste trabalho e por sua amizade.

Aos professores Carlos Rocha, Romeu Reginatto, Roberto Lotero, Adriano Batista, também à Fabiana Santos e demais pessoas que integram o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, pela oportunidade de realizar meu curso de mestrado, pelos ensinamentos e orientações nesse período.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos.

Aos amigos, Alessandro, Altamira, Cristian, Jeremy, João, Marcelo, Matheus, Miguel, Milton, Luiz e demais alunos do PGEEC pelo apoio e companheirismo.

E agradeço à todas as pessoas que tenham contribuído de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>	
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>	
<b>Capítulo 1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Serviços Ancilares .....	2
1.2	O inversor de frequência.....	2
1.3	Estratégias de controle e as modelagens no fluxo de potência .....	3
1.4	Modelagens do inversor no método da varredura.....	4
1.5	Problemática .....	5
1.6	Objetivos .....	6
<b>Capítulo 2</b>	<b>O inversor e os serviços ancilares na distribuição</b>	<b>7</b>
2.1	Os sistemas de distribuição .....	7
2.2	O inversor .....	7
2.3	Serviços ancilares.....	9
2.4	O benefício do inversor no suporte de potência reativa.....	12
2.5	Funções avançadas.....	13
2.6	Os limites de operação, ABNT NBR 16149:2013.....	15
2.6.1	Sistemas fotovoltaicos com potência nominal menor ou igual a 3 kW .....	15
2.6.2	Sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior a 3 kW e menor ou igual a 6 kW .....	15
2.6.3	Sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior a 6 kW .....	16
<b>Capítulo 3</b>	<b>Modelagens do inversor de frequência no fluxo de potência</b>	<b>19</b>
3.1	O fluxo de potência.....	19
3.1.1	Método Modified Ladder iterative .....	20
3.1.2	Método Forward/Backward Sweep.....	21
3.2	Modelagens típicas da Geração Distribuída .....	23
3.2.1	Implementação dos nós de geração tipo PQ .....	23
3.2.2	Implementação dos nós de geração tipo PV .....	24
3.3	Modelagens de inversores com funções avançadas .....	26
3.3.1	Basic Intelligent Volt-Var .....	26

3.3.2	Intelligent Volt-Var with Hysteresis .....	28
<b>Capítulo 4</b>	<b>Modelagens propostas dos inversores de frequência no fluxo de potência</b>	<b>31</b>
4.1	Basic Intelligent Volt-Var .....	31
4.1.1	Problema de convergência na implementação direta .....	31
4.1.2	Método proposto para implementar o controle BIVV no método da varredura. .....	33
4.2	Intelligent Volt-Var with Hysteresis .....	36
4.2.1	O problema da implementação do controle em análises não dinâmicas .....	36
4.2.2	Método para implementar a modelagem IVVH no método da varredura .....	36
<b>Capítulo 5</b>	<b>Análises e Resultados</b>	<b>39</b>
5.1	Análises .....	39
5.1.1	Sistema de distribuição teste .....	39
5.1.2	Métodos de análises.....	40
5.1.3	Configurações das modelagens .....	40
5.2	Resultados .....	42
5.2.1	Exemplo numérico da implementação da modelagem BIVV no método da varredura.....	42
5.2.2	Pontos operativos para as simulações com distintas modelagens e condições de operação.....	46
5.2.3	Perfis de tensões .....	51
5.2.4	Validação das implementações realizadas em Python: do método da varredura e das modelagens do inversor de frequência .....	60
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>63</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>65</b>
	<b>Anexos</b>	<b>69</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1: Inversor monofásico. Fonte: (Hassaine, 2010) .....	8
Figura 2.2: Inversor trifásico. Fonte: (Hassaine, 2010).....	9
Figura 2.3: FP em função da potência ativa .....	15
Figura 2.4: Limites operacionais demanda/injeção de potência reativa para sistemas com potência nominal superior a 6 kW .....	17
Figura 3.1: Circuito com cargas de impedância constante. Fonte: (Kersting, 2012) .....	20
Figura 3.2: Circuito com cargas de potência constante. Fonte: (Kersting, 2012) .....	21
Figura 3.3: Fluxograma do método da varredura. ....	22
Figura 3.4: Fluxograma do método da compensação. ....	25
Figura 3.5: Ilustração do controle <i>Basic Intelligent Volt-Var</i> .....	27
Figura 3.6: Ilustração do controle <i>Intelligent Volt-Var with Hysteresis</i> .....	29
Figura 4.1: Ilustração do processo de atualização da potência reativa injetada para a função avançada BIVV com implementação direta. ....	32
Figura 4.2: Processo para atualizar adequadamente no método da varredura a potência reativa do inversor que opera com o controle BIVV.....	35
Figura 4.3: Esquematização das soluções fatíveis do controle IVVH.....	37
Figura 5.1: Sistema de distribuição teste IEEE-34 modificado.....	39
Figura 5.2: Estratégias de controle e seus pontos operativos a vários níveis de carregamento do sistema de distribuição. Fornecendo 2 MW. ....	47
Figura 5.3: Estratégias de controle e seus pontos operativos a vários níveis de carregamento do sistema de distribuição. Fornecendo 1 MW. ....	49
Figura 5.4: Estratégias de controle e seus pontos operativos a vários níveis de carregamento do sistema de distribuição. Fornecendo 0 MW .....	50
Figura 5.5: Perfil de tensão. Fornecendo 2 MW e capacidade de 1 MVar. Carregamento do sistema em 100% .....	52
Figura 5.6: Perfil de tensão. Fornecendo 1 MW e capacidade de 2 MVar. Carregamento do sistema em 100% .....	53
Figura 5.7: Perfil de tensão. Fornecendo 0 MW e capacidade de 2,236 MVar. Carregamento do sistema em 100% .....	53

Figura 5.8: Perfil de tensão. Fornecendo 2 MW e capacidade de 1 MVar. Carregamento do sistema em 40% .....	54
Figura 5.9: Perfil de tensão. Fornecendo 1 MW e capacidade de 2 MVar. Carregamento do sistema em 40% .....	55
Figura 5.10: Perfil de tensão. Fornecendo 0 MW e capacidade de 2,236 MVar. Carregamento do sistema em 40% .....	56
Figura 5.11: Perfil de tensão. Fornecendo 2 MW e capacidade de 1 MVar. Carregamento do sistema em 0% .....	57
Figura 5.12: Perfil de tensão. Fornecendo 1 MW e capacidade de 2 MVar. Carregamento do sistema em 0% .....	57
Figura 5.13: Perfil de tensão. Fornecendo 0 MW e capacidade de 2,236 MVar. Carregamento do sistema em 0% .....	58
Figura 5.14: Perfis de tensão das simulações da implementação própria e OpenDSS, sem geração distribuída. ....	60
Figura 5.15: Perfis de tensão das simulações da implementação própria e OpenDSS, com o inversor modelado como nó PV e o controle BIVV .....	61



# Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Tensão e potência reativa dos pontos de configuração do BIVV.....	41
Tabela 5.2: Tensão e potência reativa dos pontos de configuração do IVVH.....	42
Tabela 5.3: Tensão e potência reativa da implementação direta da modelagem BIVV.....	43
Tabela 5.4: Tensão e potência reativa da modelagem BIVV com o método proposto. ....	44
Tabela A1: Carga por fase de cada barra do sistema IEEE - 34.....	69
Tabela A2: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 1/4.....	70
Tabela A3: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 2/4.....	70
Tabela A4: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 3/4.....	71
Tabela A5: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 4/4.....	72
Tabela A6: Faixa de classificação de tensões para valor nominal entre 1 e 69 kV. Fonte: (ANEEL, 2015).....	73



# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos anos verificou-se um grande aumento no uso de geradores distribuídos. Isso ocorreu não apenas pelos avanços nas tecnologias de produção de pequenos geradores e inversores de frequência, mas também pelas políticas de incentivo por parte de governos e empresas, apreciando-se os benefícios que estes trazem aos sistemas, tais como a possibilidade de postergar investimentos em infraestruturas de transmissão e de grandes centrais de geração, o aumento da confiabilidade dos sistemas e por permitirem a integração de fontes primárias de energia consideradas limpas. Devido a isso, criou-se a expectativa de que no futuro a forma de fornecer energia elétrica continuará evoluindo, abdicando-se da geração exclusivamente centralizada, passando a ser composto tanto por grandes centrais de geração quanto por pequenos geradores distribuídos (Guan *et al.*, 2009).

Os serviços que o gerador providencia também estão evoluindo. As práticas e métodos recomendados nos padrões IEEE 1547 já mencionam a possibilidade de ter controle de tensão de forma autônoma ou por telecomando por parte dos geradores distribuídos (Bassett, 2012; Basso *et al.*, 2015).

O aumento da penetração da geração distribuída, assim como os novos tipos de geradores empregados e as suas interfaces, permitem visar um novo paradigma para os sistemas de distribuição atuais. O gerador além de fornecer energia elétrica no sistema de distribuição, poderia fornecer serviços ancilares necessários para suprir segurança e estabilidade ao sistema elétrico (Bründlinger *et al.*, 2015).

A interface de potência da maioria dos geradores de pequeno porte inseridos nos sistemas de distribuição é o inversor de frequência. Graças à eletrônica de potência, hoje em dia estes dispositivos apresentam funções de controle avançadas que permitem controle preciso da potência ativa/reactiva e outros parâmetros elétricos, o que abre a possibilidade no futuro a dispor de outras funções extras no sistema de distribuição, como por exemplo os serviços ancilares providenciados pela geração distribuída (GD), tais como o controle de tensão ou suporte de potência reativa (Bravo *et al.*, 2014).

Novas estratégias de controle para a GD estão surgindo. A EPRI e outros (Electric Power Research Institute, 2014) desde o ano 2009 estão definindo funções nos inversores de frequências, entre as várias funções propostas se encontram as funções denominadas *Intelligent Volt Var* (IVV) e a *Intelligent Volt Var with Hysteresis* (IVVH).

Estas funções controlariam o fluxo de potência reativa injetada ao sistema em relação à tensão no ponto comum de conexão, de forma que torna à GD um elemento potencialmente favorável para a qualidade da energia elétrica no sistema de distribuição.

## 1.1 Serviços Ancilares

Os serviços ancilares podem ser classificados, segundo Gjerde (2007), em três grupos: serviços de interconexão, serviços de balanços geração-demanda e serviços locais. Os serviços de interconexão estão ligados às variações da frequência e ao aumento da capacidade de transferência sem considerar o aumento do número de linhas elétricas. Já nos serviços de balanço geração-demanda objetiva-se manter o balanço energético e prover reservas de contingência e, finalmente, os serviços locais estão relacionados aos de suporte de potência reativa e ao autorrestabelecimento do sistema.

O serviço de suporte de potência reativa é a habilidade de prover potência reativa com o propósito de controlar e suportar o transporte de potência ativa do sistema, também sendo denominado controle de tensão. A finalidade do serviço é controlar o fluxo de potência reativa do sistema, o qual é imprescindível para manter a tensão dentro de limites aceitáveis de operação (Rueda Medina, 2012).

Os dispositivos eletrônicos de potência, como os conversores de potência atuais, possuem várias vantagens quando são utilizados nas interfaces dos recursos energéticos distribuídos, sendo que uma delas é a rapidez de atuação comparada à velocidade do gerador síncrono de interface direta, além da virtude de ser configurado de diversos modos, o que permite direcioná-lo para outros serviços, ademais de prover energia elétrica (Domínguez-García *et al.*, 2011).

O inversor de frequência pertence ao conjunto de conversores de potência utilizados como interface por vários tipos de geradores para se conectar à rede de distribuição.

## 1.2 O inversor de frequência

O inversor de frequência atua como interface convertendo a potência elétrica contínua para alternada nos painéis fotovoltaicos e nas células de combustível e, no caso dos aerogeradores de indução, atua na segunda etapa da interface, após ter sido retificada a tensão na primeira etapa (Moghaddas-Tafreshi & Mashhour, 2009).

As fontes renováveis frequentemente se ligam à rede mediante os inversores de frequência que, além de converter a potência elétrica com o objetivo de que as características elétricas sejam compatíveis com o sistema de distribuição, possuem a capacidade de serem construídos e configurados com diversas estratégias de controle, incluindo-se as relacionadas

com o fornecimento de serviços ancilares, ao suporte de potência reativa ou controle de tensão (Olek & Wierzbowski, 2015).

### 1.3 Estratégias de controle e as modelagens no fluxo de potência

As diferentes estratégias de controle do inversor provocarão diferentes efeitos no sistema de distribuição, ou seja, a modelagem do inversor deve refletir os diferentes comportamentos nas simulações. A seguir se discorre sobre algumas características de interesse.

Em Demirok *et al.* (2009) são sugeridas algumas estratégias de controle de tensão para se utilizar nos inversores, sendo que uma delas consiste no corte de potência ativa e outra se baseia na absorção ou injeção de potência reativa. Os autores sugerem que a última estratégia poderia ser pouco eficiente quando os valores da relação R/X das linhas são muito elevados. Nos sistemas de distribuição, essa relação é alta mas, por contrapartida, o corte de potência ativa indica diminuição na produção ou armazenamento da energia elétrica.

A análise de sensibilidade da tensão de um nó sujeito à mudança da potência reativa injetada em um sistema de distribuição, indica o aumento da sensibilidade quando o nó se encontra mais distante da subestação (Keane *et al.*, 2011).

Desde o ano 2009, a *Electric Power Research Institute (EPRI)*, *U.S. Department of Energy (DOE)*, *Sandia National Laboratories* e *Solar Electric Power Association*, colaboram na normalização de funções avançadas para inversores inteligentes a serem utilizados por painéis fotovoltaicos ou por sistemas de armazenamento. As funções que foram publicadas são: *Basic Intelligent Volt-Var*, *Volt-Watt*, *Dynamic Reactive Current*, *Dynamic Volt/Watt*, *Peak Power Limiting* e *Voltage Ride-Through* (Dugan *et al.*, 2013).

No Brasil têm-se implementado normas para os geradores distribuídos, especificamente a ABNT NBR 16.149:2013, com o intuito de normatizar as interfaces de conexão da geração fotovoltaica às redes de distribuição. No documento se contemplam os requisitos de operação, limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa e fator de potência. As especificações de maneira implícita poderiam abrir a possibilidade de prover serviços ancilares no futuro. A norma do Brasil foi baseada em normas internacionais, como a alemã VDE-AR-N 4105:2011-08, a CEI 0-21:2012-06 do comitê eletrotécnico italiano e a IEC 61727:2004-12 do comitê eletrotécnico internacional.

Nas análises em estado permanente dos sistemas elétricos de potência, ressalta-se o fato de que é frequente o cálculo do fluxo de carga, sendo necessária a factibilidade de modelar o comportamento dos inversores de frequência modernos no fluxo de carga. Um dos métodos mais adequados para resolver o fluxo de potência nos sistemas de distribuição com características radiais e levemente malhados, segundo Balamurugan & Srinivasan (2011), é o

método *Backward Forward Sweep* ou método da varredura. Resulta necessário revisar a modelagem do inversor e o modo de sua implementação no método da varredura.

Em Araujo *et al.* (2010) se adverte os inconvenientes de convergência que se pode ter no método da varredura ao ter presentes dispositivos de controle. Por este motivo, deve-se dar especial importância à metodologia que será usada na implementação da modelagem do inversor de frequência que possui funções avançadas.

Na literatura existem análises relacionadas à resolução do fluxo de potência em sistemas de distribuição que possuem inversores de frequência modernos, porém, não há detalhes a respeito da implementação da modelagem no método da varredura.

Em Hoffmann *et al.* (2014) se apresentam análises das simulações do sistema utilizando 4 configurações de inversores de frequência: injetando somente potência ativa, configurações da norma VDE-AR-N 4105:2011-08, injetando potência reativa e, por último, absorvendo potência reativa. Não se especifica o método de resolução do fluxo de potência nem a metodologia de implementação da modelagem.

Em Smith *et al.* (2011) realizam-se simulações de sistemas de distribuição que possuem inversores com diferentes estratégias de controle, explicando como evitam a divergência das iterações do controle limitando a variação de algumas variáveis por um fator definido pelo usuário. As modelagens são implementadas em OpenDSS, um software livre para simular sistemas elétricos de distribuição, sendo que a resolução do fluxo é determinado por esse software. Os módulos desenvolvidos pelos autores relacionados às funções avançadas dos inversores podem ser consultadas em Electric Power Research Institute (2014). Em Dugan *et al.* (2013) realizaram-se simulações de sistemas de distribuição com centrais fotovoltaicas ligadas à rede mediante inversores com funções avançadas utilizando o módulo específico do OpenDSS.

Por outro lado, algumas modelagens típicas do inversor de frequência no método da varredura foram estudadas e são utilizadas frequentemente nos cálculos de fluxo de carga, detalhadas a seguir.

## 1.4 Modelagens do inversor no método da varredura

Revisando as modelagens clássicas da geração distribuída no método da varredura, pode-se encontrar duas modelagens típicas dos geradores aplicadas nos inversores de frequência, sendo nó de geração PV e nó de geração PQ. Essas modelagens são frequentes no cálculo de fluxo de potência, como por exemplo, foram utilizadas para modelar aos inversores em Zhu & Tomsovic (2002), Chen *et al.* (2006), Moghaddas-Tafreshi & Mashhour (2009) e Fengli *et al.* (2013).

O modo de implementar as modelagens no método da varredura foi publicada em Cheng & Shirmohammadi (1995). Os nós PQ de geração são tratados como nós PQ de carga negativa.

Para os nós PV se desenvolveu um método denominado compensação para atualizar, no processo iterativo do fluxo de potência, o valor da potência reativa injetada pelo inversor. No método, se define a matriz de sensibilidade de especial interesse, que aproxima linearmente a relação incremental entre a corrente de componente reativa injetada de um conjunto de nós e suas tensões.

As modelagens de geração PQ e PV foram desenvolvidas antes do surgimento das novas funções dos inversores de frequência, portanto, seu uso poderia ser inadequado para os inversores modernos. A problemática envolvida é analisada a seguir.

## 1.5 Problemática

Considerando-se o exposto, o fato de que as modelagens PV e PQ terem sido desenvolvidas antes do surgimento das inovações nos dispositivos utilizados na geração distribuída, torna-se apropriado revisar as modelagens, seu comportamento, características de interesse e as metodologias de implementação no método da varredura, além dos seus efeitos nas simulações dos sistemas de distribuição.

Geralmente as fontes renováveis ou sistemas de armazenamento utilizam os inversores de frequência como interfaces de conexão e, conseqüentemente, podem utilizar as estratégias de controle providas por eles, as quais são passíveis de fornecer serviços ancilares no futuro. Seria conveniente estudar as modelagens que representam esses inversores, sua implementação no fluxo de potência, além de comparar vários pontos operativos resultantes das diferentes simulações do sistema de distribuição em diversas circunstâncias para diferentes modelagens.

O estado do sistema de distribuição é sensível às potências ativa e reativa injetadas em um nó do sistema, logo, torna-se apropriado analisar os efeitos nas grandezas elétricas de cada nó e cada ramo do sistema ao operar o inversor com as funções avançadas, como por exemplo, analisar as mudanças nos perfis de tensão do sistema.

As concessionárias dos sistemas de distribuição em seus planejamentos e as suas decisões devem possuir ferramentas de análise confiáveis e atuais. Pelo crescimento geral da geração distribuída, é necessário corroborar as ferramentas de análise com maior ênfase no que se refere aos inversores, pois estão começando a ser utilizadas funções avançadas relacionadas ao suporte de potência reativa, comportamento este que poderia ser irrepresentável com as modelagens habituais.

## 1.6 Objetivos

O Objetivo geral do presente trabalho é modelar, nos cálculos do fluxo de potência, o inversor de frequência com funções avançadas passíveis de fornecer serviços ancilares nos sistemas de distribuição. A implementação da modelagem será no método da varredura.

Se enumeram os objetivos específicos:

- 1) Revisar as modelagens típicas, os nós PV e PQ, e estudar sua implementação no método da varredura.
- 2) Estudar as modelagens dos inversores com funções avançadas e verificar se os métodos que são utilizados para implementar no método da varredura são apropriados e eficazes.
- 3) Demonstrar a factibilidade de implementar no método da varredura outras modelagens distintas das típicas nós PV e PQ. Resolver os problemas de convergência que poderiam ocorrer nos processos iterativos.
- 4) Ilustrar e analisar as diferenças dos pontos operativos do inversor de frequência operando em um nó do sistema de distribuição ao comparar-se às diferentes estratégias de suporte de potência reativa, com distintas condições de cargas do sistema e vários níveis de fornecimento de potência ativa.
- 5) Comparar as diferenças nos perfis de tensão em pontos operativos críticos selecionados de um grupo de resultados obtidos ao se modelar as diversas estratégias de controle avançadas dos inversores.
- 6) Indicar os benefícios da modelagem adequada do inversor nas análises de fluxo de potência.



# Capítulo 2

## O inversor e os serviços ancilares na distribuição

Neste capítulo serão expostas as características destacadas dos sistemas de distribuição, com posterior apresentação breve dos inversores utilizados como interface para ligar aos geradores nos sistemas de distribuição. As funções avançadas dos inversores modernos poderiam permitir prover serviços ancilares aos geradores distribuídos, porém, na atualidade não se tem definido esses conceitos na distribuição, como por exemplo, a normativa atual do Brasil não considera serviços ancilares na distribuição, sendo que ambas as temáticas serão tratadas ao final do capítulo.

### 2.1 Os sistemas de distribuição

Os sistemas de distribuição tipicamente iniciam-se na subestação, a qual é alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão. Em alguns casos pode ocorrer de a subestação ser alimentada diretamente por linhas de alta tensão, e nessas situações provavelmente, o sistema não possui sistema de subtransmissão, característica passível de mudança entre as distintas concessionárias. Toda subestação alimenta o sistema de distribuição mediante um ou mais alimentadores e normalmente estes têm características radiais, o que significa que cada carga é alimentada apenas por um caminho, exceto em alguns casos onde são levemente malhados (Kersting, 2012).

### 2.2 O inversor

Os inversores de potência são as tecnologias que permitem conexões eficientes e flexíveis dos diferentes atores (geração de energia renovável, armazenamento de energia, transmissão flexível e cargas controláveis) ao sistema elétrico. As interfaces de inversores de frequência se dividem em duas classes: inversores comutados pela rede e os inversores de auto-comutação (Grigsby, 2012).

Os inversores comutados pela rede requerem um sinal de comutação da tensão da mesma, a fim de operar. Portanto, eles interrompem suas operações se o sinal de linha desaparece, isto é, se a tensão da rede elétrica é anormal ou interrompido. Estes não são tão populares atualmente para dispositivos monofásicos.

Os inversores de auto-comutação, como sugere o nome, são autocomutados. Todas as unidades autônomas são autocomutadas, mas nem todos os inversores de auto-comutação são autônomos. Eles podem ser concebidos como fontes de tensão ou fontes de corrente. Estas unidades ainda empregam o sinal de tensão da rede elétrica como medida de comparação e fornece potência elétrica à frequência da rede.

Os inversores estáticos utilizam dispositivos semicondutores de potência para efetuar a comutação, os quais funcionam em dois modos, corte (OFF) e modo condução (ON). Portanto, o sinal alternado que se obtém na saída é quadrado e pode ser convertido ao senoidal mediante filtros de potência, porém, podem ser aplicados controles de comutação para que o sinal de saída seja mais próximo ao senoidal. A maioria dos inversores de baixa potência utilizam o controle PWM com alta frequência de comutação, que dá como resultado saídas bem próximas ao senoidal, alto fator de potência e baixa distorção de harmônicos (Hassaine, 2010).

As configurações do circuito de potência podem realizar-se mediante diversas formas seguindo a configuração em ponte, quer sejam monofásicos, para pequenas potências, ou trifásicos, para potências medias e grandes. A configuração em ponte monofásico se observa na Figura 2.1, onde os pontos dos meios dos ramos se conectam diretamente à linha elétrica. Na ponte trifásica, Figura 2.2, a excitação dos dispositivos de comutação se faz de forma parecida ao inversor monofásico mas as três tensões estão defasadas  $120^\circ$ . Os interruptores de potência devem ser capazes de conduzir uma corrente bidirecional quando estão fechados e impedir a corrente ao estarem abertos. Nos inversores atuais se utilizam transistores MOSFET e transistores IGBT.

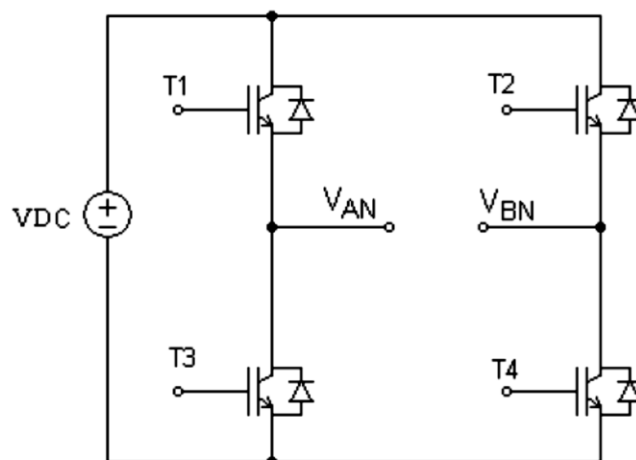


Figura 2.1: Inversor monofásico. Fonte: (Hassaine, 2010)

Os MOSFET suportam potências médias e são utilizados quando a tensão contínua é menor a 200 V e a frequência de comutação maior a 1 MHz. Os IGBT são utilizados quando a tensão contínua tem valor elevado (maior a 300 V) e a frequência de comutação está abaixo de 40 kHz.

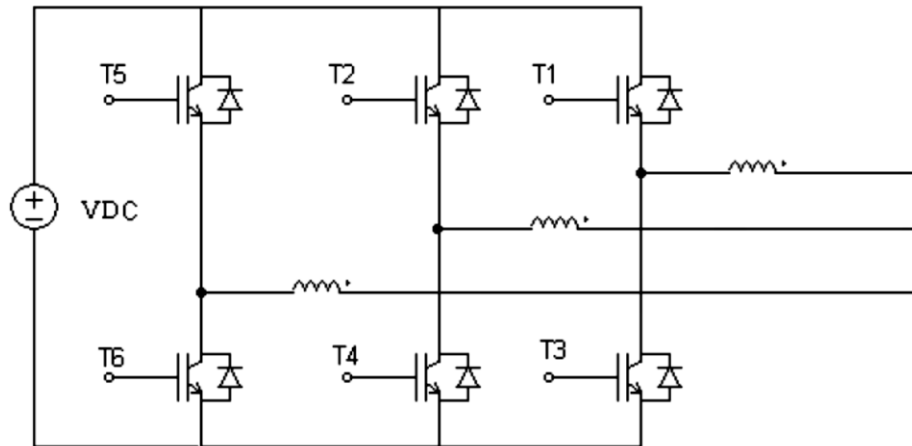


Figura 2.2: Inversor trifásico. Fonte: (Hassaine, 2010)

As estratégias de controle que podem ser aplicadas nos inversores mudaram seu comportamento, podendo ser configurados para distintos objetivos, como por exemplo, prover suporte de potência reativa ou controlar a tensão com diferentes estratégias, o que estaria estreitamente relacionado aos serviços ancilares. Atualmente, esses serviços não existem nos sistemas de distribuição, porém, tecnicamente, poderiam ser providos pela geração distribuída com os inversores de frequência. A seguir expõe-se a temática.

