

Assessing the Performance of Smart Inverter Volt-Watt and Volt-Var Functions in Distribution Systems with High PV Penetration

T. M. Wanzeler

*Programa de Pós-Graduação em
Eng. Elétrica - PPGEE
Universidade Federal do Pará -
UFPA*

Tucuruí - PA, Brasil
twanzeler@ufpa.br

J. P. A. Vieira

*Programa de Pós-Graduação em
Eng. Elétrica - PPGEE
Universidade Federal do Pará -
UFPA*

Belém - PA, Brasil
jpavieira@ufpa.br

P. Radatz

*Programa de Pós-Graduação em
Eng. Elétrica - PPGEE
Universidade de São Paulo -
USP*

São Paulo - SP, Brasil
paulo.radatz@usp.br

V. C. Souza

*Programa de Pós-Graduação em
Eng. Elétrica - PPGEE
Universidade Federal do Pará -
UFPA*

Belém - PA, Brasil
vandersoneng@hotmail.com

D. C. Pinheiro

*Programa de Pós-Graduação em
Eng. Elétrica - PPGEE
Universidade Federal do Pará -
UFPA*

Tucuruí - PA, Brasil
eng.dpinheiro@ufpa.br

Abstract—The overvoltage problem in distribution networks may be caused by significant active power injection from photovoltaic (PV) generation. In the distribution networks with high PV penetration around the world the overvoltage is commonly mitigated by curtailing active power injection due to lower X/R ratio. However, this directly results in suboptimal capture of energy from PV generators. To mitigate overvoltage, smart inverter Volt-Watt and Volt-Var control functions have been introduced in recent standards. The utility of these functions has been established in few recent studies. This paper shows how smart inverter Volt-Watt and Volt-Var control functions alleviate the overvoltage problem in distribution networks with high integration of PV generators.

Keywords— smart inverter, volt-var control, volt-watt control, high PV penetration, distribution systems.

I. INTRODUÇÃO

O número de instalações de unidades de geração distribuída (GD) tem crescido significativamente no Brasil nos últimos dois anos. Segundo a ANEEL, o número de conexões de unidades de GD superou a marca de 10 mil instalações em maio de 2017, com destaque para a fonte solar fotovoltaica (FV) que representa 99% do número total de instalações. A nova projeção da ANEEL aponta para 886,7 mil instalações e 3,2 GW de capacidade de unidades de GD até 2024.

Esse crescente aumento de conexões de geradores FV nas redes de distribuição do Brasil associado com a imprevisibilidade e a carência de inércia desse tipo de fonte introduzirá, em um futuro breve, vários problemas na operação dessas redes. Um dos principais problemas será a sobretensão, que poderá aumentar os custos de violações dos limites de tensão estabelecidos pelo PRODIST [1] e de manutenção em equipamentos reguladores de tensão, como LTCs, reguladores

de tensão e capacitores chaveados automaticamente. Atualmente, as normas técnicas das concessionárias de distribuição exigem o desligamento parcial ou total de geradores FV por meio da atuação da proteção de sobretensão do inversor. Essa prática tem sido necessariamente adotada nas redes de distribuição de baixa tensão (BT) devido ao valor baixo da relação X/R dos cabos. Entretanto, o desligamento dos geradores FV pode comprometer a gestão energética de consumidores que possuem tais fontes, uma vez que numa condição muito favorável de irradiação solar, o consumidor pode ter a sua produção excedente (geração maior que a carga) reduzida ou anulada.

O controle de fator de potência constante de geradores FV também pode ser utilizado para evitar sobretensões nas redes de distribuição. A operação de geradores FV com fator de potência unitário ainda é padrão em muitos países, incluindo o Brasil. Por outro lado, a exploração da capacidade que a fonte FV possui de injeção/absorção de potência reativa é uma opção cada vez mais atrativa.

Na busca de soluções para minimizar estes problemas, surgem as funcionalidades de controle inteligente presentes nos inversores fotovoltaicos. Sendo assim, uma série de estratégias utilizando as funcionalidades dos inversores inteligentes foram descritas em [2], visando analisar e mitigar os efeitos causados pelo alto nível de penetração FV. Em [3] é descrita a utilização das funcionalidades de controle inteligente presentes nos inversores FV, *Volt-Watt* e *Volt-Var*, bem como os efeitos que estes controles causam na rede. Em [4] os autores analisaram o desempenho do controle *Volt-Var* em sistemas de distribuição com alta penetração FV. Em [5] os autores apresentaram a utilização do controle avançado *Volt-Var* como forma de reduzir a sobretensão causada pela inserção da GD e aumentar a capacidade de hospedagem nas redes de distribuição. Já em [6], os autores descrevem a utilização das três principais

funções de controle presentes nos inversores FV, função *Volt-Watt*, função *Volt-Var* e função dinâmica de corrente reativa.

