

<http://dx.doi.org/10.48005/2237-3713rta2021v10n3p4861>

Análise dos reguladores de tensão em redes com alta penetração de geração distribuída fotovoltaica: uma perspectiva do consumidor industrial*

Analysis of voltage regulators in high penetration networks of distributed photovoltaic generation: an industrial consumer perspective

Leandro Pereira Gama

Universidade Federal Fluminense - UFF
lpgama@hotmail.com

Paulo Roberto Duailibe Monteiro

Universidade Federal Fluminense - UFF
pauloduailibe@id.uff.br

Thiago Trezza Borges

Universidade Federal Fluminense - UFF
thiagotrezza@id.uff.br

Marcio Zamboti Fortes

Universidade Federal Fluminense - UFF
mzamboti@id.uff.br

Angelo Cesar Colombini

Universidade Federal Fluminense - UFF
accolombini@id.uff.br

RESUMO ESTRUTURADO

Este trabalho aborda os conceitos e as implicações da utilização da geração distribuída (GD) fotovoltaica nas redes elétricas de média e baixa tensão. São avaliados os possíveis impactos causados aos reguladores de tensão ao longo destas redes. A análise considerou a variação do nível de geração das GDs em 8 cenários. Nestes cenários serão avaliadas a operação de comutação de TAP em um regulador de linha de distribuição, uma indústria e por último a análise da Fase A de três reguladores. Para isso foram utilizadas simulações através do programa computacional OpenDSS. O primeiro cenário é realizado sem a penetração de GDs e os demais com a penetração das GDs de 50 % e 90 %. Tais análises foram realizadas utilizando o caso teste 8.500 barras do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), disponível na biblioteca do OpenDSS e os resultados são comentados para caracterizar os impactos na tensão da barra.

Palavras-chave: Geração distribuída; Regulador de tensão; Estudo de casos; Intermitência fotovoltaica; Qualidade de energia; OpenDSS.

STRUCTURED ABSTRACT

This work addresses the concepts and implications of using photovoltaic distributed generation (DG) in medium and low voltage power grids. Possible impacts caused to voltage regulators along the distribution network are evaluated. The analysis considered the variation of the DGs

* Received 03 August 2021; accepted in 31 March 2022; published online 13 April 2022.

generation level in 10 scenarios. In these scenarios, the TAP switching operation in an electric grid regulator, an industry and finally the analysis of Phase A of three regulators will be evaluated. For this, simulations were used through the computer program OpenDSS. The first scenario is carried out without the penetration of DGs and the others with the penetration of DGs of 50%, 70% and 90%. Such analyzes were performed using the 8,500-bar test case from the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), available in the OpenDSS library and the results are commented to show the impact in the voltage level in the bar.

Keywords: *Distributed generation; Voltage regulator; Case studies; Photovoltaic intermittency; Power quality; OpenDss.*

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o Brasil vem desenvolvendo uma maior conscientização em relação ao aproveitamento dos recursos naturais, visto que o país utiliza 83 % de sua energia através de fontes renováveis, sendo que 63,8 % dessa energia é produzida pelas hidrelétricas (MME, 2020). Contudo, com as estiagens, os níveis dos reservatórios vêm caindo de maneira significativa e com isso é necessário a utilização de usinas termoelétricas que, além da poluição, tem um custo considerável. Desta forma, o Brasil tem investido fortemente em outras fontes como a eólica e a solar que representam 10,3 % da energia gerada (MME, 2020). Essas gerações de fontes renováveis, são comumente alocadas próximos aos centros de consumo, e podem ser instaladas por consumidores ao longo da rede de distribuição, caracterizando uma Geração Distribuída (GD).

Contudo, elevados níveis de GD ao longo da rede de baixa tensão aumenta a complexidade da operação do sistema, para manter a tensão em níveis adequados, evitando assim a subtensão e sobretensão da rede. Com isso é necessário a regulação de tensão que tem como objetivo fazer com que os consumidores de pequena e larga escala, como residências e indústrias, recebam uma tensão com qualidade, conforme determinação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), por meio do Módulo 8 do PRODIST (PRODIST, 2021). As distribuidoras de energia e os órgãos reguladores atentam para uma contínua necessidade da melhoria dos serviços prestados. Com isso, a utilização dos reguladores de tensão tem se mostrado importante para manter os níveis de tensão dentro dos limites especificados de 0,92 e 1,05 pu, conforme o Módulo 8 do Prodist. Os reguladores de tensão são largamente utilizados no Brasil.

Os tipos mais usados são os equipamentos com comutadores automáticos eletromecânicos, constituídos por sistemas mecânicos que permitem uma ação sob carga e possibilitam um bom desempenho na regulação da tensão em regime permanente (BURATTI, 2016). Porém, para variações rápidas de tensão, o regulador eletromecânico não possui uma dinâmica de compensação rápida o suficiente para corrigir essas variações. Assim, viu-se a necessidade da adoção de reguladores de tensão com comutador eletrônico de TAP possibilitando uma melhoria satisfatória na qualidade de energia.

Os reguladores de tensão são usados frequentemente em redes de distribuição, para regular a tensão em cada fase da rede separadamente, visando manter a tensão dentro de uma faixa de valores pré-estabelecidos, respeitando os limites seguros de operação nos pontos de carga. Através de seu sistema de regulação de tensão avançado, os reguladores de tensão são projetados para funcionar dentro de uma faixa de operação parametrizada, permitindo assim que as distribuidoras mantenham os níveis de tensão dentro de padrões aceitáveis para garantir o correto funcionamento dos equipamentos e do sistema elétrico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Brasil tem investido de maneira significativa em grandes projetos de energias renováveis ao longo da última década. Anteriormente a matriz energética do país era composta apenas pelas grandes hidrelétricas. Porém, além dos impactos ambientais, temos as estiagens com a falta de chuvas, e com isso a redução dos níveis dos reservatórios e o racionamento de energia. Neste contexto, passou-se a investir em fontes de energias renováveis como a biomassa, eólica e a solar. Nos últimos anos aumentou-se de maneira significativa a instalação de painéis solares nas residências e indústrias. A geração produzida, por essas fontes, é distribuída através das redes de distribuição das concessionárias de energia e isso tem acarretado diversos problemas na qualidade de energia, principalmente nos reguladores de tensão, que são equipamentos projetados pra melhorar a qualidade de energia que vai para os consumidores (RIBEIRO et al., 2020).

