



# DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES COM ALTA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

**Tema:** Recursos Energéticos Distribuídos

**Autores:** RAFAEL FERNANDO MARIANO

**Co-Autores:** -

**Empresa:** BECKWITH ELECTRIC

---

## Resumo

Nesse trabalho apresentou-se os desafios no que se refere aos ajustes e parametrizações de reguladores de tensão no sistema de distribuição de energia com alocação de geração distribuída. Discutiu-se novas propostas de ajustes e ferramentas para a correta regulação de tensão, como compensação remota de tensão, tempo de resposta de operação por tempo inverso e validação de um algoritmo que autodetermina a causa de inversão de fluxo no alimentador onde o regulador está instalado.

## 1. Introdução

Com o avanço da alocação da geração distribuída no sistema de distribuição de energia, desafios para operação, confiabilidade e garantia de qualidade de energia vem se tornando cada vez maior. A regulação de tensão tem sido um dos principais alvos dos efeitos de alta penetração de geração distribuída (GD), por não serem despachadas e terem características de inércia lenta, a previsibilidade da geração e o impacto na variação da tensão durante o dia é notável.

Os impactos da geração distribuída no planejamento, operação e performance da rede elétrica são diversos. Avaliação do impacto da regulação de tensão, esquemas de proteção, distorção harmônicas, compensação de reativos se faz necessários. Devido parte da geração distribuída ser com instalações de geradores do tipo monofásico, um dos impactos é o desbalanço de tensão na rede elétrica, operações excessivas de reguladores e banco de capacitores, e violações de tensão. Nesse trabalho será abordado os desafios de parametrização de reguladores de tensão monofásicos no sistema de distribuição de energia, discutindo-se os métodos tradicionais e suas performances com a alocação de geração distribuída na rede de energia bem como possíveis soluções com o intuito de sanar impactos na regulação de tensão. Com a possibilidade de mudança de fluxo na rede elétrica as parametrizações de reguladores de tensão já não são mais efetivas pelo método tradicional, onde tem-se ajustes estáticos com base em estudo de planejamento, devido a dinâmica na rede e a falta de previsibilidade de seu comportamento, se faz necessário uma parametrização dinâmica do regulador de tensão.

Novos recursos e métodos foram introduzidos nesse trabalho para responder os desafios que traz a geração distribuída, iniciando com a mudança na seletividade de resposta de reguladores de tensão que usualmente são por tempo fixos o que dificulta o tempo de resposta em caso de sobreamento em painéis solares por exemplo. Outra questão é o tipo de rearme dos tempos de operação assim como uma alteração no

método de compensação de queda de tensão, permitindo uma retroalimentação remota para o controle de regulador de tensão. Por fim avalia-se com testes em campo a performance de um algoritmo capaz de autodeterminar a razão da mudança do fluxo de potência que passa pelo regulador, se é ocasionado pela geração distribuída alocada no alimentador ou uma manobra realizada pela concessionária de energia, permitindo dessa forma uma correção dinâmica de parametrização e evitando que o regulador de tensão se perca na regulação e deixe a rede vulnerável a violações de subtensão e ou sobretensão.

## 2. Desenvolvimento

A variação brusca de tensão é um dos maiores impactos nos circuitos de distribuição de energia com elevada penetração de geração distribuída, principalmente do tipo solar, pois sombras podem ocasionar variações consideráveis nos níveis de tensão, além de dinâmica de geração lenta. Os reguladores de tensão instalados na rede de distribuição possuem tempos de operação na casa de dezenas de segundos com o intuito de obter-se uma seletividade na regulação, desde a subestação até o fim do circuito. Essa característica de tempo definido na casa de dezenas de segundos faz com que os reguladores demorem para regular a tensão em momentos de sombreamento nos painéis solares ou intermitência na geração, ocasionando sobretensões elevadas por tempos consideráveis.

Com o intuito de ter-se uma resposta mais dinâmica a características de variações de tensão na rede a aplicação do conceito de operação por tempo inverso mostra-se uma ótima solução para aplicação de variação de tensão causada por sombreamento e demais características da geração distribuída. A resposta de atuação por tempo inverso opera mais rápido para variações de tensões mais severas e mais lento para variações pequenas de tensão, sendo adequada para aplicação a jusante de religadores automáticos e para alta penetração de GDs onde se faz necessário operações mais rápidas e dinâmicas.

A Fig. 1 apresenta um gráfico de tempo inverso. Suponha-se que a tensão de base do regulador é ajustado em 122V, largura de banda de 3V e tempo base de operação de 45s, e um sombreamento ocorre e afeta boa parte da geração distribuída alocada no alimentador, ocasionando um afundamento de tensão de 6V na base secundária, ou seja, a tensão no controle está em 116V. Com o método convencional a regulação irá ocorrer apenas após atingir os 45 segundos ajustado, já com o tempo inverso temos uma relação delta múltipla de 4 o que significa que tem-se uma alteração dinâmica no tempo de operação, sendo agora 25% do tempo base, ou seja, 11,25 segundos.