Com isso, este artigo tem por objetivo analisar o desempenho das funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var* em sistemas testes de baixa tensão (BT) e média tensão (MT) com alto nível de penetração FV.

II. SOBRETENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM PRESENÇA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A inserção de GD em redes de distribuição de energia elétrica é causa de vários problemas operacionais que desafiam os operadores desses sistemas. Neste cenário, o principal problema é a sobretensão, que é causada pela injeção de potência ativa (P) e potência reativa (Q) de acordo com (1). Onde R e X são a resistência e reatância do alimentador, respectivamente.

$$\Delta V = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{V} \quad (1)$$

Além disso, a alta inserção de geradores distribuídos afeta significativamente o fluxo de potência e o perfil de tensão nos equipamentos tanto da concessionária quanto dos consumidores ao longo de um alimentador, podendo alterar a direção tradicional dos fluxos de potências ativa e reativa [7]. A Fig. 1 apresenta uma sobretensão causada pela inserção da GD em um alimentador com cargas leves.

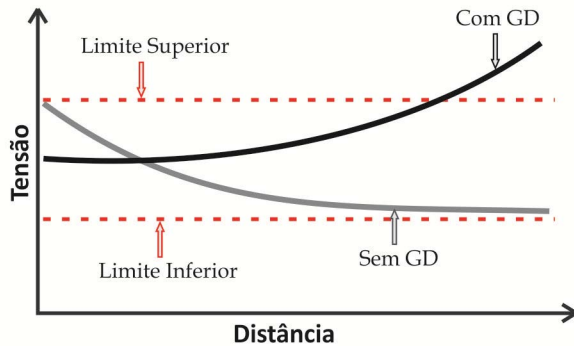


Figura 1 - Sobretensão causada pela GD (Fonte: Adaptado de [8])

Vale ressaltar que as tensões nas proximidades da GD são mais afetadas pela potência ativa injetada. Isso está diretamente relacionado com a relação X/R do alimentador de distribuição onde a GD está inserida.

III. FUNÇÕES DE CONTROLE VOLT-WATT E VOLT-VAR

A. Função de Controle Volt-Watt

A funcionalidade *Volt-Watt* é utilizada para reduzir a saída de potência ativa em cada sistema FV individualmente, com o objetivo de amenizar as sobretensões causadas pela inserção da GD. Isso pode ser extremamente necessário quando os controles existentes de regulação da tensão não conseguem evitar essas sobretensões [6].

Esta função de controle é mais eficaz para os sistemas de distribuição que possuem um valor baixo para a relação X/R

dos cabos. Pois, se a rede possuir característica mais reativa do que resistiva, a função *Volt-Var* pode ser mais apropriada [2]. Essa função *Volt-Watt* destina-se a fornecer um mecanismo flexível através do qual uma curva *Potência Ativa vs. Tensão* pode ser configurada pelo usuário através de um conjunto de pontos (x, y) que definem a saída de potência ativa em vários valores de tensão terminal em p.u. (Ver Fig. 2). Vale salientar que a função *Volt-Watt* ajusta apenas a saída de potência ativa e não a saída de potência reativa [6].

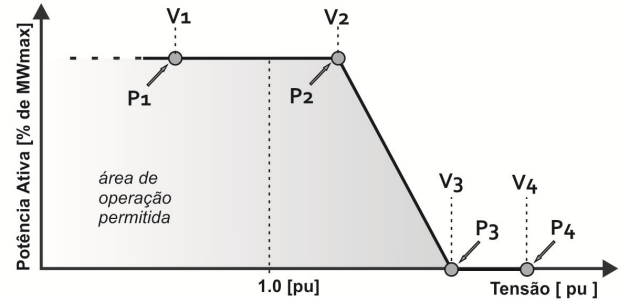


Figura 2 - Curva de Controle *Volt-Watt* (Fonte: Adaptado de [6])

Através da Fig. 2 observa-se que esta função controla a saída de potência ativa de um determinado sistema FV por meio de uma curva de *Potência Ativa vs. Tensão*. À medida que a tensão aumenta acima de um certo nível (V2), a saída de potência ativa é reduzida linearmente de P2 até P3 para tensões entre V2 e V3. No nível de tensão V3 ou superior, a saída de potência ativa é ajustada para zero [6].