## 2.3 Serviços ancilares

Os serviços ancilares são serviços básicos da eletricidade e são essenciais para a fiabilidade e operação dos sistemas elétricos. As companhias de energia elétrica vêm realizando há décadas estas funções como uma organização monopólica integrada verticalmente. A medida que esse monopólio começa a desaparecer surge uma nova estrutura com várias partes as quais consequentemente passam a competir no mercado (Grigsby, 2012).

No mercado competitivo da energia elétrica existem duas abordagens extremas. A primeira consiste em dois mercados paralelos, ou seja, o próprio mercado da energia elétrica e o mercado dos chamados serviços ancilares. No outro extremo está o mercado integral de energia e suporte de qualidade, sendo somente um produto (Wu *et al.*, 2004).

Pela evolução tecnológica dos inversores de potência, o mercado desregulado e os serviços ancilares, faz com que seja interessante o estudo da geração distribuída. No caso de

usar interfaces de eletrônica de potência, estas podem ser configuradas para aprovisionar serviços ancilares. Além de serem fornecedores de energia, seria fatível desenhá-los para fornecer potência reativa, balanceamento de cargas, suporte de tensão e mitigação dos harmônicos (Joos *et al.*, 2000).

Os serviços ancilares são definidos por Gjerde (2007) como todos aqueles serviços empregados pelo sistema que tem por objetivo suportar a transmissão da energia elétrica desde o produtor até os consumidores. Tais serviços podem ser separados em três grupos:

- Serviços de interconexão;
- Serviços de balanço geração-demanda;
- Serviços locais;

Os serviços de interconexão são dois. O serviço de resposta da frequência que atua continuamente e está baseado exclusivamente na variação da frequência, e os esquemas de proteção especiais que permitem acrescentar a transferência de potência sem a necessidade de construir novas linhas.

Os serviços de balanço geração-demanda subdividem-se em três. A resposta da regulação que tem a habilidade de responder ante o desbalanço calculado entre os recursos, cargas, intercâmbios e a resposta da frequência; o acompanhamento da carga, que permite responder ante qualquer evento programado ou à sinais de carga lenta; e finalmente, as reservas de contingências encarregadas de responder ante eventos inesperados.

Os serviços locais subdividem-se em dois. O serviço de potência reativa, que diz respeito à habilidade de prover potência reativa, reservas ou controle de tensão para controlar e suportar a capacidade do transporte de potência ativa no sistema elétrico; e o autorrestabelecimento que está relacionado à habilidade de reiniciar-se independentemente de fontes externas.

No Brasil, em 2003, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), na resolução N° 265 estabelece os procedimento para prestação de serviços ancilares somente na geração e transmissão. Já no ano 2008, mediante a resolução N° 309, altera-se artigos da Resolução N° 265 de forma a permitir que os agentes de distribuição também possam prestar serviços ancilares, contribuindo para a operação eficiente do Sistema Interligado Nacional (SIN), porém, o fornecimento dos serviços ancilares na distribuição por enquanto não são considerados nas normativas.

A ANEEL estabelece as seguintes definições de serviços ancilares (ANEEL, 2003; ANEEL, 2008):

- Controle primário de frequência: é o controle realizado por meio de reguladores automáticos de velocidade das unidades geradoras, objetivando limitar a variação da frequência quando da ocorrência de desequilíbrio entre a carga e a geração.
- Controle secundário de frequência: é o controle realizado pelas unidades geradoras participantes do Controle Automático de Geração (CAG), destinado a restabelecer a

frequência do sistema ao seu valor programado e manter e/ou restabelecer os intercâmbios de potência ativa aos valores programados.

- Reserva de potência para controle primário: é a provisão de reserva de potência ativa efetuada pelas unidades geradoras para realizar o controle primário de frequência.
- Reserva de potência para controle secundário: é a provisão de reserva de potência ativa efetuada pelas unidades geradoras participantes do CAG, para realizar o controle secundário de frequência e/ou de intercâmbios líquidos de potência ativa entre áreas de controle.
- Reserva de prontidão: é a disponibilidade de unidades geradoras com o objetivo de recompor as reservas de potência primária ou secundária do sistema, em caso de indisponibilidade ou redeclaração de geração, se atingido o limite de provisão de reserva de potência ativa do sistema.
- Suporte de potência reativa: é o fornecimento ou absorção de potência reativa, destinada ao controle de tensão da rede de operação, mantendo-a dentro dos limites de variação estabelecidos nos Procedimentos de Rede.
- Autorrestabelecimento: a capacidade que tem uma unidade geradora ou usina geradora de sair de uma condição de parada total para uma condição de operação, independentemente de fonte externa para alimentar seus serviços auxiliares para colocar em operação suas unidades geradoras.
- Sistema especial de proteção (SEP): sistema que, a partir da detecção de uma condição anormal de operação ou de contingências múltiplas, realiza ações automáticas para preservar a integridade do SIN, dos equipamentos ou das linhas de transmissão deste. O SEP abrange os Esquemas de Controle de Emergência (ECE), os Esquemas de Controle de Segurança (ECS) e as proteções de caráter sistêmico.

Nos sistemas de potência com serviços ancilares, a responsabilidade básica do operador do sistema é manter a confiabilidade e a segurança mediante os serviços ancilares. A função do serviço de suporte de potência reativa é manter o fluxo de potência nas linhas entre os valores aceitáveis e a tensão dentro dos limites nas barras e nós do sistema. Além disso, não é desejável transportar potência reativa ao longo do sistema, em vez disso o recomendável seria colocar estrategicamente dispositivos locais com suporte de potência reativa considerando as demandas do sistema. Os dispositivos que se podem utilizar têm diferentes características, como por exemplo, comparando de maneira geral os geradores com os bancos de capacitores, os geradores possuem uma rápida atuação no suporte de potência reativa, porém, têm um alto custo de operação e oportunidade, lembrando-se que o custo de oportunidade está relacionado ao benefício que poder-se-ia obter se não se providenciassem serviços ancilares, e por outra parte, os bancos de capacitores possuem uma atuação lenta no suporte, porém, possuem baixos custos de instalação e operação (Bhattacharya & Zhong, 2001).

Entre os vários métodos utilizados para resolver os problemas dos desvios da tensão do valor nominal, destaca-se o método de controle de fluxo de potência reativa. Com o corte de fornecimento de potência ativa verifica-se que este limita a energia fornecida e, ocasionalmente, com vários recursos distribuídos poder-se-ia estar cometendo condicionamentos injustos em relação à potência disponibilizada. Alguns detalhes devem ser considerados, como o fato de que o controle da potência reativa não acarreta mudança da potência ativa fornecida, porém, dever-se-ia aumentar a capacidade do inversor para suprir potência reativa extra e, além disso, outra característica relevante se deve aos valores elevados da relação resistência/reatância no sistema de distribuição. Em simulações realizadas em Demirok *et al.* (2009) evidencia-se a possibilidade da ineficiência do controle de tensão com essa estratégia.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) especifica na NBR 16.149:2013 as características da interface de conexão (inversores de frequência) para os sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica de distribuição. Todos os parâmetros de qualidade de energia (tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência) têm valores limites de operação estabelecidos e as características poderiam permitir o fornecimento de serviços ancilares. Exemplificando, na norma se define o fator de potência em função da potência ativa fornecida e também zonas de operação fatíveis (valores de potência ativa e reativa), dependendo do sistema fotovoltaico, configurando adequadamente seria fatível prover controle de tensão ou suporte de potência reativa. Destaca-se o fato de que não se encontra a informação explícita em relação à possibilidade do inversor poder injetar somente potência reativa sem fornecer potência ativa, em outras palavras se poderia no futuro fornecer exclusivamente suporte de potência reativa, entretanto a capacidade tecnológica permitiria eventualmente fornece-los.

Além dos sistemas fotovoltaicos, abre-se a possibilidade de que os parques eólicos possam prestar serviços ancilares ao sistema elétrico de potência. As plantas comerciais disponíveis na atualidade são capazes de satisfazer toda a gama de requisitos da rede, aliás, oferecem um rendimento similar e em alguns casos superior às tecnologias de geração convencional. A tecnologia tem evoluído devido à crescente demanda de funções avançadas de controle de potência ativa e reativa para manter a integridade do sistema eólico, e tem-se demonstrado que o funcionamento é adequado em vários casos (MacDowell *et al.*, 2015).

Dois dos serviços ancilares, o controle de tensão e suporte de potência reativa, poderiam ser fornecidos mediante a geração distribuída. Os avanços na tecnologia e das funções do inversor de frequência o tornam passível de prover esses serviços. A seguir se discorre sobre o assunto.

## **2.4 O benefício do inversor no suporte de potência reativa**

A vantagem principal do inversor de frequência é a flexibilidade e rapidez no controle da potência reativa. A potência reativa pode-se variar na mesma escala de tempo que a frequência do sistema elétrico de distribuição. A quantidade de potência também é considerável, sendo

estabelecida em relação à capacidade da potência aparente do inversor. Quando o fator de potência é um, pode-se utilizar a capacidade íntegra para o fornecimento de potência ativa, no entanto, quando o fator de potência é zero, a capacidade pode ser inteiramente usada para injetar potência reativa. Essa flexibilidade é comparada às convencionais máquinas síncronas e até com melhor flexibilidade respeito ao fator de potência.

Frequentemente nos sistemas fotovoltaicos, o inversor têm uma capacidade extra para ser utilizada, além disso, à noite quando a potência real fornecida é zero, o sistema pode injetar ou absorver potência reativa de sua capacidade integral. Uma característica das cargas noturnas é o aumento significativo da iluminação e o consumo de potência reativa diminui, podendo provocar problemas de sobretensão. A capacidade de absorver ou injetar potência reativa do inversor resultam nesses casos vantajosos (Domínguez-García *et al.*, 2011).

A regulação de tensão no sistema de distribuição é tipicamente feita mediante a mudança do tap dos transformadores da subestação, reguladores de tensão nas linhas ou bancos de capacitores nos alimentadores, se os geradores distribuídos são habilitados para prover controle de tensão e suporte de potência reativa que, devido as suas vantagens técnicas, providenciarão benefícios às concessionárias.

A maioria dos inversores que operam como interfaces na geração distribuída são autocomutados, o que traz a vantagem de prover um sinal de saída alternada arbitrária tanto em fase como em amplitude, portanto, a princípio, se poderia fornecer potência elétrica em qualquer valor e fator de potência. Ao comparar-se com a gama de fator de potência que pode operar um gerador síncrono, o inversor apresenta melhor desempenho, o que traz grandes vantagens se o gerador distribuído tem por objetivo suprir controle de tensão ou suporte de potência reativa.

Tipicamente, os geradores distribuídos operam com fator de potência unitário, assim existem probabilidades de se ter inconvenientes. Por exemplo, separando um subsistema o qual está sendo alimentado por um fluxo determinado de potência real e reativa, quando opera o gerador distribuído, uma parte da potência ativa será suprida e o fluxo que inicialmente alimentava o subsistema diminuirá substancialmente seu fator de potência por permanecer fixa a potência reativa. O inconveniente é passível de evitar-se provendo potência com fator de potência diferente do unitário (Kroposki *et al.*, 2010).

## 2.5 Funções avançadas

O suporte de potência reativa e outros serviços ancilares são viáveis de serem providos pelos geradores distribuídos quando o inversor de frequência é a interface. Com o intuito de estabelecer funções padrões nos inversores, a *Electric Power Research Institute* (EPRI) vem impulsionando a definição de funções avançadas padrões a serem implementadas nos inversores atuando como interface para os recursos energéticos distribuídos. Em relação ao inversor e sua evolução, surge um novo conceito, quando este já não simplesmente converte a

potência elétrica, mas ainda possuindo funções avançadas, é chamado de inversor inteligente (*smart inverter*) (Dugan *et al.*, 2013).

Algumas das funções avançadas definidas pela Electric Power Research Institute (2014) são listadas abaixo:

- *Basic Intelligent Volt-Var* (BIVV): relacionada ao suporte de potência reativa e tensão.
- *Intelligent Volt-Var with Hysteresis* (IVVH): Semelhante ao controle BIVV somando-se uma região de histereses.
- *Volt-Watt* (VW): relativo ao controle de tensão variando a potência ativa em função do valor da tensão.
- *Dynamic Reactive Current* (DRC): proporciona suporte de tensão tendo em conta a variação da tensão em si mesma e não à algum valor de referência. Uma função dinâmica.
- *Dynamic Volt/Watt* (DVW): Semelhante à *Volt/Watt*, porém, as decisões são feitas com a variação do valor da tensão.
- *Peak Power Limiting* (PPL): Estabelece a potência ativa máxima fornecida.
- *Voltage Ride-Through* (VRT): Define os valores de tensão e tempos dos eventos nos quais se deve ligar ou desligar a fonte do sistema.

Neste trabalho serão consideradas as funções do controle BIVV e do controle IVVH. A BIVV muda a potência reativa injetada em relação à tensão e de forma análoga opera o controle IVVH integrando-se além de uma região de histereses na mudança da potência reativa. Esses controles estão estreitamente relacionados ao controle de tensão e suporte de potência reativa, sendo que suas implementações no fluxo de potência são, presumidamente, fatíveis desde o ponto de vista das análises que serão feitas neste trabalho.

A função DRC é dependente do tempo, o escopo do trabalho limita-se a incursionar em análises dessas características. As funções VW, DVW e PPL estão relacionadas ao controle de tensão, porém, possuem mudança na potência ativa fornecida e o propósito deste trabalho é modelar e analisar ao inversor no suporte de potência reativa. A função VRT está relacionada à operação do inversor em condições anormais, não relacionadas ao suporte de potência reativa.

Na seção seguinte são modelados os limites de operação dos inversores segundo a normativa atual aplicável no Brasil, as quais deveriam ser levadas em conta nos projetos ou planejamentos futuros dos sistemas de distribuição e eventualmente nos serviços auxiliares.



## 2.6 Os limites de operação, ABNT NBR 16149:2013

Os inversores utilizados nos sistemas fotovoltaicos ligados aos sistemas de distribuição do Brasil têm limites operativos definidos segundo a capacidade de geração. Nesta seção se formulam matematicamente os limites, e as expressões devem ser consideradas na modelagem dos inversores de frequência que foram aprovados pela norma ABNT NBR 16150:2013.

### 2.6.1 Sistemas fotovoltaicos com potência nominal menor ou igual a 3 kW

O fator de potência deve ser igual a 1, o que implica que os limites de potência reativa mínimo e máximos,  $Q_{min}$  e  $Q_{max}$ , sejam dados por (2.1).

$$Q_{max} = 0 \quad (2.1)$$

### 2.6.2 Sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior a 3 kW e menor ou igual a 6 kW

O inversor pode trabalhar com Fator de potência igual a 1 e deve apresentar como opcional operando com valores distintos de 1, variando de acordo com a Figura 2.3. Dependendo da topologia, carregamento da rede e potência a ser injetada, os pontos A, B e C podem ser ajustados de forma diferente. Na ilustração o valor do fator de potência limite é 0,95.

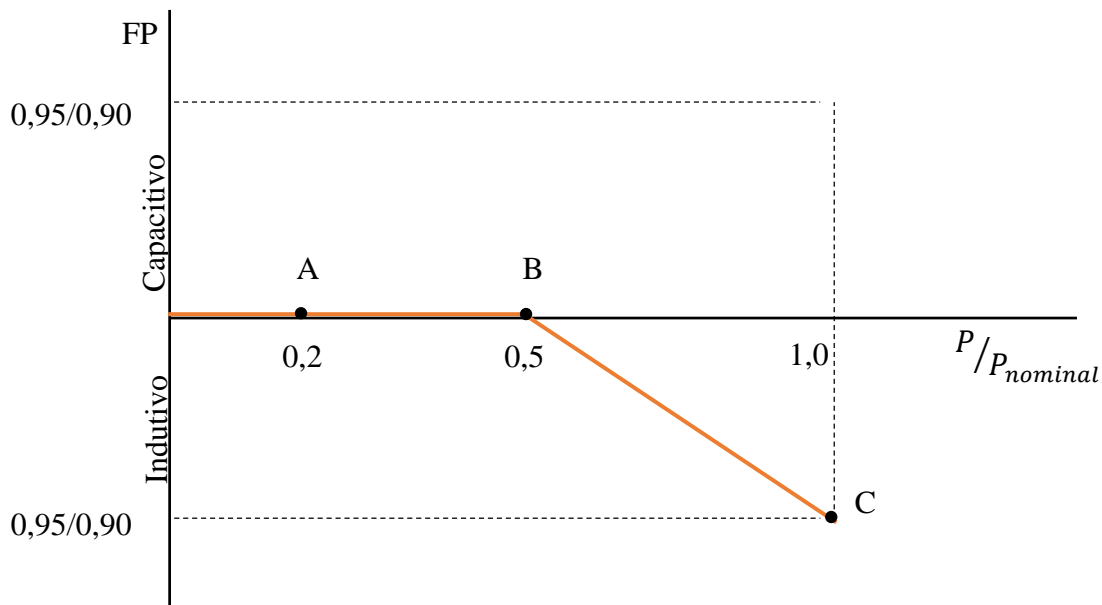


Figura 2.3: FP em função da potência ativa

A operação com fator de potência ajustável só deve ser habilitada quando a tensão no ponto de conexão ultrapassa a tensão de ativação  $v_{ati}$ , valor ajustável entre 100% e 110% do valor nominal da rede e como valor padrão pode-se estabelecer em 104%. A curva de ajuste do fator de potência só pode ser desabilitada quando a tensão da rede retrocede a um valor abaixo da tensão de desativação  $v_{des}$ , valor ajustável entre 90% e 100% da tensão nominal da rede, com o valor padrão em 100%.

Contudo, os limites a se utilizar na modelagem são expressados com as equações expostas abaixo:

$$\begin{cases} \textit{Ativado} = \textit{Verdadeiro} & \textit{se} & v > v_{ati} \\ \textit{Ativado} = \textit{Falso} & \textit{se} & v < v_{des} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} Q &= 0 & \textit{se} & \textit{Ativado} = \textit{Falso} \\ Q &= 0 & \textit{se} & \textit{Ativado} = \textit{Verdadeiro} \textit{ e } P \leq P_A \\ Q &= 0 & \textit{se} & \textit{Ativado} = \textit{Verdadeiro} \textit{ e } P \leq P_B \\ Q &= P_C \frac{\sqrt{1 - FP_C^2}}{FP_C} & \textit{se} & \textit{Ativado} = \textit{Verdadeiro} \textit{ e } P \geq P_C \\ Q &= P \frac{\sqrt{1 - FP^2}}{FP} & \textit{se} & \textit{Ativado} = \textit{Verdadeiro} \textit{ e } P_B < P < P_C \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$FP = FP_C + \frac{(FP_C - FP_B)}{(P_C - P_B)}(P - P_C) \quad (2.4)$$

Os parâmetros  $P_A$ ,  $P_B$  e  $P_C$  são os valores da potência ativa dos pontos A, B e C, e os parâmetros  $FP_B$  e  $FP_C$  são os fatores de potência dos pontos B e C.

A variável *Ativado* da (2.2) indica se a correção do fator de potência será realizada. Caso essa afirmação seja verdadeira, se calcula com (2.3) a potência reativa  $Q$  pelo inversor em função da potência ativa fornecida  $P$ . Com a expressão (2.4) se computa o fator de potência quando a operação está entre os pontos  $P_B$  e  $P_C$ .

### 2.6.3 Sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior a 6 kW

O inversor deve apresentar o modo de trabalho com fator de potência unitário, similar ao comportamento mostrado no tópico 2.6.1.

Um modo de trabalho alternativo ao anterior, é com fator de potência ajustável, similar ao mostrado no tópico 2.6.2, com a diferença do valor limite do fator de potência, que é 0,90 e não 0,95, conforme ilustrado na Figura 2.3.

O segundo modo de operação opcional do inversor é um pouco irrestrito no sentido de que o controle da potência reativa é determinado pelas condições da rede e definido individualmente pelo operador da rede, no entanto, os limites de operação se dão conforme ilustrado na Figura 2.4.

Na Figura 2.4 é mostrada a capacidade do inversor de operar com fator de potência desde 0,9 indutivo até 0,9 capacitivo sempre que a potência aparente seja maior ou igual a 20% da potência nominal  $P_{nom}$  e menor ou igual a 100%. Portanto, para um valor dado de fornecimento de potência ativa  $P$  os limites de potência reativa,  $Q_{min}$  e  $Q_{max}$  são determinados com as expressões de (2.5).

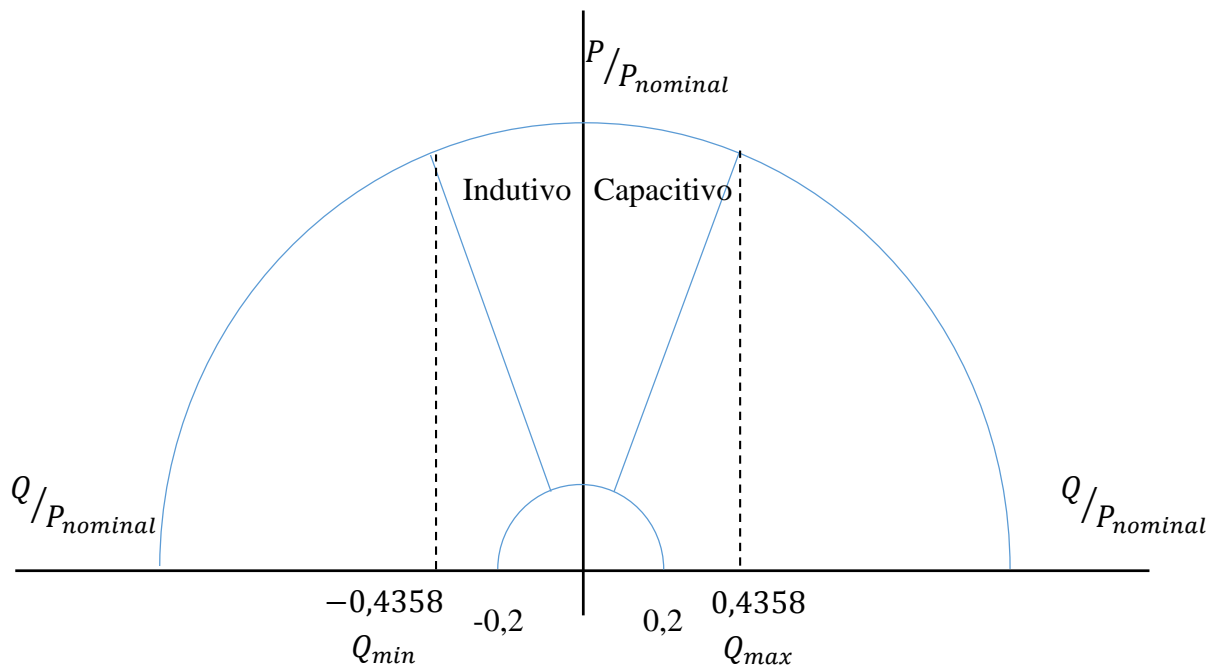


Figura 2.4: Limites operacionais demanda/injeção de potência reativa para sistemas com potência nominal superior a 6 kW

As equações anunciam que, ao ser  $P$  igual ou maior a 90% da  $P_{nom}$ , os limites de  $Q$  são determinados pela potência aparente máxima. Quando  $P$  é maior a 20 % de  $P_{nom}$  e menor a 90%, os limites se determinam pelo fator de potência mínimo de 0,9. Os demais casos são combinações entre o limite por fator de potência mínimo e por limite de potência aparente igual ou maior a 20% de  $P_{nom}$ , sendo que nesta última zona se têm duas regiões, as quais serão selecionadas dependendo se o inversor injeta ou absorve potência reativa da rede.

$$\begin{cases} Q_{max} = \sqrt{P_{nom}^2 - P^2} \\ Q_{min} = -Q_{max} \end{cases} \quad \text{se } 0,9P_{nom} \leq P \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} Q_{max} = P \frac{0,4358}{0,9} \\ Q_{min} = -Q_{max} \end{cases} \quad \text{se} \quad 0,2P_{nom} < P < 0,9P_{nom}$$

$$\begin{cases} Q_{max} = P \frac{0,4358}{0,9} \\ Q_{min} = \sqrt{(0,2P_{nom})^2 - P^2} \end{cases} \quad \text{se} \quad P \leq 0,2P_{nom} \quad \text{e} \quad Q > 0$$

$$\begin{cases} Q_{max} = -\sqrt{(0,2P_{nom})^2 - P^2} \\ Q_{min} = -P \frac{0,4358}{0,9} \end{cases} \quad \text{se} \quad P \leq 0,2P_{nom} \quad \text{e} \quad Q < 0$$

No Capítulo 3 serão mostradas em detalhes as modelagens do controle BIVV e do controle IVVH.

# Capítulo 3

## Modelagens do inversor de frequência no fluxo de potência

Nos fluxos de potência, a modelagem dos geradores distribuídos que utilizam como interface o inversor de frequência, vem sendo feita, geralmente, semelhantemente à modelagem dos geradores de interface direta, como o gerador síncrono. Por outro lado, a evolução da eletrônica de potência, incluindo-se o inversor, permitem aplicar novas estratégias de operação providenciando-se a possibilidade de fornecer serviços ancilares na distribuição, sendo que dois desses serviços são o controle de tensão e o suporte de potência reativa, os quais estão relacionados com as funções avançadas BIVV e IVVH. Contudo, o surgimento das funções avançadas nas interfaces propicia a necessidade de revisar as modelagens dos inversores nos fluxos de potência.

Nos tópicos seguintes serão mostrados o método da varredura para resolver o fluxo de potência, bem como a implementação das modelagens clássicas dos geradores nesse método. Por último, serão apresentadas as modelagens dos inversores com as funções BIVV e IVVH e sua implementação no método da varredura.

### 3.1 O fluxo de potência

As análises dos sistemas de distribuição consistem tipicamente em um estudo do sistema em estado permanente sob condições normais de funcionamento, denominado, geralmente, como cálculo do fluxo de potência (FP), e um estudo do sistema sob condições de curto circuito, denominado análise de curto circuito. O cálculo de FP de um sistema de distribuição consiste em determinar as grandezas elétricas de modo similar ao cálculo de FP em sistemas de transmissão. O estudo completo é determinado nos passos apresentados a seguir:

- O módulo e fase da tensão de cada barra do sistema.
- O fluxo de linha em cada ramo do sistema, especificado em kW e kVAr.
- Potência das perdas em cada ramo.
- O fluxo total de entrada em kW e kVAr.

- Potência das perdas totais do sistema.
- Consumo de kW e kVAr de cada carga baseado em sua modelagem.

Considerando as características radiais dos sistemas de distribuição, as técnicas iterativas normalmente utilizadas nos cálculos de fluxo de potências nos sistemas de transmissão não são aplicáveis devido aos problemas de convergência. No entanto, Kersting (2012) apresentou uma técnica iterativa específica para os sistemas radiais, denominada *Modified Ladder iterative*.

