

Efeitos das funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var* na regulação de tensão em redes de distribuição com presença de sistemas fotovoltaicos

Effects of *Volt-Watt* and *Volt-Var* control functions on voltage regulation in distribution networks with the presence of photovoltaic systems

DOI:10.34117/bjdv8n9-125

Recebimento dos originais: 15/08/2022

Aceitação para publicação: 12/09/2022

Tiago Machado Wanzeler

Doutorando

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: Rodovia BR 422, km 13, Canteiro de Obras UHE, Vila Permanente, Tucuruí - PA, CEP: 68464-000

E-mail: twanzeler@ufpa.br

Bruno Gonçalves de Oliveira

Mestrando

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: Rodovia BR 422, km 13, Canteiro de Obras UHE, Vila Permanente, Tucuruí - PA, CEP: 68464-000

E-mail: brunoserv@hotmail.com

João Paulo de Abreu Vieira

Doutor

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01, Guamá, Belém - PA, CEP: 66075-110

E-mail: jpavieira@ufpa.br

Paulo Ricardo Radatz de Freitas

Mestre

Instituição: Electric Power Research Institute (EPRI - EUA)

Endereço: EPRI 3420 Hillview Avenue, Palo Alto, California 94304

E-mail: paulo.radatz@gmail.com

Patrick Coelho Lopes

Doutorando

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01, Guamá, Belém - PA, CEP: 66075-110

E-mail: patrik.lopes@itec.ufpa.br

Jhoanyn Valois Fantin Calvinho

Mestrando

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: Rodovia BR 422, Km 13, Canteiro de Obras UHE, Vila Permanente, Tucuruí - PA, CEP: 68464-000

E-mail: jhon.fantin13@gmail.com

RESUMO

Esse artigo investiga os efeitos das funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var* de inversores inteligentes na regulação de tensão em redes de distribuição com presença de sistemas fotovoltaicos (FV). Os principais problemas enfrentados pelos operadores de redes de distribuição devido à alta integração de sistemas FV são a sobretensão e as excessivas comutações de tape em autotransformadores reguladores de tensão. Problema da sobretensão em redes de distribuição pode ser causado pela significativa injeção de potência ativa dos sistemas FV. Além disso, as variações rápidas e significativas na potência ativa injetada pelos sistemas FV, associadas com os transitórios de nuvens, resultam em um aumento excessivo de comutações de tape em reguladores de tensão, afetando negativamente a vida útil do equipamento. Simulações de fluxo de carga de séries temporais de um alimentador de MT com a presença de uma usina solar FV foram realizadas em cenários de alta e baixa variabilidade solar.

Palavras-chave: *Volt-Watt*, *Volt-Var*, regulador de tensão, tape, sistemas de distribuição.

ABSTRACT

This paper investigates the effects of smart inverter *Volt-Watt* and *Volt-Var* control functions on voltage regulation in distribution networks with photovoltaic (PV) systems. The major problems faced by distribution network operators due to the high integration of PV systems are the overvoltage and excessive tap counts in step voltage regulators. The overvoltage problem in distribution networks may be caused by significant active power injection from PV systems. Moreover, the rapid and significant variations in PV generator active power associated with cloud transients result in an increase of voltage regulator tap counts, adversely affecting the useful life of the device. Time-series power flow simulations on a single MV feeder with a PV solar plant have been performed in high and low solar variability scenarios.

Keywords: smart inverter, *Volt-Watt*, *Volt-Var*, voltage regulator, excessive tap counts, PV penetration, distribution systems.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a ANEEL, em dezembro de 2015 foi lançado o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD. Com R\$ 100 bilhões em investimentos, a previsão é que até 2030, 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão ter energia gerada por elas mesmas, entre residência, comércios, indústrias e setor agrícola, o que pode resultar em 23.500 MW (48 TWh produzidos) de energia limpa e renovável, o equivalente à metade da geração da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

De acordo com Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), em 09/10/2017, o Brasil contava com 438,3 MW de potência instalada de geração solar, correspondentes a 15,7 mil instalações. Considerando todas as fontes de micro e mini geração distribuída (GD), o setor comercial detém a maior participação em potência (37%), o residencial a

maior participação em nº de usuários (75%), e o industrial a maior potência média por usuário (81 kW).

O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2026, estima que a capacidade instalada de geração solar chegue a 13 GW em 2026, sendo 9,6 GW de geração centralizada e 3,4 GW de geração distribuída. A proporção da potência solar chegará a 5,7% do total. Os estudos do Plano Nacional de Energia – PNE 2050, em elaboração pela Empresa de Pesquisa Energética, estimam em 78 GW a potência de micro e mini GD solar em 2050, o que poderá representar 9% da oferta total de energia elétrica do ano. No aquecimento de água, a previsão é que 20% dos domicílios detenham coletores (MME, 2017).