B. Função de Controle Volt-Var

Recentemente, a possibilidade de incorporar a capacidade de controle de potência reativa (var) com inversores FV para suporte à rede de distribuição foi relatada em vários artigos [2-6]. A alta penetração FV causa um alto grau de imprevisibilidade no funcionamento de um alimentador de distribuição, devido ao comportamento intermitente da irradiação solar. Isso tem um grande impacto sobre o fluxo de potência e o perfil de tensão do alimentador [3].

A funcionalidade de controle inteligente *Volt-Var* é usada para tentar manter a tensão no terminal do sistema fotovoltaico dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST [1]. Assim, a absorção de potência reativa (região indutiva) pode ser utilizada se a tensão exceder o limite superior, conforme a definição da curva *Volt-Var* (Ver Fig. 3). Por outro lado, se houver tensões inferiores ao normal nos terminais do sistema FV, a potência reativa pode ser entregue à rede (região capacitiva) para ajudar a aumentar a tensão para níveis adequados [6].

A função de controle *Volt-Var* permite que cada sistema FV individual forneça uma resposta variável única de acordo com: a tensão no ponto de conexão (os terminais do sistema FV), a capacidade de potência aparente disponível do inversor naquele ponto no tempo e os *setpoints volt-var* definidos pelo usuário, como ilustrado na Fig. 3 [2].

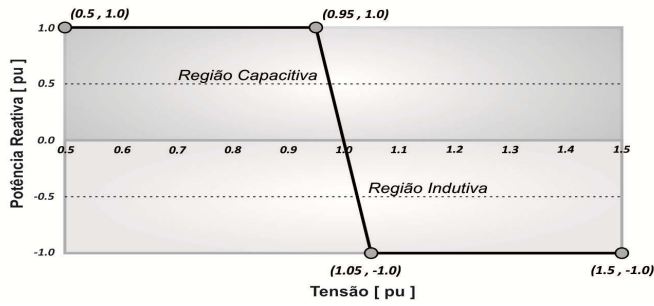


Figura 3 - Curva de Controle *Volt-Var*: Potência Reativa disponível vs. Tensão no ponto de conexão. (Fonte: Adaptado de [2])

Dada a potência nominal do inversor em kVA (*kVA rating*) e a saída de potência ativa atual (*kW present*) do *PVSystem*, a eletrônica de potência no inversor só permite gerar uma certa quantidade de potência reativa (*kvar available*) [2]. Sendo assim, é assumido para este trabalho que toda a gama de potência reativa está disponível para ser enviada para a rede (potência reativa capacitiva) ou absorvida da rede (potência reativa indutiva). Logo, a potência reativa disponível (a ser fornecida ou absorvida) em qualquer momento na simulação é regida por (2).

$$kVar_{available} = \sqrt{kVA_{rating}^2 - kW_{present}^2} \quad (2)$$

IV. SISTEMA TESTE

A. Descrição do Sistema Teste

Existem vários *softwares* de simulação de fluxo de potência que nos proporcionam a facilidade de resolução de redes radiais complexas equilibradas e desequilibradas. Mas, torna-se necessário fornecer um padrão que possa ser usado em todas as plataformas atualmente disponíveis e comparar os resultados. Para este artigo um alimentador teste de duas barras (Ver Fig. 4) foi escolhido para ser modelado e simulado no software *OpenDSS* que é controlado pelo Matlab através de sua interface COM. Apesar do número pequeno de barras, essa rede é configurada de tal forma que fornece um teste válido para as principais análises realizadas em sistemas de distribuição [9]. Observa-se também uma GD conectada à barra 2 da rede teste, onde foram disponibilizados elevados valores de potências a serem injetadas na rede, simulando altas penetrações de geração FV.

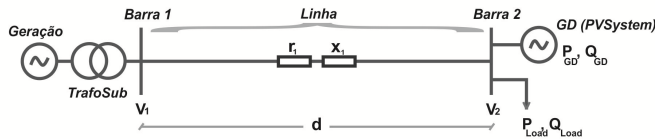


Figura 4 - Alimentador de Duas Barras Utilizado (Fonte: Próprio Autor)

Assim, para comparação e análise das funcionalidades dos inversores inteligentes em suas funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var* em sistemas com alta penetração de geração FV, a rede teste foi configurada para 2 cenários, um com dados característicos da BT e outro com dados característicos da MT,

conforme a Tabela I. A relação X/R é alterada de acordo com o tipo de cabo utilizado.