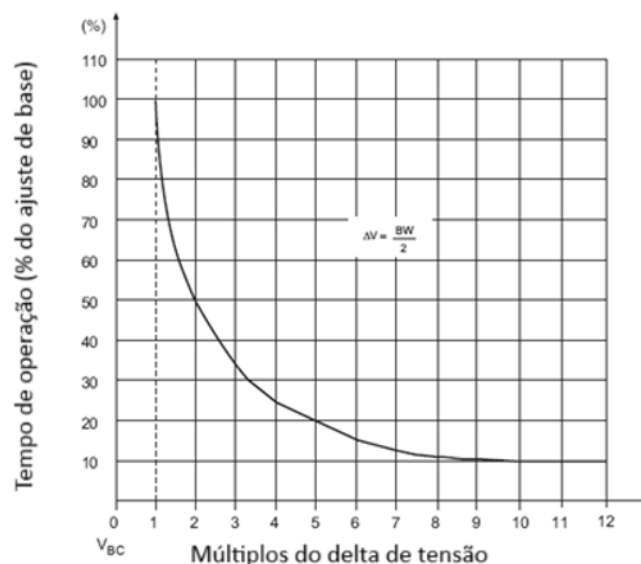


Figura 1 - Curva de Tempo Inverso

A Equação 1 demonstra o cálculo do múltiplo do delta de tensão para a curva de tempo inverso.

$$\text{Múltiplo do delta de tensão} = (|Tensão Medida - Tensão Base|) / \left(\frac{L.Banda}{2}\right) \quad (1)$$

Um outro recurso que pode ser aplicado para uma resposta mais rápida para o sistema de distribuição nos ajustes de reguladores de tensão é o método de rearme do tempo de operação, podendo ser do tipo instantâneo ou integralizado.

O tempo de rearme instantâneo zera o valor do tempo de operação que estava sendo incrementado imediatamente caso a tensão retorne dentro do valor de tensão desejado, já o rearme por integralização não zera o tempo do temporizador que estava sendo incrementado imediatamente após a tensão estar dentro da faixa de tensão, ao invés disso, o tempo é decrementando de forma integralizada.

A Fig. 2 mostra o comportamento dos dois métodos.

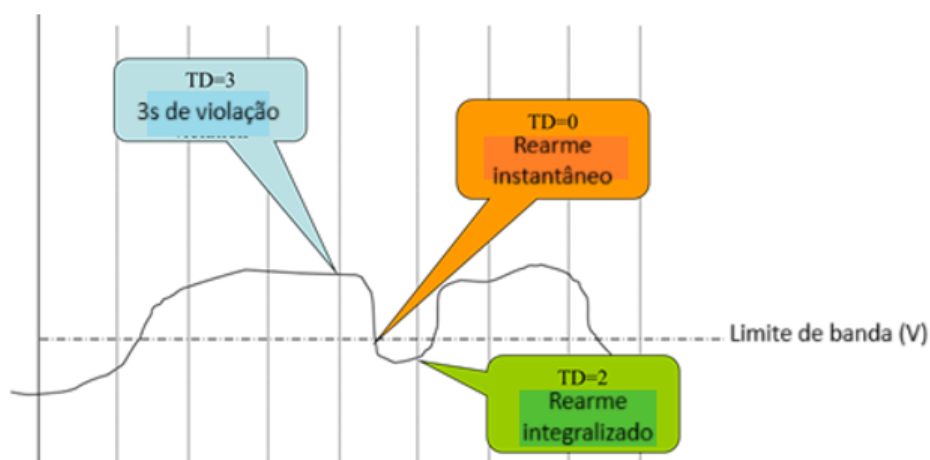


Figura 2 - Tempo de rearme instantâneo e integralizado

O método de rearme de tempo integralizado permite uma operação mais rápida do regulador caso tenha uma variação intermitente na tensão, ou seja, em uma situação que o regulador tem tempo de operação

de 25 segundos, e a tensão está fora da largura de banda, o tempo é iniciado e incrementado até 15 segundos, após esse tempo a tensão retorna para a faixa desejável, porém após mais 5 segundos a tensão fica fora do desejável uma vez mais, o método integralizado retorna o tempo de operação em 10 segundos, restando mais 15s para a comutação. Isso ocorre pois como a tensão esteve fora da banda por 15s e logo em seguida dentro da faixa por 5s, o método de integralização subtrai o tempo em que a tensão esteve fora do desejável pelo tempo em que a tensão esteve saudável, zerando o contador apenas quando o tempo da tensão saudável alcança o tempo em que a tensão esteve fora da banda. Esse comportamento permite uma resposta de atuação mais rápida quando se tem intermitências na faixa de tensão, fazendo com que o regulador opere de forma mais rápida para esse cenário.

### Compensador de queda tensão

O compensador de queda de tensão na linha, permite a compensação da queda de tensão para que o centro de carga receba a tensão desejável, contabilizando a impedância da linha e a corrente circulante, o controle do regulador é capaz de calcular a queda de tensão e aumentar a regulação na saída com o intuito de atender a tensão dentro da faixa desejável no centro de carga.

A Fig. 3 demonstra um modelo de linha com uma impedância de linha entre o regulador de tensão e o centro de carga.