Será exibido a seguir, a técnica pioneira *Modified Ladder iterative* e, posteriormente, o método recomendado atualmente em sistemas radiais, o qual foi derivado do anterior, e é denominado método *Forward/Backward Sweep*.

### 3.1.1 Método Modified Ladder iterative

Quando as cargas são modeladas como impedâncias constantes, uma consequência é o comportamento linear do sistema. Um exemplo é mostrado na Figura 3.1.

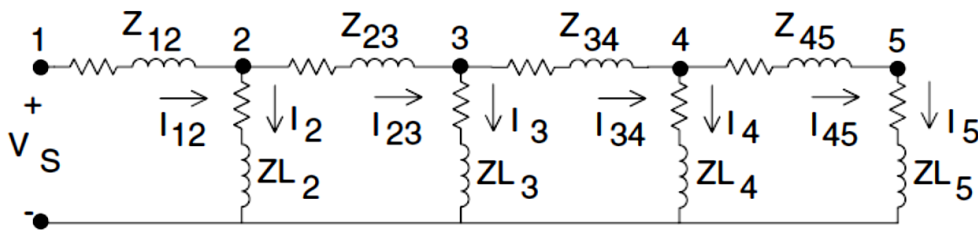


Figura 3.1: Circuito com cargas de impedância constante. Fonte: (Kersting, 2012)

Frequentemente, a tensão de alimentação  $V_S$  é um dado conhecido. Para conseguir iniciar o procedimento de resolução se assume um valor inicial na tensão da última carga  $V_5$ . Portanto, a corrente  $I_5$  da última carga de impedância  $ZL_5$  se obtém com (3.1) e aplicando as leis de tensões e de correntes de Kirchhoff se calculam as correntes e tensões do sistema completo, incluindo-se a tensão  $V_1$ , que deve ser comparada com  $V_S$  para verificar se a solução foi atingida. Se os valores  $V_1$  e  $V_S$  não são iguais, calcula-se a relação  $R$  entre a tensão especificada e a calculada com (3.2). Considerando-se a rede linear, todas as correntes das cargas e das linhas, assim como as tensões dos nós do sistema podem ser multiplicados por  $R$  conseguindo-se a solução final (Kersting, 2012).

$$I_5 = \frac{V_5}{ZL_5} \quad (3.1)$$

$$R = \frac{V_S}{V_1} \quad (3.2)$$

Quando o sistema tem cargas de potência constante, como na Figura 3.2, a rede é não linear e o fluxo de potência não pode ser solucionado diretamente com o método explicado anteriormente. Um método similar ao anterior que é apropriado para resolver o problema de forma iterativa é mostrado a seguir.

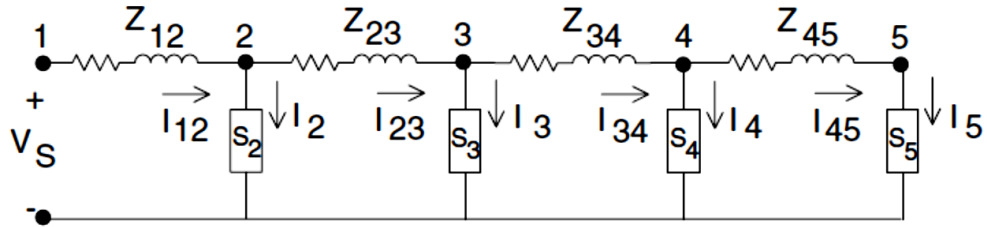


Figura 3.2: Circuito com cargas de potência constante. Fonte: (Kersting, 2012)

O processo consiste em duas varreduras. Na primeira, a varredura *forward*, as correntes das cargas e dos ramos e as tensões nas barras são atualizadas com as leis de tensão e correntes de Kirchhoff, sendo que a corrente de cada carga é determinada por (3.3). Se no final da varredura a tensão  $V_1$  não resulta igual a tensão especificada  $V_s$ , as grandezas do sistema não poderão ser atualizadas mediante o fator  $R$  de (3.2) porque o sistema é não linear, porém, as tensões e as correntes serão atualizadas na segunda varredura, a varredura *backward*, considerando-se a lei de Kirchhoff e as correntes obtidas na varredura *forward*, adotando-se como tensão de referência a  $V_s$ . As duas varreduras são efetuadas repetidamente até que a diferença entre  $V_1$  e  $V_s$  sejam menores a uma tolerância preestabelecida (Kersting, 2012).

$$I = \left(\frac{S}{v}\right)^* \quad (3.3)$$

A seguir é apresentado um método baseado no processo anterior frequentemente usado e conveniente para resolver o fluxo de potência nos sistemas de distribuição.

### 3.1.2 Método Forward/Backward Sweep

Os algoritmos *Forward/Backward Sweep* poderiam ser classificados em três tipos de métodos: soma de correntes, soma de potências e soma de impedâncias. O método soma de correntes têm muita similitude com o método de Kersting. Na continuação se exibirá o algoritmo extraído de Cheng & Shirmohammadi (1995).

Cada iteração consiste em 3 etapas: o cálculo das correntes nodais e as varreduras *Backward* e *Forward*. Na Figura 3.3 pode-se observar o processo completo. Inicia-se dando o

valor à iteração  $k = 0$  e estabelecendo os valores iniciais aos módulos e ângulos das tensões de cada nó, logo se acrescenta uma unidade à variável  $k$ .

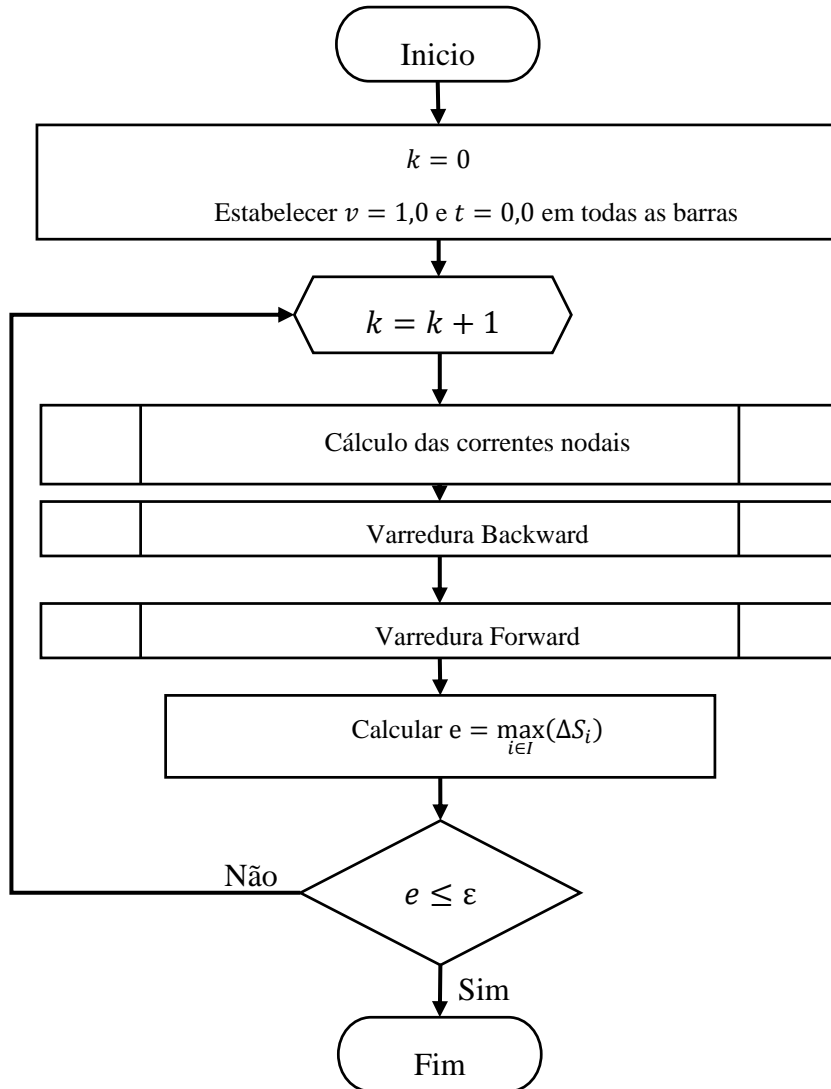


Figura 3.3: Fluxograma do método da varredura.

Em seguida, calculam-se as correntes injetadas  $I_i$  na iteração  $k$  em cada nó  $i$  com (3.4). Sendo  $S_i$  a potência injetada,  $V_i$  a tensão,  $Y_i$  a admitância dos elementos shunt, nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} (S_{ia}/V_{ia}^{(k-1)})^* \\ (S_{ib}/V_{ib}^{(k-1)})^* \\ (S_{ic}/V_{ic}^{(k-1)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{k-1} \quad (3.4)$$



No próximo passo se efetua a varredura *Backward*, começando desde as barras terminais em direção à barra da subestação, onde se atualiza a corrente  $J_l$  do ramo montante  $l$  da barra  $j$  com (3.5), sendo  $M$  o conjunto das barras jusantes.

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^k = - \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^k + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \end{bmatrix}^k \quad (3.5)$$

Após, realiza-se a varredura *Forward*, começando desde a barra da subestação em direção às barras terminais, onde se atualiza a tensão  $V_j$  mediante a equação (3.6), a atualização é feita em cada nó  $j$  alimentado através do ramo  $l$  pelo nó  $i$ , sendo  $Z_l$  a matriz impedância desse ramo.

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ba,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ca,l} & Z_{cb,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^k \quad (3.6)$$

Por último, se obtém o *mismatch* de potência com (3.7) em cada barra  $i$  do conjunto  $I$  formado por todos os nós do sistema, depois se calcula o maior *mismatch*  $e$  e se compara com a tolerância  $\varepsilon$ . Se o critério de convergência for cumprido, o processo será finalizado, do contrário o mesmo deverá ser repetido.

$$\begin{aligned} \Delta S_{ia}^k &= V_{ia}^k (I_{ia}^k)^* - Y_{ia}^* |V_{ia}|^2 - S_{ia} \\ \Delta S_{ib}^k &= V_{ib}^k (I_{ib}^k)^* - Y_{ib}^* |V_{ib}|^2 - S_{ib} \\ \Delta S_{ic}^k &= V_{ic}^k (I_{ic}^k)^* - Y_{ic}^* |V_{ic}|^2 - S_{ic} \end{aligned} \quad (3.7)$$

## 3.2 Modelagens típicas da Geração Distribuída

A modelagem típica da geração distribuída nos fluxos de potências em sistemas de distribuição é mediante nós PV e nós PQ.

### 3.2.1 Implementação dos nós de geração tipo PQ

Os nós de geração PQ são tratados de forma semelhante aos nós de carga com potência constante, ou seja, aos nós de carga PQ. A diferença entre as duas modelagens está no sentido da injeção de corrente, sendo que no nó de geração PQ a corrente de sinal positiva é injetada

no sistema e no nó de carga PQ é absorvida desde o sistema. Com frequência, nos fluxos de potência, a implementação dos nós de geração PQ se utilizam os mesmos nós de carga de potência constante mudando somente o sinal da potência, representando-se dessa maneira o sentido contrário das correntes de ambas modelagens, e por isso, na literatura as vezes se encontram os nós de geração PQ denominados como nós de carga negativa (Moghaddas-Tafreshi & Mashhour, 2009).

A potência injetada no nó  $i$  é calculada com (3.8), sendo  $P_{Gi}$  e  $P_{Ci}$  as potências ativas de geração e de carga, e  $Q_{Gi}$  e  $Q_{Ci}$  as potências reativas de geração e de carga, respetivamente. Note-se que as potências injetadas são fixas e, portanto, não mudam ao longo da resolução do fluxo de potência (admitindo a carga imutável).

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Ci} \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Ci} \end{cases} \quad (3.8)$$

### 3.2.2 Implementação dos nós de geração tipo PV

Nos nós de geração PV mantém fixo o valor da potência ativa fornecida e o módulo da tensão é controlado para atingir o valor estabelecido. Um tratamento especial deve ser realizado para poder obter a solução do fluxo de potência. O nível de tensão estabelecido nessas barras está relacionado com o controle da potência reativa fornecida que, por ser não linear, a relação entre a tensão e a potência, tem que ser solucionado utilizando um método iterativo. A seguir, descreve-se um procedimento para o cálculo da potência reativa, baseado no método apresentado em Cheng & Shirmohammadi (1995).

A relação incremental entre o módulo da tensão e o módulo do componente da corrente reativa injetada é expressada em (3.9), onde  $[Z_v]$  é uma matriz com valores reais constantes, chamada de matriz de sensibilidade dos nós PV, e a dimensão é dada pelo número de nós PV.

$$[Z_v][I_q]^\gamma = [\Delta V]^\gamma \quad (3.9)$$

A matriz  $[Z_v]$  pode ser formada observando-se as seguintes propriedades dos valores que a compõem. Os valores da diagonal são o módulo da soma da impedância de sequência positiva de todos os ramos, entre o nó  $i$  e o nó de referência. Se dois nós  $i$  e  $j$  têm caminhos completamente diferentes até o nó referência, então  $z_{ij}$  é zero. Se  $i$  e  $j$  possuem parte do caminho em comum até o nó referência, então  $z_{ij}$  é igual ao módulo da soma das impedâncias de sequência positiva de todos os ramos em comum.

Resolvendo (3.9) encontra-se o vetor dos módulos das correntes injetadas de componentes reativas  $[I_q]$  para cada nó  $i$  tipo PV na iteração  $\gamma$ . O vetor  $[\Delta V]^\gamma$  é formado pelas diferenças entre a tensão especificada e o módulo da tensão de sequência positiva de cada nó  $i$ .

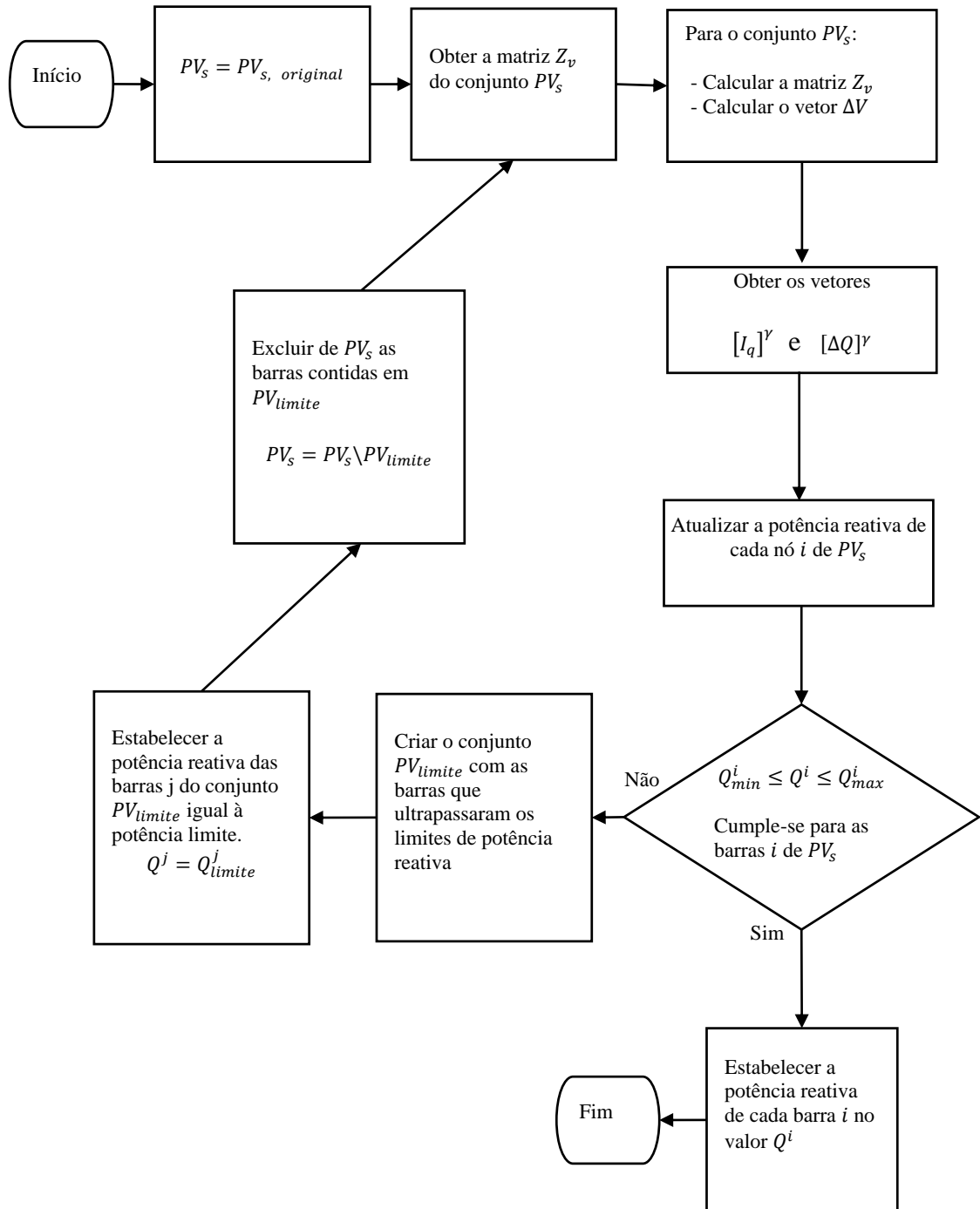


Figura 3.4: Fluxograma do método da compensação.

Tendo os valores das correntes de componente reativa necessárias para corrigir o valor da tensão, pode-se calcular com (3.10) o vetor  $[\Delta Q]^\gamma$ , que é o vetor dos incrementos das potências reativas de cada nó  $i$  tipo PV aplicados na atualização da potência reativa. O vetor  $||[V_1]^\gamma||$  é formado pelos módulos das tensões de sequência positiva na iteração  $\gamma$ .

$$[\Delta Q]^\gamma_{(i)} = |[V_1]^\gamma|_{(i)} [I_q]^\gamma_{(i)} \quad (3.10)$$

A Figura 3.4 exibe o fluxograma do processo de correção da potência reativa.  $PV_s$  representa o conjunto de nós PV, cada nó que ultrapassa a potência reativa limite deve ser excluído do conjunto e estabelecer sua potência reativa nesse valor limite.

Uma vez atualizado, o valor da potência reativa gerada para calcular a potência injetada nos nós PV é determinada a partir da mesma equação dos nós de geração PQ, a equação (3.8).

A modelagem PQ representa os geradores distribuídos que mantem fixa a potência ativa e reativa, e a modelagem PV os que mantem fixo o fornecimento da potência ativa e controlam a tensão num valor constante. Essas modelagens não são aplicáveis aos inversores de frequência modernos, os quais já possuem funções avançadas e podem ser configurados com diversas estratégias de controle. Por exemplo, se o inversor foi configurado para prover potência reativa numa quantidade dependente linearmente da tensão, nenhuma das duas modelagens representaria esse comportamento, porque a modelagem PQ não muda a injeção de potência reativa e na modelagem PV é alterada a potência reativa, porém, a relação é não linear com a tensão. No decorrer do trabalho são expostas as modelagens de duas funções avançadas dos inversores de frequência.

### 3.3 Modelagens de inversores com funções avançadas

As funções avançadas dos inversores, como por exemplo, funções que relacionam a potência reativa injetada e a tensão, geralmente possuem curvas indicando os pares de valores que determinam o comportamento. É assim que na modelagem, a princípio, dever-se-ia contemplar essas curvas para o processo iterativo da resolução do fluxo de potência, embora é possível ter-se problemas de convergência ao não ser utilizado um método adequado para a implementação da modelagem.

Serão apresentadas as modelagens dos inversores com funções avançadas que são a base das modelagens propostas no Capítulo 4.

#### 3.3.1 Basic Intelligent Volt-Var

Nesse tipo de controle, as decisões do comportamento do inversor são tomadas segundo a tensão no ponto de conexão entre o inversor e o sistema. O comportamento típico é dado por uma ou mais curvas. Tem-se um exemplo da função BIVV na Figura 3.5, onde o inversor absorve a capacidade máxima de potência reativa da rede quando a tensão é superior ao ponto P5, e injeta a capacidade máxima de potência reativa se a tensão é menor de P2. Deve-se ressaltar que quando a tensão desce de  $v_{min}$  ou ultrapassa à  $v_{max}$ , o inversor é desligado do sistema, valores fixados definidos por P1 e P6.

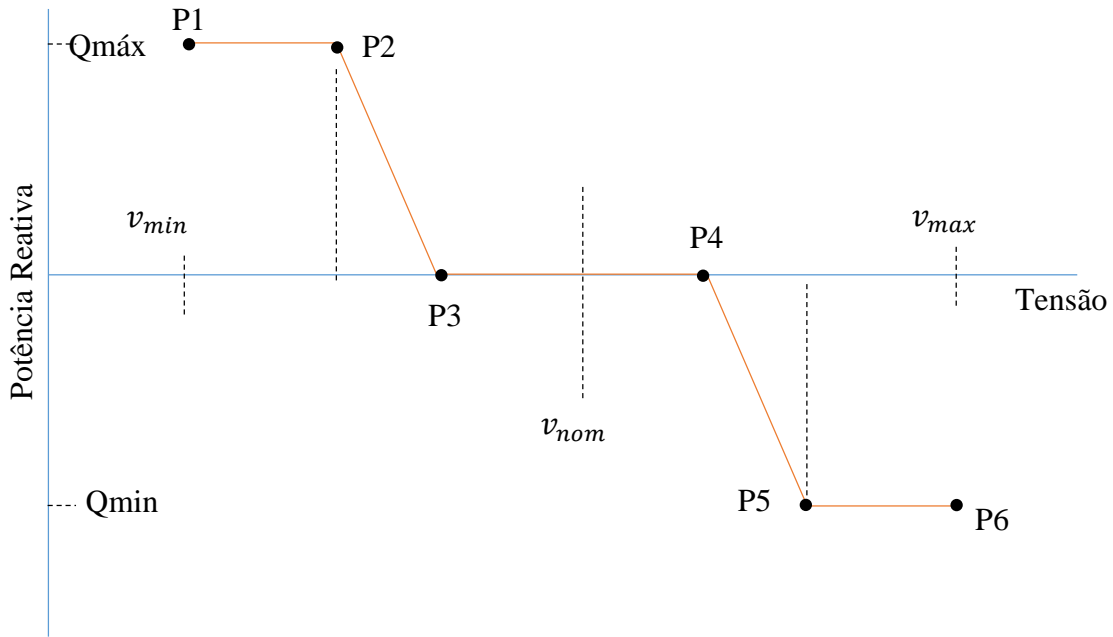


Figura 3.5: Ilustração do controle *Basic Intelligent Volt-Var*

O controle tem um comportamento similar à modelagem PV no sentido de que muda a quantidade de potência reativa dependendo da tensão, porém, a mudança na injeção de potência reativa depende linearmente da tensão por uma função definida em trechos, calculando-se a injeção de potência reativa entre P2 e P3 linearmente, e do mesmo modo entre P4 e P5. Também na ilustração está representada uma zona morta entre P3 e P4, não injetando potência reativa nesses valores de tensões, porém, ao configurar os pontos de controle poderia fazer coincidir os pontos P3 e P4 e com isso suprimir a zona morta (Dugan *et al.*, 2013).

Contudo, a formulação matemática para atualizar a potência reativa injetada pelo inversor está exemplificado em (3.11).

$$f_{BIVV}(v) \begin{cases} 0 & \text{se } v < v_{P1} \\ Q_{P2} & \text{se } v \leq v_{P2} \\ Q_{P2} + \frac{Q_{P3} - Q_{P2}}{v_{P3} - v_{P2}}(v - v_{P2}) & \text{se } v_{P2} < v \leq v_{P3} \\ 0 & \text{se } v_{P3} < v < v_{P4} \\ Q_{P5} + \frac{Q_{P5} - Q_{P4}}{v_{P5} - v_{P4}}(v - v_{P5}) & \text{se } v_{P4} \leq v < v_{P5} \\ Q_{P5} & \text{se } v_{P5} \leq v \\ 0 & \text{se } v_{P6} < v \end{cases} \quad (3.11)$$

Sendo  $Q_{P_i}$  e  $v_{P_i}$  o valor da potência reativa e da tensão de cada o ponto  $P_i$  pertencente à configuração da função BIVV. A função  $f_{BIVV}(v)$  fornece o valor da potência reativa a ser

injetada tendo como variável o valor da tensão  $v$ . Nas simulações onde se atualiza a potência injetada mediante uma implementação direta da modelagem, se utilizaria o valor ministrado pela função, como será demonstrado posteriormente, a implementação desse modo pode provocar alguns problemas de convergência. No Capítulo 4 se faz uma análise detalhada dos eventuais problemas de convergência e se propõe um método conveniente para implementar a modelagem.

### 3.3.2 Intelligent Volt-Var with Hysteresis

A estratégia de controle *Intelligent Volt-Var with Hysteresis* (IVVH) tem duas curvas similares ao controle BIVV definindo uma região de histereses, como se observa na Figura 3.6. Quando a tensão no ponto de conexão está aumentando, os pontos operativos são aqueles que são dados pela curva P1-P2-P3-P4, caso contrário, os pontos operativos são definidos pela curva P4-P5-P6-P1. Se a variação do módulo da tensão inverte o sentido, a potência reativa injetada permanece constante até alcançar um ponto perimetral da zona de histereses, e só então começa a mudar a quantidade de potência reativa injetada em função de P2-P3 ou P5-P6, conforme seja o caso. Também existem as tensões limites de operação, quando a tensão desce de P1 ou ultrapassa P4 o inversor é desligado da rede (Dugan *et al.*, 2013).

A modelagem matemática do comportamento IVVH pode-se formular com as seguintes equações:

$$v_{inf} = v_6 + \frac{v_6 - v_5}{Q_6 - Q_5} (Q_{anterior} - Q_6) \quad (3.12)$$

$$v_{sup} = v_3 + \frac{v_3 - v_2}{Q_3 - Q_2} (Q_{anterior} - Q_3) \quad (3.13)$$

$$\begin{array}{llll}
 Q = 0 & \text{se} & v < v_1 & \text{ou} & v_4 < v \\
 Q = Q_6 & \text{se} & v < v_{inf} & \text{e} & v \leq v_6 \\
 Q = Q_6 + \frac{Q_5 - Q_6}{v_5 - v_6} (v - v_6) & \text{se} & v < v_{inf} & \text{e} & v > v_6 \\
 Q = Q_3 & \text{se} & v_{sup} < v & \text{e} & v \geq v_3 \\
 Q = Q_3 - \frac{Q_2 - Q_3}{v_2 - v_3} (v_3 - v) & \text{se} & v_{sup} < v & \text{e} & v < v_3 \\
 Q = Q_{anterior} & \text{se} & v_{inf} \leq v \leq v_{sup} & & 
 \end{array} \quad (3.14)$$

Os valores  $v_{inf}$  e  $v_{sup}$  obtidos com (3.12) e (3.13), são as tensões que limitam a operação dentro da região de histerese quando o inversor está injetando a quantidade  $Q_{anterior}$  de potência reativa. Se a tensão do inversor  $v$  encontra-se dentro desses limites, o valor de potência reativa  $Q$  que injetará o inversor permanece igual a  $Q_{anterior}$ , caso contrário, o valor  $Q$  será atualizado com (3.14).

