



REGULAÇÃO ATIVA DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Tema: Qualidade de Energia

Autores: Yago Araújo dos Santos

Co-Autores: Luiz Eduardo Borges da Silva, Erik Leandro Bonaldi, Robson Bauwelz Gonzatti, Rondineli Rodrigues Pereira, Wisam Ali Mohamad Issa, João Gabriel Luppi Foster, Pablo Senna Oliveira, Henrique Parreiras Couto

Empresa: PS Soluções Indústria, Comércio, Representações e Consultoria Ltda.

Resumo

O aumento de Geração Distribuída (GDs) nas redes de distribuição em 13,8 kV, principalmente com a disseminação da geração fotovoltaica, tem produzido problemas nos níveis de tensão dos ramais do Sistema de Distribuição de Energia (SDE). Este fenômeno é provocado pelo fluxo reverso de potência. Por este motivo, os índices de qualidade de energia, em relação às faixas de tensão, encontram-se superiores ao esperado, podendo criar danos aos clientes e ao próprio SDE. Com isso, a concessionária fica sujeita a sofrer com a imposição de multas significativas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A proposta do trabalho é substituir os métodos tradicionais de compensação de potência reativa, com componentes passivos, por compensadores ativos. O dSTATCOM têm sido largamente aplicado juntamente com as GDs. Ele auxilia na minimização dos problemas ocasionados pela intermitência na produção de energia dessas usinas, possibilitando cada vez mais a integração de GDs ao SDE.

1. Introdução

A transição para a rede do futuro ou rede de distribuição inteligente (do Inglês, “*Distribution Smart Grid*”) vêm acontecendo devido aos avanços na eletrônica de potência (XU et al., 2023). Neste contexto, observa-se a grande quantidade de conversores de potência compondo o sistema elétrico, atuando como cargas não lineares, possibilitando a Geração Distribuída (GD) e também aplicados para melhorar a qualidade da energia elétrica.

A geração distribuída compreende usinas eólicas, mini e micro usinas fotovoltaicas. A minigeração possui potência instalada maior que 75 kW até 5 MW. Agora, a microgeração são usinas com potência instalada abaixo de 75 kW (ANEEL, 2024). No Brasil, entre o período de 2015 até agosto de 2024, a energia fotovoltaica aumentou exponencialmente como mostra as Figura 1, atingindo aproximadamente 33,4 GW ao final desse período (ABSOLAR, 2024).



Figura 1 – Evolução exponencial das GDs no Brasil. Adaptado de (ABSOLAR, 2024).

Diante da alta penetração de GDs no sistema de distribuição, principalmente sistemas fotovoltaicos, as exigências e pré-requisitos para integração desse tipo de fonte renovável está cada vez maior. Conforme Arritt e Dugan (2011), as principais preocupações estão relacionadas ao aumento e a regulação de tensão; flutuações de tensão; impacto na análise de faltas, localização e eliminação; o transformador de acoplamento; harmônicos e desequilíbrio.

A sobretensão nos pontos de acoplamento de GDs pode ser ocasionada pelo montante de usinas conectadas ao sistema, bem como pela intermitência da geração. Se houver muita geração e cargas insuficientes para consumir a potência ativa gerada, tem-se sobretensão, provocada pelo fluxo reverso de carga (HOLGUIN; RODRIGUEZ; RAMOS, 2020). Os sistemas fotovoltaicos estão sujeitos a interferência do tempo. Quando uma nuvem passageira ofusca a incidência solar, a curva de geração diminui, minutos depois, após a passagem completa da nuvem, a curva de geração é reestabelecida. Este transiente, causa variações de tensão no sistema, exigindo dos reguladores de tensão uma resposta a subtensão. Então, os reguladores atuam durante a subtensão momentânea e aumentam a tensão do sistema. Todavia, após o reestabelecimento da curva de geração, a tensão aumenta abruptamente e viola os níveis de tensão. Os reguladores de tensão mais comuns na distribuição são os bancos de capacitores e OLTC (do Inglês, “On-Load Tap Changer”). Eles não são suficientemente rápidos para acompanhar os transitórios da curva de geração de um sistema fotovoltaico, por este motivo, acabam contribuindo com a sobretensão durante alguns segundos, para depois serem retirados de operação (ARRITT; DUGAN; 2011). A Figura 2 apresenta a curva de tensão da rede com geração fotovoltaica frente a regulação de tensão.

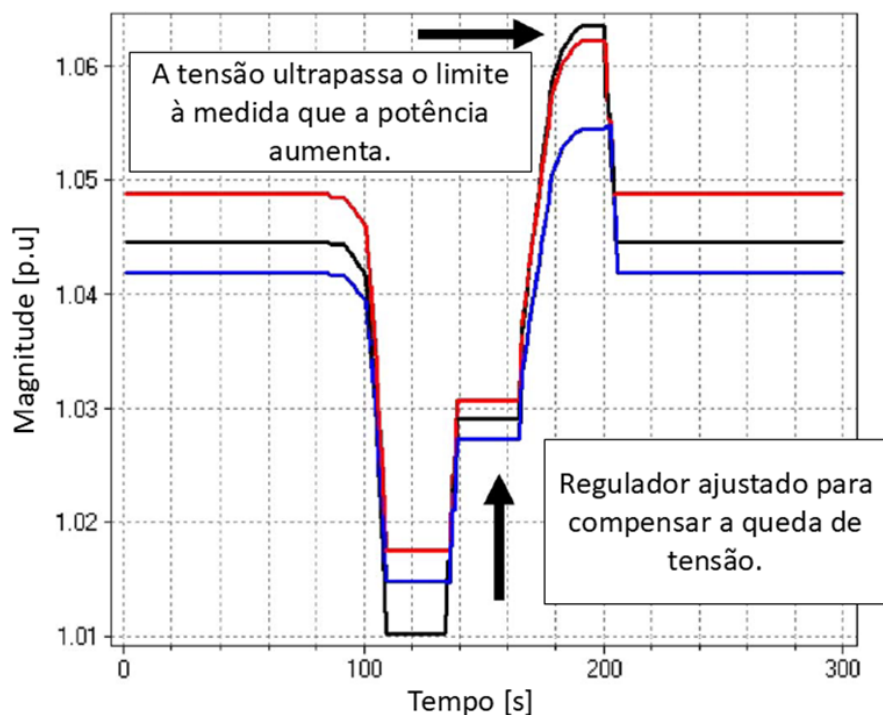


Figura 2 - Resposta simulada de um regulador de tensão frente a curva de tensão da rede afetada por GDs. Adaptada de (ARRITT; DUGAN; 2011).