O regulador de tensão de média tensão é instalado em redes de distribuição, que regula sua própria fase nos sistemas monofásicos e trifásicos. É utilizado principalmente nos setores residenciais e industriais. Esse equipamento compensa as flutuações da tensão na rede elétrica, além de fornecer uma regulação de tensão adequada e de qualidade no fornecimento de energia. Através de seu sistema de regulação, a rede opera dentro de níveis de tensão aceitáveis, conforme exigências do Módulo 8 do PRODIST.

Em aspectos operativos, possui um comutador automático com 32 TAPs para uma regulação que varia em $\pm 10\%$ da tensão do sistema. Esse dispositivo pode controlar a tensão na barra a montante ou em barras remotas. A função do regulador que permite o monitoramento de uma tensão remota é conhecida como *Line Drop Compensation* (LDC), cujo objetivo é evitar atuações frequentes e desnecessárias de comutação do TAP (CARVALHO, et al., 2017).

Possui normalmente 32 posições de TAP, podendo operar tanto na configuração de elevar a tensão, como na condição de diminuir a tensão, isso é devido a sua polaridade da bobina série que determina a operação do regulador com a função de elevar ou diminuir a tensão. É composto por um enrolamento de excitação, ligado em paralelo com a rede. A comutação de TAP sob carga é realizada com o auxílio de um reator que tem a finalidade de evitar a interrupção do circuito durante o processo de comutação (BURATTI, 2016).

O regulador é dividido de acordo com a norma IEEE C57.15 (IEEE STD. C57.15, 1986) em dois tipos, denominados A e B. O Tipo A é chamado de regulador com excitação variável porque a bobina de excitação percebe e pode atuar com qualquer variação que ocorra na tensão da fonte. O regulador Tipo B é chamado de regulador de excitação constante, pois as variações da fonte não são percebidas NBR 11809 (ABNT, 1991). Estes dois tipos de reguladores de tensão podem elevar ou abaixar a tensão, dependendo da polaridade das bobinas eletricamente conectadas (SANTOS, 2013).

O regulador de tensão é um autotransformador acrescido de um mecanismo de comutação. É usado em redes de distribuição de média tensão para manter o estado estacionário das tensões dentro de limites aceitáveis. Tradicionalmente, os TAPs dos reguladores são controlados automaticamente através do compensador de queda de linha com base em um modelo de queda de tensão aproximado de um centro de carga local. Esse dispositivo é cada vez mais desafiado pelas redes de distribuição com altos níveis de fontes renováveis oriundos das GDs.

Um estudo realizado recentemente indica que durante a reversão dos fluxos de energia (devido as variações na rede de distribuição) causados pela entrada das GDs, os reguladores de tensão sofrem grandes desgastes com as trocas excessivas do TAP e isso tem gerado uma grande preocupação pelas distribuidoras de energia com a vida útil desses equipamentos (BAZRAFESHAN, et al.2019).

O regulador de tensão é um comutador. Normalmente é definido que o regulador de tensão na subestação é do tipo transformador *On Load TAP Changer* (OLTC). Ou seja, o

transformador consegue realizar comutação de TAP, para regular a tensão, mesmo quando operando sob carga. O sistema de controle tradicional de um comutador de tensão com base regulador mede a tensão e a corrente de carga, estima a tensão no ponto remoto, e aciona a mudança de TAP quando a tensão estimada está fora do limite. Este método realimenta a tensão no lado secundário do transformador OLTC, corrente de barramento de carga estimada e a linha da impedância entre o transformador e a carga para estimar a queda de voltagem (LIU, et al. 2012).

Muttaqui e outros (2015) desenvolveram um estudo para controlar a operação do OLTC do transformador, regulador de tensão e da GD. Para isso, gerou-se um método para manter a tensão de alimentação em um nível aceitável com uma variedade de dispositivos de regulação, minimizando ou possivelmente eliminando o número de operações desses equipamentos. O método de coordenação de controle de tensão utiliza o conceito da zona de controle. A ideia-chave desses métodos de coordenação é seletividade ou prioridade. Em outras palavras, apenas o dispositivo correto (ou dispositivos) deve responder em uma ordem correta a qualquer caso de flutuação de tensão. Além do alcance da relação de TAP o regulador de tensão tem um similar modelo ao do OLTC. O regulador é capaz de regular a tensão dentro da faixa de -5 % a +5 % com cada tamanho do passo de 0,625%.

A entrada das GDs no sistema elétrico, tem sido alvo de estudos. Com isso, Matsumoto e outros (2020) elaboraram um estudo que aborda meios para reduzir os impactos nos reguladores de tensão devido a flutuação da rede, causada pela geração fotovoltaica, principalmente quando ocorre a intermitência de nuvens no decorrer do dia. Elaboraram um estudo para avaliar o uso de reguladores de tensão em redes de distribuição oriundas de geração renovável. Os reguladores de tensão convencionais estarão sujeitos a um número maior de mudanças de TAP e que encurtam de maneira significativa sua vida útil. Um outro problema, é o fluxo reverso de energia, quando a geração ultrapassa o consumo e aumento do perfil de tensão, devido a injeção de potência na rede, mantendo-se dentro de limites aceitáveis (SOLANKI et al., 2012).

3. METODOLOGIA

Neste estudo foram analisados oito cenários distintos. O primeiro cenário visa a realizar as simulações com os reguladores de tensão desabilitados, ou seja, eles não irão atuar para a regulação da energia. Nos demais cenários, os reguladores serão habilitados para verificar sua atuação e se eles estão regulando a tensão da energia gerada pelas GDs ao longo da rede de distribuição e serão realizadas simulações com 50 % e 90 % de penetração da geração fotovoltaica. Com isso, será demonstrado o quanto os reguladores de tensão são capazes de melhorar a qualidade de energia, por meio de regulação de tensão.