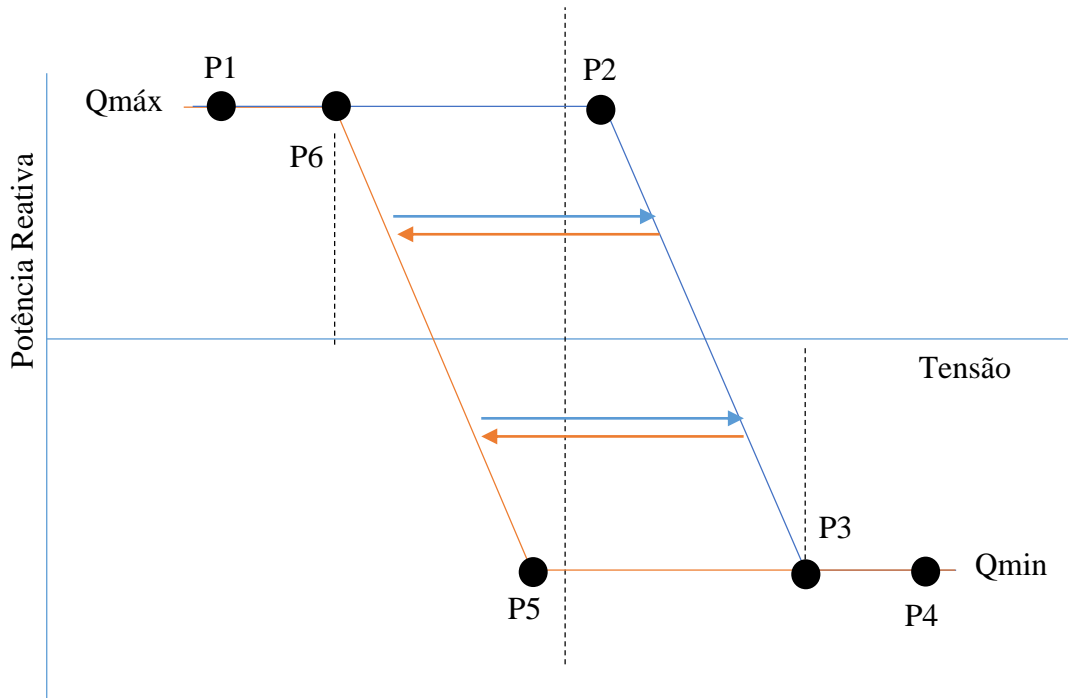


Figura 3.6: Ilustração do controle *Intelligent Volt-Var with Hysteresis*

A implementação da modelagem deste controle exige ter um histórico do estado do sistema de distribuição. No caso de análises não dinâmicas poderia se implementar a modelagem no fluxo de potência sem encontrar uma solução única, porém, brinda a possibilidade de descobrir a região dos pontos operativos de soluções fatíveis, explicado em detalhes no Capítulo 4.





# Capítulo 4

## Modelagens propostas dos inversores de frequência no fluxo de potência

Na Seção 3.3 foi apresentada a modelagem dos inversores de frequência considerando as curvas que definem o comportamento das funções avançadas. Utilizar as equações do controle BIVV para atualizar o valor da potência injetada pelo inversor em cada iteração do processo de solução do fluxo de potência poderia trazer problemas de convergência, por outra parte utilizar as equações do controle IVVH exige ter um histórico do estado do sistema não compatíveis em análises não dinâmicas. Tanto as análises dos problemas de convergência, tanto as propostas de implementação das modelagens são apresentadas a seguir.

### 4.1 Basic Intelligent Volt-Var

#### 4.1.1 Problema de convergência na implementação direta

Na Figura 4.1 se tem uma curva representando o comportamento de um nó pertencente a um sistema de distribuição. A curva descreve como varia a tensão ao ir mudando a potência reativa injetada (os eixos do gráfico estão dispostos desse modo para facilitar a análise), mantendo a carga constante no sistema e a potência ativa fornecida pelo inversor fixa. Na figura também se inclui a curva que ilustra o comportamento do controle BIVV com uma capacidade máxima de potência reativa de 2 p.u., sendo que este caso não foi considerada a zona morta do controle. O ponto S exhibe a solução do fluxo de potência do sistema quando no nó se encontra um inversor operando com o controle BIVV.

Procede-se com a análise para mostrar os problemas de convergência que poderiam se obter no método da varredura ao se atualizar a potência reativa nas sucessivas iterações de modo direto com a modelagem da subseção 3.3.1. Supondo que o sistema esteja operando no ponto 1 dado pela resolução do fluxo de potência e as condições iniciais, ou seja, nesta suposição o nó analisado está operando sem injetar potência reativa e com tensão de 0,97 p.u., fazendo com que as equações do controle BIVV calculariam que o inversor deve mudar o valor da injeção de potência reativa para 1,2 p.u. como indica o ponto 12 e, portanto, na seguinte resolução do

fluxo de potência, o sistema muda seu estado até o ponto 2 com uma tensão de 1,005 p.u. O comportamento do controle BIVV a uma tensão de 1,005 p.u. implicaria que o inversor agora absorva 0,15 p.u. de potência reativa, representado pelo ponto 23. Caso se dê continuidade ao processo de atualização da potência e solucione o fluxo de potência, como se observa, não se teria resultado convergente, ou seja, ao ir atualizando a potência reativa injetada diretamente mediante as equações do controle BIVV após cada resolução de fluxo de potência, poderia ocorrer que no processo iterativo não se convirja a uma solução.

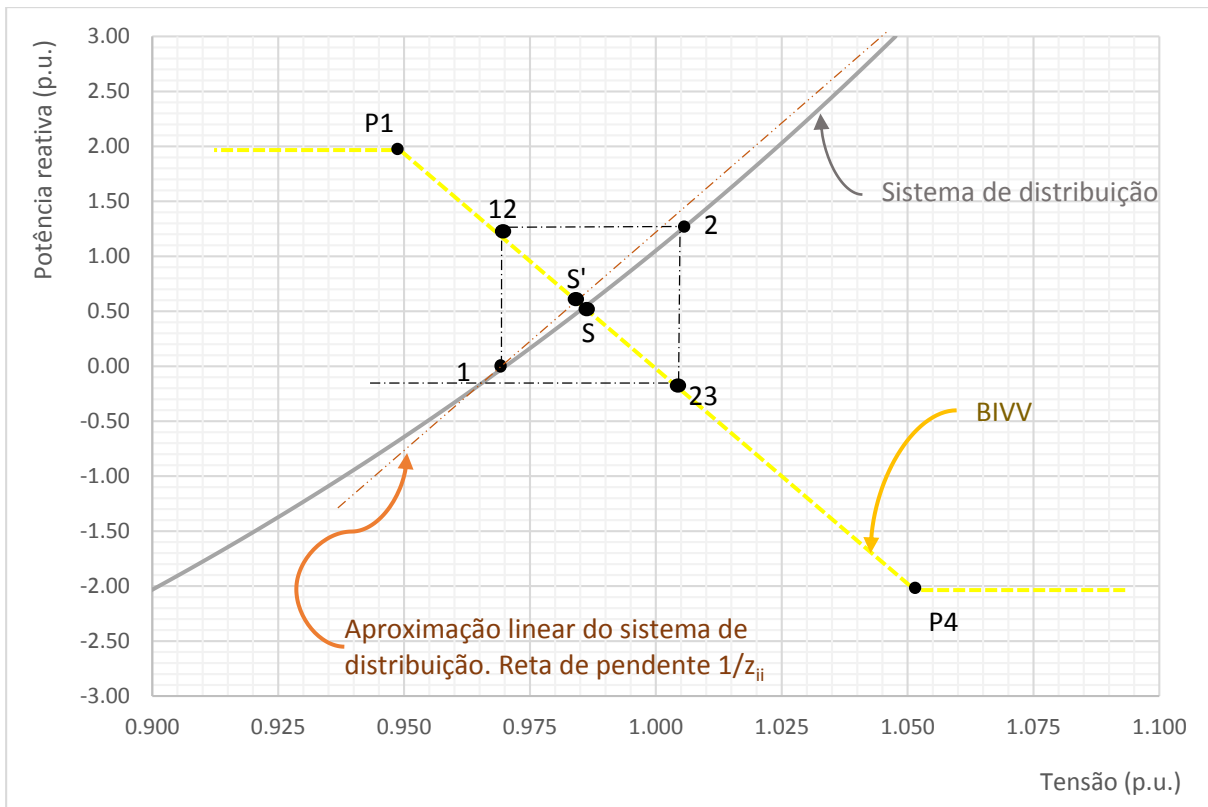


Figura 4.1: Ilustração do processo de atualização da potência reativa injetada para a função avançada BIVV com implementação direta.

Na literatura não se encontram publicações que discorram sobre a maneira de implementar a modelagem do controle BIVV especificamente no método da varredura. Por exemplo, em Demirok *et al.* (2009) são apresentadas equações da estratégia de controle de tensão similares às mostradas neste tópico e indicam somente que elas deveriam ser introduzidas mediante um script no programa PSCAD/EMTDC. Smith *et al.* (2011) discorrem sobre o desenvolvimento de um módulo para o Software OpenDSS que propiciam os comandos para incluir as funções avançadas dos inversores, porém, não exibem em detalhes a implementação no cálculo do fluxo com o método da varredura. Para evitar os problemas de divergência, os autores propõem limitar a variação de algumas variáveis por um fator definido pelo usuário, sendo que a metodologia de seleção do valor do fator não é anunciada. Em Electric Power Research Institute (2014) se especifica os comandos relacionados às funções avançadas dos inversores propostos pela EPRI. Dugan *et al.* (2013) apresentam as equações do controle BIVV e logo são introduzidas nas simulações mediante comandos próprios do software

OpenDSS, mas não se descreve o método de implementação e se é preciso tomar precauções respeito à convergência no processo de resolução.

Na continuação se faz o desenvolvimento de um método para implementar a modelagem do controle BIVV no método da varredura evitando os problemas de convergência.

#### 4.1.2 Método proposto para implementar o controle BIVV no método da varredura

Lembrando o método da compensação de Cheng & Shirmohammadi (1995) utilizado para implementar os nós PV no método da varredura, temos a matriz de sensibilidade, onde cada elemento da diagonal indica a relação entre a variação da corrente de componente reativa injetada e a variação da tensão de um nó. Se consideramos o sistema operando perto de tensões 1,0 p.u., poderia se dizer que o elemento da matriz de sensibilidade indica a relação entre a variação da tensão e a potência reativa injetada, portanto, com (4.1) teríamos uma aproximação linear da curva que relaciona a variação da potência reativa injetada e tensão em um nó. A linearização está esquematizada na Figura 4.1 pela reta que passa pelo ponto 1 e com uma pendente ou inclinação de valor  $1/z_{ii}$ , o qual, de maneira ilustrativa interceptando a curva de controle daria o ponto S', que poderia ser usado como o ponto solução aproximado e utilizado para atualizar o valor da potência reativa injetada na próxima iteração.

$$\Delta v = z_{ii} \Delta Q \quad (4.1)$$

O primeiro passo para calcular o ponto S' é encontrar o trecho da curva do controle que se deve considerar, para definir o trecho se comparam os valores de potência reativa calculada mediante a aproximação linear do sistema  $Q_{(v_k)}$  com os valores  $Q_k$  de cada ponto  $k$  definido no controle BIVV. O ramo que se deve considerar tem que cumprir a (4.2).

$$\Delta Q_{k-1} \times \Delta Q_k < 0 \quad (4.2)$$

O valor  $\Delta Q_k$  se calcula com (4.4), considerando-se que o valor  $Q_{(v_k)}$  para a tensão  $v_k$  no nó se estima com (4.3). Sendo  $Q$  e  $v$  o valor da potência reativa injetada e a tensão atual no nó.

$$Q_{(v_k)} = Q + \frac{v_k - v}{z_{ii}} \quad (4.3)$$

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_{(v_k)} \quad (4.4)$$

Contudo, se considera a reta que une os pontos  $(k - 1)$  e  $k$  do controle BIVV e a reta que lineariza a resposta do nó com pendente  $1/z_{ii}$ . Fazendo uso dos valores  $\Delta Q_k$  calculados nos pontos extremos e valendo-se da linearidade dos cálculos se escreve a expressão (4.5), a qual

relaciona o valor  $\Delta Q_{S'}$ , para o valor de tensão  $v_{S'}$ . Para encontrar o valor da tensão, solução entre o controle e a aproximação do sistema, o valor  $\Delta Q_{S'}$ , deve ser zero, fato que permite escrever a equação (4.6).

$$\Delta Q_{S'} = \Delta Q_k + \frac{\Delta Q_k - \Delta Q_{k-1}}{v_k - v_{k-1}} (v_{S'} - v_k) \quad (4.5)$$

$$v_{S'} = v_k - \frac{\Delta Q_k}{\frac{\Delta Q_k - \Delta Q_{k-1}}{v_k - v_{k-1}}} \quad (4.6)$$

A equação (4.6) oferece a tensão  $v_{S'}$ , que será utilizada como dado de entrada em  $f_{BIVV}(v_{S'})$  da (3.11) para calcular o valor da potência reativa que injetará o inversor na próxima iteração. O uso dessa equação se dá quando as tensões  $v_k$  e  $v_{k-1}$  dos pontos contíguos são de igual valor para evitar denominadores nulos, e nesse caso o valor da potência a injetar na próxima iteração se calcula diretamente com (4.7). Isso poderia acontecer, por exemplo, se um trecho da curva fora configurado com um comportamento análogo ao nó PV equivalente a uma linha vertical.

$$Q_{inversor} = Q_k - \Delta Q_k \quad (4.7)$$

Resumindo, com o valor obtido de (4.8) se atualiza a potência reativa injetada pelo inversor. Sendo  $v_{S'}$ , a tensão obtida com (4.6).

$$\begin{cases} Q_{inversor} = f_{BIVV}(v_{S'}) & \text{se } v_k \neq v_{k-1} \\ Q_{inversor} = Q_k - \Delta Q_k & \text{se } v_k = v_{k-1} \end{cases} \quad (4.8)$$

Na Figura 4.2 se exhibe um fluxograma que descreve o processo completo de atualização da potência reativa injetada pelo inversor, detalhados nos tópicos a seguir:

- 1) Ler a potência reativa  $Q$  e tensão  $v$  atual do inversor. Esses valores são obtidos depois de ter solucionado o fluxo de potência.
- 2) Calcular os valores  $\Delta Q_k$  mediante (4.4) em cada ponto que conformam a configuração da função  $f_{BIVV}(v)$  para encontrar os pontos  $(k - 1)$  e  $k$  que satisfaçam à (4.2). Esses dois pontos serão considerados nos cálculos posteriores.
- 3) Se  $v_k \neq v_{k-1}$  calcular a tensão  $v_{S'}$ , mediante (4.6). Sendo  $S'$  o ponto operativo solução do inversor de frequência quando a relação entre a tensão e a potência reativa injetada no nó onde for ligado o inversor é aproximado por uma linearização. Calcular  $Q_{inversor}$  com a função  $f_{BIVV}(v)$  considerando a tensão  $v_{S'}$ , e depois ir ao item (5).
- 4) Se  $v_k = v_{k-1}$ , calcular  $Q_{inversor}$  com (4.7).
- 5) Atualizar a potência injetada pelo inversor com o valor  $Q_{inversor}$ .

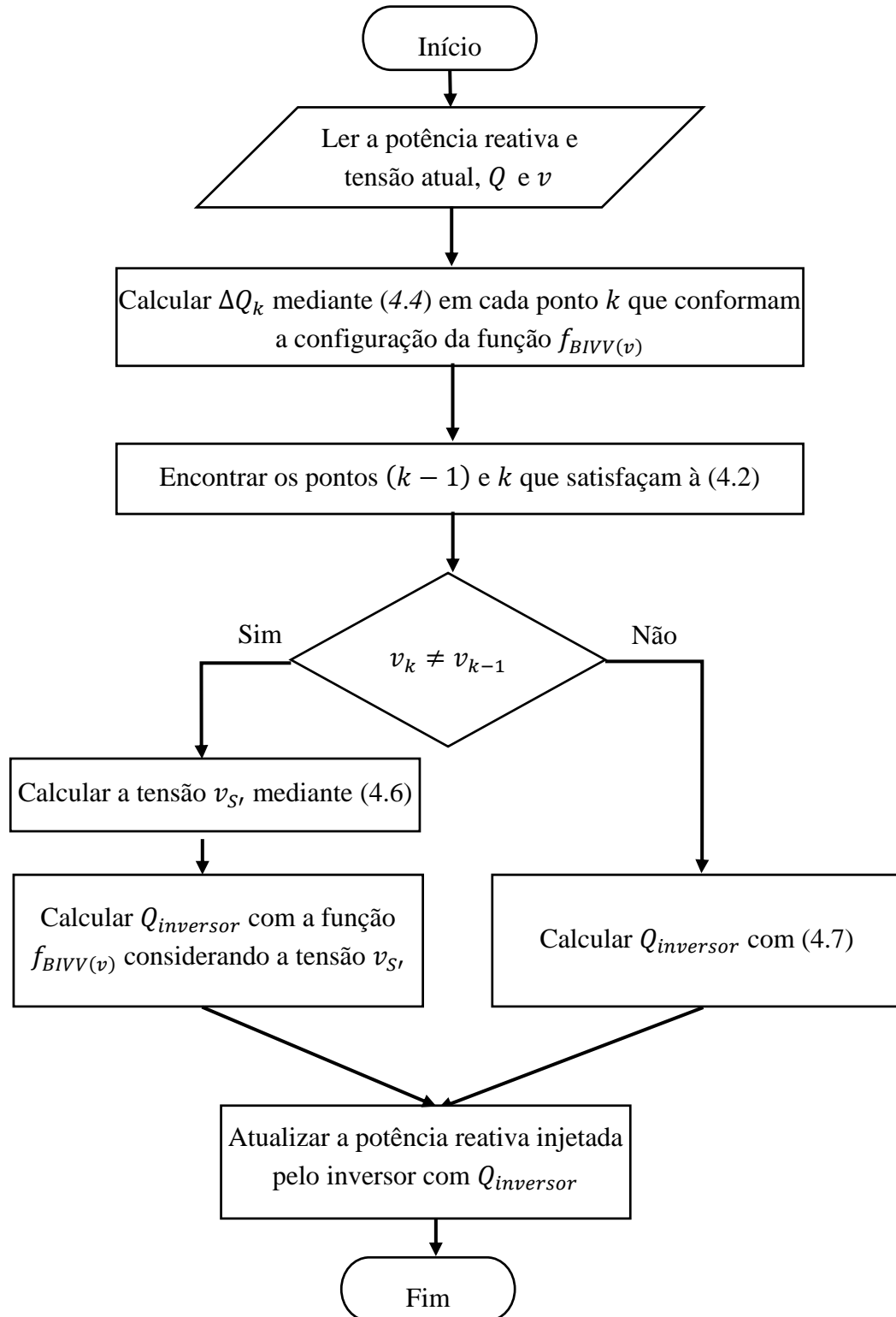


Figura 4.2: Processo para atualizar adequadamente no método da varredura a potência reativa do inversor que opera com o controle BIVV.

## 4.2 Intelligent Volt-Var with Hysteresis

### 4.2.1 O problema da implementação do controle em análises não dinâmicas

Considerando a modelagem da subseção 3.3.2, na resolução do fluxo de potência dever-se-ia conhecer o estado anterior do sistema, e caso a análise não fosse dinâmica, não se poderia ter um histórico do sistema. Neste trabalho, as análises a serem feitas são todas de casos do sistema em condições especificadas sem ter conhecimento do estado anterior, é assim que, para fins analíticos, seria útil encontrar o intervalo das soluções factíveis do inversor operando no sistema.

### 4.2.2 Método para implementar a modelagem IVVH no método da varredura

Com o intuito de implementar a modelagem do controle IVVH no método da varredura e encontrar o conjunto de soluções, se consideram algumas características de interesse do controle. As curvas que encerram na região de histereses são semelhantes às curvas do controle BIVV e poderia usá-las para localizar os pontos operativos limites dos resultados factíveis do fluxo de potência.

Como é exemplificado na Figura 4.3, têm-se as curvas do controle IVVH (P1-P6) e uma curva que relaciona o valor da tensão e a potência reativa injetada em um nó do sistema para um nível de carregamento fixo. O trecho da curva do sistema que passa na zona de histereses representa o conjunto de soluções factíveis e os limites estarão dados pelos pontos L2 e L1. Um ponto com tensão menor será o representante da hipótese de ter precedentemente carregamento maior, e o outro ponto de tensão maior será o representante da hipótese de ter precedentemente carregamento menor ao atual.

Contudo, resolvendo dois fluxos de potência, um para cada curva limite considerada semelhante à curva do controle BIVV, se obtém os limites da região solução da implementação da modelagem do controle IVVH para um nível de carregamento estabelecido. O processo se descreve a seguir:

- 1) Considerar a curva P1-P2-P3-P4 igual ao controle BIVV e resolver o fluxo de potência utilizando a modelagem exibida na Figura 4.2. O ponto operativo resultante será o ponto limite L1.
- 2) Considerar a curva P4-P5-P6-P1 igual ao controle BIVV e resolver o fluxo de potência de modo análogo ao item anterior. O ponto operativo resultante será o ponto limite L2.

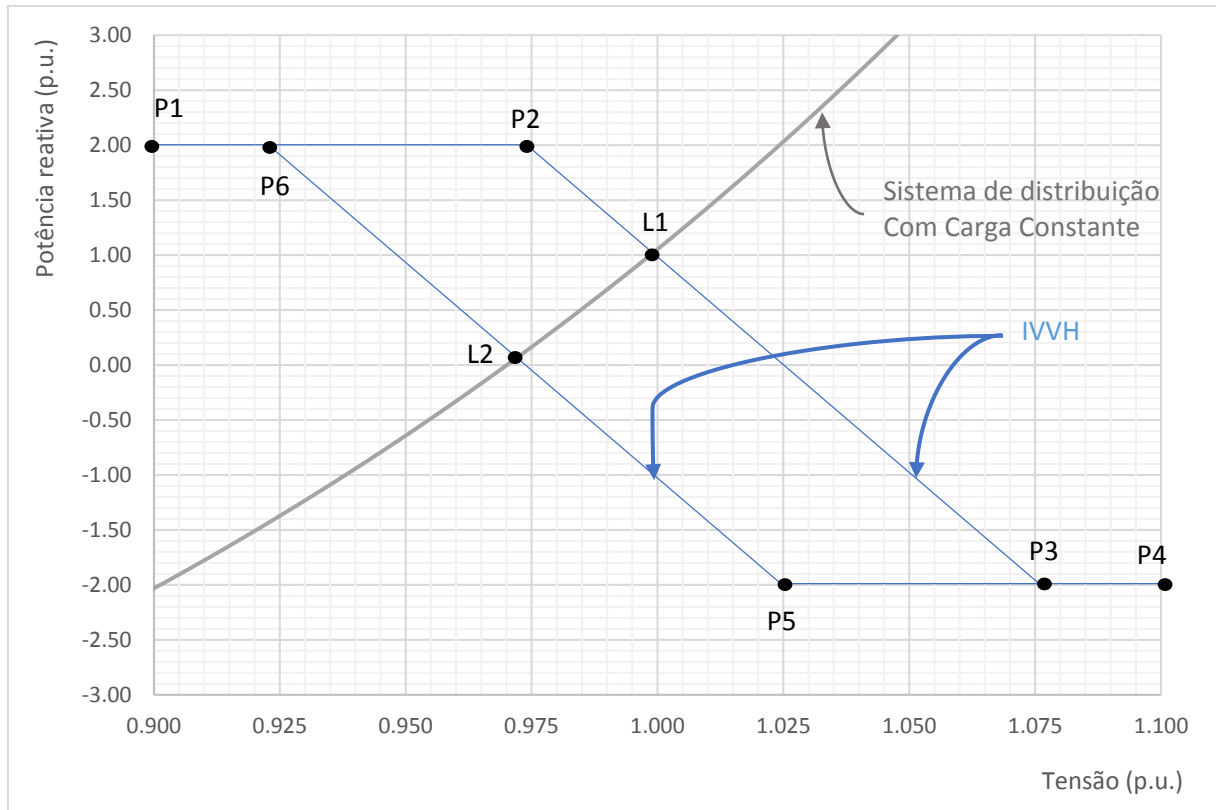


Figura 4.3: Esquematização das soluções fatíveis do controle IVVH

Com o procedimento proposto não se obtém todos os pontos operativos das soluções fatíveis, mas se obtém os pontos limites. Na Figura 4.3 pode-se perceber que a curva do sistema entre os limites L1 e L2 é não linear, porém, poderia assumir-se que ao se aproximar das soluções mediante uma reta que une os pontos L1 e L2, não se cometeria grandes erros para o propósito das análises que serão feitas no Capítulo 5.





# Capítulo 5

## Análises e Resultados

### 5.1 Análises

Neste capítulo serão realizadas simulações em estado permanente do sistema de distribuição teste IEEE – 34, no qual será inserido um gerador distribuído que utiliza como interface um inversor de frequência.

#### 5.1.1 Sistema de distribuição teste

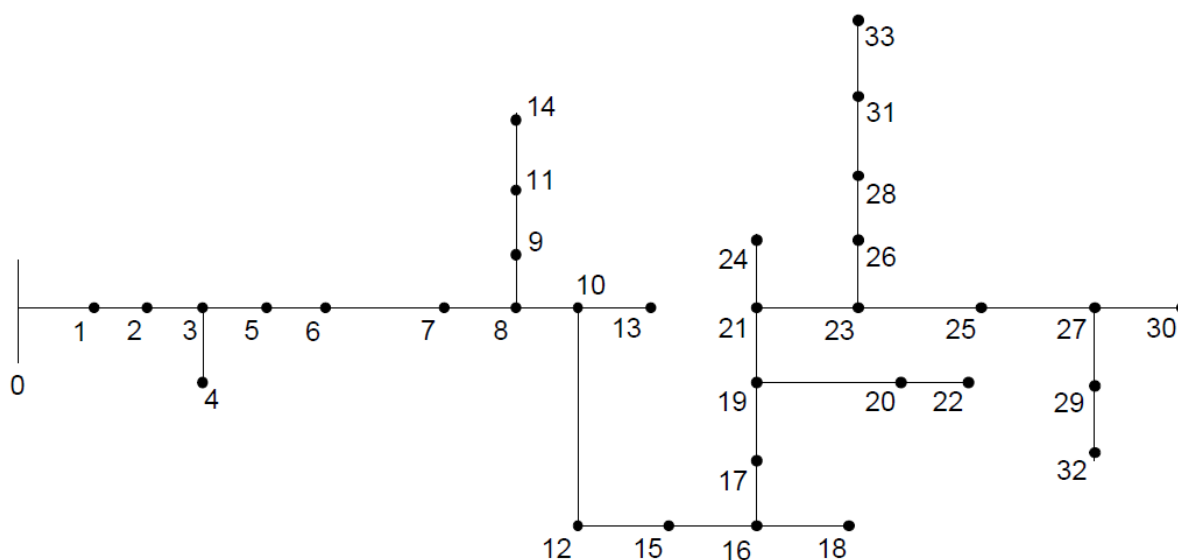


Figura 5.1: Sistema de distribuição teste IEEE-34 modificado

O sistema teste IEEE-34 modificado pode ser observado na Figura 5.1, onde o nó 0 representa a subestação que alimenta o sistema de distribuição, portanto, será o nó de referência para os cálculos de fluxos de potência, fixando sua tensão em 25,647 kV (1,03 p.u.). Não foi considerado nenhum regulador de tensão, capacitor ou transformação de nível de tensão, todas as cargas foram modeladas como cargas de potência constante, já que o objetivo é analisar e avaliar a modelagem do gerador distribuído e do inversor de frequência. Os parâmetros elétricos

das linhas e características dos nós estão indicados nos ANEXOS, onde todas as grandezas elétricas serão expressadas em valores por unidade, sendo que a base de tensão adotada é  $V_B = 24,9 \text{ kV}$  e a base de potência  $S_B = 1,0 \text{ MVA}$ . A fonte distribuída se conecta através do inversor de frequência ao nó 7. O método da varredura foi implementado na linguagem Python para resolver os fluxos de potência.