Além da vantagem de produzir energia limpa e reduzir gastos com consumo tarifado da energia elétrica, a geração solar ainda possui vantagens socioambientais. Pois, a energia solar é livre de carbono e, portanto, contribui para a redução de emissões de CO₂ na natureza. E ainda com a implementação do ProGD, o Brasil pode evitar que sejam emitidos 29 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera de acordo com a ANEEL.

Em um futuro não muito distante, 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 vários problemas na operação dessas redes. Os principais problemas estão relacionados à sobretensão e comutações excessivas de tape dos RTs em redes de distribuição em média tensão (MT), que poderão aumentar os custos de violações dos limites de tensão estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2017) e de manutenção em equipamentos reguladores de tensão, como LTCs (*Load Tap Changer*), reguladores de tensão (RTs) e capacitores chaveados automaticamente.

Na busca de soluções para minimizar estes problemas, além dos controles de tensão já consolidados, surgem as funcionalidades de controle inteligente presentes nos inversores fotovoltaicos. Sendo assim, uma série de estratégias utilizando as funcionalidades inteligentes dos inversores foram descritas no trabalho elaborado pelo *Electric Power Research Institute* (Smith, 2013), visando analisar e mitigar os efeitos causados pelo alto nível de penetração FV. Em (Meghasai *et al*, 2015) 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 (Smith *et al*, 2011a) os autores analisaram o desempenho do controle *Volt-Var* em sistemas de distribuição com alta penetração FV. Em (Smith *et al*, 2011b) os autores apresentaram a utilização da função de controle *Volt-Var do inversor(es) do(s) sistema) FV* como forma

de reduzir a sobretensão causada pela inserção desse(s) sistema(s) e aumentar a capacidade de hospedagem nas redes de distribuição. Já em (Sunderman *et al*, 2014), os autores descrevem a utilização das três principais funções de controle presentes nos inversores FV, função *Volt-Watt*, função *Volt-Var* e função que controla a corrente reativa dinamicamente.

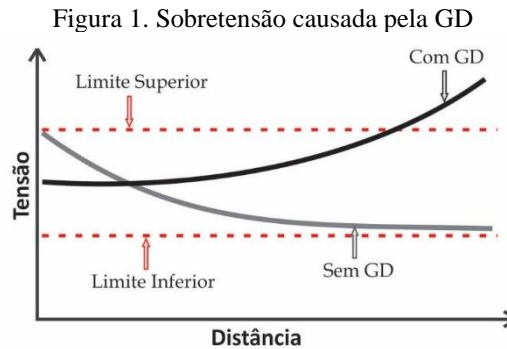
Sendo assim, este artigo tem por objetivo analisar os efeitos causados pelas funções de controle inteligente, nomeadamente conhecidas como *Volt-Watt* e *Volt-Var*, na operação dos RTs em redes de distribuição em MT com diferentes níveis de variabilidade solar e alto grau de penetração da geração FV.

2 PROBLEMAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

A crescente conexão de sistemas FV à rede de distribuição leva a uma série de desafios, uma vez que tais redes convencionais foram projetadas e dimensionadas para alimentar as cargas com fluxo de potência unidirecional. Além disso, elevados níveis de penetração de geradores fotovoltaicos distribuídos afetam diretamente os sistemas de distribuição, seja durante condições normais de operação, seja para condições de variações, devido as suas características distintas que diferem da geração convencional (Sara *et al*, 2013).

2.1 SOBRETENSÃO

Os sistemas FV são dimensionados para o atendimento de cargas, que por sua vez são as forças que impulsionam o sistema para problemas operacionais relacionados à regulação de tensão. Então, a conexão massiva de sistemas FV distribuídos próximos às cargas pode acarretar em novos desafios para operação dos sistemas de distribuição, além de resultar em impactos que podem causar benefícios e/ou malefícios do ponto de vista da operação do sistema. A Fig. 1 apresenta a elevação da tensão em função da distância causada pela inserção da GD em um alimentador com cargas leves, com e sem a presença da geração distribuída.



Fonte: Adaptado de (Philip, 2002)

Atualmente, os operadores de redes de distribuição buscam manter o perfil adequado de tensão ao longo do alimentador com a ajuda habitual dos reguladores de tensão, banco de capacitores e LTCs. Entretanto, o desafio do controle de tensão é intensificado quando o sistema FV impacta na operação de reguladores de tensão (Heitor, 2017). A conexão do sistema FV em um ponto do sistema causa um aumento de tensão conforme apresentado na Equação (1). Esse acréscimo de tensão depende tanto da impedância “vista” do ponto de conexão à subestação, quanto das potências ativa e reativa geradas pelo sistema.

$$\Delta V = V_{fv} - V_1 \approx \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_{fv}^*} \quad (1)$$

Onde $P = P_{fv} - P_{carga}$, $Q = \pm Q_{fv} - Q_{carga}$, R e X são as resistência e reatância “vistas” do ponto de conexão à subestação (Vanderson, 2017).