Este trabalho propõe a substituição dos reguladores de tensão passivos ou com atuação mecânica, por reguladores de tensão ativos, alocados em pontos de alta incidência de GDs. O dSTACOM é um equipamento capaz de realizar a regulação tensão mais rapidamente do que os reguladores mencionados anteriormente (MISHRA; KARTHIKEYAN; 2009) e (ECHAVARRÍA; CLAUDIO; COTOROGEA, 2007). Este equipamento é utilizado para compensação de potência reativa, como foco no suporte de tensão (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

2. Desenvolvimento

O dSTATCOM (do Inglês, “*Distribution Static Synchronous Compensator*”) é um compensador estático síncrono aplicado diretamente para a distribuição. A Figura 3 mostra a estrutura básica do equipamento, que é composta pelo VSC (do Inglês, “*Voltage Source Converter*”), elo CC e controle (MA et al., 2015).

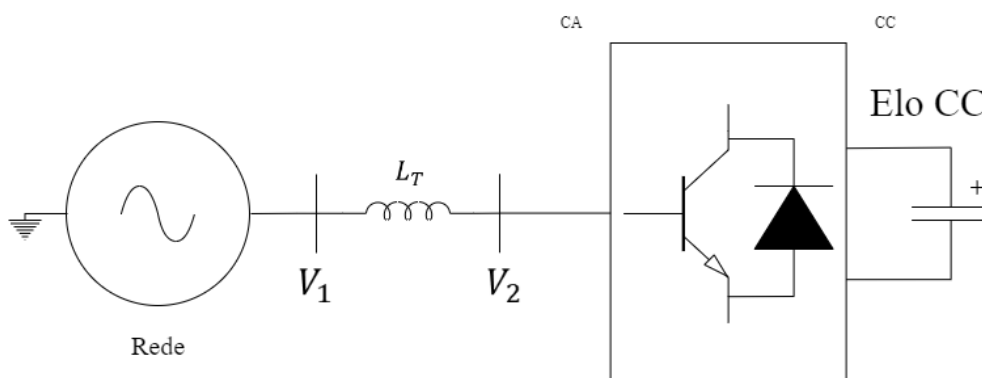


Figura 3 – Estrutura básica de um dSTATCOM.

O circuito VSC é composto por IGBTs (do Inglês, "*Insulated-Gate Bipolar Transistor*") que são semicondutores de potência que suportam elevadas correntes e podem ser chaveados em altas frequências. O elo CC opera como suporte de tensão e deve ser controlado para manter uma tensão pré-definida e estável. O controle ou modulação são necessários para realizar o chaveamento dos IGBTs, a mais comum é a (do Inglês, "*Pulse-Width Modulation - PWM*"). A Eq. (1) define a tensão de linha na saída do conversor trifásico. O princípio de funcionamento pode ser entendido analisando o diagrama unifilar do equipamento, apresentado na Figura 4. Ele funciona como uma fonte de corrente controlada por tensão que é conectada em paralelo com a rede. O modo operativo é determinado pela corrente que circula entre o equipamento e o alimentador. A corrente existente entre a fonte e equipamento é definida pela Eq. (2). A impedância total (5K entre o alimentador e conversor é a soma das impedâncias da linha (5K55V5555K55V5555K55V55a5_5\).

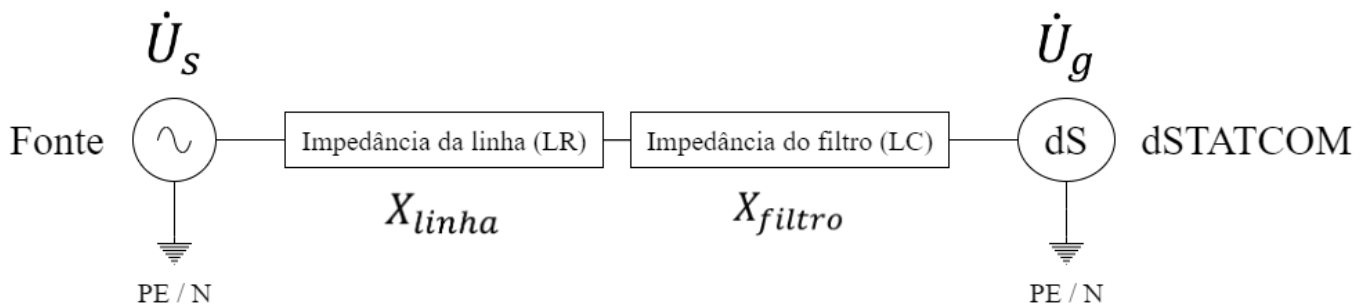


Figura 4 – Diagrama unifilar do dSTATCOM conectado na fonte.

$$U_g = \left(\frac{3}{2} \right) U_{cc} \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$I = (U_s - U_g) / X \quad (2)$$

Onde:

U_g – Tensão de linha lado CA do conversor;

» Índice de modulação referente ao PWM;

U_{cc} – Tensão sobre o elo CC;

ω – Frequência angular da rede;

ϕ – Diferença de fase entre U_s e U_g ;

I – Corrente CA entre o alimentador e conversor;

U_s – Tensão de linha do alimentador;

X – Impedância entre o alimentador e conversor.

Na condição operativa ideal, este equipamento não absorve potência ativa, o que significa que o intercâmbio de potência entre a rede e dSTATCOM é puramente de potência reativa. Na prática, o equipamento necessita de potência ativa para manter o elo CC estável e para suprir as perdas existentes relacionadas a linha elétrica e principalmente ao chaveamento dos IGBTs.

A operação é diretamente dependente da tensão existente em U_s e U_g . Quando $|U_s| > |U_g|$, a corrente I tem caráter indutivo, pois ela está atrasada em 90° de U_g . Nesta condição, a direção do fluxo de potência acontece da rede para o dSTATCOM, pois absorve potência reativa indutiva do sistema, atuando como um indutor. Agora, se $|U_s| < |U_g|$, a corrente I tem caráter capacitivo, pois ela está adiantada em 90° de U_g . Nesta condição, a direção do fluxo de potência acontece do dSTATCOM para a rede, pois o equipamento prove potência reativa capacitiva ao sistema, atuando como um capacitor. Por fim, se $|U_s| = |U_g|$ não haverá intercâmbio de energia e $I = 0$. Basicamente, ao variar U_g é possível ajustar a direção e o montante de potência reativa (WATANABE; AREDES, 1998). A potência reativa é determinada pela Eq. (3).

A potência ativa é determinada pela Eq. (4). Se $0^\circ < \phi < 90^\circ$ o dSTATCOM estará absorvendo potência ativa da rede. Entretanto, se $-90^\circ < \phi < 0^\circ$, o dSTATCOM estará fornecendo potência ativa para a rede. Então, quando se fala sobre a estabilidade de tensão do elo CC é exatamente o ϕ que está sendo controlado, pois ele representa a diferença de fase entre U_s e U_g (WATANABE; AREDES, 1998).

$$Q = U_s (U_s - U_g \cos \phi) / X \quad (3)$$

$$P = (U_s U_g \sin \phi) / X \quad (4)$$

Onde:

Q – Potência reativa;

P – Potência ativa;

U_s – Módulo da tensão de linha do alimentador;

U_g – Módulo da tensão de linha lado CA do conversor;

X – Módulo da impedância entre o alimentador e conversor;

ϕ – Diferença de fase entre U_s e U_g .