O objetivo de analisar os impactos gerados pelas GDs nos 3 (três) reguladores de tensão alocadas na rede de média de distribuição, bem com a qualidade de energia entregue as indústrias. Para avaliação dos impactos, serão considerados cenários classificados quanto ao perfil de geração e nível de penetração das GDs, conforme indicado na Tabela 1. Nas simulações serão analisadas as variações de tensão e TAP dos reguladores. Na Figura 1 temos a localização aproximada das indústrias de média tensão e barras da rede de baixa tensão monitoradas. Neste estudo será avaliado o Regulador nº 2 verificando as suas 3 fases (A, B e C) e a alteração do *delay* de 15 para 60 segundos. O aumento do intervalo de tempo é para justamente indicar a redução do número de TAP do regulador e com isso fazer um comparativo com os 2 intervalos de tempo.

Tabela 1: Cenários das Simulações

Cenários	Com GD	Sem GD	Penetração 50%	Penetração 70%	Penetração 90%	Delay 15	Delay 60
1		x				x	
2	x		x			x	
3	x		x				x
4	x		x				x
5	x				x	x	
6	x				x		x
7	x				x		x
8	x		x		x	x	

Fonte: Próprio autor.

1º Cenário – Neste cenário não será utilizada a geração fotovoltaica e dessa forma serão avaliadas as variações de tensão nos reguladores de tensão sem as GDs;

2º Cenário – Este cenário terá a geração fotovoltaica com 50% de penetração das GDs e *delay* de comutação no TAP dos reguladores de tensão de 15 segundos.

3º Cenário - Este cenário terá a geração fotovoltaica com 50% de penetração das GDs e *delay* de comutação no TAP dos reguladores de tensão de 60 segundos.

4º Cenário - Este cenário avalia a qualidade de energia na entrada da indústria, com geração fotovoltaica com 50 % de penetração das GDs e *delay* de 60 segundos na comutação do TAP dos reguladores de tensão.

5º Cenário – Este cenário terá a geração fotovoltaica com 90 % de penetração das GDs e *delay* de 15 segundos na comutação do TAP dos reguladores de tensão.

6º Cenário – Este cenário terá a geração fotovoltaica com 90 % de penetração das GDs e *delay* de 60 segundos na comutação do TAP dos reguladores de tensão.

7º Cenário – Este cenário avalia a qualidade de energia na entrada da indústria, com geração fotovoltaica com 90 % de penetração das GDs e *delay* de 60 segundos na comutação do TAP dos reguladores de tensão.

8º Cenário – Neste cenário serão avaliadas as variações de tensão somente

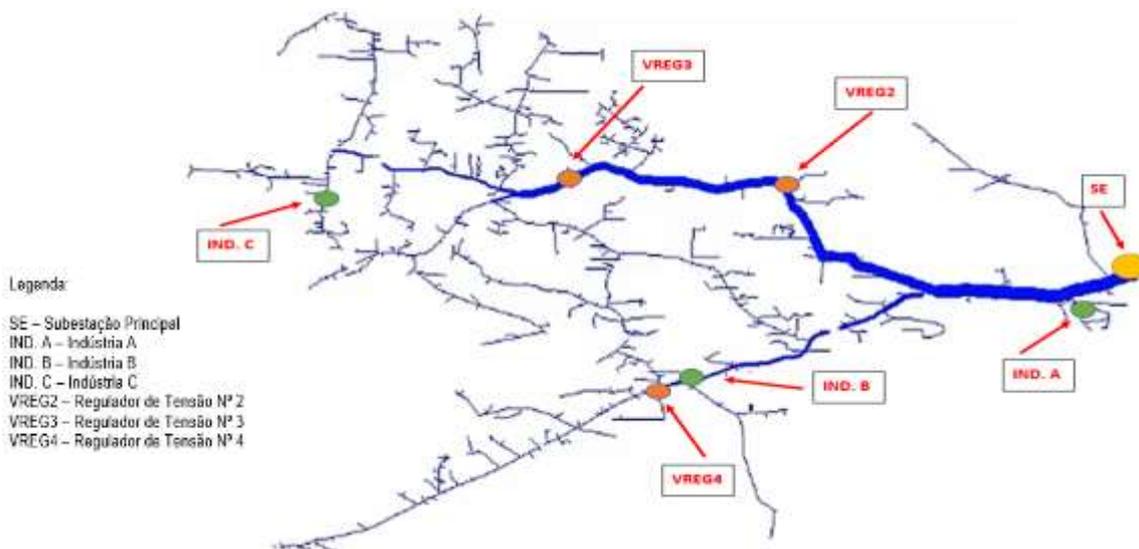


Figura 1 – Localização aproximada das Indústrias, Reguladores de Tensão e Subestação.

Fonte: Próprio autor.

4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

Análise de Caso sem GDs (Cenário 1)

O cenário 1 consiste no caso base, em que não há penetração de GD na rede IEEE 8.500 barras. Os 3 reguladores de tensão ao longo da rede, apresentados na Figura 3.4 operam com delay de 15 segundos. Ou seja, a cada 15 segundos do passo de simulação o regulador de tensão pode atuar, visando manter a tensão da rede em níveis adequados, conforme especificações do Módulo 8 do PRODIST. Para observar o estado de um trecho da rede, na situação sem GD e com cargas atualizadas no período horário, a Figura 2 apresenta o comportamento de um dos reguladores de tensão.