TABELA I - DADOS UTILIZADOS

Sistema	Tensão (kV)	Tipo do Cabo	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)
BT	0.22	Alumínio Nu 1/0 AWG Fase	0.60420	0.42983
MT	13.8	Alumínio Nu 336 MCM	0.18933	0.38122

A rede teste funcionando em BT foi configurada com uma distância (d) de 100 m, uma carga leve de 10kW e 1kvar e com a utilização do cabo do tipo *Alumínio Nu 1/0 AWG Fase* que possui a resistência maior que sua reatância, fato característico em redes de baixa tensão. Para a MT, considerou-se uma distância de 18 km, com carga de 500kW e 50kvar e foi utilizado o cabo do tipo *Alumínio Nu 336 MCM*, que possui uma relação X/R maior, apresentando-se como um sistema mais reativo em relação ao anterior. Estes cenários foram configurados para então verificar o comportamento dos controles propostos e definir em qual sistema os controles *Volt-Watt* e *Volt-Var* são mais efetivos na melhora das variações de tensão ocasionadas pela inserção da GD.

B. Modelo PV System

Um sistema fotovoltaico consiste em um ou mais módulos ou painéis de células solares que convertem a insolação do sol em corrente contínua (CC). Em seguida, um inversor CC/CA inverte a corrente contínua em um sinal de corrente alternada (CA) sincronizado com a rede [2].

No programa *OpenDSS*, a maioria desses componentes é representado de forma simplificada na classe do dispositivo *PVSystem*. A versão atual do modelo *PVSystem* é útil para simulações geralmente com etapas de tempo maiores do que 1s. O modelo pressupõe que o inversor possa encontrar o ponto de máxima potência (propriedade *Pmpp* do modelo) do painel rapidamente. Isso simplifica a modelagem dos componentes individuais (painéis FV e inversores) e é adequado para a maioria dos estudos de impacto de interconexão [2].

Um diagrama de blocos simplificado para todo o sistema FV implementado no *OpenDSS*, desde a célula solar até a rede é ilustrado na Fig. 5. O controle do inversor, que fornece os modos de controle de *Volt-Watt* e *Volt-Var* também é mostrado na figura, esse controle é modelado no *OpenDSS* através de um elemento de controle *InvControl* [2].

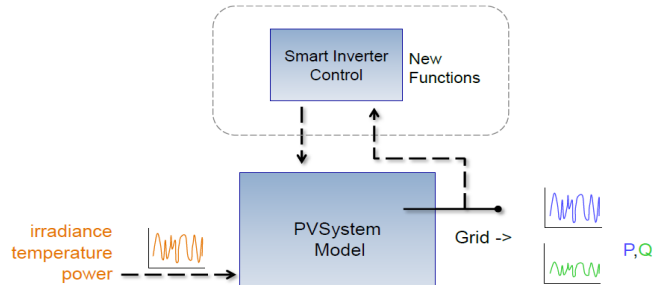


Figura 5 - Diagrama de blocos simplificado do modelo PV System e do modelo *InvControl* (Fonte: [2])

V. RESULTADOS

A. Impacto da GD na sobretensão:

Neste trabalho é utilizada a rede teste de duas barras mostrada na Fig. 4, considerando os cenários criados de BT e MT. Com isso, um dos principais impactos causados pelo alto nível de penetração PV são as variações de longa duração de tensão nos barramentos onde os sistemas fotovoltaicos são instalados. Então, faz-se necessário analisar estas variações e o desempenho das funções de controle presentes no inversor do FV. Vale salientar que neste trabalho foram utilizados dados de geração de um sistema fotovoltaico real instalado no telhado de uma residência na cidade de Belém. A curva de potência do gerador FV em um dia com baixa variabilidade solar foi normalizada.

Então, as simulações foram realizadas para um período de 24h com passos de simulação de 1s. Pode-se observar através da Fig. 6 e Fig. 7 a tensão no ponto de conexão (barra 2) ao longo do dia para a BT e MT, respectivamente, sem a aplicação dos controles *Volt-Watt* ou *Volt-Var*.