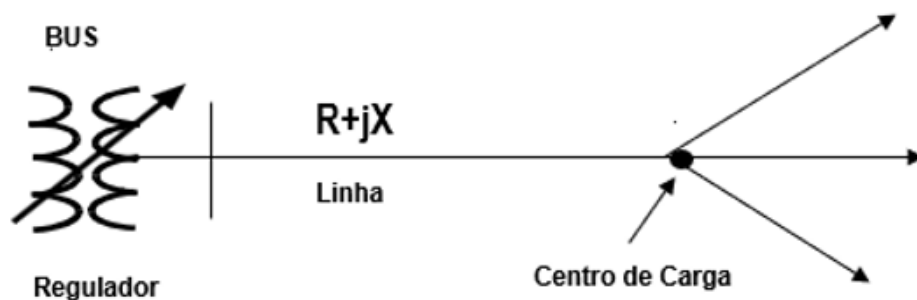


Figura 3 - Representação de um circuito com tensão compensada no centro de carga

O intuito é garantir a regulação de tensão no centro de carga, porém elevar a tensão diretamente na saída do regulador sem considerar a queda de tensão na linha pode provocar uma tensão adequada em momento de carga leve e de subtensão no fim da linha em momento de carga elevada. O inverso também é verdade, elevar a tensão considerando o perfil de carga elevada, quando se tem uma carga leve no sistema a tensão na saída do regulador será extremamente elevada, violando níveis de qualidade de energia elétrica.

Com o intuito de ter-se uma compensação dinâmica, baseando-se na carga circulante no sistema, utiliza-se o compensador de queda de tensão, onde é informado os dados de impedância de linha e o regulador utiliza esses dados para compensar a regulação, garantindo uma tensão saudável no centro da carga e permitindo uma tensão controlada na saída do regulador, evitando violação de tensão no início da linha.

A Fig. 4 demonstra o perfil de regulação sem a aplicação do compensador de queda de tensão (A) e com compensador de queda de tensão (B). Verifica-se que na condição (A) a tensão na saída do regulador é fixa para qualquer condição de carga no sistema, já no cenário (B), a tensão no centro de carga é fixa independente do perfil de carga.

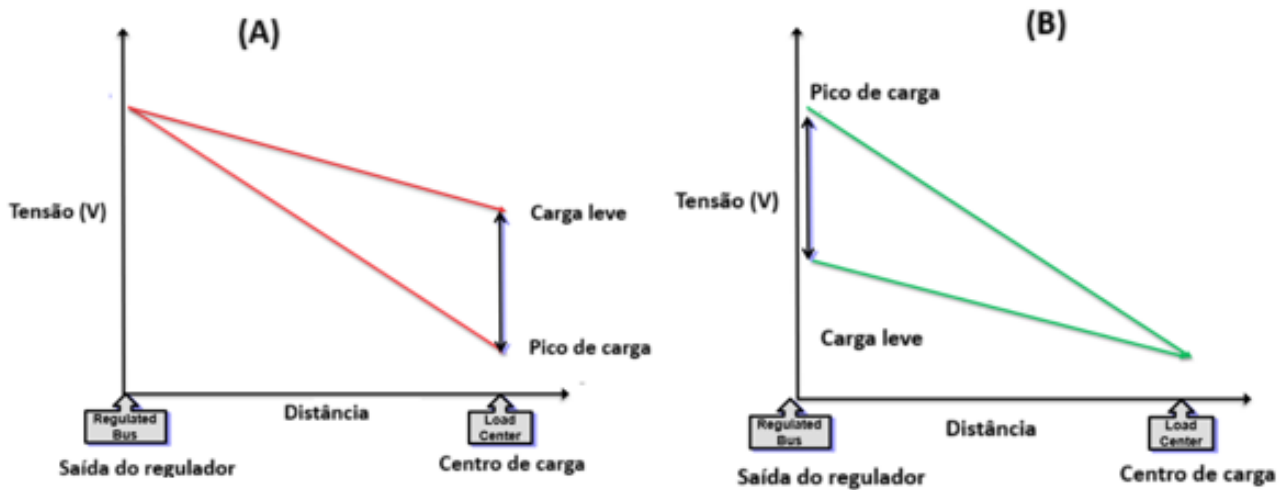


Figura 4 - Perfil de regulação de tensão sem (A) e com compensador de queda de tensão (B)  
 Apesar da compensação de queda de tensão ser uma ótima ferramenta para garantir a tensão adequada sobre todo o circuito, com o crescimento da geração distribuída, e sua penetração considerável no alimentador, faz com que essa ferramenta perca a confiabilidade e garanta a tensão adequada no centro de carga. A Fig. 5 demonstra um circuito onde tem-se uma contribuição de geração distribuída alocada no meio da linha.