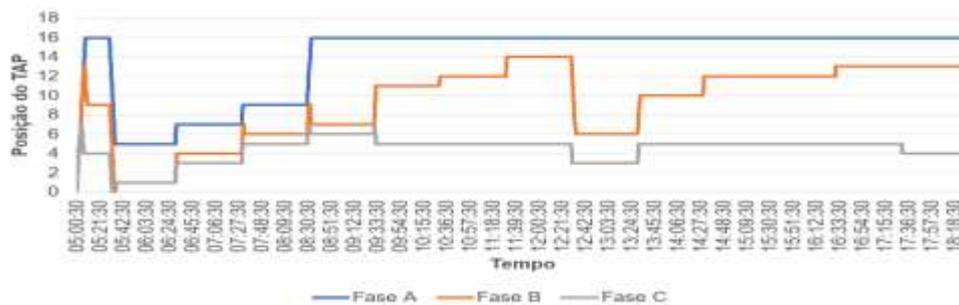


Figura 2 – Posição do TAP do VREG2 sem GD e *delay* de 15 segundos.

A Figura 2 apresenta o comportamento do VREG2, indicando a comutação da posição do TAP do regulador de tensão nas 3 fases, ao longo de 14 horas (de 05:00 até 18:30). O VREG2, possui 32 posições, que pode variar de -16 até +16. Pela Figura 3, é observado apenas que o regulador operou em sua faixa positiva, apontando a presença de sobtensões na rede, e a necessidade de elevar a tensão no seu secundário, para garantir que a tensão a jusante se mantenha dentro dos níveis adequados. Para analisar a tensão no secundário desse equipamento, a Figura 3 é apresentada.

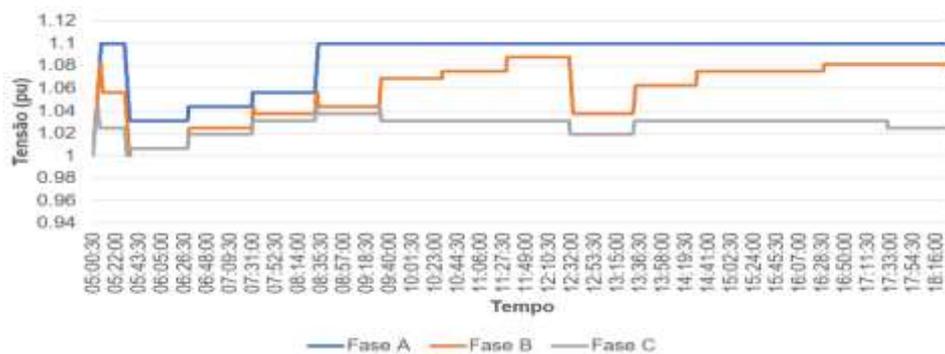


Figura 3 – Tensão no secundário do VREG2 sem GD e *delay* de 15 segundos.

A posição 16 do TAP corresponde uma tensão de 1,1 pu no secundário do regulador de tensão. Essa tensão máxima de operação do equipamento é atingida na maior parte do tempo na fase A, indicando que esta fase é a mais carregada no sistema trifásico. Assim, possivelmente o regulador de tensão não conseguiu garantir que a tensão da rede permanecesse acima de 0,92 pu, uma vez que o limite de operação do equipamento precisou estar sempre acionado.

Destaca-se que apesar da curva de carga da rede de baixa tensão possuir dados horários, o regulador de tensão pode operar a cada 15 segundos. Assim, em alguns instantes é

visto um salto na variação do TAP que não é mantido. Ou seja, em alguns instantes, o TAP se eleva em mais de 3 posições e logo em seguida ele reduz, como no caso da fase B às 08:30. Esse efeito ocorre, pois, a comutação do regulador de tensão com delay de 15 segundos não possibilita a verificação da nova tensão antes do próximo ciclo de atuação. Assim, novas comutações do TAP são realizadas, sem a validação da nova informação de tensão da rede, após a correção da tensão realizada pelo regulador no ciclo anterior.

Na ferramenta computacional OpenDSS, o regulador de tensão é ajustado para cada fase, permitindo diferentes configurações de TAP conforme necessidade de carregamento por fase. Desta forma, as Figuras 2 e 3 apresentaram diferentes posições e ajustes de tensão para cada fase. Neste cenário o VREG2 apresentou 38 comutações do TAP para fase A, 62 para fase B e 31 para a fase C, ao longo das 14 horas simuladas. A quantidade de variações no TAP em um curto espaço de tempo, é de interesse desse estudo, uma vez que esse parâmetro influencia na vida útil do equipamento.

Análise de Caso com GDs (Cenário 2)

O cenário 2 foi construído inserindo 50 % de GD na rede, em relação a capacidade nominal do transformador do alimentador. Neste cenário, os reguladores de tensão ainda possuem 15 segundos de delay, bem como o cenário 1.

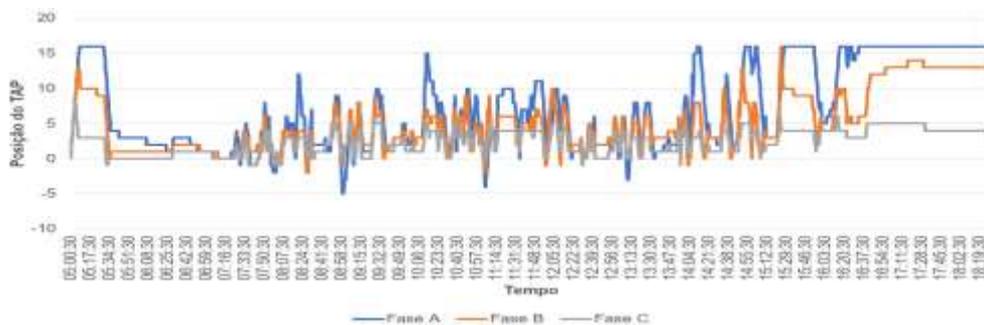


Figura 4 – Posição do TAP do VREG2 com 50 % de GD e *delay* de 15 segundos.

No caso do cenário 1, nenhuma das fases apresentou comutação para níveis negativos do TAP, indicando nível de subtensão. Porém na Figura 4, é identificado pontos de comutação negativa nas 3 fases. Quando a posição do TAP varia para valores negativos, significa que o regulador de tensão precisa ajustar a tensão em seu secundário para valores abaixo de 1,0 pu, conforme Figura 5. Isso ocorre quando a tensão a jusante do regulador de tensão está aumentando, e para adequar a tensão da rede nos níveis aceitáveis pelo PRODIST, o dispositivo realiza comutações negativas.