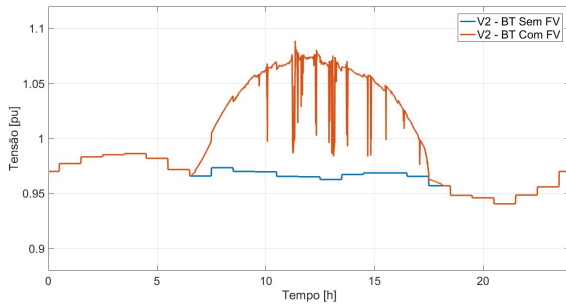


Figura 6 - Tensão no ponto de conexão (Barra 2) ao longo do dia: Caso Base na Baixa Tensão. (Fonte: Próprio Autor)

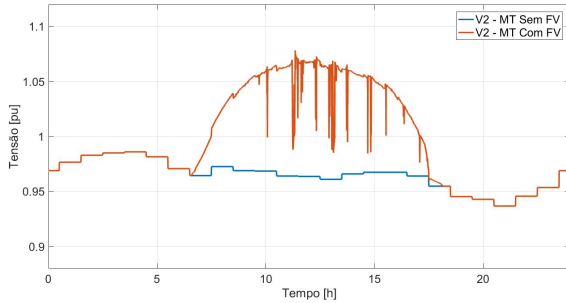


Figura 7 - Tensão no ponto de conexão (Barra 2) ao longo do dia: Caso Base na Média Tensão. (Fonte: Próprio Autor)

Nota-se através da Fig. 6 e Fig. 7 que a tensão no ponto de conexão do FV apresenta uma elevação durante o período em que o FV injeta potência ativa na rede. Para melhor análise e posterior comparação dos resultados a Fig. 8 apresenta a tensão ao longo do tempo no ponto de conexão do FV para ambos os cenários (BT e MT) durante o período de atuação do sistema FV, evidenciando a sobretensão gerada.

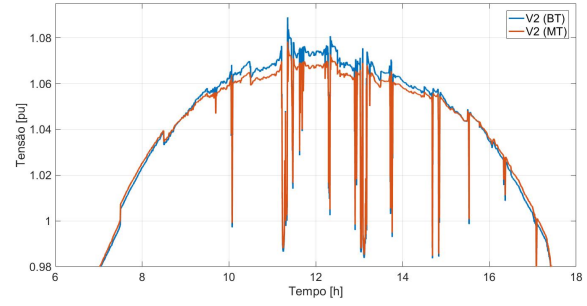


Figura 8 - Sobretensão causada durante a atuação do sistema fotovoltaico (Fonte: Próprio Autor)

B. Efeito do Controle Volt-Watt

A partir da análise da Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8, onde foram apresentadas a tensão (V2) ao longo do dia no ponto de conexão do sistema fotovoltaico, antes e após a instalação do mesmo, em ambos os cenários. Observa-se que a elevação da tensão no sistema teste em BT é maior em relação à MT, isto se deve ao fato que este sistema (BT) é mais resistivo em relação ao outro (MT). Além disto, estas sobretensões causadas em V2 são devidas principalmente ao alto nível de penetração PV e pelo baixo carregamento na linha.

Sendo assim, foram realizadas uma série de simulações (*OpenDSS* e *Matlab*) pelo mesmo período de tempo nos cenários considerados com a implementação do controle *Volt-Watt* nos inversores fotovoltaicos. A Fig. 9 e Fig. 10 apresentam as tensões ao longo do tempo no ponto de conexão do FV e a saída de potência ativa com o controle *Volt-Watt* aplicado ao *PV System*, sendo comparados ao caso base.

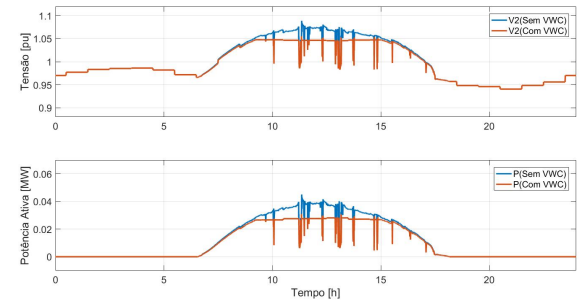


Figura 9 – Tensão (V2) e Potência Ativa (P) com e sem o *Volt-Watt Control* (VWC) - Sistema em Baixa Tensão (BT) (Fonte: Próprio Autor)