SUPORTE DE TENSÃO

A tensão imposta pelo conversor VSC na frequência fundamental (ω), é capaz de produzir correntes reativas de perfil indutivo ou capacitivo. Isto demonstra a flexibilidade deste tipo de conversor em realizar a compensação de potência reativa, visto que desempenha o papel de componentes passivos como indutores e capacitores. Desta maneira, o equipamento atua diretamente no nível de tensão da rede, diminuindo-o ou aumentando-o, conforme a direção do fluxo da corrente entre a rede e o dSTACOM. Esta funcionalidade é definida como suporte ou regulação de tensão. No Brasil, os níveis de tensão adequados para a manutenção da qualidade da energia elétrica do sistema são definidos no PRODIST. A Tabela I apresenta as faixas de tensão admitidas.

Tabela I – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2,3 kV (220/127). Adaptado de (ANEEL, 2025).

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

O comportamento do conversor depende da diferença de fase entre a tensão e corrente imposta pelo mesmo. Quando a corrente está adiantada em relação a tensão, o equipamento atua como um capacitor como mostra a Figura 5(a). Agora, se a corrente está atrasada em relação a tensão, o equipamento atua como um indutor como mostra a Figura 5(b).

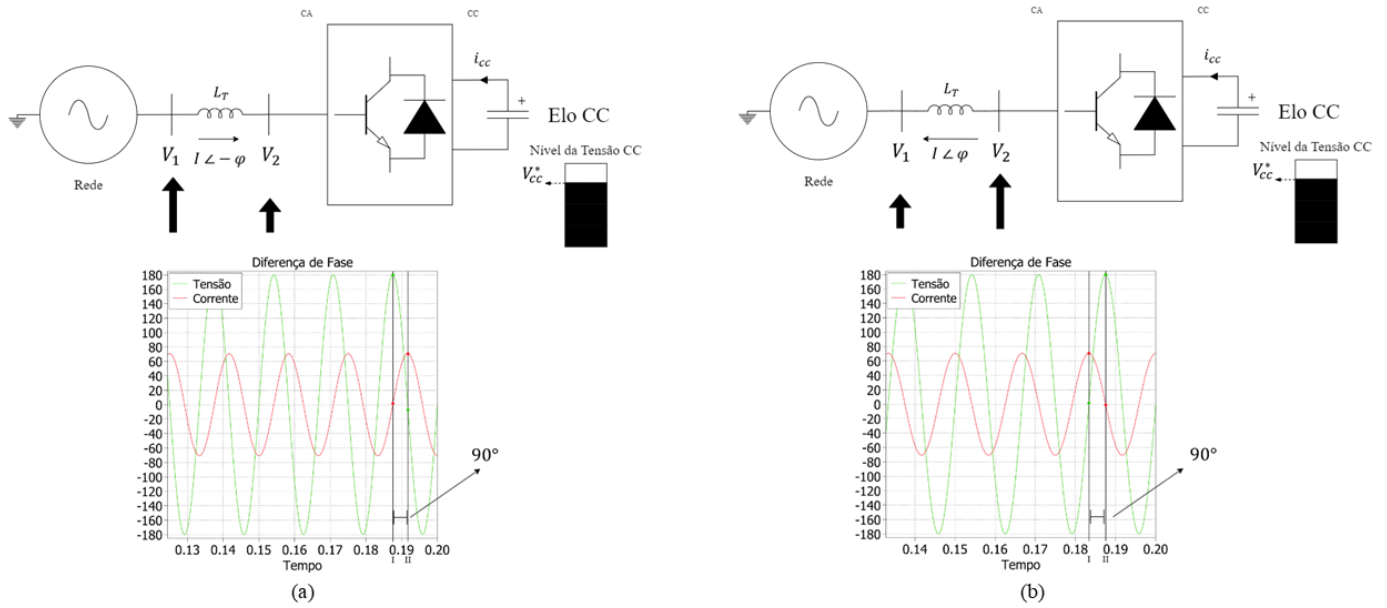


Figura 5 – (a) dSTACOM provendo potência reativa capacitiva ao sistema. (b) dSTATCOM absorvendo potência reativa indutiva do sistema.

Apesar da malha de controle para o suporte de tensão não estar diretamente acoplada ao controle da tensão no elo CC, ela depende diretamente do nível de tensão existente no capacitor que o compõe. Então, para que o conversor VSC seja capaz de absorver ou injetar potência reativa na rede, o nível de tensão no elo CC deve ser mantido na referência (V_{cc}^*) pré-estabelecida, que deve ser maior que a tensão de pico (V_p) em relação a tensão de linha da rede (V_L).

A malha de controle, definida na Figura 6, mostra como é realizado o suporte de tensão por meio da compensação de potência reativa. Ela é composta por controladores proporcionais integrais (PIs), filtros passa-baixas (FPB), sinais de tensão e corrente instantâneos e limitadores. Os sinais de tensão impostos pelo conversor estão sincronizados com a rede, mediante a aplicação do algoritmo PLL, o qual fornece as componentes de eixo direto (V_d) e quadratura (V_q) em relação a tensão trifásica da rede. A corrente trifásica medida na saída do conversor é submetida a transformação síncrona, disponibilizando as componentes de eixo direto (I_d) e quadratura (I_q). A primeira componente é utilizada na regulação de tensão do elo CC, enquanto a segunda componente no controle da corrente reativa. Estas componentes são filtradas pelos filtros FPB, visando eliminar os harmônicos de alta frequência provenientes do chaveamento dos semicondutores. Assim, as componentes filtradas são renomeadas por V_d , I_d e I_q .