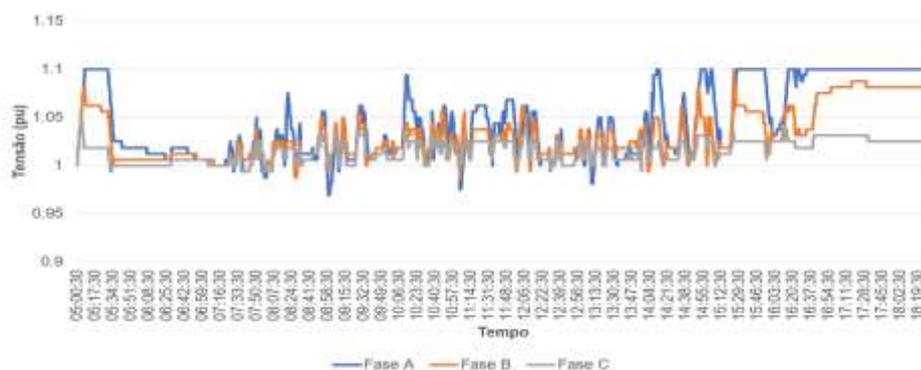


Figura 5 – Tensão no secundário do VREG2 com 50 % de GD e *delay* de 15 segundos.

Outro ponto importante a se observar nas Figuras 4 e 5 é que com a inserção de GD, houve um alívio de carga, em alguns momentos do dia, fazendo com que a tensão da fase A no secundário do regulador de tensão não precisasse ser ajustada, na maior parte do tempo, para o limite máximo superior de 1,1 pu. Por outro lado, à medida que há um aumento na penetração de GD, é previsto que o regulador de tensão precise corrigir com mais frequência problemas de sobretensão, como no caso da Figura 4 às 08:58.

Destaca-se que a curva de geração utilizada para a simulação apresenta granularidade de 30 segundos, por esse motivo, a tensão na rede pode apresentar variações nesse mesmo intervalo, provocando a atuação do regulador de tensão com mais frequência. Além disso, a característica intermitente da geração fotovoltaica torna a operação do regulador de tensão complexa, uma vez que a geração não se mantém constante por muito tempo. Desta forma, em relação ao cenário base, sem GD, neste cenário com 50 % de GD é visto uma variação de TAP de 604, 483 e 295 nas fases A, B e C, respectivamente. Assim, a penetração de 50 % causa um aumento na atuação do regulador de tensão em mais de 7 vezes, chegando a uma variação maior que 15 vezes para a fase A.

Análise de Caso com GDs (Cenário 3)

Para analisar o comportamento do regulador de tensão com atuação de 60 segundos de delay, a Figura 6 apresenta o VREG2 nessa faixa de operação. Esse parâmetro infere na velocidade em que o equipamento consegue comutar entre um TAP e outro. Como a variação da curva de geração fotovoltaica ocorre a cada 30 segundos, ajustando a operação do regulador de tensão para cada 60 segundos é permitido que o equipamento perceba o sinal de variação de tensão antes de atuar. Ou seja, o regulador de tensão observará se a tensão da rede voltará para o nível adequado, segundo o PRODIST, antes de operar. Em casos de muita geração intermitente na rede, em que a tensão gerada se reduz de forma instantânea por intercepção de radiação solar sobre a placa, é interessante operar o regulador de tensão com *delay*, evitando que sua atuação em casos de eventos isolados e instantâneos.

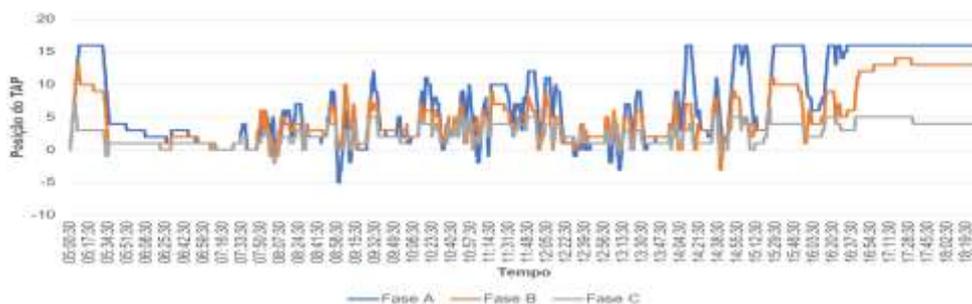


Figura 6 – Posição do TAP do VREG2 com 50 % de GD e *delay* de 60 segundos.

Na Figura 6 a operação do regulador de tensão apresenta semelhanças com a Figura 4.3. Contudo, ao aplicar o *delay* de 60 segundos no VREG2, o número de comutação nas 14 horas simuladas foi de 542 para a fase A, 398 na fase B, e 229 na fase C. Desta forma, houve uma redução na quantidade de variação do TAP em todas as fases, em relação ao cenário 2, com *delay* de 15 segundos. Esse resultado já era esperado, uma vez que o ajuste do *delay* para valores maiores do que o passo de simulação de 30 segundos, permite que o equipamento não atue em todas as variações de tensão da rede, que em diversos casos são provocadas pelas intermitências das fontes fotovoltaicas.

Análise de Caso com GDs (Cenário 4)

Este cenário avalia a qualidade de energia na barra de média tensão na entrada da indústria do início da rede, “IND. A”, conforme Figura 1. Neste cenário é utilizado a mesma configuração do cenário 3: geração fotovoltaica com 50 % de penetração em relação a potência nominal do transformador do alimentador, e o VREG2 com *delay* de 60 segundos para comutação de TAP. A Figura 7 ilustra o perfil de tensão nas três fases na barra de entrada da indústria.