### 5.1.2 Métodos de análises

Na primeira subseção 5.2.1 da seção 5.2 se expõe uma análise de caso do tipo numérica e esmiuçada com o objetivo de evidenciar a eficácia dos métodos desenvolvidos neste trabalho para implementar as modelagens do inversor com funções avançadas.

Na subseção 5.2.2 serão feitas simulações para várias modelagens do inversor, com distintos valores de fornecimento de potência ativa pela fonte distribuída e em diferentes condições de carga do sistema. Os resultados serão ilustrados por meio de gráficos que possuem curvas que relacionam a tensão e potência injetada no nó onde se encontra o inversor, que logo serão sobrepostos com as curvas das estratégias de controle do inversor.

Na subseção 5.2.3 serão traçados os perfis de tensão do sistema de distribuição em diversos pontos operativos obtidos da subseção anterior.

Finalmente, na subseção 5.2.4 será avaliado, com OpenDSS, as implementações feitas neste trabalho. Se avaliará o método da varredura, a modelagem PV e a modelagem BIVV.

### 5.1.3 Configurações das modelagens

Serão apresentadas as configurações usadas pelas distintas estratégias de controles, as quais influenciarão os parâmetros que definem as modelagens.

## Considerações preliminares

Muitas vezes, nos sistemas de distribuição, tem-se limites de potência reativa nos geradores distribuídos dados pelas normas aplicadas pela concessionária, como por exemplo, no Brasil a geração distribuída está limitada em relação ao fator de potência mínimo permitido. As análises deste trabalho são desenvolvidas desconsiderando tais condicionamentos, tendo em vista que o inversor tem capacidade de fornecer vários tipos de serviços ancilares, incluindo-se ao suporte de tensão e de potência reativa, imaginando que em um futuro os geradores distribuídos possam prover serviços ancilares. Pelo exposto, se analisa o comportamento das diversas modelagens, estabelecendo o máximo de potência reativa somente em função da capacidade nominal do inversor de frequência e a potência ativa fornecida.

Para todas as modelagens é fixado a mesma potência aparente nominal de 2,236 p.u., sendo que esse valor é designado para se obter casos de análises injetando potência ativa e reativa em combinações de valores de 1 p.u. e 2 p.u., ou seja, o valor arredondado de  $\sqrt{1^2 + 2^2}$  p.u. Logo, a potência ativa fornecida  $P$  e a capacidade de potência reativa permanecem sujeitos à potência aparente, conforme o limite da mesma. Portanto, as capacidades máxima e mínima de potência reativa são dadas por (5.1) e (5.2).

$$Q_{max} = \sqrt{2,236^2 - P^2} \quad (5.1)$$

$$Q_{min} = -Q_{max} \quad (5.2)$$

## Modelagem PV

Na modelagem PV deve-se especificar 4 valores, sendo a tensão de referência definida em 1,0 p.u., a potência ativa que estará definida segundo o caso de análise e os dois limites de potência reativa dadas pelas expressões (5.1) e (5.2).

## Modelagem BIVV

Nesta modelagem são estabelecidos 6 pontos que definem o comportamento do controle. A análise a ser efetuada se configura de forma a não ter zona morta, fazendo coincidir os pontos P3 e P4. As tensões dos pontos P1 e P6 são definidos com o objetivo de evitar o desligamento do inversor da rede. Ver Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tensão e potência reativa dos pontos de configuração do BIVV

Ponto	Tensão (p.u.)	Potência reativa em % da capacidade máxima
P1	0,0000	100%
P2	0,950	100%
P3	1,000	0
P4	1,000	0
P5	1,050	-100%
P6	2,000	-100%

## Modelagem IVVH

Deve-se definir duas curvas, as quais encerram a região de histerese, similar à Figura 3.6. P1 e P4 indicam as tensões mínimas e máximas nas quais o inversor pode permanecer fornecendo potência à rede. Para avaliar o inversor sem ter desligamento se configura de modo que o desligamento do inversor da rede seja improvável. Os pontos de configuração estão designados de acordo à Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Tensão e potência reativa dos pontos de configuração do IVVH

Ponto	Tensão (p.u.)	Potência reativa em % da capacidade máxima
P1	0,000	100%
P2	0,975	100%
P3	1,075	-100%
P4	2,000	-100%
P5	1,025	-100%
P6	0,925	100%

## 5.2 Resultados

Nesta seção são expostos tanto os resultados do exemplo numérico da implementação BIVV, quanto os resultados das simulações nas diversas condições de operação do inversor.

### 5.2.1 Exemplo numérico da implementação da modelagem BIVV no método da varredura

O exemplo numérico será feito com o inversor fornecendo 1 MW de potência ativa, 2 MVAR de capacidade de potência reativa e com a carga do sistema em 40% e a modelagem do inversor será do controle BIVV. Serão apresentados os processos de solução do fluxo de potência com a implementação direta da modelagem e com o método proposto.

## Implementação sem o método proposto

Na implementação direta, o primeiro passo é resolver o fluxo de potência do sistema com inversor injetando potência reativa nula. Através do resultado se obtém a tensão no nó onde se encontra conectado e com isso, mediante as equações que representam o controle BIVV, se calcula a potência reativa a ser injetada. Nota-se que a potência a ser injetada na próxima iteração é a mesma do valor obtido diretamente das equações que definem o controle BIVV.

Tabela 5.3: Tensão e potência reativa da implementação direta da modelagem BIVV.

Iteração	Tensão	Q do BIVV	Q da próxima iter
0	1,0297	-1,1900	-1,1900
1	0,9964	0,1422	0,1422
2	1,0335	-1,3389	-1,3389
3	0,9920	0,3210	0,3210
4	1,0380	-1,5232	-1,5232
5	0,9863	0,5465	0,5465
6	1,0438	-1,7514	-1,7514
7	0,9792	0,8323	0,8323
8	1,0508	-2,0000	-2,0000
9	0,9712	1,1526	1,1526
10	1,0585	-2,0000	-2,0000
11	0,9712	1,1526	1,1526
12	1,0585	-2,0000	-2,0000
13	0,9712	1,1526	1,1526

Na Tabela 5.3 são exibidos os valores de tensão e potência reativa a ser injetada na próxima iteração do processo de resolução de fluxo de potência. Nas sucessivas iterações, o valor da potência reativa se atualiza em função da tensão no ponto comum de conexão. Se evidencia que para os valores de iteração pares a tensão aumenta em sua evolução, e para os valores ímpares ocorre o contrário, mostrando como acontece a divergência do processo de

resolução. Já na iteração 8 o valor da potência reativa a ser injetada na próxima iteração atinge o nível mínimo, logo, na iteração 9, injetando-se essa quantidade de potência reativa, obtém-se um valor de tensão igual a 0,9712 p.u. Se compararmos os valores das linhas da tabela depois da iteração 8, verifica-se que a cada duas linhas têm-se valores repetitivos, não conseguindo uma solução convergente para o problema.

### Implementação com o método proposto

Na implementação mediante o método proposto, o primeiro passo é resolver o fluxo de potência do sistema com inversor injetando potência reativa nula, e com o resultado se obtém a tensão no nó onde se encontra conectado e, com isso, mediante o processo mostrado na subseção 4.1.2, calcula-se o valor de potência a ser injetada na próxima iteração. Nota-se que a potência a ser injetada na próxima iteração não é a mesma do valor obtido diretamente das equações que definem o controle BIVV.

Tabela 5.4: Tensão e potência reativa da modelagem BIVV com o método proposto.

Iteração	Tensão	Q do BIVV	Q da próxima iter
0	1,0297	-1,1900	-0,4305
1	1,0182	-0,7266	-0,5376
2	1,0152	-0,6082	-0,5631
3	1,0145	-0,5798	-0,5691
4	1,0143	-0,5731	-0,5706
5	1,0143	-0,5715	-0,5709
6	1,0143	-0,5711	-0,5710
7	1,0143	-0,5710	-0,5710
8	1,0143	-0,5710	-0,5710

Na Tabela 5.4 são exibidos os valores de tensão e potência reativa a ser injetada na próxima iteração do processo de resolução de fluxo de potência. Nas sucessivas iterações o valor da potência reativa se atualiza em função da tensão no ponto comum de conexão, evidenciando que a tensão na evolução do processo tem uma tendência decrescente e não uma tendência alternante como se tinha no caso da implementação direta, mostrando como ocorre a convergência do processo de resolução. Na iteração 1, o valor da potência reativa a ser injetada

na próxima iteração é aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do valor definido pelo controle BIVV, evitando assim que a tensão na próxima iteração não seja muito diferente da atual e, conseqüentemente, consiga avançar até a solução sem obter valores alternantes. A medida que as iterações evoluem, os valores da potência reativa do controle BIVV e o calculado para a próxima iteração são cada vez mais próximos, sendo que a partir da iteração 7 tais valores são iguais, atingindo o objetivo do método, que é encontrar uma solução convergente e que o valor da potência reativa injetada seja ditado pelo controle BIVV.

A seguir, se exemplifica os cálculos envolvidos com os cálculos da primeira iteração:

- 1) Depois de ter resolvido o fluxo de potência sem injetar potência reativa para iteração zero, o resultado apresenta uma tensão de 1,02975 p.u.
- 2) Calcula-se os valores  $\Delta Q_k$  mediante (4.4) para encontrar os pontos  $(k - 1)$  e  $k$ , que satisfaçam à (4.2).

Para  $k = 4$

$$Q_{(v_k)} = Q + \frac{v_k - v}{z_{ii}} = 0 + \frac{1,0000 - 1,02975}{0,0441} = -0,67460$$

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_{(v_k)} = 0 + 0,67460 = 0,67460$$

Para  $k = 5$

$$Q_{(v_k)} = Q + \frac{v_k - v}{z_{ii}} = 0 + \frac{1,0500 - 1,02975}{0,0441} = 0,45918$$

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_{(v_k)} = -2 - 0,45918 = -2,45918$$

Avaliando a condição:

$$\Delta Q_4 \times \Delta Q_5 = (0,67460)(-2,45918) < 0$$

- 3) Calcula-se a tensão  $v_{S'}$ , mediante (4.6) e logo se obtém o valor de  $Q_{inversor}$  com  $f_{BIVV}(v_{S'})$ .

$$v_{S'} = v_k - \frac{\Delta Q_k}{\frac{\Delta Q_k - \Delta Q_{k-1}}{v_k - v_{k-1}}} = 1,05000 - \frac{-2,45918}{\frac{-2,45918 - 0,67460}{1,05000 - 1,00000}} = 1,010763$$

$$f_{BIVV}(v) = Q_{P5} + \frac{Q_{P5} - Q_{P4}}{v_{P5} - v_{P4}}(v - v_{P5})$$

$$Q_{inversor} = f_{BIVV}(1,01076) = -2 + \frac{-2 - 0}{1,05 - 1,00}(1,010763 - 1,05)$$

$$Q_{inversor} = -0,43052$$

## 5.2.2 Pontos operativos para as simulações com distintas modelagens e condições de operação

Serão feitas simulações para várias modelagens do inversor, com distintos valores de fornecimento de potência ativa pelo gerador e em diferentes condições de carga do sistema. Os resultados serão ilustrados por meio de gráficos, que possuem curvas que relacionam a tensão e potência injetada no nó onde se encontra o inversor, que logo serão sobrepostos com as curvas das estratégias de controle do inversor.

Cada fluxo de potência necessário para encontrar os pontos da curva que relacionam a tensão e potência reativa injetada se efetua com a condição de fornecimento constante de potência ativa e mudando a quantidade de potência reativa, desde a absorção de potência reativa da rede até à injeção para a rede. Para diversificar as condições do sistema de distribuição, as cargas são afetadas por um fator multiplicador de forma homogênea, derivando-se, portanto, em uma curva de resposta por cada fator.

As curvas representativas de cada modelagem das estratégias de controle se desenham com o propósito de perceber graficamente o comportamento, o qual ilustra a potência reativa injetada pelo inversor em função da tensão do ponto comum de conexão com a rede.

Sobrepondo as curvas de resposta do nó com vários níveis de carga do sistema e as curvas das modelagens do inversor com diferentes estratégias de controle, permite-se exibir graficamente os diferentes pontos operativos resultantes, facilitando a análise e comparação nas diversas circunstâncias. Isto não significa que o valor da tensão e potência de cada ponto operativo são determinados mediante algum método gráfico, pois esses valores são determinados pela resolução do fluxo de potência.

Com o intuito de melhorar ainda mais as análises, o procedimento mencionado no parágrafo anterior se efetua com vários níveis de potência ativa fornecida pelo inversor, o qual também traz mudança no máximo de absorção/injeção de potência reativa por estar sujeito à potência aparente nominal.

A seguir se apresentam as análises para 3 níveis de potência ativa fornecida, 2 MW, 1 MW e 0 MW, com seus respectivos limites de absorção/injeção de potência reativa.

### Fornecendo 2 MW e com capacidade máxima de 1 MVAr

Na Figura 5.2 encontram-se três curvas para os níveis de carregamento 100%, 40% e 0%. Em cada curva são exibidos os pontos para cada par de valores, tensão e potência reativa injetada, no nó 7. Estão exibidas as curvas que representam as 3 modelagens, PV, BIVV e IVVH.

Para a modelagem PV, com 100% da carga do sistema, a operação resultante está ilustrada pelo ponto P1, mantendo-se a tensão em 1 p.u. e com valores de absorção de potência reativa baixos, isto ocorre devido ao fornecimento de 2 MW do inversor, ainda que o sistema tenha



carga plena o fluxo de potência ativa para a rede provoca elevação da tensão fazendo desnecessária a injeção de potência reativa. No caso de 40% de carga, o ponto de operação é P2, a tensão elevou-se a 1,035 p.u. e atingiu o máximo de potência reativa que pode ser absorvida (1 MVar), porém, não foi suficiente para manter a tensão em 1,00 p.u., do mesmo modo ocorre com carga nula, onde o inversor permanece absorvendo o máximo de potência reativa e a tensão apresenta o valor de 1,068 p.u. como se exibe no ponto P3.

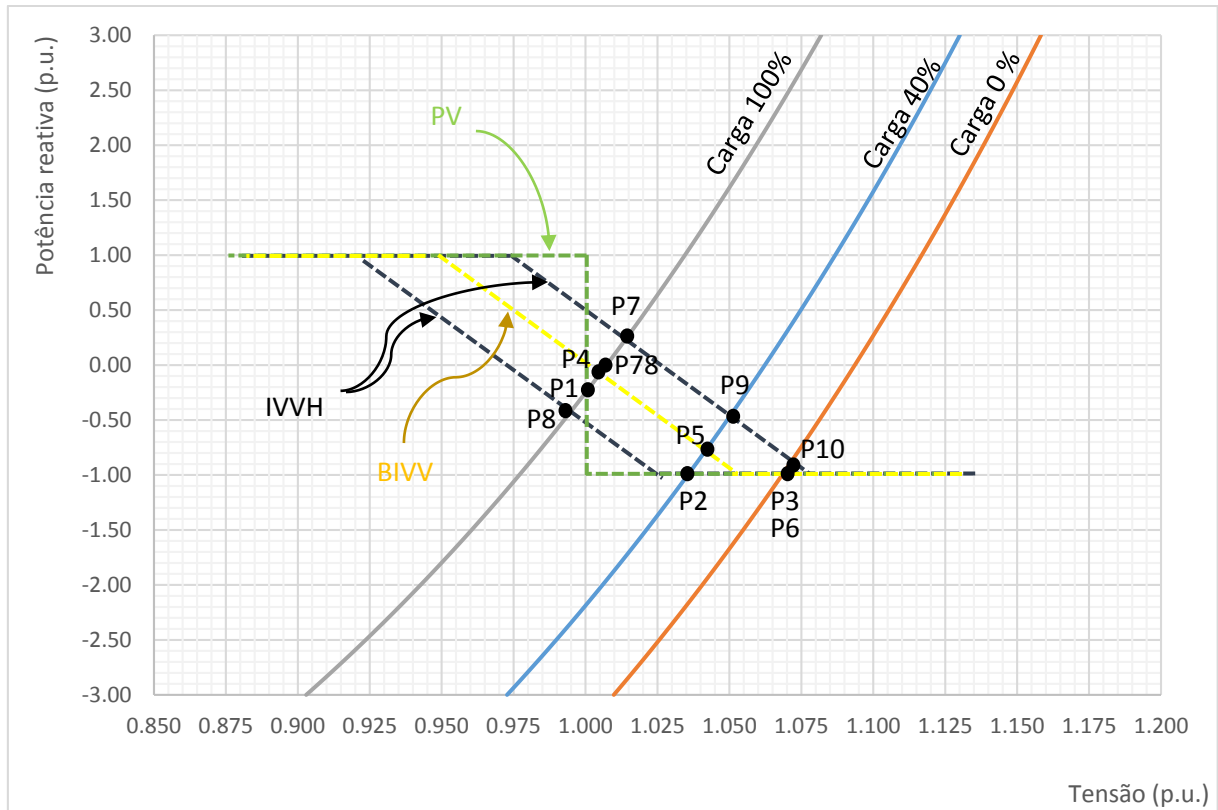


Figura 5.2: Estratégias de controle e seus pontos operativos a vários níveis de carregamento do sistema de distribuição. Fornecendo 2 MW.

Nas simulações com a modelagem BIVV, o resultado indicado por P4 quando a carga é de 100% está muito próximo ao P1, sendo que isto ocorre em virtude dos 2 MW fornecidos. Mesmo sem injetar/absorver grandes quantidades de potência reativa, o inversor consegue manter a tensão perto de 1 p.u., e nessa zona as duas modelagens têm comportamentos similares. Observando a operação em 40% de carga, indicado pelo ponto P5, se evidencia que a tensão difere somente em 0,005 p.u. de P2, mas a quantidade de potência reativa absorvida é 0,19 MVar menor comparado à modelagem PV, a qual está absorvendo a capacidade máxima. E finalmente, com carregamento zero do sistema, P6 coincide com P3 por ambas terem atingido o máximo de potência reativa.

Analisando a modelagem IVVH, ao ter carregamento de 100% e se o inversor for ligado ao sistema com parâmetros de início habituais de operação, ou seja, tensão 1 p.u. e sem injeção de potência reativa, a operação seria no ponto P78 com uma tensão de 1,007 p.u., já que esse ponto se encontra dentro da região de histereses, porém, se por alguma circunstância o sistema

antes estivesse com carga muito grande, conseqüentemente, a tensão precedente estaria muito abaixo a 1 p.u., portanto, ao aumentar a tensão devido à diminuição da carga até chegar ao 100%, a operação estaria representada pelo ponto P7, caso contrário ao ter cargas muito pequenas precedentemente, implica-se operar em P8 ao atingir o carregamento o valor de 100%, logo, poderiam ocorrer pontos operativos intermediários sobre a curva de carregamento de 100% entre os limites P7 e P8 como consequência das diversas condições predecessoras que poderiam ocorrer. Resumindo, a operação poderia acontecer a partir da injeção de 0,223 MVAR e com uma tensão de 1,014 p.u. até absorver 0,407 MVAR provocando uma tensão de 0,995 p.u. Com carregamento do 40%, a operação pode ocorrer sobre a curva de carregamento 40% entre os limites P2 e P9, ou seja, a partir da absorção de 1 MVAR a uma tensão de 1,035 p.u. até absorver 0,490 MVAR e 1,049 p.u., o ponto P2 coincide com as outras duas modelagens, sendo esse ponto o máximo de potência reativa que pode ser absorvido. Neste caso, o intervalo de operação fatível teve um decréscimo comparado ao caso de ter 100% de carga devido a estar mais próximo dos níveis máximos de absorção de potência reativa.

No caso de carga nula torna-se evidente a operação no limite de potência reativa para todas as modelagens. A modelagem PV e BIVV coincidem, e a modelagem IVVH tem os pontos limites de operação fatíveis, P6 e P10 muito próximos, variando somente a partir da absorção 1 MVAR com tensão de 1,068 p.u. até absorver 0,912 MVAR e 1,071 p.u.

## **Fornecendo 1 MW e com capacidade máxima de 2 MVAR**

Na Figura 5.3 se observam as 3 curvas de resposta para os 3 níveis de carregamento ao fornecer ao inversor 1 MW. Destaca-se o fato do deslocamento das curvas, indo para valores de tensões menores comparados às curvas da análise anterior, isto é, devido à mudança do fornecimento da potência ativa de 2 MW para 1 MW, o qual traz diminuição da tensão ao ter menos potência ativa injetando à rede.

Avaliando a modelagem PV, tendo carga de 100% o ponto de operação P1 indica que se fornece 1,052 MVAR mantendo a tensão em 1,0 p.u., comparando ao caso homólogo no fornecimento de 2 MW, agora também se consegue conservar a tensão em 1,0 p.u., porém, a potência reativa injetada acrescentou-se 1,302 MVAR, no entanto, a potência ativa fornecida decresceu em menor quantidade, só 1MW, evidenciando neste caso de carregamento de 100% o menor efeito sobre a tensão pela mudança da potência reativa em relação à ativa. Continuando a análise com a curva de 40%, o ponto P2 demonstra estar absorvendo 1,070 MVAR e uma tensão de 1,0 p.u., quando se fornecia 2 MW se absorvia apenas 0,070 MVAR a mais, porém, a tensão ascendia a 1,035 p.u. O sistema sem carga opera no ponto P3, o inversor atinge o máximo de potência reativa que pode ser absorvida, permitindo elevar-se a tensão a somente 1,008 p.u., comparando-se à operação homologa de P3 da Figura 5.2, onde se absorve 1 MVAR a menos e fornece 1 MW a mais, sendo a tensão de 1,065 p.u.

Para a modelagem BIVV em carregamento pleno, o ponto P4 mostra a injeção de 0,551 MVAR e uma tensão de 0,986 p.u. Agora existe uma diferença maior entre os pontos P1 e P4 das modelagens PV e BIVV respectivamente, comparado a estar fornecendo 2 MW. Para o caso

de 40% de carga, o ponto P5 demonstra absorver 0,571 MVar e tensão de 1,014 p.u., diferenciando-se da modelagem PV que consegue manter a tensão em 1,0 p.u. Por último, o ponto 6 para carregamento zero absorve 1,229 MVar a uma tensão de 1,031 p.u., que é consideravelmente maior em relação ao ponto P3 do caso da modelagem PV.

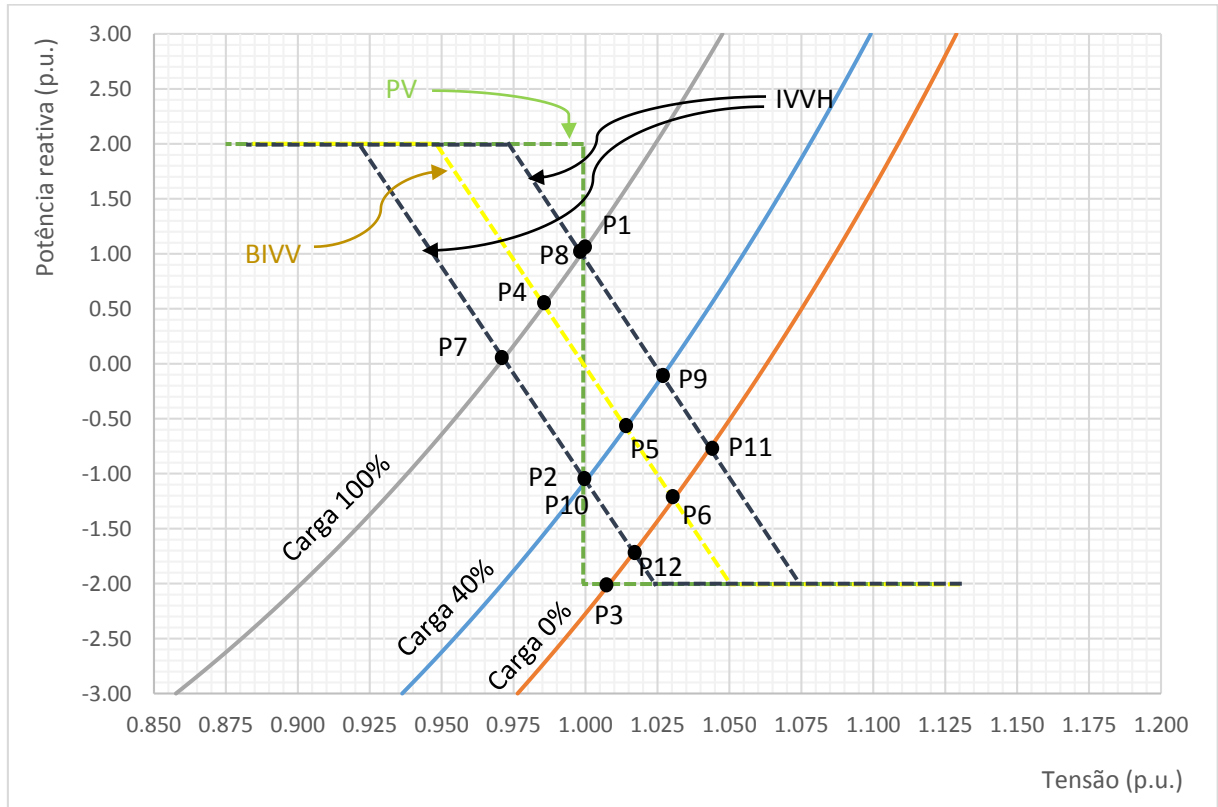


Figura 5.3: Estratégias de controle e seus pontos operativos a vários níveis de carregamento do sistema de distribuição. Fornecendo 1 MW.

Procedendo a análise da modelagem IVVH com sua zona de histereses e, consequentemente, com as zonas de operações fatíveis, ao ter carregamento de 100% se tem um intervalo que varia ao injetar-se 0,089 MVar, tensão de 0,973 p.u. até 1,027 MVar e tensão de 0,999 p.u., pontos P7 e P8. Ao confrontar esse resultado com a modelagem PV se observa que P1 com tensão de 1,0 p.u. não pertence à região fatível de operação. Já no caso de carga de 40% o ponto limite de operação P10 praticamente coincide com a modelagem PV, ou seja, ao ir de tensões maiores para menores, ou dito de outra maneira, com o valor de carregamento de menor para maior, a modelagem IVVH coincide com a PV, sendo que isso ocorre somente nessas circunstâncias, já que a operação poderia ocorrer até no outro extremo P9 absorvendo somente 0,092 MVar e permitindo uma tensão de 1,027 p.u. Para carga nula, a zona de trabalho fatível se encontra entre P11 e P12, absorvendo 0,750 MVar e tensão de 1,044 p.u. até 1,696 MVar e 1,017 p.u., observa-se aqui como a solução da modelagem PV o ponto P3 não pertence à zona fatível.