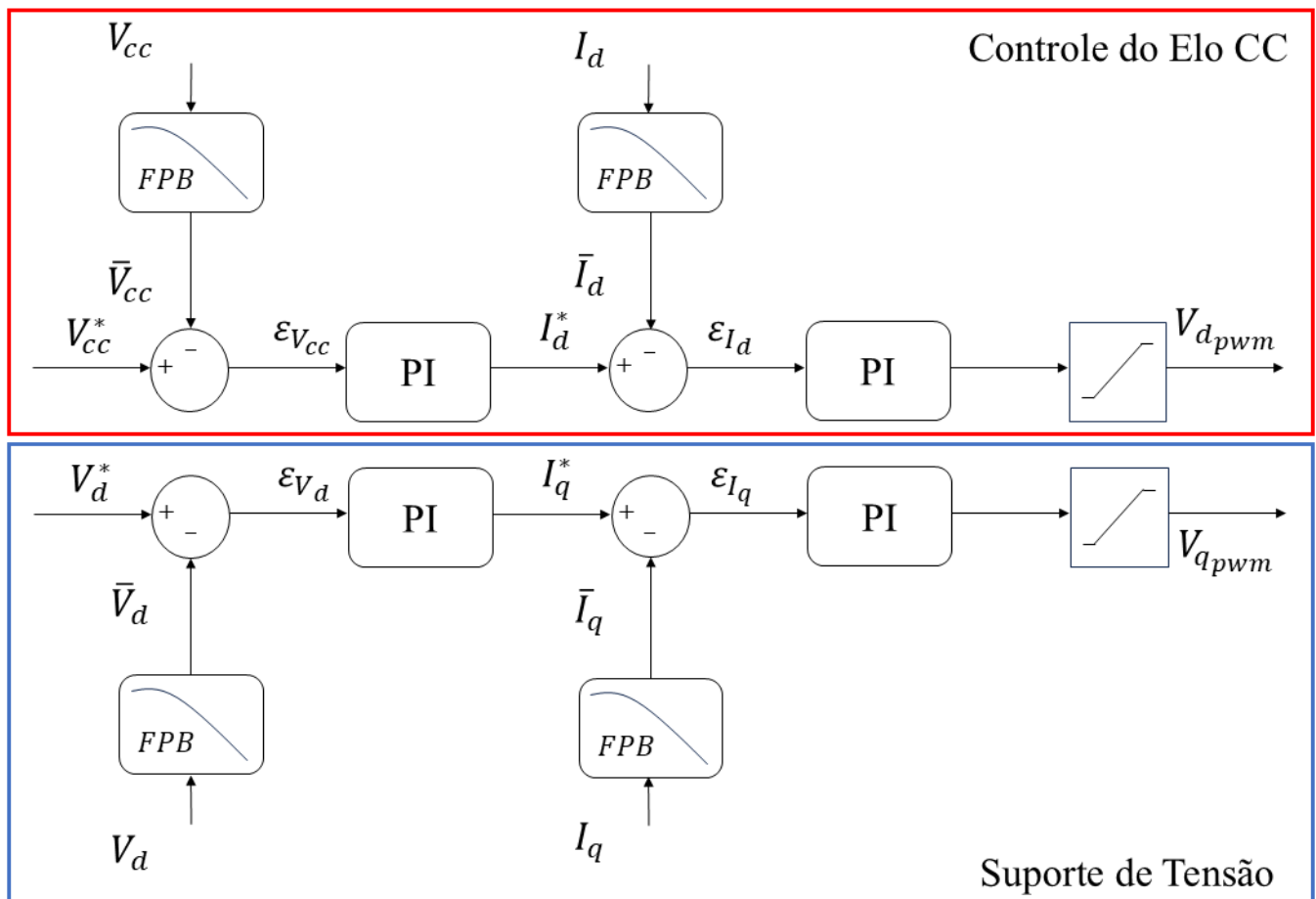


Figura 6 – Malha de controle completa na sequência positiva.

Inicialmente, realiza-se a comparação entre o sinal de referência (V_d^*), que é o valor de pico da tensão nominal da rede, com o sinal medido (V_d). O resultado desta comparação ou erro (p) alimenta o primeiro controlador proporcional integral (PI) desta malha de controle. A saída do primeiro PI gera uma referência de corrente (I_q^*), que é a quantidade de corrente reativa injetada pelo dSTACOM para regular a tensão da rede. Ela é comparada com o valor de I_q . Por fim, como resultado da diferença entre I_q^* e I_q obtém-se a entrada do segundo PI ou erro (q). A saída deste PI é limitada para evitar a saturação do sinal modulante e assim ser imposto pelo conversor através da modulação PWM.

Conforme foi mencionado anteriormente, a malha de controle para o suporte de tensão envolve a malha de controle da tensão no elo CC. Com a união das duas malhas de controle, tem-se a malha de controle na sequência positiva, onde os valores da parcela ativa (I_d) e reativa da corrente (I_q) são controlados por referências de tensão. Os sinais modulantes gerados por cada malha de controle são enviados a transformada síncrona inversa e posteriormente divididos por V_{cc}^* . Sequencialmente, são destinados à modulação PWM. A Figura 7 apresenta a reconstituição dos sinais através das mudanças de coordenadas ($dq0' \rightarrow abc$).

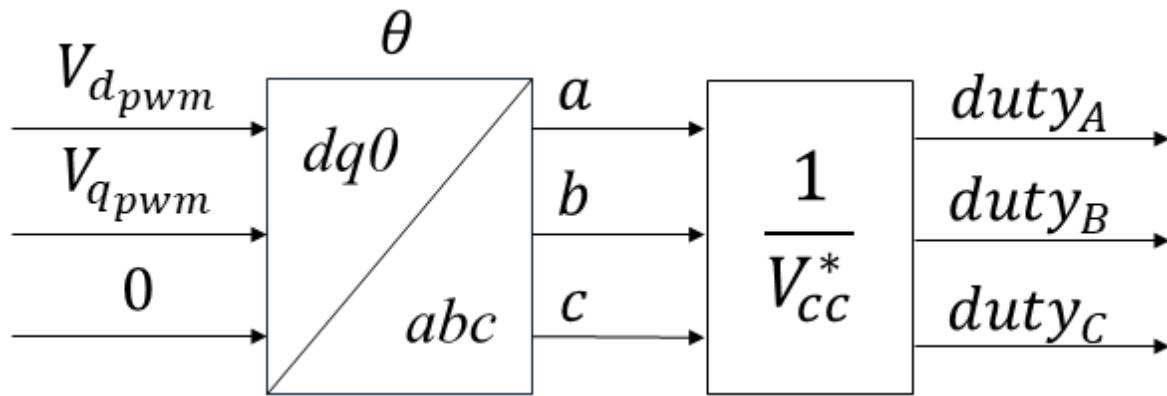


Figura 7 – Sinais modulantes destinados ao PWM.

SISTEMA TESTE

O sistema implementado em simulação é composto pela fonte de alimentação, carga trifásica equilibrada, usinas fotovoltaicas e dSTATCOM como mostra a Figura 8. O alimentador trifásico é equilibrado e simétrico, pois disponibiliza as tensões de linha em 220 V e tensões de fase 127 V na frequência de 60 Hz. Neste circuito de distribuição foram dispostas micro usinas fotovoltaicas monofásicas de mesma potência.