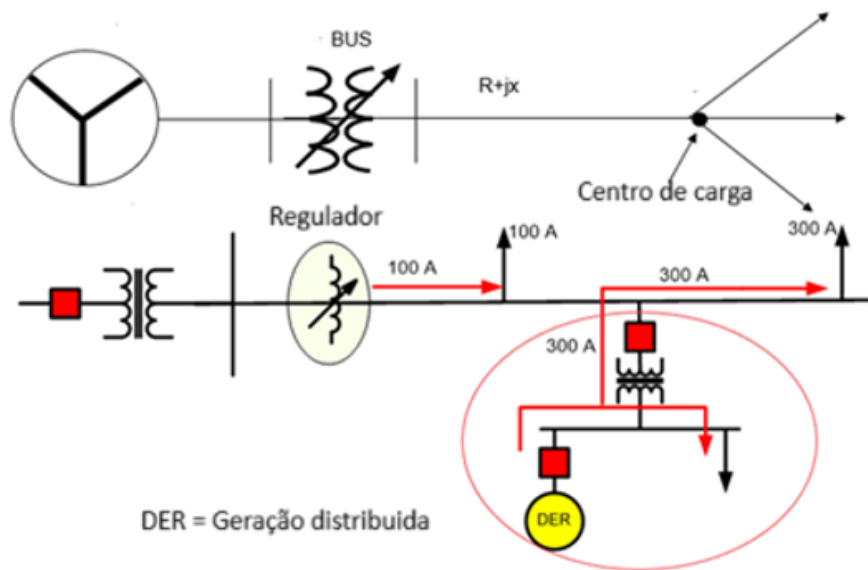


Figura 5 - Regulação de tensão com geração distribuída

A corrente de carga demanda no exemplo é de 400A. O compensador de carga enxerga toda a impedância da linha, dado esse inserido no controlador. Nas situações onde toda a corrente demanda pela carga passa pelo regulador o cálculo de compensação de queda de tensão na linha será correto, entretanto, com a penetração de geradores distribuídos na rede, a corrente total que passa pela linha não passa pelo regulador, visto que os geradores contribuem com o fornecimento de corrente para carga, impactando diretamente no cálculo do compensador de queda do regulador, pois, não é possível saber qual a queda de tensão da linha pelo cálculo tradicional que depende da corrente circulante pelo regulador, portanto, para aplicações

com penetração de geração distribuída o método tradicional de compensador de queda se mostra pouco confiável.

Com o intuito de solucionar essa nova realidade que a geração distribuída traz para a compensação de queda de tensão, uma proposta de compensação de queda de tensão remota é proposta, conforme figura 6.

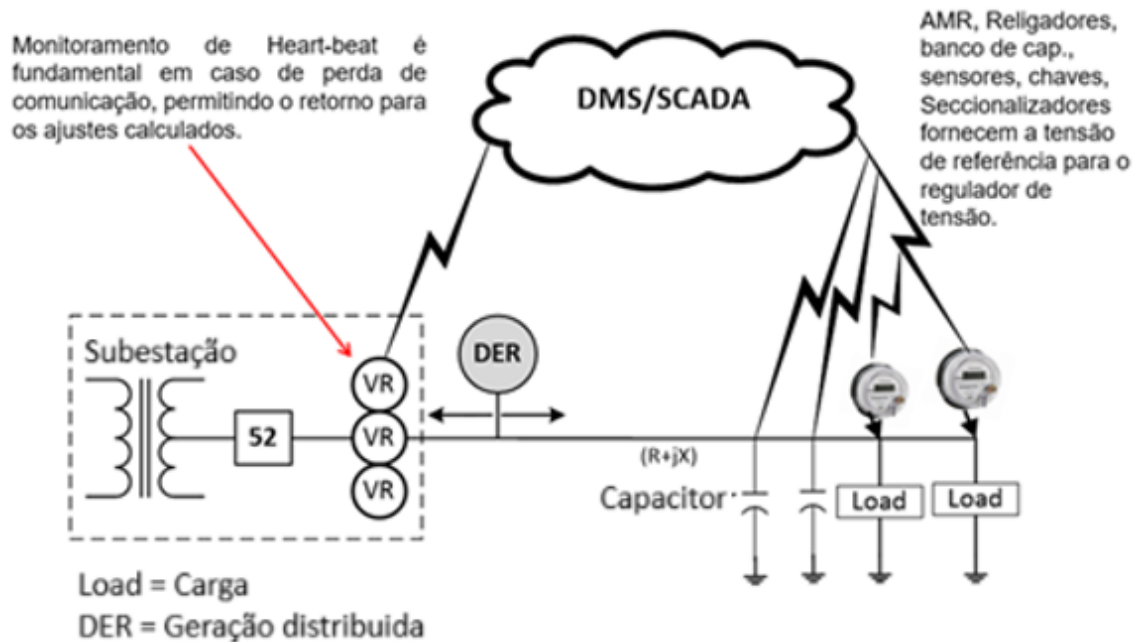


Figura 6 - Compensação remota de tensão

A proposta baseia-se em uma compensação remota com base em medições de tensão na rede, oriundas de religadores, banco de capacitores, sensores e ou medidores, instalados próximos ao centro de carga. Com a retroalimentação dessa medição o controle sabe a tensão no centro de carga e calcula de forma dinâmica a compensação de queda, dessa forma, não sendo dependente da corrente circulante pelo regulador e tornando-se confiável para aplicações onde geradores distribuídos são largamente aplicados no alimentador.