## Fornecendo 0 MW e com capacidade máxima de 2,236 MVar

Na Figura 5.4 são exibidas as 3 curvas de carregamento, e como era esperado tem-se um deslocamento das curvas para níveis de tensão menores ao se comparar com as curvas das análises com maiores níveis de fornecimento de potência ativa.

A presente análise é realizada considerando-se que o inversor injete ou absorva simplesmente potência reativa, ou dito em outras palavras, considerando o gerador distribuído como um dispositivo que poderia servir para o controle de tensão ou suporte de potência reativa, o que estaria relacionado diretamente com o conceito dos serviços ancilares nos sistemas de distribuição.

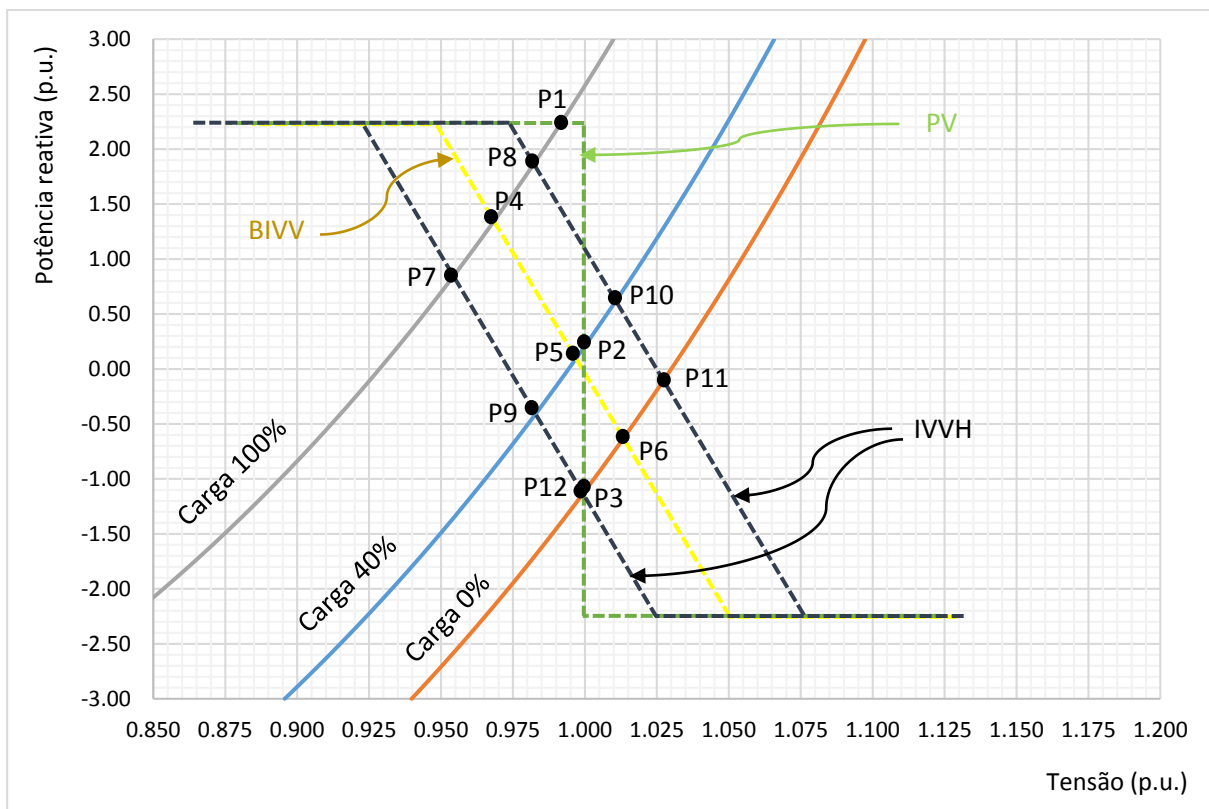


Figura 5.4: Estratégias de controle e seus pontos operativos a vários níveis de carregamento do sistema de distribuição. Fornecendo 0 MW

Na Figura 5.4 percebe-se que para a modelagem PV no caso de carga 100% a operação indicada por P1 se está injetando o máximo de potência reativa, 2,236 MVar com uma tensão de 0,992 p.u., e aqui evidencia-se como com a mesma capacidade de potência aparente nominal o inversor atingiu o máximo de potência reativa sem conseguir manter a tensão em 1,0 p.u. Este é outro indício que nessas condições de carga a potência ativa tem maior preponderância nos efeitos da tensão que a potência reativa ao ser comparada com análises do inversor fornecendo potência real. Com 40% de carga se injeta 0,209 MVar e se mantêm a tensão em 1,0 p.u., representado pelo ponto P2. Já com carga nula também se mantêm a tensão em 1,0 p.u., mas o inversor nessas condições absorve 1,111 MVar, conforme ilustrado por P3. O consumo de

potência reativa se deve ao fato de que o nó 0 foi fixado à tensão 1,03 p.u. e a modelagem PV foi configurada para manter a tensão em 1 p.u.

Visualizando o comportamento da modelagem BIVV, para carregamento em 100%, 40% e 0% indicados pelos pontos P4, P5 e P6, injetando o valor de potência reativa de 1,375 MVar, 0,114 MVar e -0,616 MVar com tensões de 0,969 p.u., 0,997 p.u. e 1,014 p.u., nenhum atinge a capacidade máxima de potência reativa e também nenhum opera à tensão de 1,0 p.u., notoriamente diferentemente da modelagem PV.

Finalmente, na modelagem IVVH, a zona de operação fatível para carregamento de 100% encontra-se entre os limites de P7 até P8. A partir da injeção de 0,879 MVar à tensão de 0,955 p.u. até a injeção de 1,887 MVar e 0,983 p.u. de tensão, destaca-se que, apesar da diferença significativa na potência injetada entre os pontos de 1 MVar, houve uma variação na tensão de apenas 0,028 p.u. Nestas condições também o ponto P1 da modelagem PV não pertence à zona fatível. Com carga de 40%, as soluções podem variar ao absorver 0,384 MVar e tensão de 0,986 p.u. até injetar 0,627 MVar e tensão de 1,011 p.u., como indicam os pontos P9 e P10. Neste caso, há possibilidade de haver uma solução com tensão de 1,0 p.u. quando o inversor injeta 0,209 MVar, concordando com o ponto P2 da modelagem PV. Quando ocorre carregamento nulo, a solução pode se dar a partir da absorção de 0,104 MVar e tensão de 1,027 p.u. até a absorção de 1,114 MVar e tensão de 0,999 p.u., exibidos na figura pelos pontos extremos P11 e P12, sendo que o ponto P12 quase coincide com P3 da modelagem PV, inclusive o ponto P3 está na zona fatível da modelagem IVVH.

### 5.2.3 Perfis de tensões

A seguir serão traçados perfis de tensão do sistema considerando os nós que ligam o nó 0 e o nó 33. Em cada gráfico serão traçados 3 perfis, um para cada modelagem, exceto para a modelagem IVVH que terá duas curvas identificando os limites da região de operação fatível. Considerando a característica desequilibrada do sistema de distribuição, a tensão utilizada no traçado será a tensão de sequência positiva. As condições do sistema serão alguns casos das análises anteriores, cujos pontos operativos poderiam ser de interesse desde o ponto de vista dos efeitos no sistema. Quando se menciona tensão adequada, precária e crítica, refere-se aos níveis de tensões estabelecidos por a ANEEL (2015) nos sistemas elétricos de distribuição do Brasil, ver Tabela A6.

### Carregamento do sistema de distribuição de 100%

Na Figura 5.5 temos os perfis de tensão correspondentes para as 3 modelagens do inversor inserido no nó 7, sendo que o inversor fornece 2 MW e tem uma capacidade máxima de absorção/injeção de potência reativa de 1 MVar.

Neste caso, a modelagem PV e BIVV resultam em perfis de tensão muito próximos. No nó 33 tem-se tensões de 0,918 p.u. e 0,923 p.u., respectivamente, apenas diferindo em 0,005 p.u. Destaca-se o fato de o valor de tensão ser muito próximo a 1,0 p.u. no nó 7 quase sem necessidade de injetar potência reativa, pelo efeito de fornecer potência ativa, porém, nos últimos nós a tensão desce consideravelmente. A modelagem IVVH apresentada pelas duas curvas limites abrangem os dois perfis pertencentes às outras duas modelagens, encontrando-se elas quase na metade do intervalo fatível da modelagem IVVH.

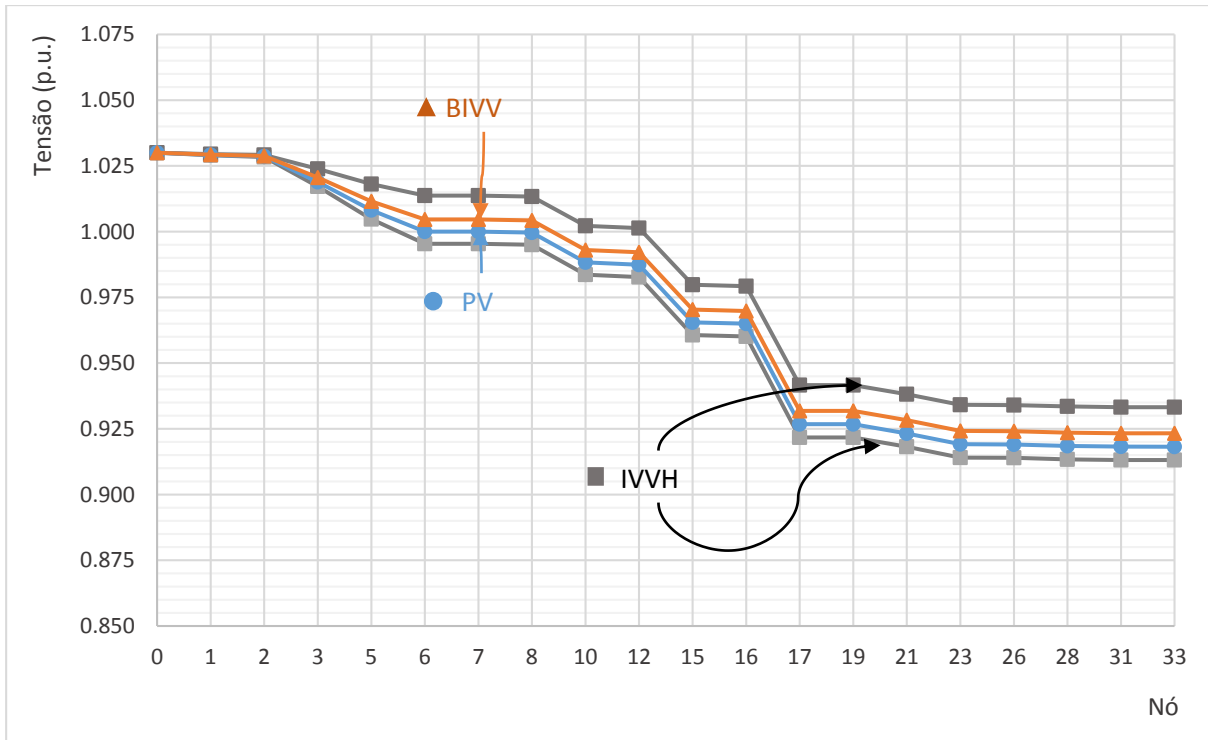


Figura 5.5: Perfil de tensão. Fornecendo 2 MW e capacidade de 1 MVar. Carregamento do sistema em 100%

No caso de o inversor fornecer 1 MW com capacidade de 2 MVar, Figura 5.6, os perfis de tensão são semelhantes ao caso anterior, onde se fornece 2 MW para a modelagem BIVV e IVVH, entretanto, agora possui tensões menores, ou seja, tiveram deslocamento decrescente dos perfis. A modelagem PV permaneceu imutável, porém, a operação não foi igual, ao passo de ter injeção quase nula de potência reativa a injetar 1,052 MVar, a ação da estratégia de controle se deve à tentativa de compensar a tendência de diminuição de tensão por causa do decréscimo da potência real fornecida. O perfil da modelagem PV não faz parte das soluções que poderiam ocorrer para a modelagem IVVH, o que contrasta muito ao caso anterior, quando o inversor fornecia 2 MW, onde a modelagem PV entregou um perfil posicionado perto do meio da zona fatível, percebendo-se com isto que a rigidez da estratégia de controle PV em relação à absorção/injeção de potência reativa desmesurada com o simples objetivo de fixar a tensão no valor de referência.

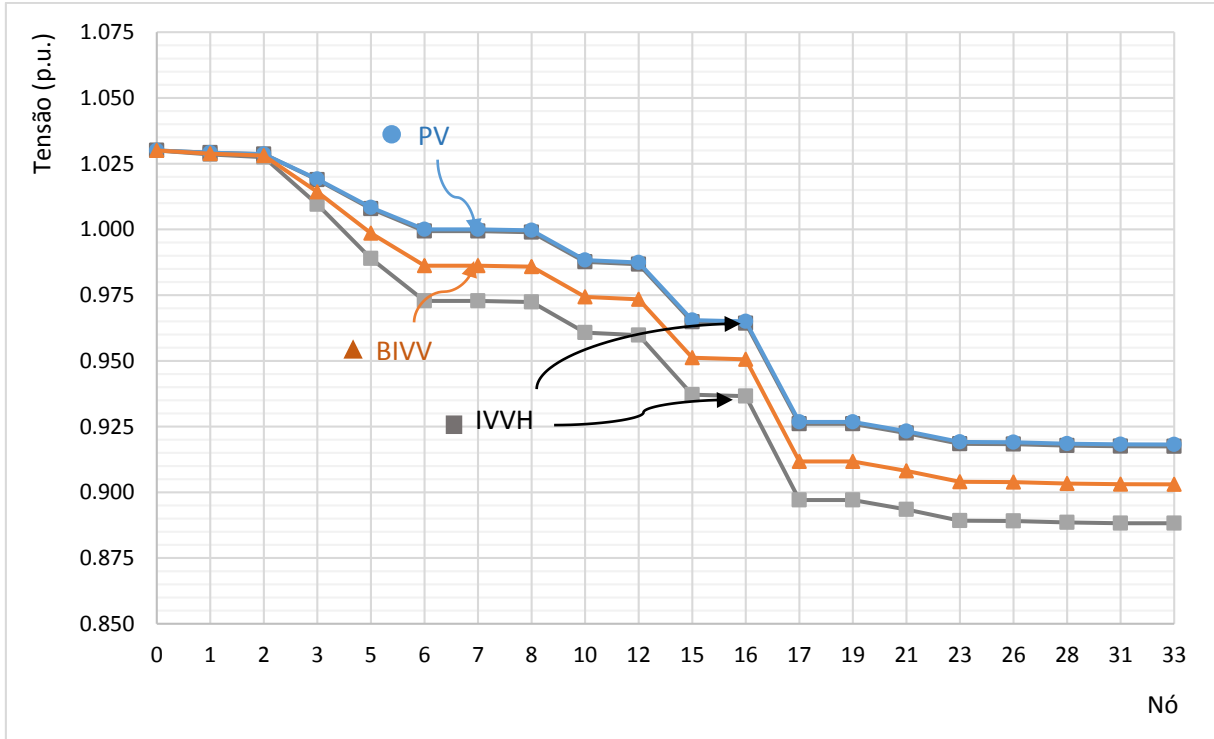


Figura 5.6: Perfil de tensão. Fornecendo 1 MW e capacidade de 2 MVar. Carregamento do sistema em 100%

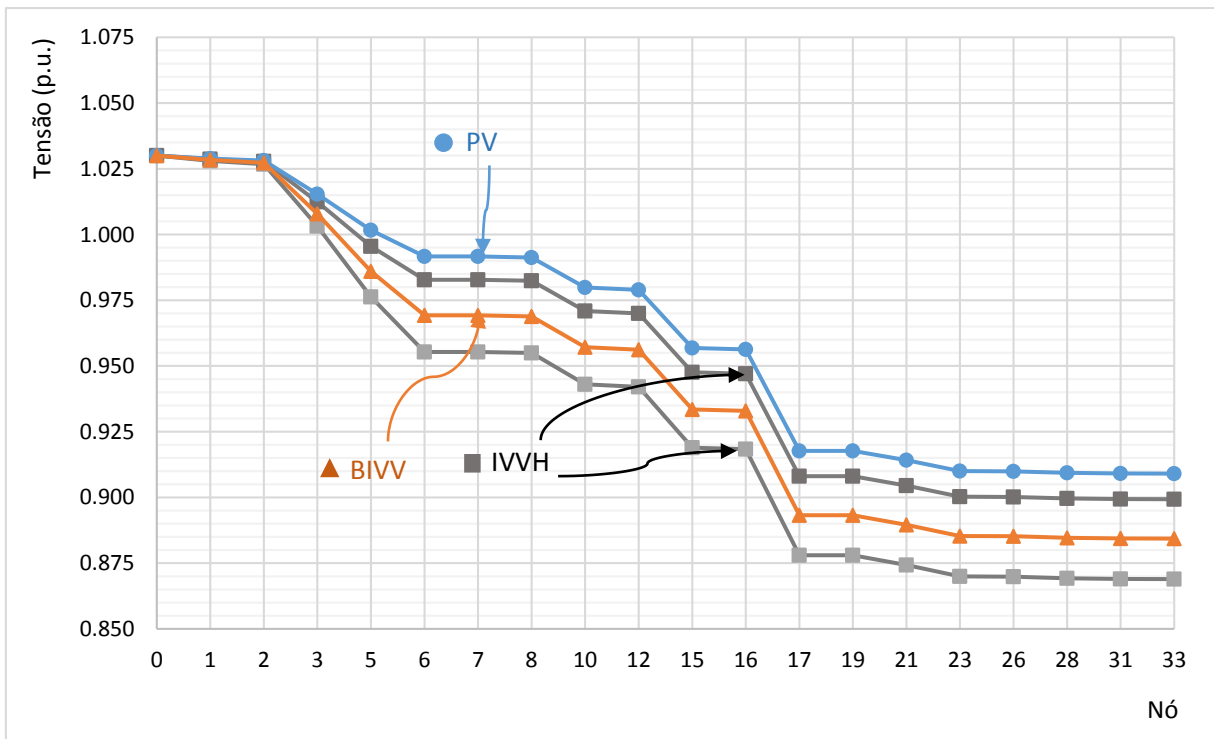


Figura 5.7: Perfil de tensão. Fornecendo 0 MW e capacidade de 2,236 MVar. Carregamento do sistema em 100%

Analisando os resultados quando o inversor não fornece potência real e com capacidade máxima de potência reativa de 2,236 MVar, Figura 5.7, se observa como os perfis são bem semelhantes ao caso anterior, quando se fornece ao inversor 1 MW, até na posição relativa entre os perfis, como por exemplo, o perfil da modelagem PV continua fora da região de resultados fatíveis da modelagem IVVH, porém, todos os perfis tiveram uma queda nos valores de tensão devido à diminuição da potência real fornecida, mesmo tendo maior capacidade de potência reativa, 0,236 MVar a mais, nenhuma estratégia consegue que os valores de tensão nos nós finais sejam considerados adequados para um sistema de distribuição. Na melhor das hipóteses, a modelagem PV dá uma tensão de 0,909 p.u., aproximadamente 10% menor ao valor da tensão base, no caso da modelagem IVVH se teve resultados ainda mais distantes de 1,0 p.u., o perfil do limite inferior atinge a tensão crítica de 0,869 p.u.

### Carregamento de 40%

Ao fornecer 2 MW como se observa na Figura 5.8 vemos como a potência ativa provoca a elevação da tensão nos nós em torno ao nó 7 para todas as modelagens, mesmo que o inversor esteja absorvendo a capacidade máxima de potência reativa. Se comparamos entre todos os perfis, a modelagem PV tem o perfil mais próximo à tensão 1,0 p.u. nos primeiros nós, também se percebe que nos nós finais o perfil atinge tensões de 1,005 p.u., praticamente 1 p.u..

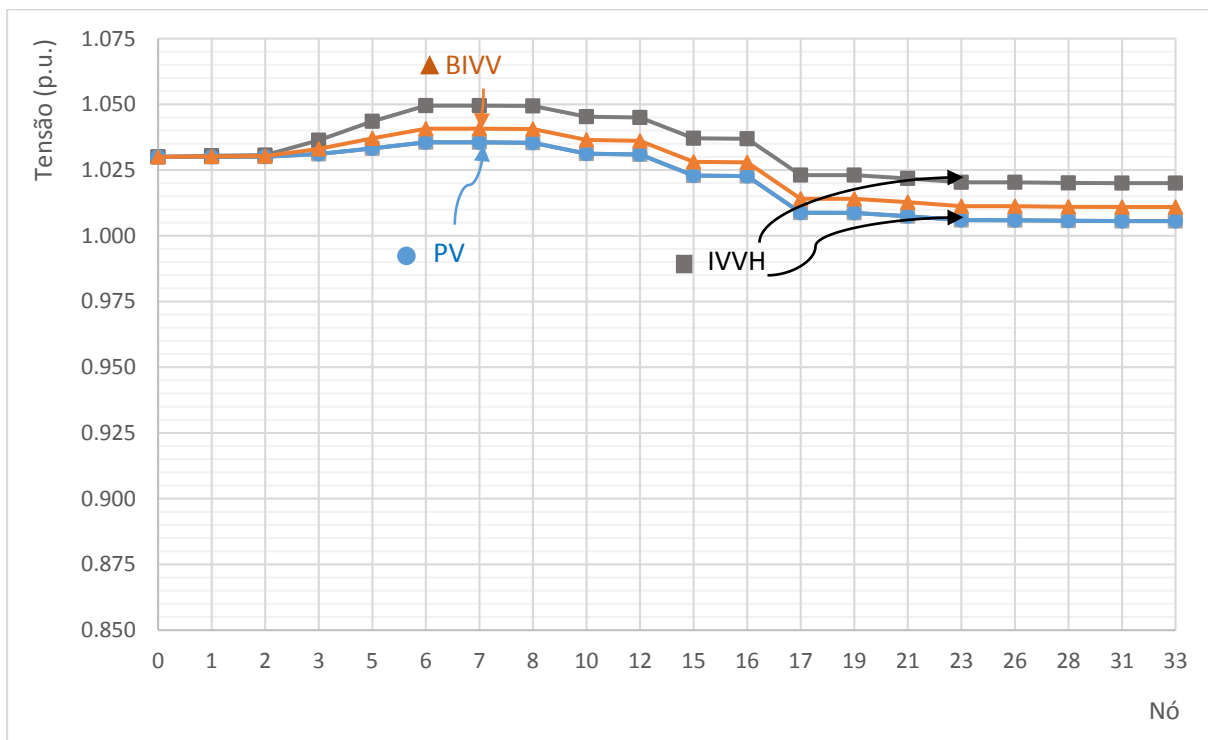


Figura 5.8: Perfil de tensão. Fornecendo 2 MW e capacidade de 1 MVar. Carregamento do sistema em 40%

Em relação à modelagem IVVH o limite inferior coincide com a modelagem PV, por outra parte, o limite superior atinge até níveis de tensão de 1,049 p.u. na região estreita ao nó 7,



já nos nós finais através dos fluxos de potência provocados pelas cargas a tensão consegue descer até 1,020 p.u. Nota-se que o perfil da modelagem BIVV evidencia sua localização um pouco abaixo da metade da zona fatível pertencente à modelagem IVVH.

Os resultados do fornecimento de 1 MW pelo inversor são ilustrados na Figura 5.9. A modelagem PV resulta em um perfil onde a tensão do nó 7 coincide no valor de 1,0 p.u., porém, esse esforço faz com que se absorva 1,070 MVar, que afinal produzem tensões nos últimos nós de 0,969 p.u., distantes de 1,0 p.u., se consideramos a modelagem BIVV, embora não se atinja 1,0 p.u. no nó onde está inserido o inversor, conseguem-se tensões de 0,984 p.u. nos nós finais, valores mais próximos a 1,0 p.u. Resulta interessante notar o extremo superior da modelagem IVVH tendo valor de tensão de 0,997 p.u. nos nós finais da rede contrastando com o extremo inferior, que atinge níveis de tensão iguais aos entregues pela modelagem PV. Neste caso, se destaca o fato de que a modelagem IVVH na sua zona fatível de resultados abrange praticamente todos os perfis que poderiam ocorrer com as demais modelagens.

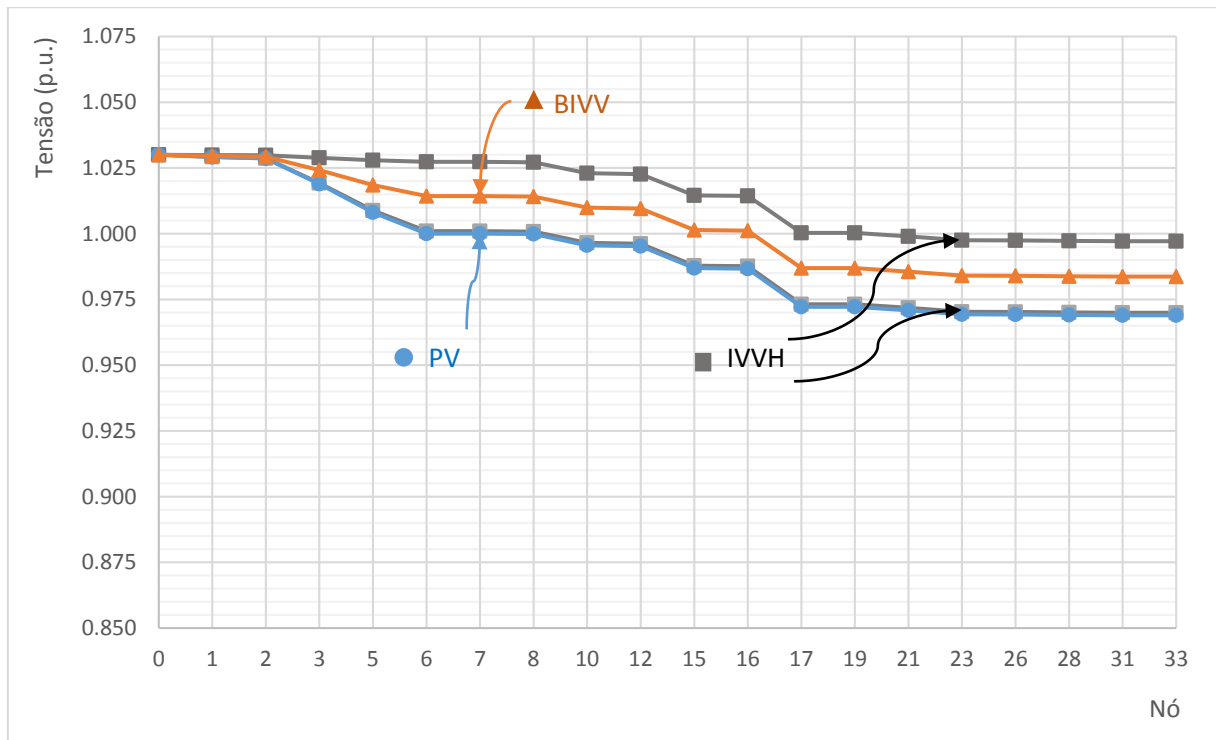


Figura 5.9: Perfil de tensão. Fornecendo 1 MW e capacidade de 2 MVar. Carregamento do sistema em 40%

Se comparamos os perfis da Figura 5.9 e Figura 5.10, a modelagem PV é a única modelagem na qual o perfil permanece igual, pois nas outras modelagens desce o perfil com o decréscimo da potência ativa fornecida, o que é uma evidência clara para sugerir a seleção adequada da modelagem nos fluxos de potência segundo a estratégia de controle que o inversor esteja utilizando em sua operação.