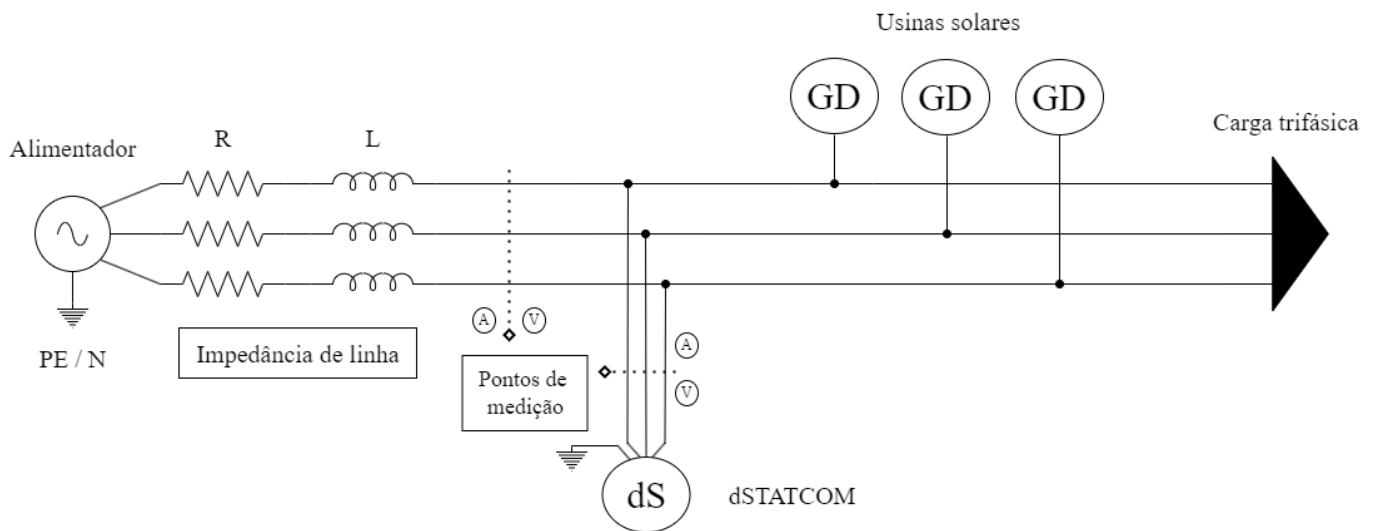


Figura 8 – Sistema de distribuição simplificado para teste do dSTACOM.

A topologia utilizada para compor o dSTATCOM consiste de um conversor VSC trifásico, formado por dois semicondutores de potência (IGBTs) em cada perna, sendo conectados em paralelo entre si e ao capacitor do elo CC. Com isso, tem-se uma topologia de quatro pernas e dois níveis. A Figura 9 apresenta detalhadamente esta topologia.

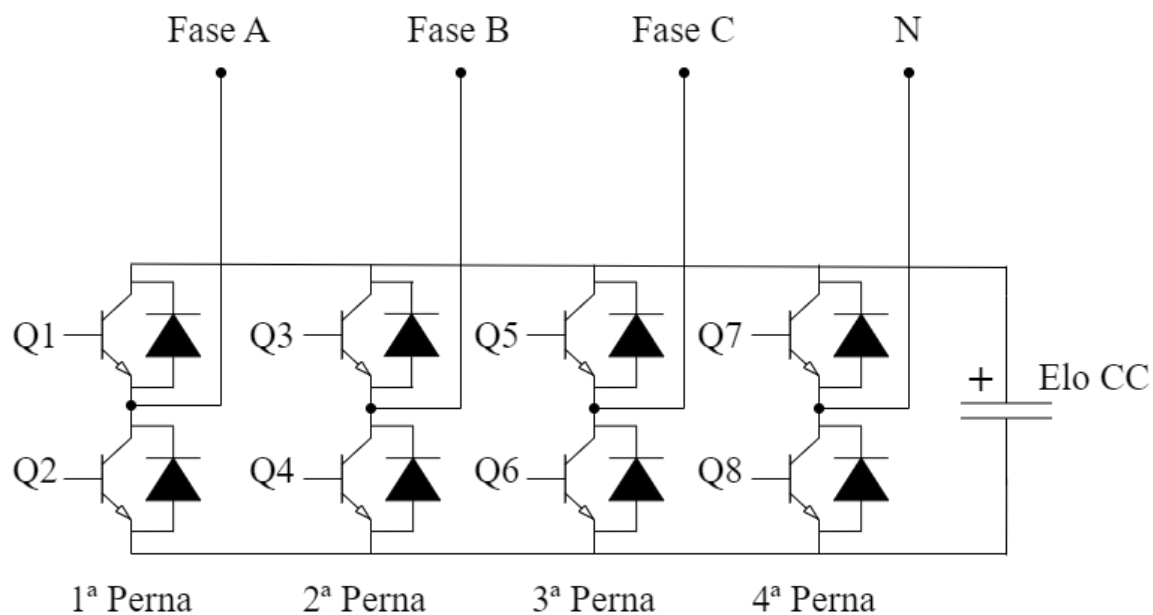


Figura 9 – Conversor VSC trifásico de quatro pernas.

Na saída do conversor foi disposto um filtro indutivo-capacitivo (LC) para minimizar as frequências de chaveamento nos sinais de tensão e corrente. Ainda na Figura 8 estão dispostos os pontos de medição dos sinais de tensão (V) e corrente (A), os quais são monitorados na entrada do alimentador e na saída do dSTACOM. A Tabela II mostra os parâmetros adotados na simulação.

Tabela II – Parâmetros de simulação.

Características Elétricas	
Alimentador	
Tensão F-F	220 V
Tensão F-N	127 V
Frequência	60 Hz
Impedância da Linha	
R	0,09 Ω
L	730 μ H
X / R	3,05
dSTACOM	
Potência	100 kVA
Filtro (LC)	
L	10 mH
C	25 μ F
Frequência de chaveamento	15 kHz
Banco equivalente de capacitores (Elo CC)	7050 μ F
MicroGDs	
GD – Fase A	10 kW
GD – Fase B	10 kW
GD – Fase C	10 kW
Carga Trifásica	
Potência	16 kVA

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema de teste foi elaborado para permitir a verificação operativa do dSTACOM com os controles previamente implementados. Os cenários operativos consistem em mostrar o equipamento realizando a regulação de tensão. Por este motivo, criou-se três cenários de simulação. O primeiro cenário apresenta uma subtensão, o qual foi provocado ao sistema por uma carga linear indutiva. O segundo cenário mostra uma sobretensão. Esta foi produzida por usinas fotovoltaicas conectadas ao barramento. O terceiro cenário consiste na junção das cargas lineares indutivas e usinas fotovoltaicas. Neste último caso, também é possível perceber uma sobretensão indesejada no sistema.

Cenário 1

A carga trifásica é responsável por produzir um subtensão no sistema de distribuição simplificado, como mostra a Figura 10. Neste caso, o dSTATCOM deve ser aplicado para injetar corrente reativa capacitiva, tendo vista a correção do nível de tensão da rede. A Figura 11 mostra as tensões e corrente medidas na entrada do alimentador. Embora o dSTATCOM esteja conectado na rede, ele está em modo flutuação. Neste modo não há intercâmbio de potência entre a rede o equipamento. Com isso, o subtensão é evidenciado.