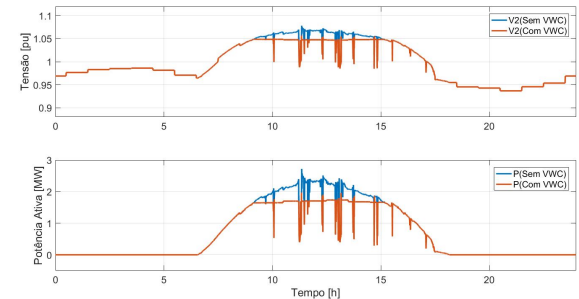


Figura 10 - Tensão (V2) e Potência Ativa (P) com e sem o *Volt-Watt Control* (VWC) - Sistema em Média Tensão (MT) (Fonte: Próprio Autor)

A partir da Fig. 9 e Fig. 10 pode-se observar o controle *Volt-Watt* atuando nas redes testes em BT e MT, respectivamente, de forma que este atua na limitação da saída de potência ativa do painel FV com o objetivo de corrigir as sobretensões causadas por esta penetração. A Fig. 11 apresenta a comparação da tensão corrigida e a Fig. 12 mostra a comparação entre as saídas de potência ativa (em pu) da GD, em ambos cenários (BT e MT) durante o período de atuação do *PVSystem* com o controle *Volt-Watt* aplicado aos inversores.

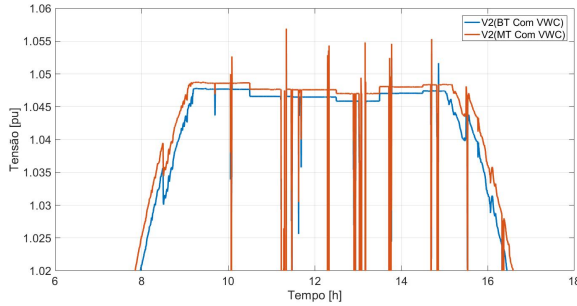


Figura 11 - Tensão V2 (BT e MT) com *Volt-Watt Control (VWC)*

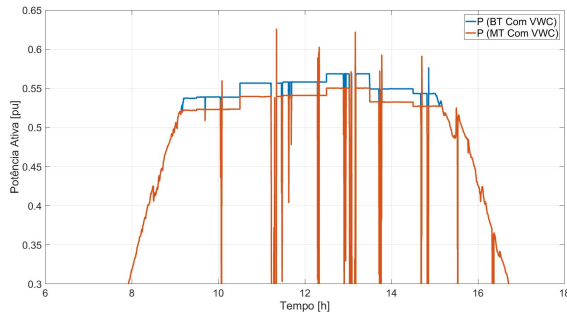


Figura 12 - Potência Ativa da GD (BT e MT) com *Volt-Watt Control (VWC)*

Assim, observa-se através da Fig. 9 e Fig. 10 que o controle *Volt-Watt* conseguiu corrigir as sobretensões presentes nos dois cenários criados (BT e MT), ou seja, o controle foi eficaz trazendo as tensões para valores abaixo de 1,05 p.u., sendo este o limite superior aceitável para um valor de tensão adequada de acordo com [1]. Apesar disto, conforme pode-se observar na Fig. 11, o controle *Volt-Watt* obteve melhor desempenho quando é aplicado à rede teste de BT, pois mesmo com uma maior sobretensão gerada pela inserção da GD (Ver Fig. 8), o valor da tensão no ponto de conexão da GD foi menor do que na rede teste de MT. Além disso, o controle necessitou limitar menos geração de potência ativa, conforme pode ser observado na Fig. 12.

Entretanto, nota-se que o controle *Volt-Watt* não consegue corrigir eventuais violações de tensão causadas fora do período de injeção de potência ativa, neste caso observa-se uma subtensão, em ambos cenários, por volta das 21h. Isso explica-se pelo fato de que este controle atua na limitação de potência ativa que está disponível no painel FV, ou seja, só consegue corrigir sobretensões quando há geração. Logo, nenhuma irradiação solar sobre o painel neste período torna o controle ineficiente, sendo necessário a atuação de outros mecanismos de controle em conjunto para que as subtensões neste período possam ser corrigidas.

C. Efeito do Controle Volt-Var

Agora, depois de implementado o controle *Volt-Var* aos inversores FV nos diferentes cenários, novas simulações foram realizadas para o sistema teste pelo mesmo período de tempo com o objetivo de corrigir os níveis de tensão na barra 2 em análise. A Fig. 13 e Fig. 14 apresentam a comparação das tensões ao longo do tempo após a simulação do sistema teste com o controle *Volt-Var* implementado em relação ao caso base, BT e MT, respectivamente.