Para a validação desse recurso um experimento foi realizado em uma rede conforme dados a seguir:

- Tensão do Sistema L-L : 13.8 kV
- Tensão Fase-Terra = 7.967 kV
- Parâmetros de linha:  $R = 1.47 \text{ ohm}$ ,  $X = 4.875 \text{ ohms}$
- Carga de Pico: 9 MW e 2.5 Mvar
- Banco de Capacitor: 1x 1200 kvar no fim da linha e 1x 1200 kvar no meio da linha.
- A carga está distribuída em um alimentador de 9,6 km (metade da carga próximo ao fim da linha e a outra metade próximo ao meio da linha).

Avaliou-se as duas técnicas de compensação considerando determinados níveis de penetração e geração distribuída ao longo da linha.

A Fig. 7 mostra os resultados obtidos considerando a compensação tradicional e a compensação remota para um alimentador com penetração de geração distribuída no início do alimentador. O eixo vertical apresenta a tensão em por unidade (p.u.), e o eixo horizontal a tensão a queda de tensão até o fim da linha. A

linha verde representa a compensação remota, e a vermelha a compensação estática, os gráfico mostra o impacto da geração distribuída avaliando o nível de penetração no alimentador.

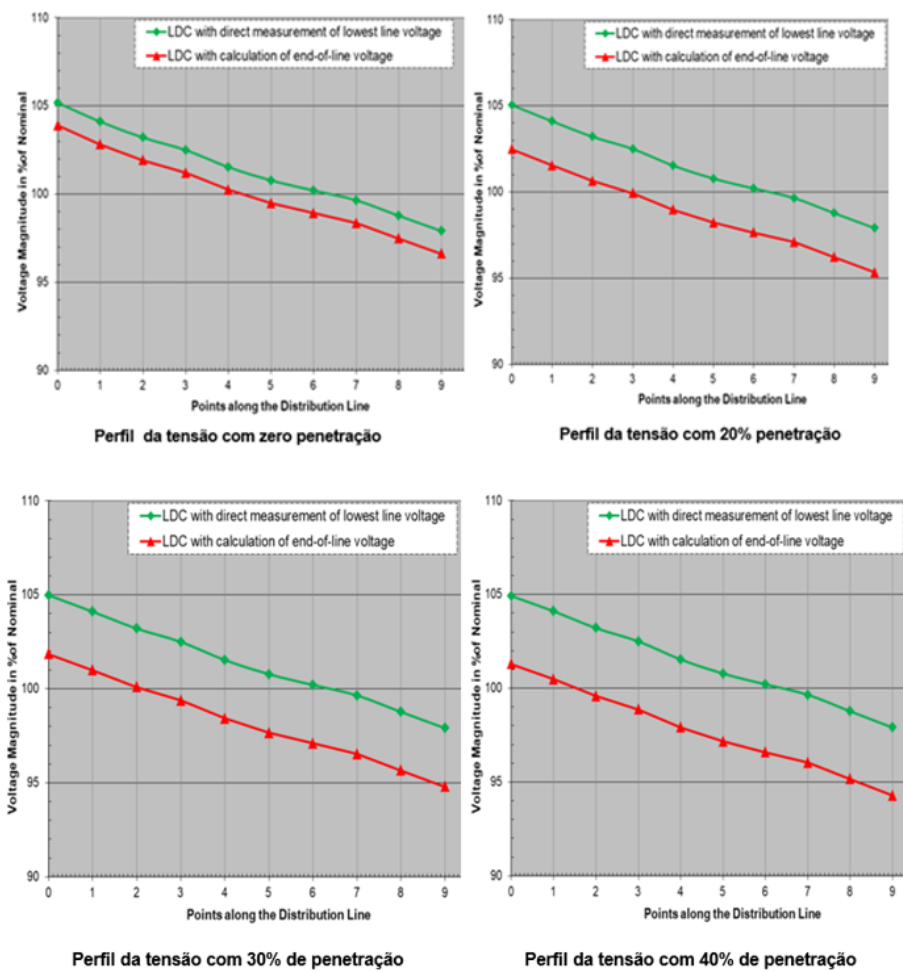


Figura 7 - Compensação de tensão tradicional versus remota no início da linha

A Fig. 8 demonstra os dois métodos de compensação considerando penetração de geração distribuída, mais próximo a metade da linha.