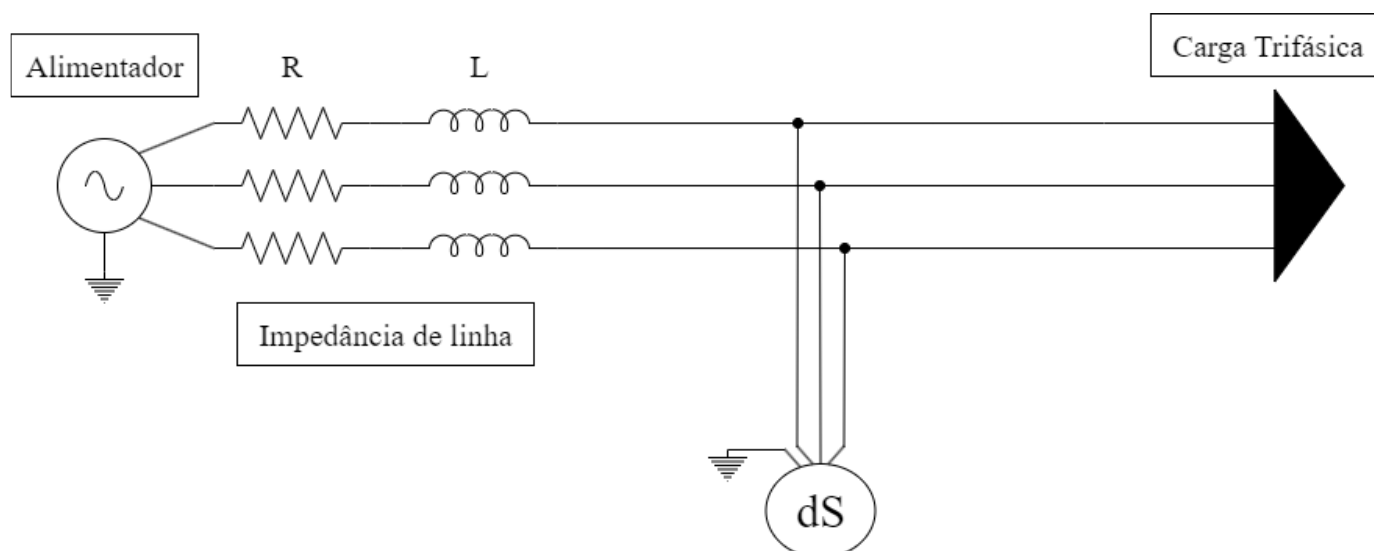


Figura 10 – Sistema de distribuição simplificado com apenas a carga trifásica.

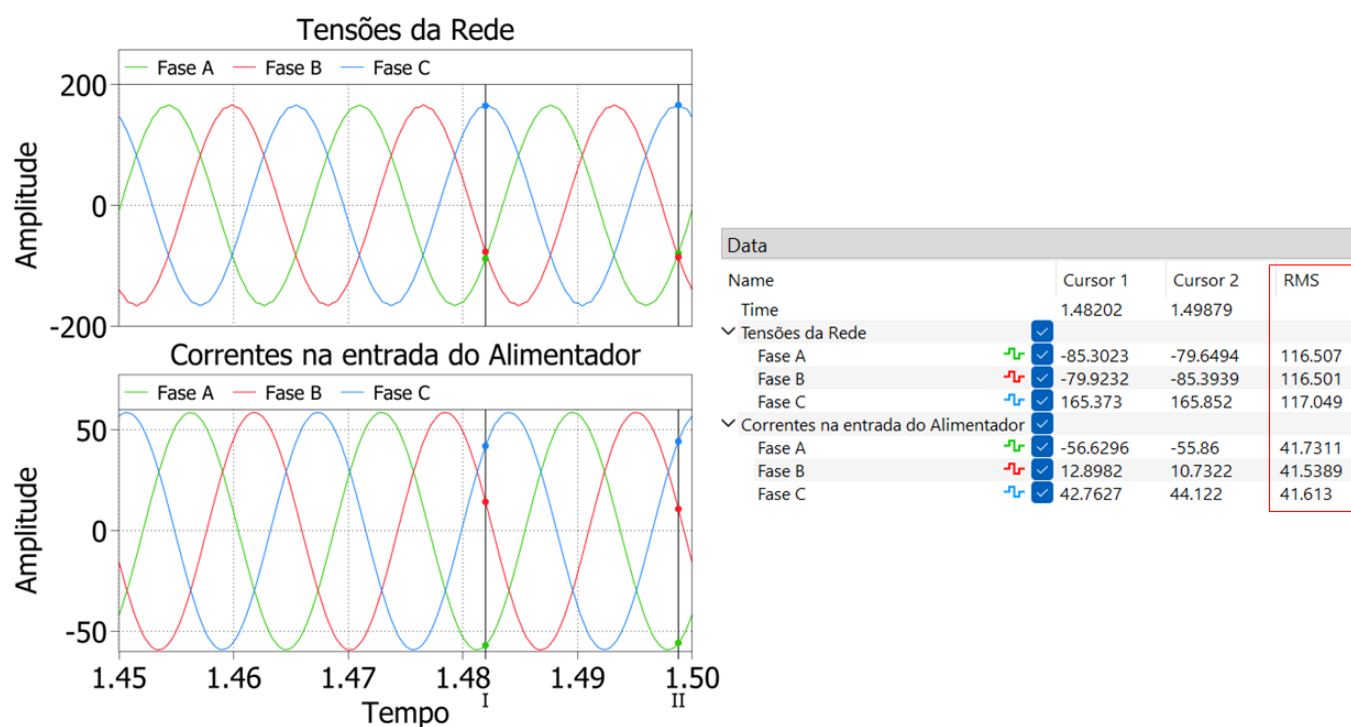


Figura 11 – Subtensão produzido pela carga trifásica.

Agora, com o dSTATCOM injetando corrente reativa capacitiva na rede, as tensões do sistema tendem a referência que é de 180 V de pico ou 127 V RMS. A Figura 12 mostra os sinais de corrente e tensão medidos na entrada do alimentador.