2.2 EXCESSIVAS COMUTAÇÕES DE TAPE

Outro problema enfrentado pelos operadores do sistema são as consequentes comutações excessivas de tape em reguladores de tensão. Pois, as variações na potência ativa injetada pela geração FV, causadas por nuvens transitórias em dias nublados, resultam em rápidas e, por vezes, em significativas variações de tensão, prejudicando a qualidade da energia da rede. Segundo (Daniel, 2013), quando o nível de penetração da geração FV é elevado, a intermitência da fonte solar pode resultar em comutações excessivas de tape em reguladores de tensão, alcançando até 400 comutações por dia, levando a 150.000 operações de tape por ano e cerca 6 milhões de operações de tape

durante uma vida de 40 anos. Estas comutações excessivas acabam diminuindo a vida útil e aumentando a quantidade de manutenções realizadas nesses equipamentos.

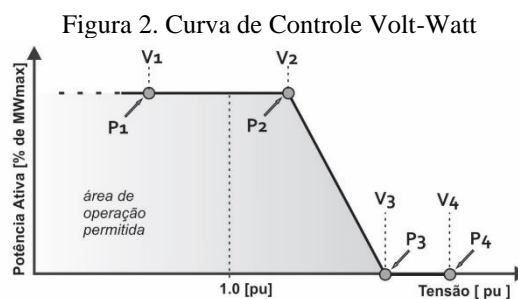
3 FUNÇÕES DE CONTROLE VOLT-WATT E VOLT-VAR

Uma série de estratégias utilizando as funcionalidades inteligentes dos inversores foram descritas em (Smith, 2013), incluindo as estratégias de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var*, visando analisar e mitigar os efeitos causados pelo alto nível de penetração PV. A seguir são descritas as funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var*.

3.1 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 (Sunderman, 2014). Segundo (Smith, 2013), essa 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. Esse fato pode ser visto na Equação (1), com X/R baixo o efeito do produto R.P é predominante em alterar a variação de tensão do que o termo X.Q.

A função *Volt-Watt* destina-se a fornecer um mecanismo flexível através do qual uma curva *Potência Ativa vs. Tensão do ponto de conexão* conforme apresentado na Fig. 2. 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.



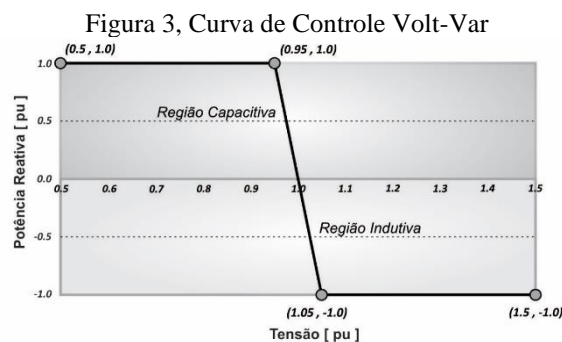
Fonte: Adaptado de (Smith, 2013)

Vale salientar que a função *Volt-Watt* ajusta apenas a saída de potência ativa e não a saída de potência reativa (Sunderman, 2014).

3.2 FUNÇÃO DE CONTROLE VOLT-VAR

Recentemente, a possibilidade de incorporar a capacidade de controle de potência reativa com a utilização dos inversores dos sistemas FV para dar suporte à rede de distribuição foi relatada em vários artigos. A alta penetração FV causa um alto grau de imprevisibilidade no funcionamento de um alimentador de distribuição, devido ao comportamento intermitente da radiação solar. Isso tem um grande impacto sobre o fluxo de potência e o perfil de tensão do alimentador (Meghasai *et al*, 2015). A exploração da capacidade que o sistema FV possui de injeção/absorção de potência reativa é uma opção cada vez mais atrativa. Em (Fernanda *et al*, 2016), ressalta-se que a opção para mitigar problemas de qualidade de tensão é usar a capacidade dos inversores dos sistemas FV.

No geral, 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 (ANEEL, 2017). 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* apresentada na 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 (Sunderman *et al*, 2014).



Fonte: Adaptado de (Smith, 2013)

De acordo com (Fernanda *et al*, 2016), os inversores do gerador FV são tipicamente dimensionados para fornecer apenas energia ativa com base no tamanho do painel fotovoltaico. Não é uma prática padrão injetar ou absorver energia reativa. No entanto, estudos recentes consideram a capacidade que os inversores FV possuem de fornecer/absorver potência reativa para controlar o nível de tensão devido ao aumento expressivo nos níveis de penetração FV. Assim, a potência reativa máxima (Q_{max}) que um sistema FV pode fornecer em determinado instante (t), depende da potência ativa gerada nesse instante ($P(t)$). 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 pela Equação (2). Onde S_{nom} é a potência aparente nominal do inversor:

$$Q_{max}(t) = \sqrt{S_{nom}^2 - P(t)^2} \quad (2)$$

A Equação (1) apresenta a relação entre a variação de tensão e as potências ativa e reativa fornecida pelo sistema FV. Logo, fazendo $\Delta V=0$, Q é representado pela Equação (3):

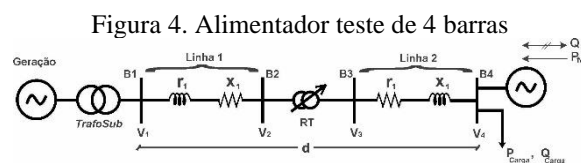
$$Q \approx -\frac{R \cdot P}{X} = -P \cdot \left(\frac{X}{R}\right)^{-1} \quad (3)$$

Portanto, ao utilizar o controle *Vol-Var* nos inversores FV, a quantidade de potência reativa que deve ser injetada para cancelar a variação de tensão depende da mudança de potência ativa P e da relação X/R do ponto de conexão (Fernanda *et al*, 2016).