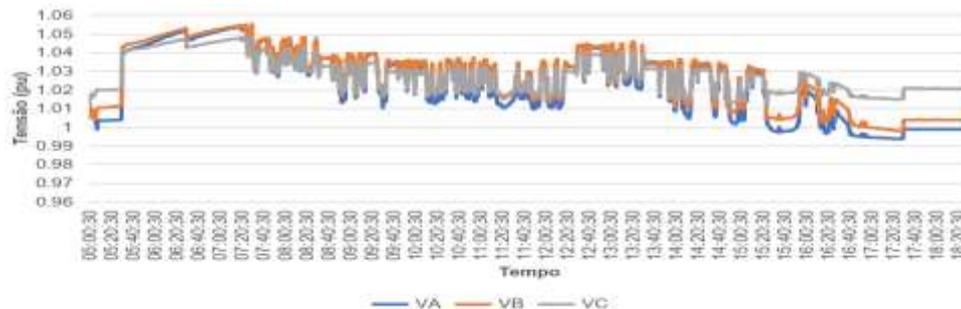


Figura 7 – Tensão na entrada da indústria com 50 % de GD e *delay* de 60 segundos no VREG2.

A Figura 7 aponta momentos em que a tensão da barra de média tensão da indústria supera a tensão de 1,05 pu, que é o limite superior desejado pelas distribuidoras de energia para cumprir com o estabelecido pelo PRODIST. Como essa indústria se encontra no início da rede, antes de qualquer regulador de tensão, a tensão dessa indústria tende a ficar próxima da 1,05 pu, uma vez que os reguladores de tensão atuam para corrigir a tensão a jusante. Assim, como a barra de média tensão da “IND. A” se encontra a montante dos reguladores de tensão, e próximo a subestação, a tensão nessa barra tende a estar em níveis próximos a 1,05 pu, visando evitar problemas de subtensão nas barras ao final do alimentador. Destaca-se que os reguladores não visam ajustar a tensão das barras a montante.

Desta forma, à medida que a carga dos consumidores da rede e das indústrias começam a aumentar, a tensão na barra de média tensão no ramal de entrada da indústria, do início da rede, começa a perceber esse impacto, com uma redução no seu nível de tensão. O aumento da tensão para níveis superiores de 1,0 pu no período antes de 07:30, indica que os reguladores da rede atuaram elevando a tensão da rede a jusante, o que causou uma elevação na tensão a montante dos reguladores de tensão.

Análise de Caso com GDs (Cenário 5)

Este cenário é composto por geração fotovoltaica com 90 % de penetração em relação a potência nominal do transformador. Os reguladores de tensão estão com atraso na comutação do TAP ajustados no modo default do OpenDSS, que é definido em 15 segundos. Para verificar o comportamento da rede através da operação do regulador de tensão, a Figura 8 ilustra a variação da posição do TAP do VREG2 ao longo do dia.

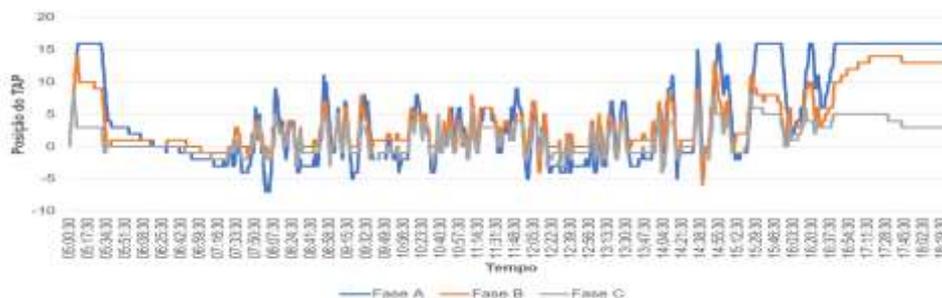


Figura: 8 – Posição do TAP do VREG2 com 90 % de GD e *delay* de 15 segundos.

A Figura 8 indica que não há variações significativas na operação do VREG2, em relação ao cenário de 50 % de penetração de GD. Contudo, há um aumento na frequência de atuação em faixas negativas do TAP. Esse efeito representa que o aumento de GD eleva a quantidade de sobretensões na rede, principalmente no período de maior radiação solar, entre 08:00 e 15:30. Apesar desse aumento de sobretensões, o VREG2 não precisou reduzir a tensão da rede a jusante para níveis muito baixos. A Figura 9 mostra que a tensão do secundário do transformador não chegou a operar em faixas menores que 0,95 pu.

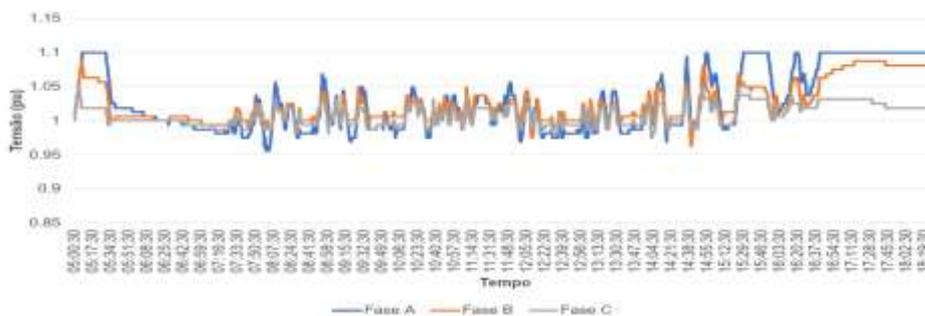


Figura 9 – Tensão no secundário do VREG2 com 90 % de GD e *delay* de 15 segundos.

Destaca-se que apesar do aumento de penetração de GD fotovoltaica provocar um alívio de carga, devido ao autoconsumo das cargas alocadas na mesma barra de geração, nos períodos de baixa radiação solar e de alto consumo de carga, como é o caso de 16:30 até 18:30, o VREG2 precisa operar em seu limite máximo superior de tensão, para mitigar problemas de subtensão na rede a jusante.