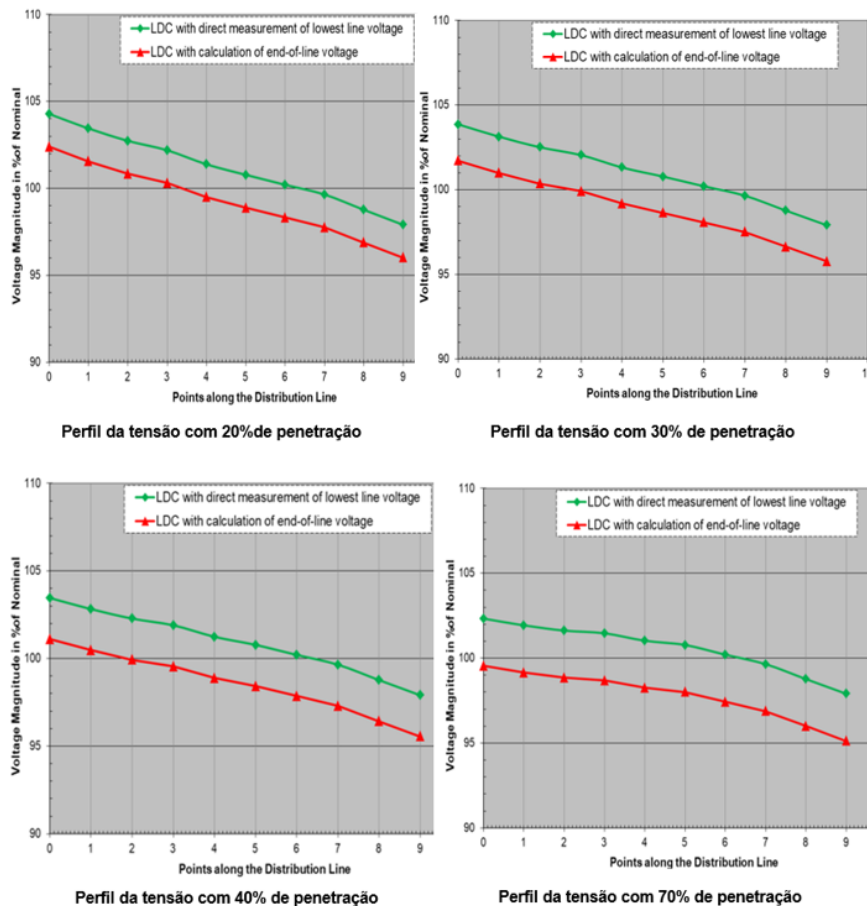


Figura 8 - Compensação de tensão tradicional versus remota no meio da linha

Observa-se com os resultados obtidos que a compensação estática de queda de tensão na linha, faz com que a tensão no centro de carga e fim da linha atinja valores de violação de subtensão, já a compensação remota assegura uma compensação adequada até o fim da linha e centro de carga. Para a condição de contribuição de geração distribuída para atender a demanda da carga alocada no início do alimentador verificou-se um maior impacto no erro da compensação estática, provocando uma violação de subtensão maior acentuada no fim da linha, já para a alocação no meio do circuito a violação ainda ocorre, porém de forma menos acentuada. Claramente que o nível de penetração de geração distribuída impacta diretamente no erro da compensação estática, erro este que não é apresentado na compensação remota, pois, possui uma retroalimentação de uma medição real no centro de carga.

#### Fluxo Reverso:

Ainda sobre o tema de compensação de queda de tensão, tem-se a questão de geradores distribuídos inverterem o fluxo de potência do circuito onde estão instalados em situações de alta penetração, gerando mais energia do que demandado pelas cargas próximas. Nesse cenário a compensação de queda de tensão no regulador de tensão sofre efeito inverso, ou seja, a tensão ao invés de ter uma queda, tem-se uma elevação, fazendo que o compensador de queda tradicional tenha um efeito inverso sobre compensação, e violando os níveis aceitáveis de tensão.

A Fig. 9 mostra o gráfico de compensador de queda para fluxo direto e inverso. Observa-se que se a corrente estiver no sentido inverso, a tensão compensada tem efeito negativo.



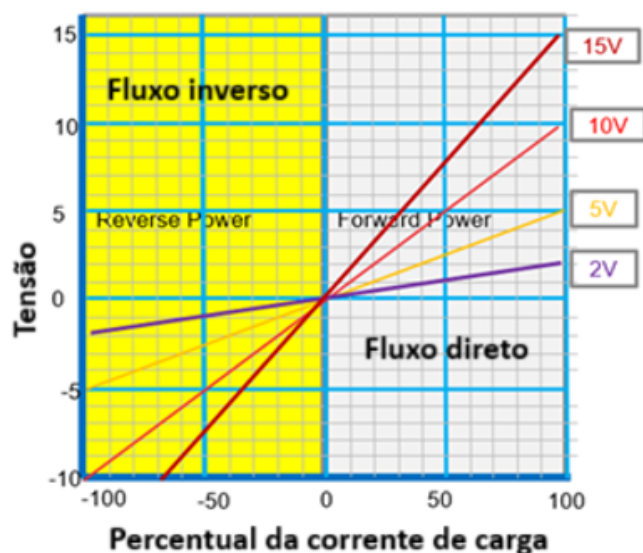


Figura 9 - Compensador de queda de tensão

Portanto, o controle do regulador de tensão ao detectar o fluxo inverso deve ter novos parâmetros para o compensador de queda de tensão, para adequar-se a nova realidade da rede. O grande desafio para essa questão é quando saber se é uma inversão de fluxo causada pela alta penetração de geração distribuída ou por uma manobra de alimentadores na rede de distribuição, onde-se o método de regulação tem propostas distintas conforme a causa da inversão do fluxo.