4 ALIMENTADOR TESTE EM MÉDIA TENSÃO

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para este artigo um alimentador teste de quatro barras foi escolhido, conforme mostrado na Fig. 4. Apesar do número pequeno de barras, essa rede é configurada de uma forma que fornece um teste válido para as principais análises realizadas em sistemas de distribuição. Observa-se também um sistema FV (modelado através do elemento *PVSystem do Software OpenDSS*) conectado à barra 4 da rede teste, onde foram disponibilizados elevados valores de potências a serem injetadas na rede.



Fonte: Próprio Autor

O sistema teste foi modelado e simulado através do *Software OpenDSS*, que é controlado pelo Matlab através de sua interface COM. Logo, para implementar um RT no *OpenDSS* é necessário definir um Transformador 1:1 através do objeto *Transformer* e em seguida implementar o controle através do objeto *RegControl*.

A rede teste foi configurada com dados característicos da MT. Assim, considerou-se uma distância de 18 km (linha 1 e linha 2 com 9 km cada), com carga de 500kW e 50kvar e foi utilizado o cabo do tipo Alumínio Nu 336 MCM, que possui uma relação X/R de 2.0135, apresentando-se como um sistema mais reativo do que resistivo.

Este cenário foi configurado e simulado para então verificar e analisar os efeitos que funções de controle inteligente, *Volt-Watt* e *Volt-Var*, causam na operação dos reguladores de tensão em redes distribuição em média tensão com inserção da geração FV, bem como poder concluir qual controle é mais eficiente na redução das comutações excessivas de tape.

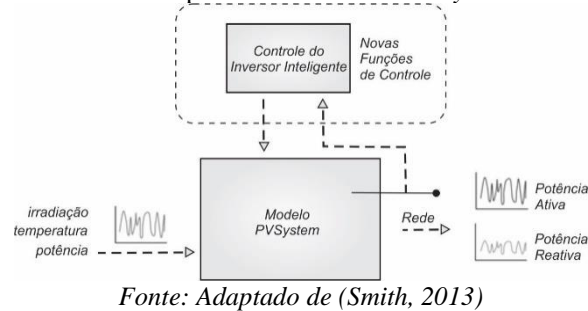
4.2 OPENDSS E O SISTEMA FV

Um sistema fotovoltaico consiste em um ou mais módulos ou painéis de células solares que convertem a radiação solar 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 (Smith, 2013).

No programa *OpenDSS*, esses componentes são representados de forma simplificada no elemento *PVSystem* para simulações em regime permanente senoidal. 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 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 (Smith, 2013).

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 *Volt-Watt* e *Volt-Var* também é mostrado na figura, esse controle é modelado no *OpenDSS* através do elemento de controle *InvControl* (Smith, 2013).

Figura 5. Diagrama de blocos simplificado do modelo *PVSystem* e do modelo *InvControl*



5 RESULTADOS

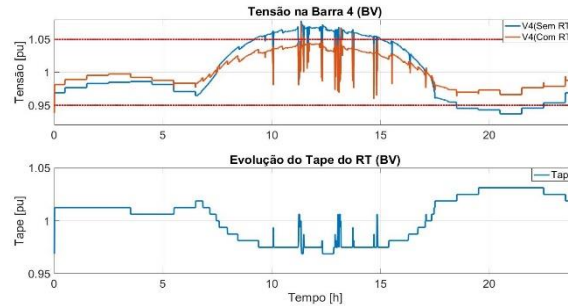
5.1 IMPACTOS DA GD NO SISTEMA

Foram realizadas uma série de simulações para então analisar os efeitos dos controles *Volt-Watt (VW)* e *Volt-Var (VV)* na regulação de tensão em redes de distribuição com presença de sistemas fotovoltaicos, bem como analisar o que acontece com as saídas de potências ativa e reativa quando se utiliza os controles *VW* e *VV*, com e sem o RT. Para isso foram considerados dois cenários para a variabilidade solar e definidos da seguinte forma: Baixa Variabilidade (BV) e Alta Variabilidade (AV). As simulações foram realizadas utilizando o alimentador em média tensão da Fig. 4 para um período de 24h com passos de simulação de 1s, inicialmente sem o RT e logo em seguida com o RT atuando. As curvas de radiação solar utilizadas nesse trabalho correspondem às curvas reais obtidas em uma campanha de medição realizada em uma residência na cidade de Belém do Pará – Brasil.