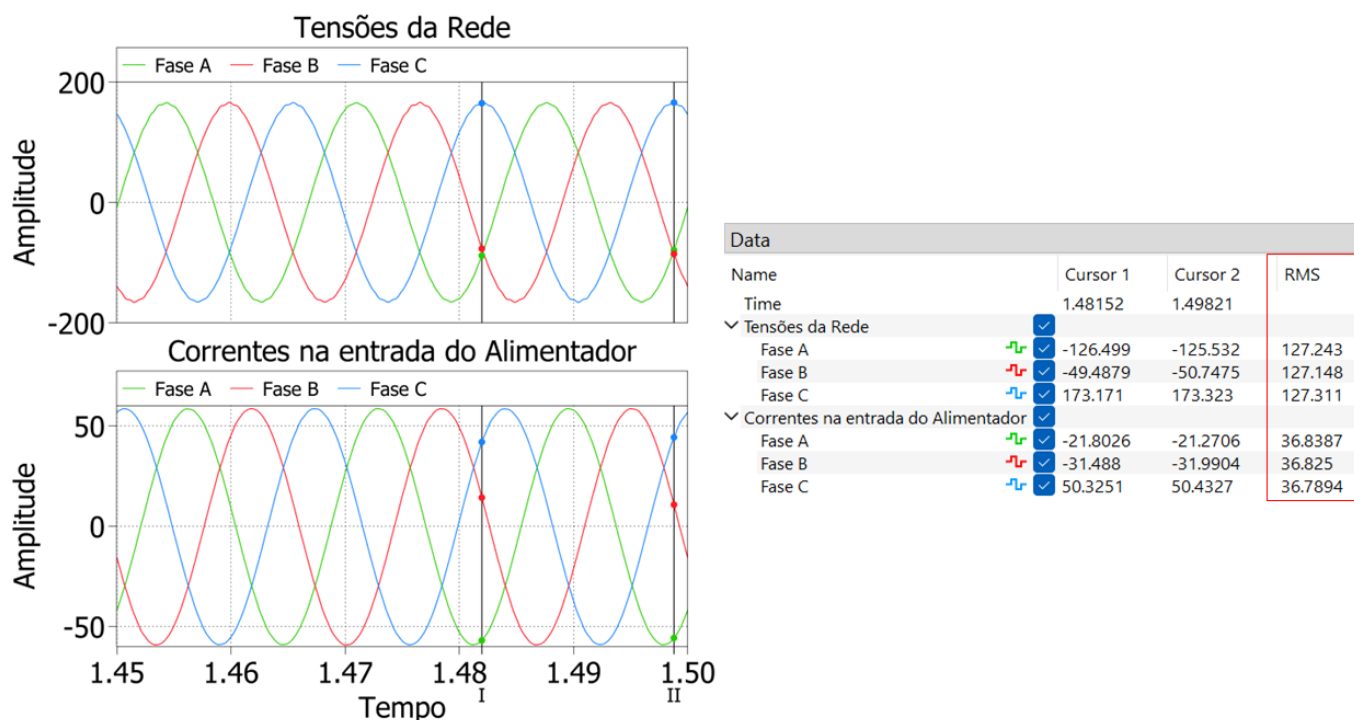


Figura 12 – Sinais de tensão e corrente da rede após a regulação de tensão.

Cenário 2

As usinas fotovoltaicas monofásicas foram conectadas na rede de distribuição como mostra a Figura 13. Elas produzem uma sobretensão ao alimentador, devido ao fluxo de carga reverso. Deste modo, é necessário aplicar o dSTATCOM para injetar corrente reativa indutiva, tendo vista a correção do nível de tensão da rede. A Figura 14 mostra as tensões e correntes do alimentador com o dSTATCOM conectado à rede, mas no estado de flutuação.

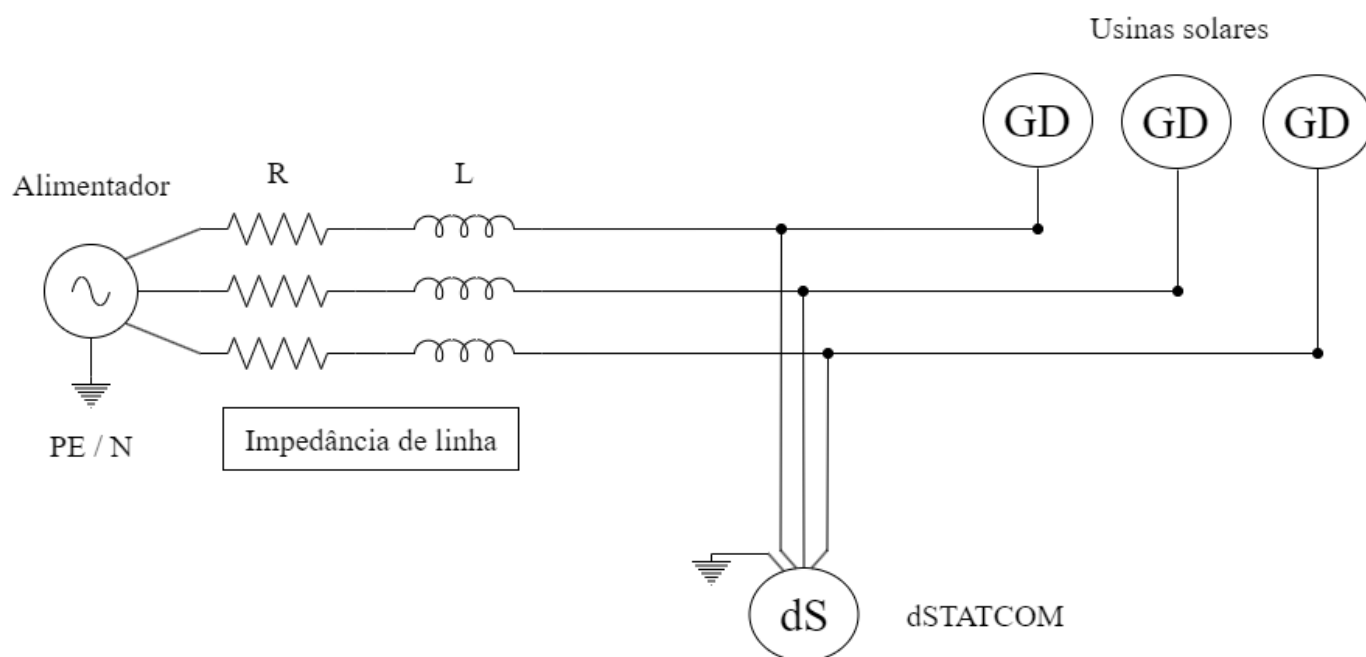


Figura 13 – Sistema de distribuição simplificado com apenas as GDs monofásicas.