Os controladores de regulador de tensão possuem diversos métodos de regulação, como co-geração e bi-direcional. O método co-geração é aplicado quando a inversão de fluxo é causada por uma geração alocada no alimentador, já o bi-direcional é uma inversão de fluxo causada por uma manobra na rede elétrica. A proposta do modo co-geração é permitir a mesma orientação de regulação, ou seja, a regulação da carga, com permissão de parâmetros distintos, como por exemplo o compensador de queda de tensão. No modo bi-direcional a proposta é mudar o sentido de regulação, visto que a fonte da concessionária mudou de lado, estando conectada ao lado carga e não mais na bucha fonte do regulador, tendo dessa forma o foco da regulação a bucha fonte, permitindo também novos parâmetros de regulação porém no sentido fonte e não mais carga.

A grande questão é que atualmente as duas condições podem ocorrer em alimentadores que possuem geração distribuída e capacidade de manobra para uma fonte alternativa ou redundante. Dessa forma, não é possível pré definir o modo de operação em caso de detecção de fluxo reverso, pois, caso seja declarado um fluxo inverso por geração distribuída e a causa da inversão e por uma manobra o regulador tentara regular a fonte da concessionária, e evidentemente não terá sucesso, se perdendo na regulação e indo aos extremos da posição de regulação. O contrário também irá provocar os mesmos sintomas.

Devido a isso, desenvolveu-se um algoritmo capaz de detectar se a inversão de fluxo foi causada por uma co-geração/geração distribuída ou manobra na rede / bi-direcionalidade. Com isso a problemática de operações indevidas e perda da regulação é anulada.

O algoritmo denominado Smart Reverse Power, baseia-se na impedância equivalente de thevenin, posição de regulação do regulador e um delta de tensão após duas tentativas de comutação. Com base na retroalimentação desses dados e a variação delta de tensão o controle é capaz de autodeterminar se o fluxo inverso é causado por uma geração distribuída ou por uma manobra na rede, dessa forma, definindo de forma autônoma o método de operação para condição de fluxo reverso.

Realizou-se testes em campo em uma concessionária de energia elétrica no suldeste dos Estados Unidos da América. Avaliou-se diversos cenários, sendo esses testes realizados em um alimentador que permite uma alta penetração de geração distribuída e manobras de alimentadores com o intuito de validar os mais diversos cenários. Na maior parte da avaliação o tempo esteve nublado, porém houve dias de alta incidência solar, onde a geração distribuída excedeu carga, gerando o fluxo reverso no alimentador. Por fim, manobrou-se o alimentador com o intuito de a causa do fluxo reverso ser oriunda de uma mudança na fonte pelo lado da concessionária de energia.

O modo de controle foi definido como Smart Reverse Power, inicia a declaração ao detectar o fluxo reverso no modo Geração Distribuída, em seguida duas comutações são realizadas para calcular-se o delta de tensão, sendo a diferença da tensão medida antes e após a operação. Caso a tensão delta medida atinja 50% do valor de regulação esperado, então o modo manterá o modo na condição de Geração Distribuída, caso contrário, alterna para o modo de bi-direcional. Em resumo, o algoritmo com base na tensão delta e impedância equivalente define se a impedância de carga é regulável ou não, e com base nesse dado define o seu modo de operação na condição de fluxo reverso.

A Fig. 10 demonstra os resultados dos testes obtidos em campo. Observa-se que inicialmente o modo de regulação é o direto (Forward), no momento (1) a potência ativa passa a indicar fluxo reverso e o controle alterna para o modo geração distribuída (gd) e verifica se o delta de tensão é superior a 50% da faixa de regulação, confirmou-se que a carga é regulável e manteve-se no modo geração distribuída até a detecção do evento (2) para a condição direta novamente. No cenário (3) o controle alternou novamente para o modo geração distribuída e realizou duas comutações para o cálculo de delta de tensão, e não obteve-se uma regulação de 50% do valor esperado, dessa forma no momento (4) alternou automaticamente para o modo de bi-direcional (reverso), passando a regular o lado fonte do regulador, identificando que o fluxo reverso foi causado por uma manobra de alimentador e posteriormente o fluxo voltou a condição direta.