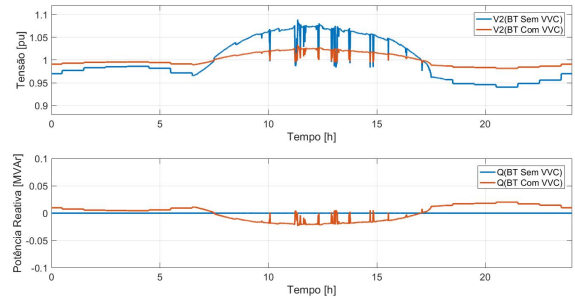


Figura 13 - Tensão (V2) e Potência Reativa (Q) com e sem o *Volt-Var Control (VVC)* - Sistema em Baixa Tensão (BT) (Fonte: Próprio Autor)

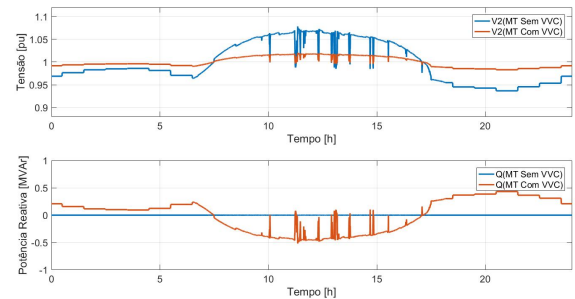


Figura 14 - Tensão (V2) e Potência Reativa (Q) com e sem o *Volt-Var Control (VVC)* - Sistema em Média Tensão (MT) (Fonte: Próprio Autor)

Visto que este controle atua obedecendo uma curva *Potência Reativa Disponível vs. Tensão* (Ver Fig. 3). Observa-se através da Fig. 13 e Fig. 14 a atuação do controle *Volt-Var* dos inversores FV para que fosse possível trazer a tensão ao longo do dia para dentro dos valores considerados adequados (0,95 p.u. a 1,05 p.u.) durante todo período de simulação em análise para ambos cenários, BT e MT.

Visto que para eliminar as sobretensões causadas pela alta penetração da GD o inversor FV necessitou absorver potência reativa da rede durante o período em que a GD injeta potência ativa. Conforme pode ser observado na Fig. 13 e Fig. 14, a potência reativa representada abaixo de zero, atuando assim na região indutiva, variando de acordo com a tensão a ser corrigida. Entretanto, nos períodos onde não há injeção de potência ativa pela GD, o inversor necessitou fornecer potência reativa à rede com intuito de corrigir as baixas tensões presentes, atuando assim na região capacitiva, durante o período sem irradiação solar onde toda energia reativa está disponível.

Em seguida, a Fig. 15 mostra em detalhes a comparação da tensão corrigida e a Fig. 16 apresenta a comparação entre as curvas de potência reativa (em pu), em ambos cenários durante

o período de geração do FV com o controle *Volt-Var* aplicado aos inversores.

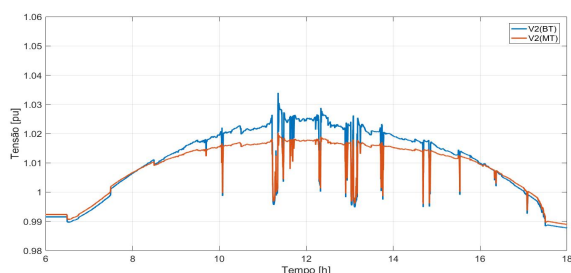


Figura 15 - Tensão V2 (BT e MT) com *Volt-Var Control (VVC)*

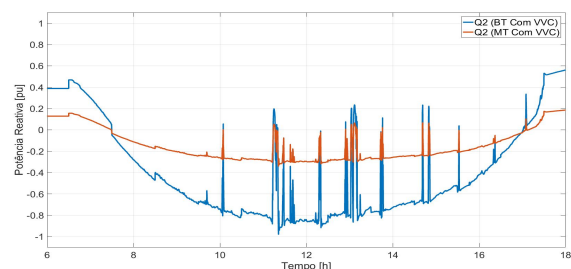


Figura 16 - Potência Reativa da GD (BT e MT) com *Volt-Var Control (VVC)*

Sendo assim, conforme pode-se observar através da Fig. 15 e Fig. 16, o controle *Volt-Var* obteve melhor desempenho quando é aplicado à rede teste de MT, pois o inversor necessitou absorver menos potência reativa da rede para evitar a sobretensão.