No que tange a quantidade de comutação necessária para manter a rede IEEE 8.500 operando dentro dos níveis estipulados de qualidade de energia, é verificado uma variação na posição do TAP de 648 vezes na fase A, 497 vezes na fase B e 404 vezes na fase C. Neste sentido, ao comparar a quantidade de variações no TAP ao longo do dia, a fase A com penetração de 90 % obteve uma redução no número de comutações em relação a penetração de 50 %. Esse resultado é justificado pelo fato de que a fase A possuía mais consumidores de grande porte, como visto no cenário base sem GD (Cenário 1), e conseqüentemente mais candidatos a possuírem clientes com GD.

Análise de Caso com GDs (Cenário 6)

Este cenário é caracterizado por geração fotovoltaica com 90 % de penetração em relação a potência nominal do transformador, contudo, diferente do cenário 5, este cenário possui um atraso de 60 segundos na operação do VREG2. Para ilustrar o perfil de variação do TAP neste cenário, a Figura 10 é apresentada.

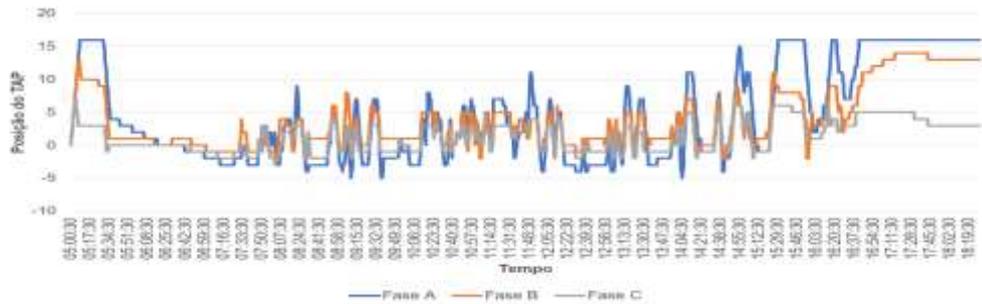


Figura 10 – Posição do TAP do VREG2 com 90 % de GD e *delay* de 60 segundos.

Novamente, através da análise gráfica, não houve mudanças significativas no comportamento do VREG2, em relação ao cenário de 90 % de GD e 15 segundos de atraso na atuação desse equipamento. Porém é observado uma redução de 15 %, 22 % e 32 % na operação do VREG2 na fase A, B e C, respectivamente. Esse resultado indica que 90 % de GD com atraso de 60 segundos apresenta a menor quantidade de variação na posição do TAP na fase A, isso se comparado com todos os cenários de penetração de GD. Já a fase B e C o cenário com penetração de 50 % e *delay* de 60 segundos, apresentou o menor número de variação do TAP. Isto ocorre, pois as fases B e C não estavam tão carregadas quanto a fase A, apontando que o aumento de GD na rede acarretou maior atuação do TAP para corrigir problemas de sobretensão na rede a jusante.

Análise de Caso com GDs (Cenário 7)

Este cenário avalia a qualidade de energia na entrada da indústria, com geração fotovoltaica com 90 % de penetração das GDs e *delay* de 60 segundos na comutação do TAP dos reguladores de tensão. A Figura 11 ilustra o perfil de tensão na barra de média tensão da indústria.

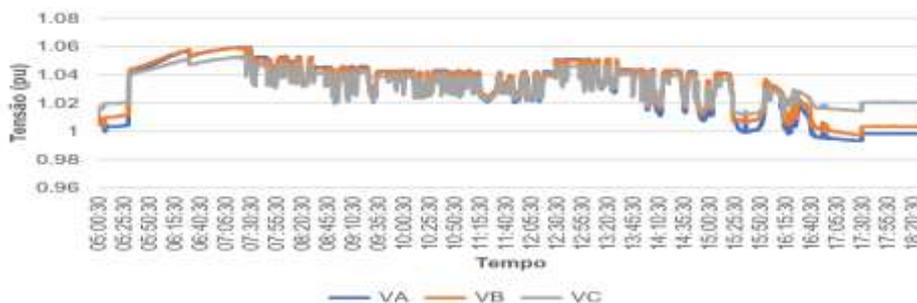


Figura 11 – Tensão na entrada da indústria com 90 % de GD e *delay* de 60 segundos no VREG2.

A Figura 11 aponta momentos em que a tensão da barra de média tensão da indústria supera a tensão de 1,05 pu, que é o limite superior desejado pelas distribuidoras de energia para cumprir com o estabelecido pelo PRODIST. Isso se justifica pela localização da indústria próxima a subestação. Assim como comentado no cenário 4, destaca-se que os reguladores de tensão operam para ajustar a tensão das barras a jusante, e como a “IND. A”, apresentada na Figura 11 se encontra a montante dos reguladores de tensão, é natural que redes muito carregadas operem com barras próximas a subestação com o limite superior de 1,5 pu violado, em alguns momentos do dia.

Análise de Caso com GDs (Cenário 8)

A fim de comparar os impactos que a penetração de GD provoca no número de comutação do TAP dos reguladores de tensão, a Figura 16 apresenta o comportamento da fase A de todos os reguladores da rede com 50 % de GD e a Figura 12 ilustra a fase A com 90 % de penetração de GD na rede.

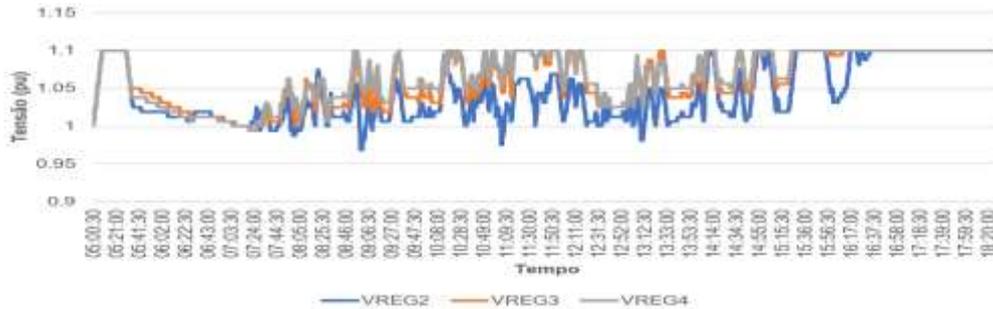


Figura 12 – Tensão no secundário dos reguladores de tensão com 50 % de GD.