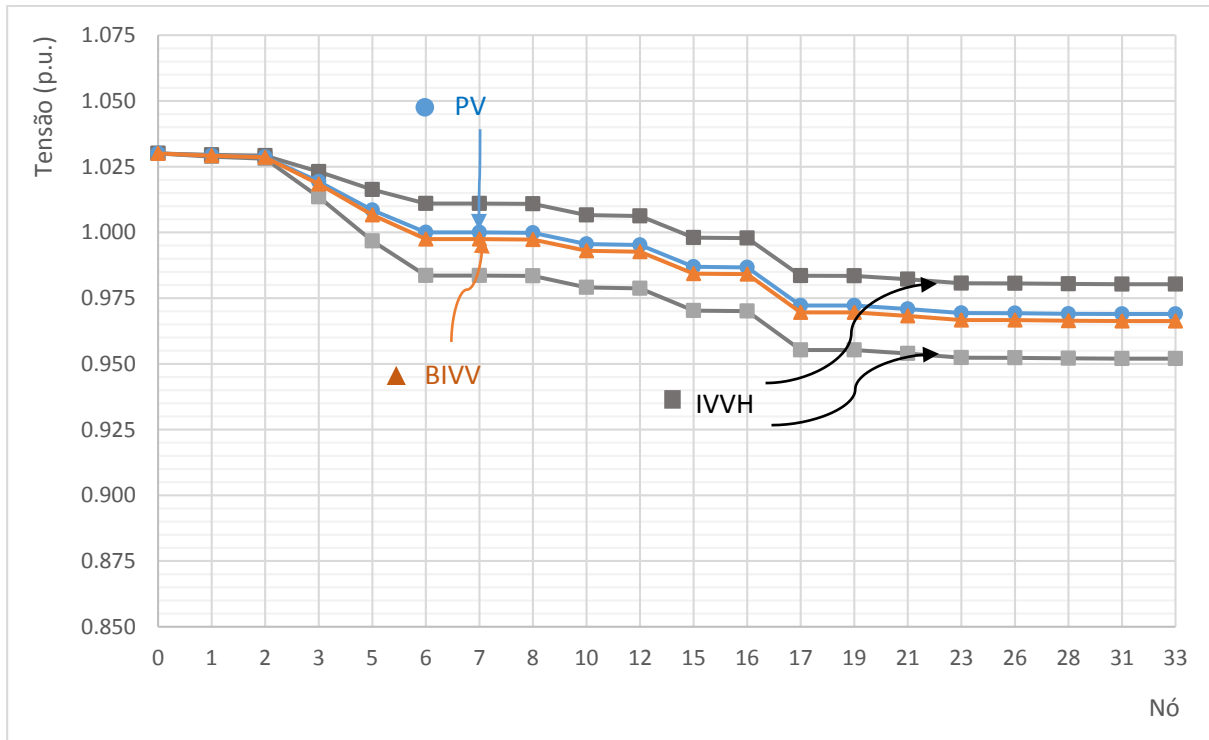


Figura 5.10: Perfil de tensão. Fornecendo 0 MW e capacidade de 2,236 MVar. Carregamento do sistema em 40%

### Carregamento de 0%

No carregamento zero, os nós posteriores ao nó 7 terão um perfil plano, já que o fluxo de potência ocorre entre o inversor e a subestação de distribuição. Então, os gráficos que serão mostrados informam o comportamento do inversor, desprezando-se as cargas, evidenciando a interação do sistema de distribuição como agente provedor de serviços ancilares.

Quando a capacidade de potência reativa é baixa, os perfis de cada modelagem têm tendência de estarem mais próximos, conforme pode ser observado na Figura 5.11. Ao ter carregamento 0% e o inversor capacidade de potência reativa somente de 1 MVar, resultam perfis muito próximos, demonstrando ainda mais essa característica nos resultados. Como o sistema não tem carga e o inversor fornece 2 MW, as 3 modelagens tiveram o mesmo comportamento, tentando diminuir a tensão provocada pelo fluxo de potência ativa consumindo a capacidade máxima de potência reativa, é assim que a modelagem PV, BIVV e o limite inferior da IVVH coincidem o limite superior da IVVH apenas difere em 0,002 p.u.

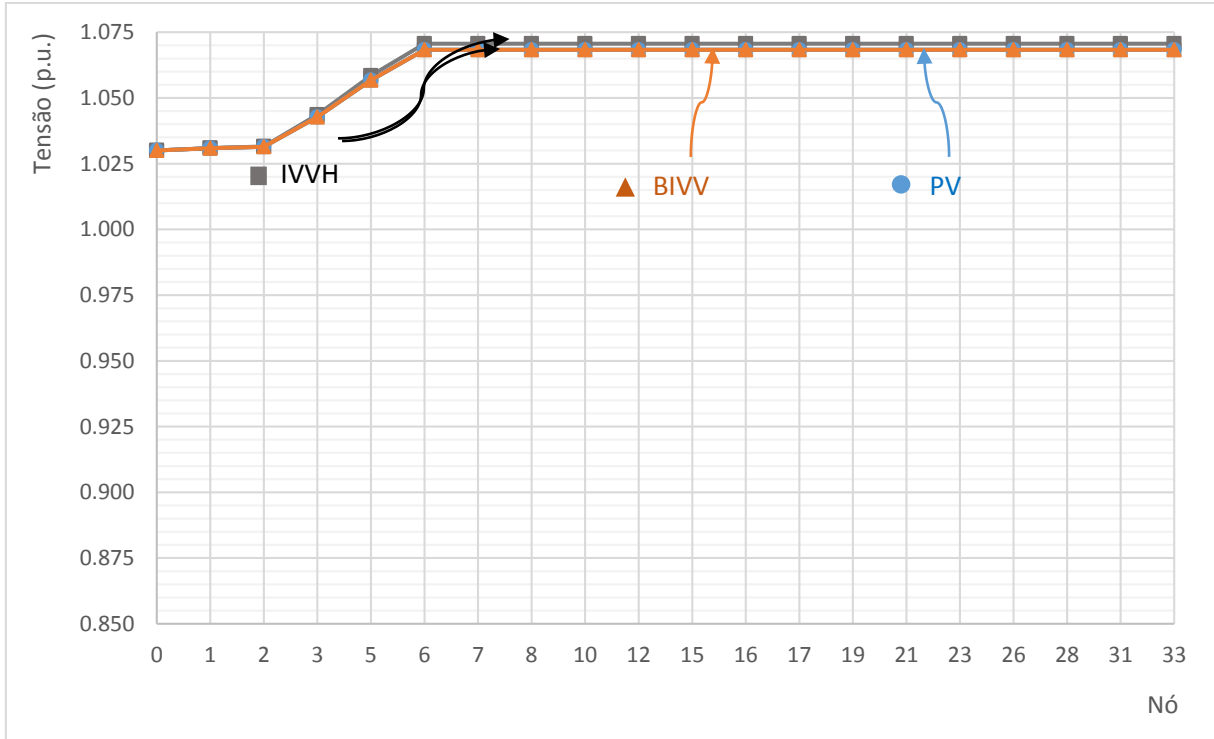


Figura 5.11: Perfil de tensão. Fornecendo 2 MW e capacidade de 1 MVar. Carregamento do sistema em 0%

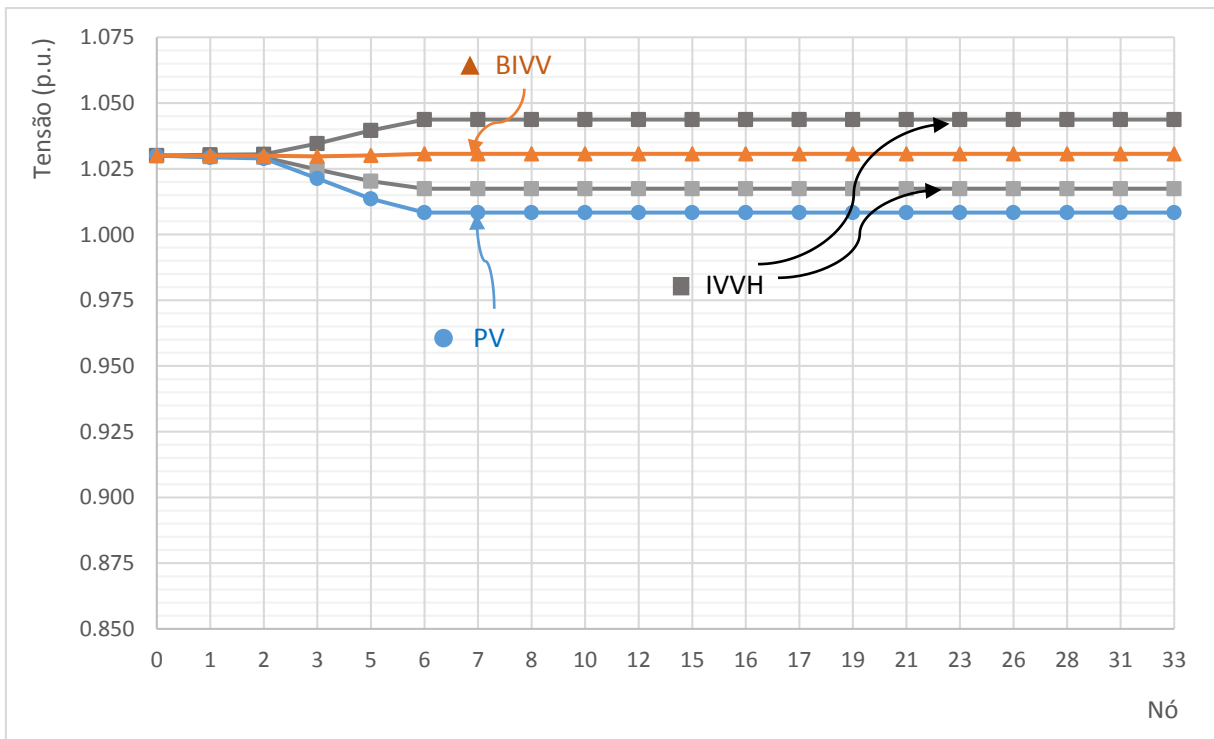


Figura 5.12: Perfil de tensão. Fornecendo 1 MW e capacidade de 2 MVar. Carregamento do sistema em 0%

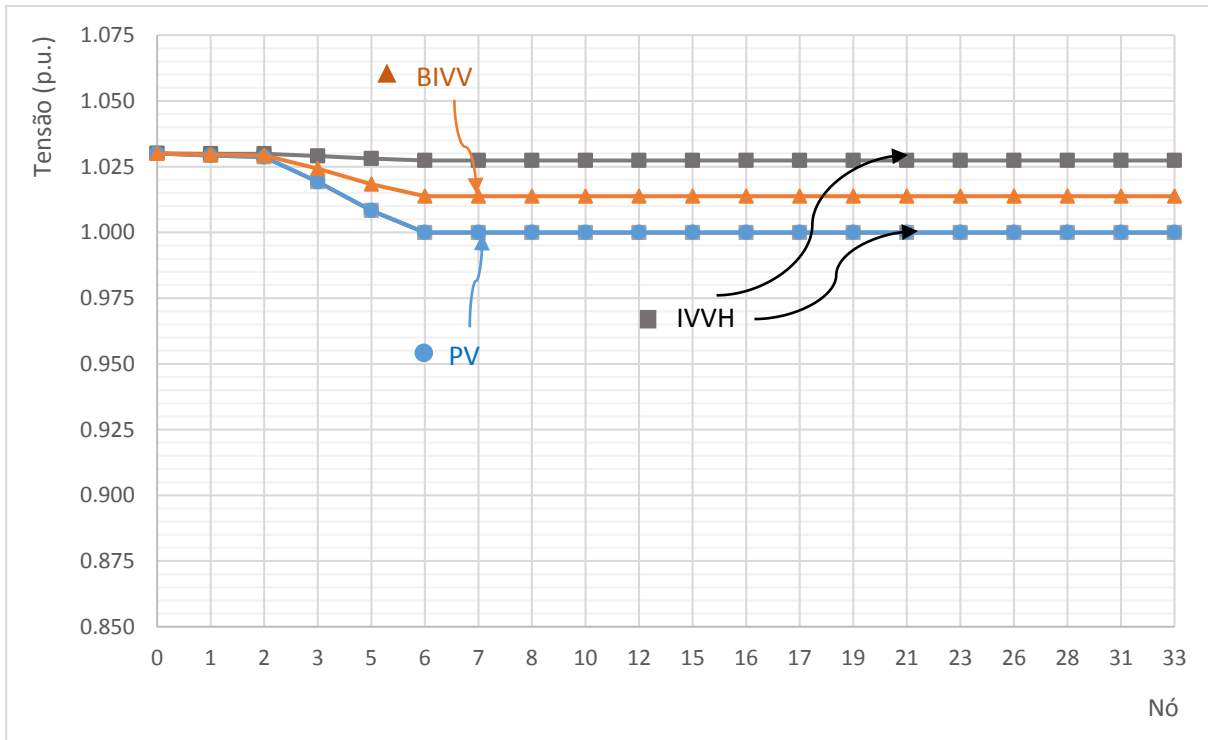


Figura 5.13: Perfil de tensão. Fornecendo 0 MW e capacidade de 2,236 MVar. Carregamento do sistema em 0%

Se o inversor fornece 1 MW e amplia sua capacidade de potência reativa para 2 MVar, Figura 5.12, vemos como os perfis de tensão estão mais distantes entre eles em relação ao acréscimo da capacidade de potência reativa e por serem diferentes as estratégias de controles. A modelagem PV atinge o nível de tensão de 1,008 p.u. e seu perfil não está dentro da região fatível da modelagem IVVH. O perfil PV teve uma mudança significativa no momento em que fornecia 2 MW, fazendo-se pensar que a variação da capacidade de potência reativa influencia com maior preponderância seu comportamento comparado às demais modelagens. A modelagem BIVV fornece um perfil sem muitas variações. Estando o sistema sem carga, a modelagem dessa estratégia decide absorver 1,229 MVar para mascarar o efeito na tensão do fluxo causado pelo fornecimento de 1 MW, resultando a tensão em 1,031 p.u. Caso não houvesse essa absorção, a tensão alcançaria o valor de 1,063 p.u.

E por fim, ao apresentar o inversor sem fornecimento de potência ativa e o sistema sem carga, este poderia ser visualizado como um suporte elétrico ligando a fonte distribuída ao sistema elétrico e o inversor provendo suporte de suporte reativa. Como se aprecia na Figura 5.13, a mudança da capacidade máxima de potência reativa comparada à análise anterior foi de 2 MVar para 2,236 MVar, sendo que esse acréscimo fez com que a modelagem PV alcançasse valores de tensão de 1,0 p.u. Em relação à modelagem IVVH, a zona de resultados fatíveis agora está mais próxima ao valor de 1,0 p.u., e seu limite inferior está praticamente coincidindo com a modelagem PV. Observando-se as diferenças entre os perfis das modelagens PV e BIVV, neste caso fornecendo 0 MW de potência ativa, os mesmos se encontram com uma diferença

de tensão de 0,014 p.u., sendo que na análise anterior com 1 MW apresentavam o dobro de diferença.

Sem carga, foi mais evidente a relação entre a tensão e o fornecimento de potência real. Com fluxo de potência ativa em um sentido, o perfil de tensão resulta crescente no sentido contrário, ficando mais claro nas modelagens BIVV e IVVH, que representam as estratégias de controle menos abruptas à modelagem PV, sendo que esta última, se for necessária utiliza toda a capacidade de potência reativa tendendo levar à tensão do ponto comum de conexão ao valor de referência que foi configurado.

### **Comparações dos perfis de tensão com o inversor fornecendo potência ativa em igual valor e diferente carregamento**

Comparando os 3 gráficos dos perfis de tensão quando o inversor fornece potência ativa de 2 MW, Figura 5.5, Figura 5.8 e Figura 5.11, ao maior carregamento os perfis da modelagem BIVV e IVVH têm maior decréscimo em direção às barras finais, com carregamento de 0% e 40%, e nos nós iniciais o perfil é crescente devido à pouca demanda de potência das cargas e, portanto, cria-se o fluxo de potência desde o nó 7 para o nó 0 que faz com que o perfil ocorra dessa forma. O comportamento da modelagem PV é similar ao comportamento das demais modelagens, fazendo-se pensar que por ter apenas 1 MVAR de capacidade de potência reativa comparado aos 2 MW de potência ativa, e por ser a tensão consideravelmente sensível à potência ativa, as estratégias de controles e suas decisões não fazem muita diferença entre os perfis das distintas modelagens.

Analisando os 3 níveis de carregamento para o inversor fornecendo 1 MW, Figura 5.6, Figura 5.9 e Figura 5.12, a modelagem PV resulta em perfis que não mudam com grande diferença entre o nó 0 e o 7. Após o nó 7, ao ter maior carregamento, o perfil possui maior decréscimo para os nós finais em relação aos fluxos de potência criados pelas cargas. Em carregamento 100% o perfil da modelagem PV está acima dos perfis das outras modelagens e, além disso, se encontra fora da zona fatível da modelagem IVVH, conforme ocorre diminuição da carga os perfis das diferentes modelagens, em relação à modelagem PV, estão subindo e tendo pente menor. Enquanto ocorre a elevação dos perfis, o perfil da modelagem não sofre mudanças significativas, começando a pertencer à região fatível dos resultados da modelagem IVVH, em um ponto coincidindo com o perfil da modelagem BIVV e posteriormente com o carregamento leve, o perfil da modelagem PV já não faz parte das possíveis soluções da modelagem IVVH encontrando-se abaixo da região da IVVH.

As comparações dos perfis em distintos níveis de carregamento quando o inversor fornece 0 MW, Figura 5.7, Figura 5.10 e Figura 5.13, são semelhantes às comparações que se fizeram com o inversor fornecendo 1 MW. A diferença mais notável é que no carregamento pleno o perfil da modelagem PV desce até tensões de 0,992 p.u. no nó 7 e 0,909 p.u. no nó 33, enquanto que fornecendo 1 MW a tensão no nó 7 permanecia em 1,0 p.u. Destacando novamente como a tensão é sensível à potência ativa.

## 5.2.4 Validação das implementações realizadas em Python: do método da varredura e das modelagens do inversor de frequência

O método da varredura para resolver os fluxos de potência e as distintas modelagens do inversor de frequência foram implementadas na linguagem Python, que é de alto nível com paradigma de programação orientada a objetos. Com o objetivo de avaliar seu funcionamento, serão realizadas simulações do sistema a carga plena, sem e com geração distribuída ligada ao nó 7, e os resultados serão exibidos pelos perfis de tensão do sistema que serão comparados aos perfis dos resultados ministrados por simulações feitas com o software OpenDSS com os mesmos parâmetros elétricos do sistema e nas mesmas condições de operação.

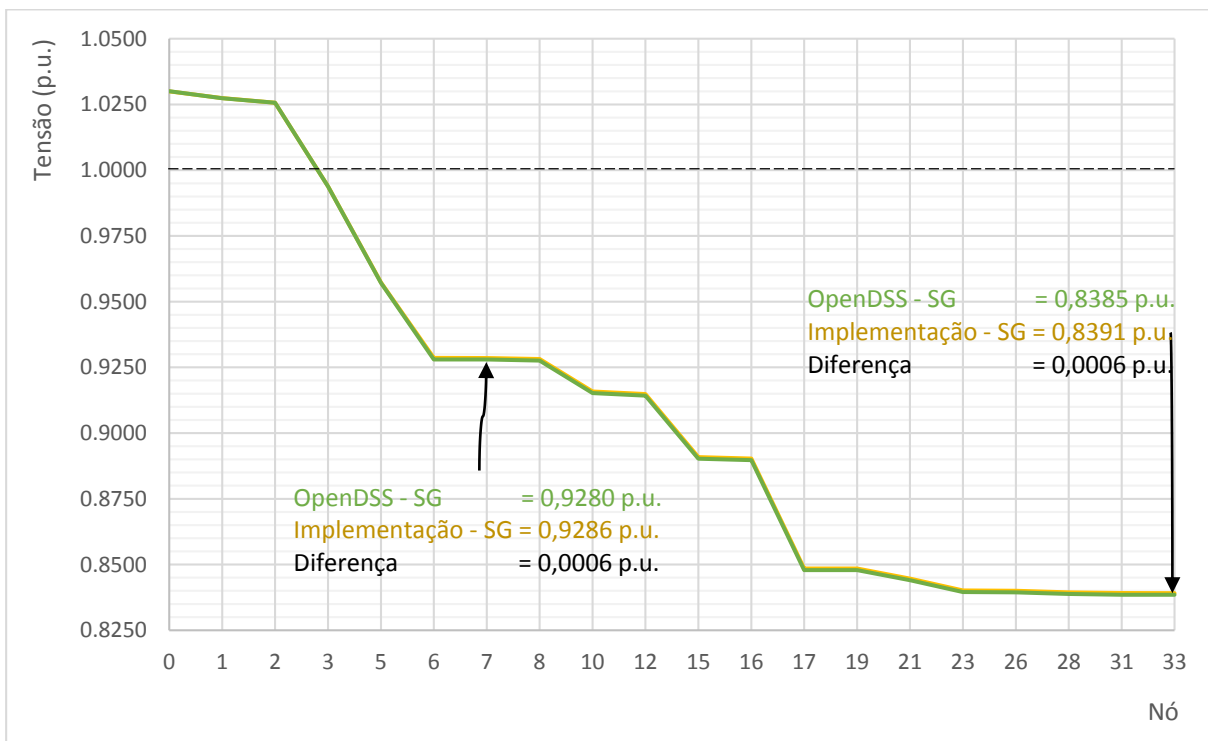


Figura 5.14: Perfis de tensão das simulações da implementação própria e OpenDSS, sem geração distribuída.

Na Figura 5.14 temos os perfis de tensão pertencentes às duas simulações do sistema a plena carga sem geração distribuída. Observando o nó 7 percebe-se que a tensão fornecida pela simulação em Python (implementação realizada e utilizada neste trabalho de pesquisa) se encontra 0,0006 p.u. acima do valor fornecido por OpenDSS (simulação de comparação). O mesmo acontece no nó 33, isto é, uma diferença percentual de 0,071% e 0,064 %, no nó 7 e 33 respectivamente. Considera-se que as diferenças entre os valores de ambas simulações são aceitáveis, notando-se que o traçado dos perfis ao longo do sistema são extremadamente próximos.

Para avaliar as simulações da implementação do inversor modelado como um nó PV e com o controle BIVV, traça-se os perfis da Figura 5.15. Temos dois perfis de tensão para a modelagem de nó PV e dois para a modelagem do controle BIVV, sendo que um perfil corresponde à implementação realizada no trabalho de pesquisa e o outro ao resultado de OpenDSS. Em todos os casos o inversor fornece 1 MW com capacidade de potência reativa de 2 MVar.

Para a modelagem PV nas duas simulações, a tensão no ponto comum de conexão atingiu o valor de 1,0000 p.u. e no nó 33 a tensão decresceu até 0,9182 p.u. Ressalta-se que os dois perfis estão quase superpostos. Já para a modelagem BIVV, a tensão no nó 7 tem uma diferença de 0,0001 p.u. equivalente a uma diferença de 0,010 % entre ambas simulações. No nó 33 a tensão alcança o valor de 0,9030 p.u. para as duas simulações. Conclui-se que as diferenças entre as simulações com a implementação própria e OpenDSS, das duas modelagens do inversor, são mínimas e se consideram aceitáveis.

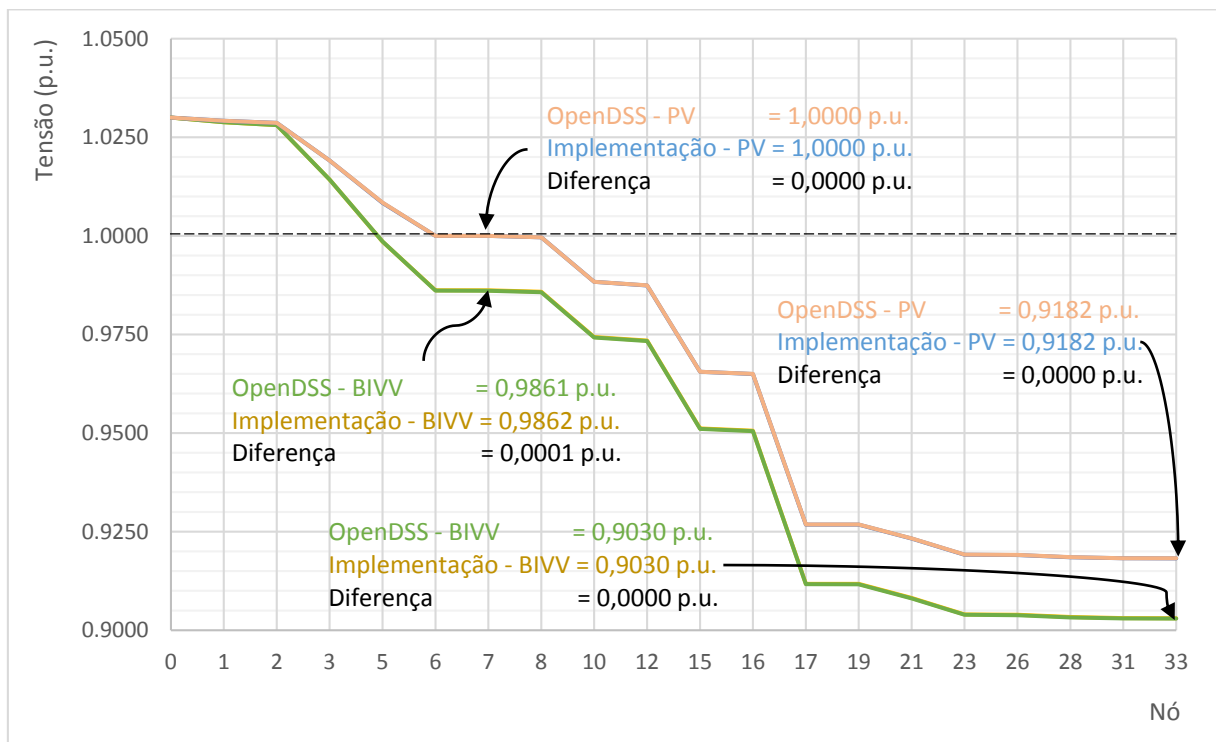


Figura 5.15: Perfis de tensão das simulações da implementação própria e OpenDSS, com o inversor modelado como nó PV e o controle BIVV





# Capítulo 6

## Conclusões

Da revisão das modelagens típicas dos inversores no método da varredura, se ressalta do método da compensação utilizado na modelagem PV um elemento particularmente importante, a matriz de sensibilidade dos nós PV. A matriz pode ser utilizada como uma linearização entre a relação da potência reativa injetada em um nó e a variação da tensão, relação importante nos cálculos de fluxo de potência quando se tem dispositivos relacionados ao suporte de potência reativa ou controle de tensão.