VI. CONCLUSÃO

O alto nível de penetração FV nos sistemas de distribuição pode ocasionar vários efeitos indesejáveis, que incluem variações de tensão de longa e de curta duração e podem causar grandes preocupações para as distribuidoras e consumidores. Na busca por conhecer melhor os impactos causados pela alta penetração fotovoltaica e encontrar soluções para minimizar seus efeitos, são essenciais as pesquisas e simulações em diferentes cenários que contribuam com este novo tema.

Neste artigo foram apresentadas simulações que analisaram o desempenho das funções de controle, *Volt-Watt* e *Volt-Var*, presentes nos inversores fotovoltaicos inteligentes. Onde foi possível demonstrar através do sistema teste de duas barras com alta penetração FV em dois cenários, na BT e MT. Foi considerado um período de simulação diária de 24h com passos de tempo de 1s e em seguida implementando a atuação dos controles *Volt-Watt* e *Volt-Var*, visando analisar e mitigar os efeitos causados pelo alto nível de penetração FV.

Sendo assim, demonstrou-se que o controle *Volt-Watt* conseguiu mitigar a sobretensão gerada em ambos os cenários (Ver Fig. 9 e 10), trazendo a tensão para dentro dos limites aceitáveis. Paralelo a isso e considerando a mesma curva de *Potência Ativa vs. Tensão* para ambos cenários, pode-se concluir que o controle *Volt-Watt* obteve melhor desempenho aplicado à rede teste em baixa tensão (BT), pois apesar da

diferença ser pequena, o inversor necessitou limitar menos a geração do FV para diminuir mais a tensão final corrigida, conforme pode ser observado na Fig. 11 e Fig. 12.

Foi demonstrado também o comportamento da atuação do controle *Volt-Var*, onde esta função permitiu trazer a tensão para dentro dos limites aceitáveis nos dois cenários considerados, através do controle de potência reativa (Ver Fig. 13 e 14). Fazendo com que o inversor FV atuasse na região indutiva (absorvendo potência reativa da rede) e na região capacitiva (fornecendo potência reativa para a rede) controlando o nível da tensão em análise. Assim, através das Fig. 15 e 16 foi possível concluir que o controle *Volt-Var* obteve melhor desempenho aplicado à rede teste em média tensão (MT). Pois, devido à alta relação X/R no ponto de conexão, foi necessário absorver menos reativo da rede para reduzir mais a tensão. Prova disto, que na BT onde tem-se um valor de X/R baixo, foi necessário absorver bastante energia reativa da rede para reduzir minimamente a tensão.

Vale salientar que as funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var* são objetos de estudo do IEEE1547 e consideradas pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*) como as melhores formas de se controlar as saídas de potências ativa e reativa dos geradores fotovoltaicos. Por fim, ressalta-se a importância do *software OpenDSS* juntamente com seu controle através do Matlab utilizando sua interface COM na plotagem dos gráficos e simulações realizadas neste artigo, bem como sua contribuição para as recentes pesquisas sobre o tema, visto que este foi desenvolvido inicialmente para estudar os impactos da inserção das gerações distribuídas nas redes de distribuição.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica”.
- [2] “Modeling High-Penetration PV for Distribution Interconnection Studies: Smart Inverter Function Modeling in OpenDSS”, Rev 2. EPRI, Palo Alto, CA: 2013. 3002002271.
- [3] S. M. Meghasai, R. Vega and H. Krishnaswami, “Simulation of Smart Functionalities of Photovoltaic Inverters by Interfacing OpenDSS and Matlab”. 2015. IEEE.
- [4] J. Smith, W. Sunderman, R. Dugan, and B. Seal, “Smart Inverter Volt/Var Control Functions for High Penetration of PV on Distribution Systems,” IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ, 2011.
- [5] J. Smith, B. Seal, W. Sunderman and R. Dugan, “Simulation of Solar Generation with Advanced Vol-Var Control,” 21st International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Frankfurt, Germany, 2011.
- [6] W. Sunderman, R. C. Dugan and J. Smith, “Open Source Modeling of Advanced Inverter Functions for Solar Photovoltaic Installations,” T&D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES, vol., no., pp.1,5, 14-17 April 2014
- [7] P. Barker and R. Mello, “Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems.” 12. IEEE. Retrieved 02 16, 2011, from IEEE.
- [8] P. Barker, “Overvoltage Considerations in Applying Distributed Resources on Power Systems”, Proc. Of the 2002 IEEE PES Summer Meeting, vol. 1, pp. 109-114.
- [9] P. Radatz, “Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS”. 2015. 191p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo – USP.