5.1.1 Sobretensão

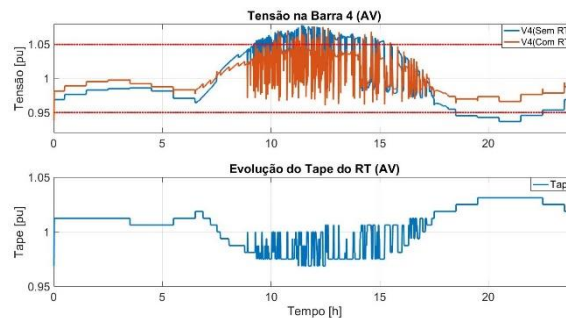
Com isso, um dos principais impactos causados pelo alto nível de penetração FV são as variações de longa duração de tensão nos barramentos onde os sistemas fotovoltaicos são instalados. Então, pode-se observar nas Fig. 6 e Fig. 7 a tensão ao longo do dia no ponto de conexão da GD, bem como os limites máximo e mínimo adequados para valores de tensão (linhas horizontais), antes e após a inserção do RT, demonstrando o funcionamento do RT na regulação de tensão na barra controlada sem a atuação dos controles *VW* e *VV*. Considerando os dois cenários, BV e AV, respectivamente.

Figura 6. Tensão e Evolução do Tape do RT ao longo do dia com BV



Fonte: Próprio Autor

Figura 7. Tensão e Evolução do Tape do RT ao longo do dia com AV



(Fonte: Próprio Autor).

5.1.2 Comutações Excessivas de Tape

Também pode ser observada nas Fig. 6 e Fig. 7 a evolução do tape do RT ao longo do dia, para os cenários considerados (BV e AV). Sendo assim, a Tabela 1 apresenta o número de comutações de tape realizadas pelo RT, incluindo o alimentador teste sem o sistema fotovoltaico. Demonstrando que a inserção da geração distribuída FV impacta significativamente na operação dos reguladores de tensão e que quanto maior a variabilidade solar, maior é o número de comutações de tape realizadas pelo RT para manter as tensões dentro dos limites adequados, causando desgastes nesses equipamentos e consequentes prejuízos para as empresas mantenedoras.

Tabela 1. Comutações de Tape.

Alimentador Teste	Nº de Comutações de Tap	
	Sem FV	Com FV
BV	8	108
AV		428

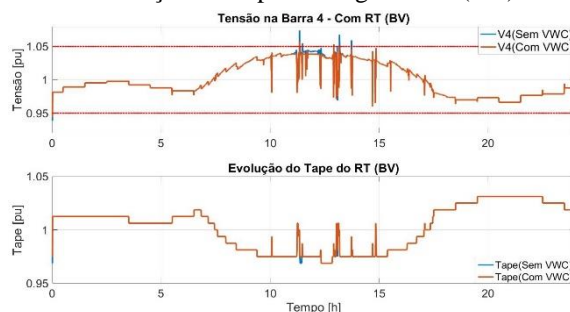
5.2 EFEITO DO CONTROLE VOLT-WATT NA OPERAÇÃO DO RT

Com o controle *VW* implementado ao sistema teste nos cenários considerados, as simulações pelo mesmo período foram realizadas. Os resultados podem ser observados a seguir.

5.2.1 Baixa Variabilidade (BV)

A Fig. 8 apresenta a tensão e a evolução do *tape* do RT ao longo do dia para o cenário com baixa variabilidade solar e com a função de controle *Volt-Watt (VWC)* atuando.

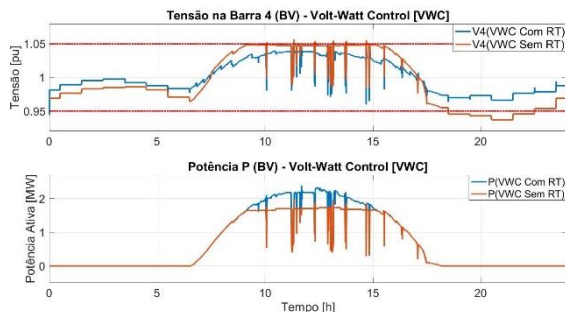
Figura 8. Tensão e Evolução do *Tape* ao longo do dia (BV) com e sem *VWC*



Fonte: Próprio Autor

Visando analisar também o efeito da atuação em conjunto do controle *VW* e RT na saída de potência ativa do sistema fotovoltaico, a Fig. 9 apresenta a tensão e saída de potência ativa do FV ao longo do dia para o cenário com BV, antes e após a instalação do RT, com a função de controle *Volt-Watt* atuando.