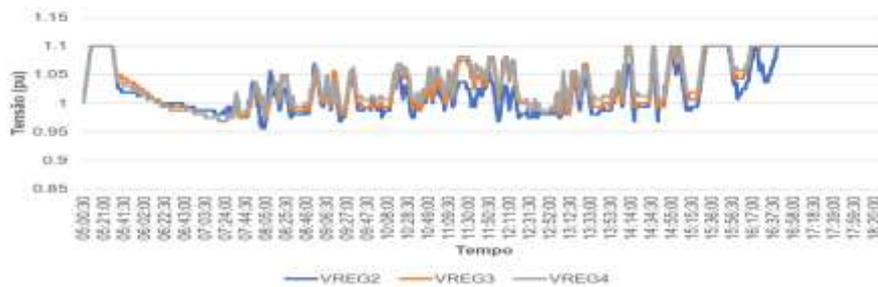


Figura 13 – Tensão no secundário dos reguladores de tensão com 90 % de GD.

A Figura 12 e 13 possibilitam identificar as partes mais carregadas da rede, ou seja, os trechos da rede com maior carga. Assim, observa-se que o VREG3 e VREG4 operam na maior parte do tempo simulado na posição máxima do TAP, com tensão de secundário em 1,10 pu. Essa operação indica que a fase A está mais carregada nos trechos de rede a jusante desses reguladores de tensão. Neste sentido, à medida que a penetração de GD aumenta, é visto um alívio de carga entre 08:30 e 15:30, evitando que VREG3 e VREG4 operem com o TAP na posição +16. Esse efeito indica que pode haver uma sinergia na alocação e dimensionamento da GD na fase ao longo da rede, para reduzir a necessidade de operação dos reguladores de tensão, e consequentemente, aumentando sua vida útil.

Tabela 2: Comutação de TAP

Cenários	Penetração	Delay	Fase A	Fase B	Fase C
Cenário 1	Sem GD	15 segundos	38	62	31
Cenário 2	50%	15 segundos	604	483	295
Cenário 3	50%	60 segundos	542	398	229
Cenário 4					
Cenário 7	90%	15 segundos	648	497	404
Cenário 8	90%	60 segundos	607	416	391
Cenário 9					
Cenário 10					

Fonte: Próprio autor.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi verificado como as GDs de geração fotovoltaica atuam nos reguladores de tensão distribuídos na rede. Foram incluídos 2 tipos de penetrações e em cada uma foi feito um comparativo com *delay* de 15 e 60 segundos, para justamente ter-se uma análise dos impactos nos reguladores. Chega-se à conclusão de que os reguladores são altamente danificados pois a variação de TAPs nesses equipamentos é constante e com isso gera um maior desgaste nos equipamentos e quanto menor o *delay* maior será atuação do TAP do regulador, sendo, portanto, equipamento a ser melhor especificado quando da implantação em uma rede que possua GD especificamente fotovoltaica conectada.

6. REFERÊNCIAS

ABNT, NBR 11809 Reguladores de Tensão – Especificação - Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

BAZRAFESHAN, Mohammadhafez; GATSIS, Nikolaos; ZHU, Hao. Optimal power flow with step-voltage regulators in multi-phase distribution networks. *IEEE Transactions on power systems*, v. 34, n. 6, p. 4228-4239, 2019.

BURATTI, Rafael Pereira. Reguladores de Tensão em Redes Elétricas com Alta Penetração de Cargas não Lineares. Ilha Solteira, 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2016.

CARVALHO, Vanderson; OLIVEIRA, Werbwston; BARATA, Heitor Alves; VIEIRA, J.P.A.. Impacto da Variabilidade da Geração Fotovoltaica no Controle de Tensão em Redes de Distribuição Ativas. XVII Eriac Decimo Séptimo Encuentro Regional Ibero Americano de Cigré, CE-C4, 2017.

IEEE, IEEE C57.15 – IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Cod for Step-Voltage, 2009.

LIU, Xiaohu; AICHHORN, Andreas; LIU, Liming; LI, Hui. Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 2, p. 897-906, 2012.

MATSUMOTO, Thomas R., NABETA, Silvio I., CHABU, Ivan E., NAGAO, Shigueru JR., SANTOS, Nerilvaldo R.; DOMINICE, Alexandre. Induction Voltage Regulator Performance in Primary Distribution Networks with a High Degree of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020.

MME. “Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira”. Governo do Brasil, 28 de jan. de 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasil#:~:text=O%20Brasil%2C%20atualmente%2C%20tem%2083,Minas%20e%20Energia%2C%20Reive%20Barros>>. Acesso em: 04 de Jul. de 2021.

MUTTAQUI, M. Kashem; D.T., LE; Neqnevitsky, Michael; LEDWICH, Gerard. A coordinated voltage control approach for coordination of OLTC, voltage regulator, and DG to regulate voltage in a distribution feeder. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1239-1248, 2015.

PRODIST. Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade de Energia, Atualizado em 01 de janeiro de 2021. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo_8-Revisão_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47>. Acesso em: 21/06/2021.

RIBEIRO, Tiago Pinheiro; ARAÚJO, Munique Freire de; PEREIRA, Aleksandro Maick; MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe. Comparison of industrial substation arrangements. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, N10, 2020. Disponível em: <<https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/3682>>. Acesso em: 09 mar. 2021.

SANTOS, Signie Laureano França. Método para seleção ótima de tap's de reguladores de tensão em situações de interrupção de energia. Curitiba. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SOLANKI, S. K.; RAMACHANDRAN, V.; SOLANKI, J. Steady State Analysis of High Penetration PV on Utility Distribution Feeder. In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, IEEE PES, 2012.