As novas funções dos inversores possuem curvas que expressam seu comportamento, como por exemplo, a *Basic Intelligent Volt-Var* possui curvas nas quais se relacionam a potência reativa e a tensão no ponto comum de conexão. Quando se utilizam diretamente essas curvas para atualizar o valor da potência reativa no processo de resolução do fluxo de potência, é provável ter-se problemas de convergência, por esse motivo é muito importante considerar métodos que assegurem a convergência no processo de resolução. Neste trabalho foi apresentado um método que faz uso de elementos da matriz de sensibilidade dos nós PV, para aproximar linearmente a curva de resposta do sistema, e com isso, estimar o valor de potência reativa a ser injetada nas sucessivas iterações do processo de resolução do fluxo de potência. Foi exibido, mediante dois exemplos numéricos, a evolução da resolução para a implementação direta e com o método proposto, evidenciando-se a divergência para o primeiro e a convergência para o segundo. O método apresentado teve eficácia em todas as simulações das análises efetuadas, conseguindo atingir soluções em valores convergentes e conforme a estratégia de controle.

Mediante a resolução dos fluxos de potência se encontraram os pontos operativos para a modelagem PV, modelagem BIVV e IVVH. As simulações foram feitas para diversas condições de carga do sistema e com vários níveis de fornecimento de potência ativa pelo inversor. Em geral, com o aumento da capacidade da potência reativa, a diferença entre os pontos operativos de cada modelagem aumentou. Desde que o inversor de frequência esteja evoluindo para operar com novas funções e habilitando-se a possibilidade de fornecer serviços ancilares relacionados ao suporte de potência reativa, dever-se-ia ser muito crítico na modelagem, pelo fato de que esses serviços implicariam maior capacidade de potência reativa.

Os perfis de tensão para a modelagem PV tende a permanecer imutável devido às diferenças do estado do sistema ou à quantidade de potência real fornecida pelo inversor, sendo que o contrário ocorre com as modelagens dos controles avançados, indicando que os nós PV

ministram menor variação da tensão nas simulações, e isto é ainda mais evidente quando se aumenta a capacidade da potência reativa do inversor. Por outro lado, se o inversor fornece potência real de valor adequado para manter a tensão no ponto comum de conexão próxima ao valor de referência injetando uma quantidade relativamente mínima de potência reativa, os perfis providos pelas diferentes modelagens estão propensos a se aproximarem.

Se a ferramenta de simulação utilizada por alguma concessionária não é atual, tendo somente por exemplo modelagem PV para a geração distribuída ou, no pior dos casos, somente a modelagem PQ, ao ser inseridos geradores distribuídos utilizando como interface aos inversores com funções avançadas, se terá diferenças nos perfis de tensão e no valor da potência injetada pelo inversor, que resultaria em problemas nas tomadas de decisões em relação à configuração ou planejamento da operação do sistema ou na definição da capacidade de potência dos geradores, etc. Como foi demonstrado nos resultados das simulações das distintas modelagens se pode ter valores muito diferentes, assim dever-se-ia utilizar a modelagem proposta do controle BIVV quando o inversor opera com funções Volt-Var linear a trechos e não utilizar as modelagens clássicas, como por exemplo a PV. Ressalta-se que se deve ser cuidadoso tanto na modelagem quanto na implementação no método utilizado para resolver o fluxo de potência. Neste trabalho, teve que ser desenvolvido um método específico na modelagem do controle BIVV para assegurar a convergência no método da varredura.

Observou-se que no sistema de distribuição analisado, a potência ativa poderia ter maior influência na tensão que a potência reativa, o que poderia sugerir que no controle de tensão dever-se-ia considerar uma função de ação conjunta entre a potência ativa e reativa. Se forem desenvolvidas estratégias conjuntas, seria necessário pesquisar sobre as modelagens que poderiam representar esses inversores e como assegurar a convergência na resolução do fluxo de potência, considerando que a complexidade do problema poderia aumentar significativamente.

Como propostas de trabalhos a futuro, se menciona os dois seguintes: modelagem de vários geradores distribuídos com funções Volt-Var em um sistema de distribuição convencional, ou seja alimentado por um alimentador e vários GD; e como segunda proposta, pesquisar sobre as modelagens em redes ilhadas das funções Volt-Var que poderiam operar em conjunto com outras funções que relacionam a potência ativa e a frequência.

# Referências Bibliográficas

ANEEL (2015). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, Brasil: pp. 1–76.

ANEEL (2003). *Resolução Normativa 265*, Brasil: pp. 1–7.

ANEEL (2008). *Resolução Normativa 309*, Brasil: pp. 1–2.

Araujo, L.R. De, Penido, D.R.R., Júnior, S.C., Pereira, J.L.R., Garcia, P.A.N. (2010). Comparisons between the three-phase current injection method and the forward/backward sweep method, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **32**(7): 825–833.

Balamurugan, K., Srinivasan, D. (2011). Review of power flow studies on distribution network with distributed generation, *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on*, IEEE, Singapore, pp. 411–417.

Bassett, D.L. (2012). Update of the status of IEEE 1547.8, expanding on IEEE Standard 1547, *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*, IEEE, Orlando, FL, pp. 1–3.

Basso, T., Chakraborty, S., Hoke, A., Coddington, M. (2015). IEEE 1547 Standards Advancing Grid Modernization, *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*, IEEE, New Orleans, LA, pp. 1–5.

Bhattacharya, K., Zhong, J. (2001). Reactive power as an ancillary service, *IEEE Transactions on Power Systems* **16**(2): 294–300.

Bravo, R.J., Robles, S.A., Bialek, T. (2014). VAr support from solar PV inverters, *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, IEEE, Denver, CO, pp. 2672–2676.

Bründlinger, R., Thomas, S., Lauss, G., Hoke, A., Chakraborty, S., Martin, G., Kroposki, B., Johnson, J., de Jong, E. (2015). Lab Tests: Verifying That Smart Grid Power Converters Are Truly Smart, *IEEE power and energy magazine* **13**(2): 30–42.

Chen, H., Chen, J., Shi, D., Duan, X. (2006). Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation, *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, Montreal, QC, pp. 1–8.

Cheng, C.S., Shirmohammadi, D. (1995). A Three-phase Power Flow Method For Real-Time Distribution System Analysis, *IEEE Transactions on Power Systems* **10**(2): 671–679.

Demirok, E., Sera, D., Teodorescu, R., Rodriguez, P., Borup, U. (2009). Clustered PV

inverters in LV networks: An overview of impacts and comparison of voltage control strategies, *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE*, IEEE, Montreal, QC, pp. 1–6.

Domínguez-García, A.D., Hadjicostis, C.N., Krein, P.T., Cady, S.T. (2011). Small inverter-interfaced distributed energy resources for reactive power support, *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, IEEE, Fort Worth, TX, pp. 1616–1621.

Dugan, R., Sunderman, W., Seal, B. (2013). Advanced Inverter Controls For Distributed Resources, *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*, IET, Estocolmo, Suécia, pp. 1–4.

Electric Power Research Institute (2014). *Common Functions for Smart Inverters, Version 3*, EPRI, Palo Alto, Estados Unidos.

Fengli, J., Zhixia, Z., Tong, C., Bo, H., Zailin, P. (2013). Impact of Distributed Generation on Voltage Profile and Losses of Distribution Systems, *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese*, IEEE, Xi'an, pp. 8587–8591.

Gjerde, O. (2007). Ancillary services - State of the art in the Nordic market, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, IEEE, Tampa, FL, pp. 1–2.

Grigsby, L.L. (2012). *Electric Power Generation, Transmission and Distribution, 3ed.*, CRC Press, Boca Raton, Florida.

Guan, F.H., Zhao, D.M., Zhang, X., Shan, B.T., Liu, Z. (2009). Research on distributed generation technologies and its impacts on power system, *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09*, IEEE, Nanjing, pp. 1–6.

Hassaine, L. (2010). *Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores . Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red*, Teses de doutorado, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Espanha.

Hoffmann, A., Fleckenstein, M., Balzer, G., Hartkopf, T. (2014). Grid services with PV-converters in distribution systems, *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*, IEEE, Washington, DC, pp. 1–5.

Joos, G., Ooi, B.T., McGillis, D., Galiana, F.D., Marceau, R. (2000). The potential of distributed generation to provide ancillary services, *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, IEEE, Seattle, Estados Unidos, pp. 1762–1767.

Keane, A., Ochoa, L.F., Vittal, E., Dent, C.J., Harrison, G.P. (2011). Enhanced utilization of voltage control resources with distributed generation, *IEEE Transactions on Power Systems* **26**(1): 252–260.

Kersting, W.H. (2012). *Distribution System Modeling and Analysis*, 3rd ed., CRC Press, Las Cruces, New Mexico.

Kroposki, B., Pink, C., Deblasio, R., Thomas, H., Simões, M., Sen, P.K. (2010). Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(3): 901–908.

MacDowell, J., Dutta, S., Richwine, M., Achilles, S., Miller, N.W. (2015). Serving the Future: Advanced Wind Generation Technology Supports Ancillary Services, *IEEE Power & Energy Magazine* **13**(6): 22–30.

Moghaddas-Tafreshi, S.M., Mashhour, E. (2009). Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation, *Electric Power Systems Research* **79**(4): 680–686.

Olek, B., Wierzbowski, M. (2015). Local Energy Balancing and Ancillary Services in Low Voltage Networks with Distributed Generation, Energy Storage and Active Loads, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **62**(4): 2499–2508.

Rueda Medina, A.C. (2012). *Valoração de Serviços Ancilares de Geradores Distribuídos*, Tese de doutorado, UNESP, Ilha Solteira, Brasil.

Smith, J.W., Sunderman, W., Dugan, R., Seal, B. (2011). Smart inverter volt/var control functions for high penetration of PV on distribution systems, *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES*, IEEE, Phoenix, AZ, pp. 1–6.

Wu, T., Rothleder, M., Alaywan, Z., Papalexopoulos, A.D. (2004). Pricing Energy and Ancillary Services in Integrated Market Systems by an Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(1): 339–347.

Zhu, Y., Tomsovic, K. (2002). Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(3): 822–827.



# Anexos

As tabelas expressam dados em p.u., sendo a base de tensão de 24,9 kV e a base de potência 1 MVA.

Tabela A1: Carga por fase de cada barra do sistema IEEE - 34

<b>BARRA</b>	<b>PA</b>	<b>QA</b>	<b>PB</b>	<b>QB</b>	<b>PC</b>	<b>QC</b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
<b>1</b>	0	0	0,0450	0,0225	0,0375	0,0210
<b>2</b>	0	0	0,0450	0,0225	0,0375	0,0210
<b>3</b>	0	0	0,0240	0,0120	0	0
<b>4</b>	0	0	0,0240	0,0120	0	0
<b>5</b>	0	0	0	0	0	0
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0
<b>7</b>	0	0	0	0	0	0
<b>8</b>	0	0	0,0075	0,0030	0	0
<b>9</b>	0,0510	0,0255	0	0	0	0
<b>10</b>	0	0	0,0675	0,0330	0,0060	0,0030
<b>11</b>	0,2535	0,1305	0	0	0	0
<b>12</b>	0,0105	0,0045	0	0	0,0060	0,0030
<b>13</b>	0	0	0,0600	0,0300	0	0
<b>14</b>	0,2025	0,1050	0	0	0	0
<b>15</b>	0,0405	0,0195	0,0360	0,0180	0,0750	0,0300
<b>16</b>	0	0	0,0060	0,0030	0	0
<b>17</b>	0	0	0	0	0	0
<b>18</b>	0	0	0	0	0	0
<b>19</b>	0,0105	0,0045	0,0030	0,0015	0,0090	0,0045
<b>20</b>	0	0	0	0	0	0
<b>21</b>	0,0195	0,0090	0,0255	0,0135	0,0285	0,0150
<b>22</b>	0,4500	0,2250	0,45	0,2250	0,4500	0,2250
<b>23</b>	0,0300	0,0150	0,0525	0,0270	0,1845	0,0930
<b>24</b>	0,0030	0,0015	0	0	0	0
<b>25</b>	0,1290	0,0825	0,1050	0,0720	0,2880	0,1635
<b>26</b>	0,0135	0,0075	0	0	0	0
<b>27</b>	0,0720	0,0360	0,0480	0,0255	0,0630	0,033
<b>28</b>	0,4185	0,3225	0,4425	0,3330	0,4350	0,3315
<b>29</b>	0	0	0,0420	0,0210	0	0
<b>30</b>	0,0540	0,0345	0,0600	0,0375	0,0270	0,0210
<b>31</b>	0	0	0,0720	0,0345	0	0
<b>32</b>	0	0	0,0420	0,0210	0	0
<b>33</b>	0,0600	0,0480	0,0945	0,0645	0,0600	0,0480

Tabela A2: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 1/4

B1	B2	raa	xaa	rab	xab	rac	xac	ran	xan
0	1	0,000958	0,001276	7,52E-05	0,000671	7,52E-05	0,000615	7,52E-05	0,00062
1	2	0,000642	0,000856	5,03E-05	0,00045	5,03E-05	0,000412	5,03E-05	0,000416
2	3	0,011965	0,015945	0,000938	0,008384	0,000938	0,007682	0,000938	0,007744
3	5	0,013922	0,018553	0,001092	0,009755	0,001092	0,008938	0,001092	0,00901
5	6	0,010904	0,01453	0,000855	0,00764	0,000855	0,007	0,000855	0,007057
6	7	3,71E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,58E-06	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,42E-06
7	8	1,69E-04	1,54E-04	9,03E-06	8,06E-05	9,03E-06	7,39E-05	9,03E-06	7,45E-05
8	9	0,001382	0,000845	0,00E+00	0,00E+00	0	0	4,98E-05	4,01E-04
9	11	0,03891	0,023798	0	0	0	0	0,001402	0,01128
11	14	0,011103	0,006791	0	0	0	0	0,0004	0,003219
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
8	10	0,005568	0,005076	0,000297	0,002656	0,000297	0,002434	0,000297	0,002453
10	13	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12	0,000458	0,000418	2,45E-05	0,000219	2,45E-05	0,0002	2,45E-05	0,000202
12	15	0,011148	0,010162	0,000595	0,005317	0,000595	0,004872	0,000595	0,004911
15	16	0,000284	0,000259	1,52E-05	0,000135	1,52E-05	0,000124	1,52E-05	0,000125
16	18	0	0	0	0	0	0	0	0
16	17	0,020086	0,01831	0,001072	0,009581	0,001072	0,008778	0,001072	0,008849
17	19	5,48E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,58E-06	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,42E-06
19	21	0,002672	0,002436	0,000143	0,001275	0,000143	0,001168	0,000143	0,001177
21	24	0,001309	0,000801	0	0	0	0	4,71E-05	0,00038
21	23	0,00318	0,002898	0,00017	0,001517	0,00017	0,00139	0,00017	0,001401
23	25	0,001102	0,001004	5,89E-05	0,000525	5,89E-05	0,000481	5,89E-05	0,000485
25	27	0,001462	0,001332	7,81E-05	0,000697	7,81E-05	0,000639	7,81E-05	0,000644
27	29	0,000153	0,000139	8,23E-06	7,29E-05	8,23E-06	6,68E-05	8,23E-06	6,73E-05
29	32	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0,00E+00
27	30	0,000469	0,000428	2,50E-05	0,000224	2,50E-05	0,000205	2,50E-05	0,000207
23	26	0,000153	0,000139	8,23E-06	7,29E-05	8,23E-06	6,68E-05	8,23E-06	6,73E-05
26	28	0,000736	6,71E-04	3,94E-05	3,51E-04	3,94E-05	0,000322	3,94E-05	3,24E-04
28	31	0,001985	0,00181	0,000106	0,000947	0,000106	0,000868	0,000106	0,000875
31	33	0,000289	0,000264	1,55E-05	0,000138	1,55E-05	0,000126	1,55E-05	0,000127
19	20	3,71E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,58E-06	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,42E-06
20	22	0,00392	0,005224	0,000307	0,002747	0,000307	0,002517	0,000307	0,002537

Tabela A3: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 2/4

B1	B2	rba	xba	rbb	xbb	rbc	xbc	rbn	xbn
0	1	7,52E-05	0,000671	0,000958	0,001276	7,52E-05	0,000573	7,52E-05	0,000593
1	2	5,03E-05	0,00045	0,000642	0,000856	5,03E-05	0,000384	5,03E-05	0,000398
2	3	0,000938	0,008384	0,011965	0,015945	0,000938	0,007154	0,000938	0,007409
3	5	0,001092	0,009755	0,013922	0,018553	0,001092	0,008324	0,001092	0,00862
5	6	0,000855	0,00764	0,010904	0,01453	0,000855	0,006519	0,000855	0,006751
6	7	3,23E-07	2,58E-06	3,71E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,23E-07	2,26E-06



7	8	9,03E-06	8,06E-05	1,69E-04	1,54E-04	9,03E-06	6,89E-05	9,03E-06	7,13E-05
8	9	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
9	11	0	0	0	0	0	0	0	0
11	14	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	0	0	0,00469	0,002869	0	0	0,000169	0,00136
8	10	0,000297	0,002656	0,005568	0,005076	0,000297	0,002266	0,000297	0,002347
10	13	0	0	0,002449	0,001498	0	0	8,82E-05	0,00071
10	12	2,45E-05	0,000219	0,000458	0,000418	2,45E-05	0,000186	2,45E-05	0,000193
12	15	0,000595	0,005317	0,011148	0,010162	0,000595	0,004537	0,000595	0,004699
15	16	1,52E-05	0,000135	0,000284	0,000259	1,52E-05	0,000115	1,52E-05	0,00012
16	18	0	0	0,018853	0,011531	0	0	0,000679	0,005465
16	17	0,001072	0,009581	0,020086	0,01831	0,001072	0,008175	0,001072	0,008466
17	19	3,23E-07	2,58E-06	5,48E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,23E-07	2,26E-06
19	21	0,000143	0,001275	0,002672	0,002436	0,000143	0,001088	0,000143	0,001126
21	24	0	0	0	0	0	0	0	0
21	23	0,00017	0,001517	0,00318	0,002898	0,00017	0,001294	0,00017	0,00134
23	25	5,89E-05	0,000525	0,001102	0,001004	5,89E-05	0,000448	5,89E-05	0,000464
25	27	7,81E-05	0,000697	0,001462	0,001332	7,81E-05	0,000595	7,81E-05	0,000616
27	29	8,23E-06	7,29E-05	0,000153	0,000139	8,23E-06	6,21E-05	8,23E-06	6,44E-05
29	32	0,00E+00	0,00E+00	2,65E-03	0,002416	0	0,00E+00	1,41E-04	1,14E-03
27	30	2,50E-05	0,000224	0,000469	0,000428	2,50E-05	0,000191	2,50E-05	0,000198
23	26	8,23E-06	7,29E-05	0,000153	0,000139	8,23E-06	6,21E-05	8,23E-06	6,44E-05
26	28	3,94E-05	3,51E-04	7,36E-04	0,000671	3,94E-05	3,00E-04	3,94E-05	3,10E-04
28	31	0,000106	0,000947	0,001985	0,00181	0,000106	0,000808	0,000106	0,000837
31	33	1,55E-05	0,000138	0,000289	0,000264	1,55E-05	0,000118	1,55E-05	0,000122
19	20	3,23E-07	2,58E-06	3,71E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,23E-07	2,26E-06
20	22	0,000307	0,002747	0,00392	0,005224	0,000307	0,002344	0,000307	0,002427

Tabela A4: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 3/4

B1	B2	rca	xca	rcb	xcb	rcc	xcc	rcn	xcn
0	1	7,52E-05	0,000615	7,52E-05	0,000573	0,000958	0,001276	7,52E-05	0,000605
1	2	5,03E-05	0,000412	5,03E-05	0,000384	0,000642	0,000856	5,03E-05	0,000406
2	3	0,000938	0,007682	0,000938	0,007154	0,011965	0,015945	0,000938	0,007556
3	5	0,001092	0,008938	0,001092	0,008324	0,013922	0,018553	0,001092	0,008792
5	6	0,000855	0,007	0,000855	0,006519	0,010904	0,01453	0,000855	0,006886
6	7	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,71E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,42E-06
7	8	9,03E-06	7,39E-05	9,03E-06	6,89E-05	0,000169	0,000154	9,03E-06	7,27E-05
8	9	0,00E+00	0	0	0	0	0	0	0
9	11	0	0	0	0	0	0	0	0
11	14	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
8	10	0,000297	0,002434	0,000297	0,002266	0,005568	0,005076	0,000297	0,002394
10	13	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12	2,45E-05	0,0002	2,45E-05	0,000186	0,000458	0,000418	2,45E-05	0,000197

12	15	0,000595	0,004872	0,000595	0,004537	0,011148	0,010162	0,000595	0,004792
15	16	1,52E-05	0,000124	1,52E-05	0,000115	0,000284	0,000259	1,52E-05	0,000122
16	18	0	0	0	0	0	0	0	0
16	17	0,001072	0,008778	0,001072	0,008175	0,020086	0,01831	0,001072	0,008635
17	19	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,26E-06	5,48E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,42E-06
19	21	0,000143	0,001168	0,000143	0,001088	0,002672	0,002436	0,000143	0,001149
21	24	0	0	0	0	0	0	0	0
21	23	0,00017	0,00139	0,00017	0,001294	0,00318	0,002898	0,00017	0,001367
23	25	5,89E-05	0,000481	5,89E-05	0,000448	0,001102	0,001004	5,89E-05	0,000474
25	27	7,81E-05	0,000639	7,81E-05	0,000595	0,001462	0,001332	7,81E-05	0,000628
27	29	8,23E-06	6,68E-05	8,23E-06	6,21E-05	0,000153	0,000139	8,23E-06	6,56E-05
29	32	0,00E+00	0	0	0	0	0	0	0
27	30	2,50E-05	0,000205	2,50E-05	0,000191	0,000469	0,000428	2,50E-05	0,000202
23	26	8,23E-06	6,68E-05	8,23E-06	6,21E-05	0,000153	0,000139	8,23E-06	6,56E-05
26	28	3,94E-05	0,000322	3,94E-05	0,0003	0,000736	0,000671	3,94E-05	0,000316
28	31	0,000106	0,000868	0,000106	0,000808	0,001985	0,00181	0,000106	0,000853
31	33	1,55E-05	0,000126	1,55E-05	0,000118	0,000289	0,000264	1,55E-05	0,000124
19	20	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,71E-06	5,00E-06	3,23E-07	2,42E-06
20	22	0,000307	0,002517	0,000307	0,002344	0,00392	0,005224	0,000307	0,002476

Tabela A5: Parâmetros dos ramos entre as barras do sistema IEEE – 34. Parte 4/4

B1	B2	rna	xna	rnb	xnb	rnc	xnc	rnn	xnn
0	1	7,52E-05	0,00062	7,52E-05	0,000593	7,52E-05	0,000605	0,000958	0,001276
1	2	5,03E-05	0,000416	5,03E-05	0,000398	5,03E-05	0,000406	0,000642	0,000856
2	3	0,000938	0,007744	0,000938	0,007409	0,000938	0,007556	0,011965	0,015945
3	5	0,001092	0,00901	0,001092	0,00862	0,001092	0,008792	0,013922	0,018553
5	6	0,000855	0,007057	0,000855	0,006751	0,000855	0,006886	0,010904	0,01453
6	7	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,23E-07	2,42E-06	3,71E-06	5,00E-06
7	8	9,03E-06	7,45E-05	9,03E-06	7,13E-05	9,03E-06	7,27E-05	0,000169	0,000154
8	9	4,98E-05	0,000401	0	0	0	0	0,001382	0,000845
9	11	0,001402	0,01128	0	0	0	0	0,03891	0,023798
11	14	0,0004	0,003219	0	0	0	0	0,011103	0,006791
3	4	0	0	0,000169	0,00136	0	0	0,00469	0,002869
8	10	0,000297	0,002453	0,000297	0,002347	0,000297	0,002394	0,005568	0,005076
10	13	0	0	8,82E-05	0,00071	0	0	0,002449	0,001498
10	12	2,45E-05	0,000202	2,45E-05	0,000193	2,45E-05	0,000197	0,000458	0,000418
12	15	0,000595	0,004911	0,000595	0,004699	0,000595	0,004792	0,011148	0,010162
15	16	1,52E-05	0,000125	1,52E-05	0,00012	1,52E-05	0,000122	0,000284	0,000259
16	18	0	0	0,000679	0,005465	0	0	0,018853	0,011531
16	17	0,001072	0,008849	0,001072	0,008466	0,001072	0,008635	0,020086	0,01831
17	19	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,23E-07	2,42E-06	5,48E-06	5,00E-06
19	21	0,000143	0,001177	0,000143	0,001126	0,000143	0,001149	0,002672	0,002436
21	24	4,71E-05	0,00038	0	0	0	0	0,001309	0,000801
21	23	0,00017	0,001401	0,00017	0,00134	0,00017	0,001367	0,00318	0,002898

23	25	5,89E-05	0,000485	5,89E-05	0,000464	5,89E-05	0,000474	0,001102	0,001004
25	27	7,81E-05	0,000644	7,81E-05	0,000616	7,81E-05	0,000628	0,001462	0,001332
27	29	8,23E-06	6,73E-05	8,23E-06	6,44E-05	8,23E-06	6,56E-05	0,000153	0,000139
29	32	0	0	0,000141	0,001139	0	0	0,00265	0,002416
27	30	2,50E-05	0,000207	2,50E-05	0,000198	2,50E-05	0,000202	0,000469	0,000428
23	26	8,23E-06	6,73E-05	8,23E-06	6,44E-05	8,23E-06	6,56E-05	0,000153	0,000139
26	28	3,94E-05	0,000324	3,94E-05	0,00031	3,94E-05	0,000316	0,000736	0,000671
28	31	0,000106	0,000875	0,000106	0,000837	0,000106	0,000853	0,001985	0,00181
31	33	1,55E-05	0,000127	1,55E-05	0,000122	1,55E-05	0,000124	0,000289	0,000264
19	20	3,23E-07	2,42E-06	3,23E-07	2,26E-06	3,23E-07	2,42E-06	3,71E-06	5,00E-06
20	22	0,000307	0,002537	0,000307	0,002427	0,000307	0,002476	0,00392	0,005224

Tabela A6: Faixa de classificação de tensões para valor nominal entre 1 e 69 kV.

Fonte: (ANEEL, 2015)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão
Adequada	$0,93 \leq v \leq 1,05$
Precária	$0,90 \leq v < 0,93$
Crítica	$v < 0,90$ ou $1,05 < v$