Figura 9. Tensão e Saída de Potência Ativa do FV ao longo do dia (BV) com o Controle Volt-Watt atuando, com e sem RT

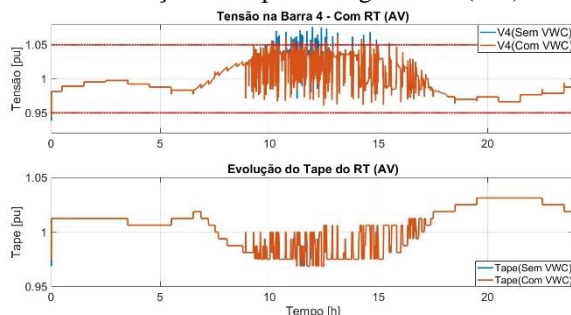


Fonte: Próprio Autor

5.2.2 Alta Variabilidade (AV)

Em seguida, considerando o dia com alta variabilidade da radiação solar, pode-se observar através da Fig. 10 a tensão e a evolução do tape do RT ao longo do dia com a função de controle *Volt-Watt* atuando.

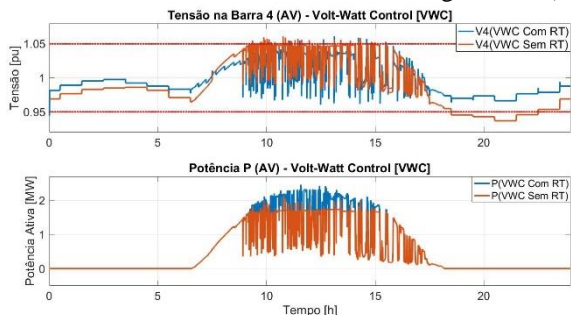
Figura 10. Tensão e Evolução do Tape ao longo do dia (AV) com e sem VWC



Fonte: Próprio Autor

Agora, a Fig. 11 apresenta a tensão e saída de potência ativa do sistema fotovoltaico ao longo do dia para o cenário com AV com a função de controle *Volt-Watt* atuando, antes e após a instalação do RT.

Figura 11. Tensão e Saída de Potência Ativa do FV ao longo do dia (AV) com e sem RT



Fonte: Próprio Autor

Nota-se através das Fig. 8 e Fig. 10 que a tensão foi pouco modificada pelo controle *VW*, visto que as atuações do RT conseguiram evitar a sobretensão. De modo que houve praticamente o mesmo comportamento nas comutações de tape do RT, com e sem o controle *VW* atuando em conjunto. Entretanto, através das Fig. 9 e Fig. 11 é possível observar que houve mudanças na saída de potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico, considerando como caso base o alimentador teste sem RT e com *VWC*, sendo comparado com a inserção do RT ao alimentador. Logo, observa-se um aumento da potência ativa fornecida pelo sistema FV.

5.2.3 Controle Volt-Watt e as Comutações de Tape

Um algoritmo implementado em Matlab com dados provenientes do *OpenDSS* permitiu quantificar o número comutações de tape que foram realizadas nas simulações após a implementação do controle *Volt-Watt* ao alimentador teste em análise, a Tabela 2 apresenta estes valores para os cenários considerados, BV e AV, respectivamente.

Tabela 2. Controle VW e as Comutações de Tape

Alimentador Teste	Nº de Comutações de Tape	
	Sem VVC	Com VVC
BV	108	103
AV	428	417

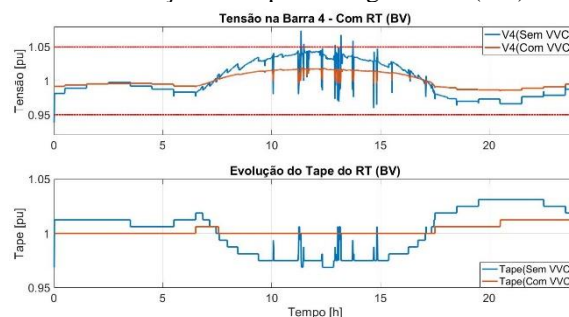
5.3 EFEITO DO CONTROLE VOLT-VAR NA OPERAÇÃO DO RT

Em seguida, novas simulações foram realizadas com o controle *VV* implementado ao sistema teste nos cenários considerados. Os resultados podem ser observados a seguir.

5.3.1 Baixa Variabilidade (BV)

A Fig. 12 apresenta a comparação da tensão na barra de conexão da GD e a evolução do tape do RT ao longo do dia para o cenário com BV, com e sem a função de controle *Volt-Var* (*VVC*) atuando.

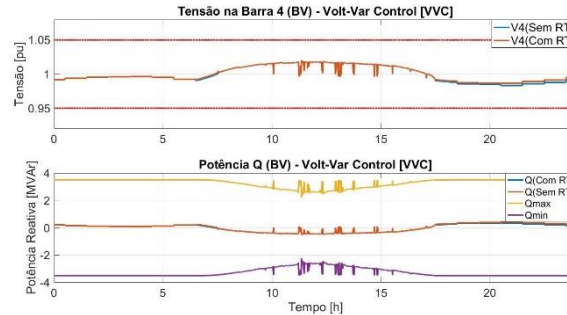
Figura 12. Tensão e Evolução do Tape ao longo do dia (BV) com e sem VVC



Fonte: Próprio Autor

Visando analisar também o efeito da atuação em conjunto do controle *VV* e RT na saída de potência reativa do sistema fotovoltaico, a Fig. 13 apresenta a tensão e saída de potência reativa do FV ao longo do dia para o cenário com baixa variabilidade solar, bem como os limites máximo e mínimo para tensão e para potência reativa (Eq. (2)), antes e após a instalação do RT, com a função de controle *Volt-Var* atuando.