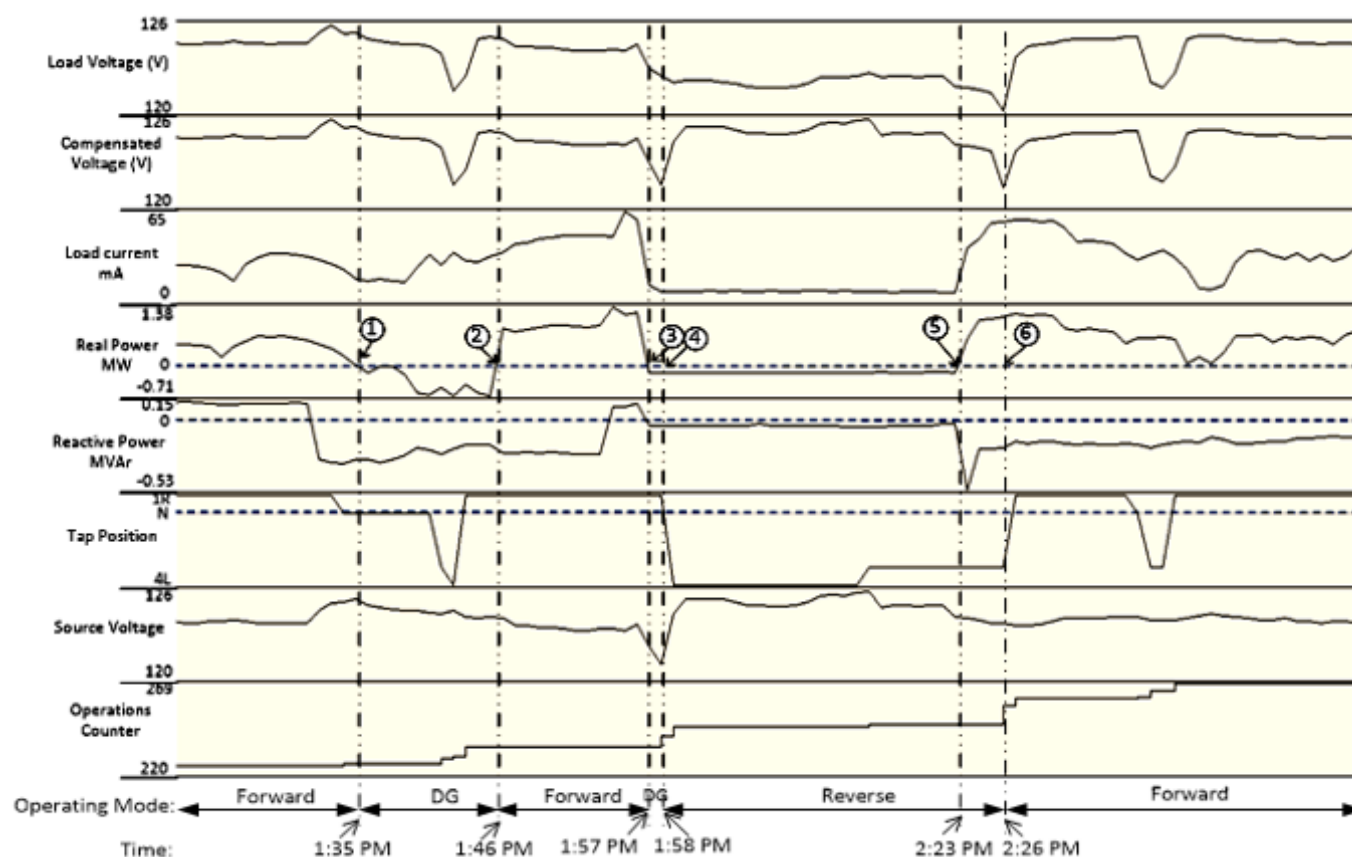


Figura 10 - Registro de operação do modo autodeterminar (Smart Reverse Power)

Os dados no registro como Load Voltage representa a tensão na carga, Compensated Voltage a tensão compensada, Load current a corrente de carga, Real Power a Potência ativa, Reactive Power a potência reativa, Tap position a posição de regulação, Source Voltage a tensão na bucha fonte do regulador e Operations Counters a quantidade de operações do comutador do regulador de tensão.

Observou-se que o controlador mudou corretamente os modos de operação durante os testes em campo, validando os diversos cenários, incluindo a autodeterminação da causa do fluxo reverso, sendo esse recurso de grande benefício para solucionar os desafios que a alta penetração de geração distribuída traz para a regulação de tensão no sistema de distribuição.

### **3. Conclusão**

A regulação de tensão tem se tornando um desafio no sistema de distribuição de energia, devido a alocação de geração distribuídas de forma massiva em alimentadores, ocasionando variações e violações de tensão na rede. Nesse trabalho observou-se alguns recursos e técnicas que podem amenizar esses efeitos e facilitar a regulação de tensão como a utilização de tempo inverso ao tradicional tempo definido para a resposta de operação dos reguladores, a aplicação de compensação de queda de tensão remota evitando violações de tensão no centro de carga assim como em toda a linha, diferentemente da proposta tradicional de compensação com base na corrente circulante pelo regulador. Por fim, verificou-se a implementação real de um algoritmo capaz de autodeterminar o modo de operação do regulador em caso de fluxo inverso, dessa forma evitando que o regulador opere de forma segura em caso de inversão de fluxo por geração distribuída ou manobra de alimentador, evitando que a regulação se perca e impactos na tensão do sistema, na avaliação em campo detectou-se que o regulador teve sucesso na autodeterminação de sua operação, regulando a carga conforme desejado.

### **4. Referências bibliográficas**

- DUGAN, Roger C., MCGRANAGHA, Mark F., SANTOSO, Surya, BEATY, H. Wayne. Electrical Power Systems Quality, Second edition. Mc Graw Hill.
- IEEE/IEC C57.15-2017 International Standard - Power Transformer - Part 21: Standard requirements, terminology and test code for step-voltage regulators.
- YALLA, Murty. Distributed Energy Resources: Operations, Protection & Control. Beckwith Electric Annual Seminar, Largo, 2022.
- IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.