Figura 13. Tensão e Saída de Potência Ativa do FV ao longo do dia (BV) com e sem RT

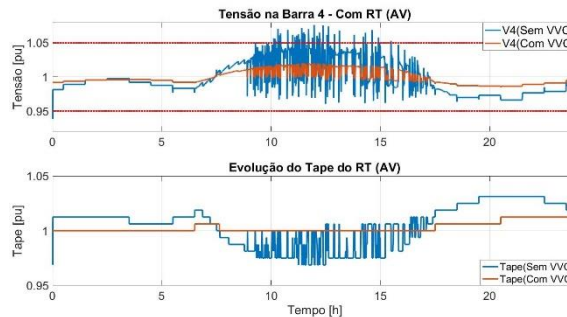


Fonte: Próprio Autor

5.3.2 Alta Variabilidade (AV)

A Fig. 14 apresenta a tensão e a evolução do tape do RT ao longo do dia com alta variabilidade da irradiação solar, com e sem a atuação da função de controle *Volt-Var*.

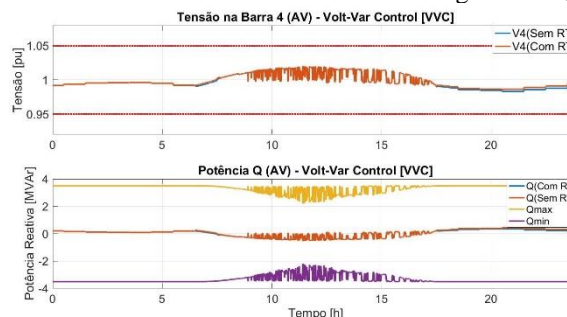
Figura 14. Tensão e Evolução do Tape ao longo do dia (AV) com e sem VVC



Fonte: Próprio Autor

A Fig. 15 apresenta a tensão e saída de potência reativa do FV ao longo do dia para o cenário com AV, antes e após a instalação do RT, com a função de controle *Volt-Var* ativa.

Figura 15. Tensão e Saída de Potência Reativa do FV ao longo do dia (BV) com e sem RT



Fonte: Próprio Autor

Nota-se através das Fig. 12 e 14 que a tensão foi notavelmente melhorada pelo controle VV, em consequência deste fato houve poucas comutações de tape para ambos

cenários considerados. Entretanto, através das Fig. 13 e 15 é possível observar que houve pouca mudança na saída de potência reativa disponibilizada pelo sistema fotovoltaico, com a utilização do RT e sem a utilização do RT utilizando o controle VV, para os cenários considerados.

5.3.3 Controle Volt-Var e as Comutações de Tap

A Tabela 3 apresenta o número comutações de tape que foram realizadas pelo RT após a implementação do controle *Volt-Var* ao alimentador teste em análise para os cenários considerados, BV e AV, respectivamente.

Tabela 3. Controle VV e as Comutações de Tap

Alimentador Teste	Nº de Comutações de Tap	
	Sem VVC	Com VVC
BV	108	4
AV	428	4

6 CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo principal analisar os efeitos das funções de controle *Volt-Watt* e *Volt-Var* na operação do regulador de tensão em redes de distribuição com presença de sistemas FV. Diferentes cenários de variabilidade solar diária (BV e AV) foram consideradas nas simulações de fluxo de carga de séries temporais em um alimentador teste. Sendo assim, inicialmente sem considerar os controles VW e VV, através dos resultados obtidos pode-se observar que quanto maior a variabilidade solar, mais o RT é solicitado, ou seja, maior é o número de comutações de tape necessárias para controlar a tensão desejada, aumentando o desgaste do equipamento e diminuindo sua vida útil.

Através das simulações que analisaram a implementação do controle *Volt-Watt*, pode-se notar que o controle VW contribui muito pouco na regulação de tensão em redes de distribuição em MT com a presença de RT. Esta pequena parcela de contribuição na regulação de tensão se justifica pelo fato de que as atuações do RT conseguem evitar as elevadas tensões causadas pela inserção da geração distribuída fotovoltaica. Logo, não é necessária a limitação significativa de potência ativa por parte do controle VW, pois, o regulador opera praticamente como no caso sem o VVC.

Agora, considerando os alimentadores com a presença do controle VW e sem RT. Então, comparando este cenário com o que o controle VW atua com a presença do RT, observa-se que em ambos cenários (BV e AV) considerados, os alimentadores que não

possuem RT para controlar a tensão tiveram que reduzir a saída de potência ativa através do controle VW, visto que este controle atua na limitação de potência ativa para reduzir a sobretensão causada pelo sistema FV. Por outro lado, os alimentadores onde o RT e o controle VW atuaram em conjunto, possuíam a capacidade de disponibilizar grande parte da potência ativa disponível pelo FV para a rede, de acordo com sua curva de radiação solar considerada, fato este que aumenta o aproveitamento da energia limpa disponibilizada pelo FV à rede. Porém, esse aumento de potência fornecida pelo FV é resultado de um alto número de comutações de tapes do regulador.

Foi demonstrado também a atuação do controle *Volt-Var* implementado em conjunto com o RT. Onde, pode-se notar que esta função permitiu trazer a tensão para dentro dos limites adequados nos dois cenários considerados (BV e AV), através do controle de potência reativa. Fazendo com que o inversor FV atuasse absorvendo reativos e, portanto, diminuindo o nível da tensão em análise de acordo com a potência reativa disponível. Além disso, pode-se observar que as comutações excessivas de tape do RT foram reduzidas consideravelmente se comparado ao caso sem VVC, chegando a apenas 4 comutações durante o dia nos dois cenários considerados, o que representou uma redução de 96,29% para o dia com BV e uma redução maior ainda de 99,06% para o dia com AV.

Para os resultados das simulações que levam em consideração a saída de potência reativa disponibilizada pelo FV com aplicação do controle VV, nota-se que não houve mudanças significativas da saída de potência reativa, com e sem o RT. Pois, o controle VV opera praticamente do mesmo modo em ambos cenários (com e sem RT). Isso é resultado da velocidade do controle do inversor, ele opera mais rápido do que o regulador e, portanto, para esse estudo ele foi capaz de colocar em geral a tensão vista pelo regulador sempre dentro da faixa aceitável.

Por fim, ressalta-se que a utilização do controle VV em conjunto com o RT traz maiores benefícios para regulação de tensão em redes de distribuição em MT ao reduzir significativamente a sobretensão e o número de comutações de tape do RT, para ambos os cenários de variabilidade solar considerados. Esta significativa redução do número de comutações de tape do RT pode contribuir para reduzir os custos de manutenções e aumentar a vida útil do equipamento. Assim, para trabalho futuros, pretende-se realizar estudos que permitirão mensurar os ganhos financeiros da aplicação do controle VV, tanto por evitar violações dos limites de tensão quanto por reduzir custos de manutenção no RT.

REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica” Última Revisão Aprovada pela Resolução Normativa nº 767/2017 – Vigência de 01/01/2018.

Daniel J. and Tim C., “An active-shunt diverter for on-load tap changers”, April 2013. IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 2, pp. 649–657.

Fernanda T.; Thiago. S.; Mariana. L. and Walmir F., May 2016. “Mitigation of Fast Voltage Variations During Cloud Transients in Distribution Systems with PV Solar Farms”, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol.PP, no.99, pp.1-1.

Heitor A. B., 2017 “Impacto de Redes de Distribuição com Massiva Conexão de Geradores Fotovoltaicos na Estabilidade de Tensão de Longo-Prazo em Sistemas de Potência”. 134p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Universidade Federal do Pará – UFPA.

Meghasai, S. M.; Vega, R. and Krishnaswami, H., 2015. “Simulation of Smart Functionalities of Photovoltaic Inverters by Interfacing OpenDSS and Matlab”. IEEE.

MME - Ministério de Minas e Energia, 2017. “Energia Sola no Brasil e no Mundo” Última Revisão Aprovada pela Resolução Normativa nº 767/2017 – Vigência de 01/01/2018.

Philip B., 2002. “Overvoltage Considerations in Applying Distributed Resources on Power Systems”, Proc. Of the 2002 IEEE PES Summer Meeting, vol. 1, pp. 109-114.

Sara E., Vijay V., G. T. Heydt, Brien K. and Jeffrey L., May 2013. “Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems”, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 893-901.

Smith, J.; Sunderman, W.; Dugan, R. and Seal, B., 2011a. “Smart Inverter Volt/Var Control Functions for High Penetration of PV on Distribution Systems,” IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ.

Smith, J.; Seal, B.; Sunderman, W. and Dugan, R., 2011b. “Simulation of Solar Generation with Advanced Vol-Var Control,” 21st International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Frankfurt, Germany.

Smith, J., 2013. “Modeling High-Penetration PV for Distribution Interconnection Studies: Smart Inverter Function Modeling in OpenDSS”, Rev 2. EPRI, Palo Alto, 3002002271.

Sunderman, W.; Dugan, R. C. and Smith, J., April 2014. “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.

Vanderson, C. S., 2017. “Controle Local de Potência Reativa em Geradores Fotovoltaicos para a Melhoria da Regulação de Tensão em Redes de Distribuição”. 95p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Universidade Federal do Pará – UFPA.