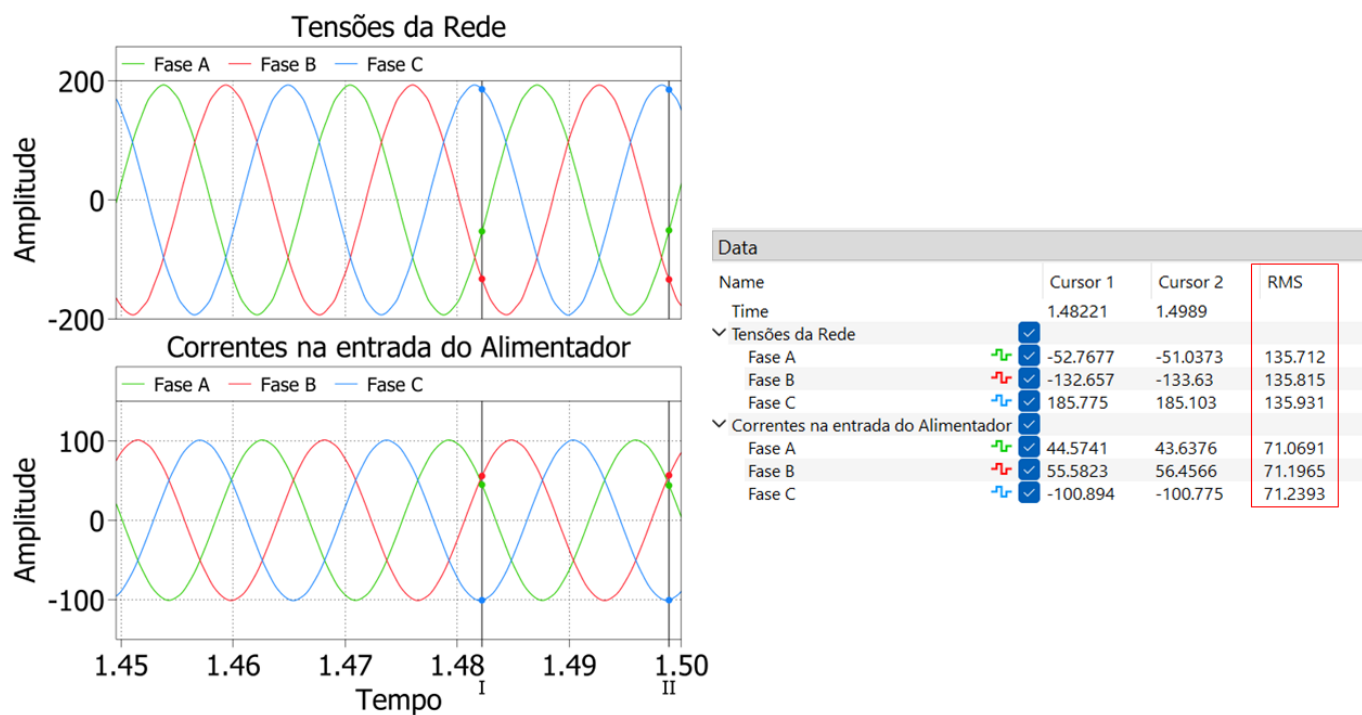


Figura 14 – Sobretensão produzida pelas GDs monofásicas.

Agora, com o dSTATCOM no estado de operação ativa, absorvendo corrente reativa indutiva da rede, as tensões do sistema tendem a referência que é de 180 V de pico ou 127 V RMS. A Figura 15 apresenta os sinais de tensão e corrente medidos na entrada do alimentador.

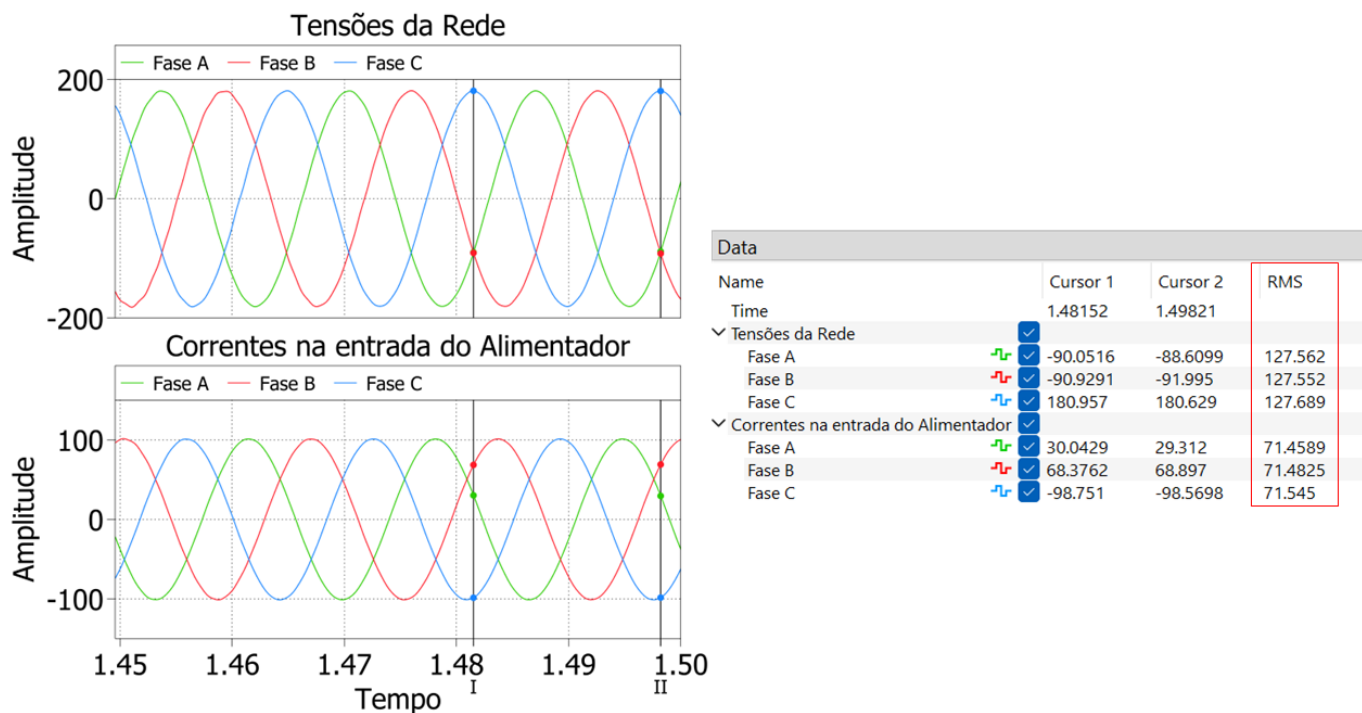


Figura 15 – Sinais de tensão e corrente da rede após a regulação de tensão.

Cenário 3

O último cenário de simulação consiste na junção da carga trifásica e das usinas fotovoltaicas monofásicas, como mostra a Figura 8. Neste cenário, a potência da carga trifásica foi alterado para produzir um cenário

comum nos sistemas de distribuição. Embora existam cargas de perfil indutivo que diminuem a tensão do alimentador, as usinas fotovoltaicas acabam injetando mais potência do que é consumido, provocando o fluxo reverso de carga e a sobretensão no alimentador.

Neste cenário, a potência da carga trifásica é 7,5 kVA. Com o dSTACOM no estado de flutuação, os sinais de tensão e correntes medidos na entrada do alimentador estão dispostos na Figura 16. Agora, no estado de operação ativa, o dSTATCOM realiza a regulação de tensão do sistema, como mostra a Figura 17.

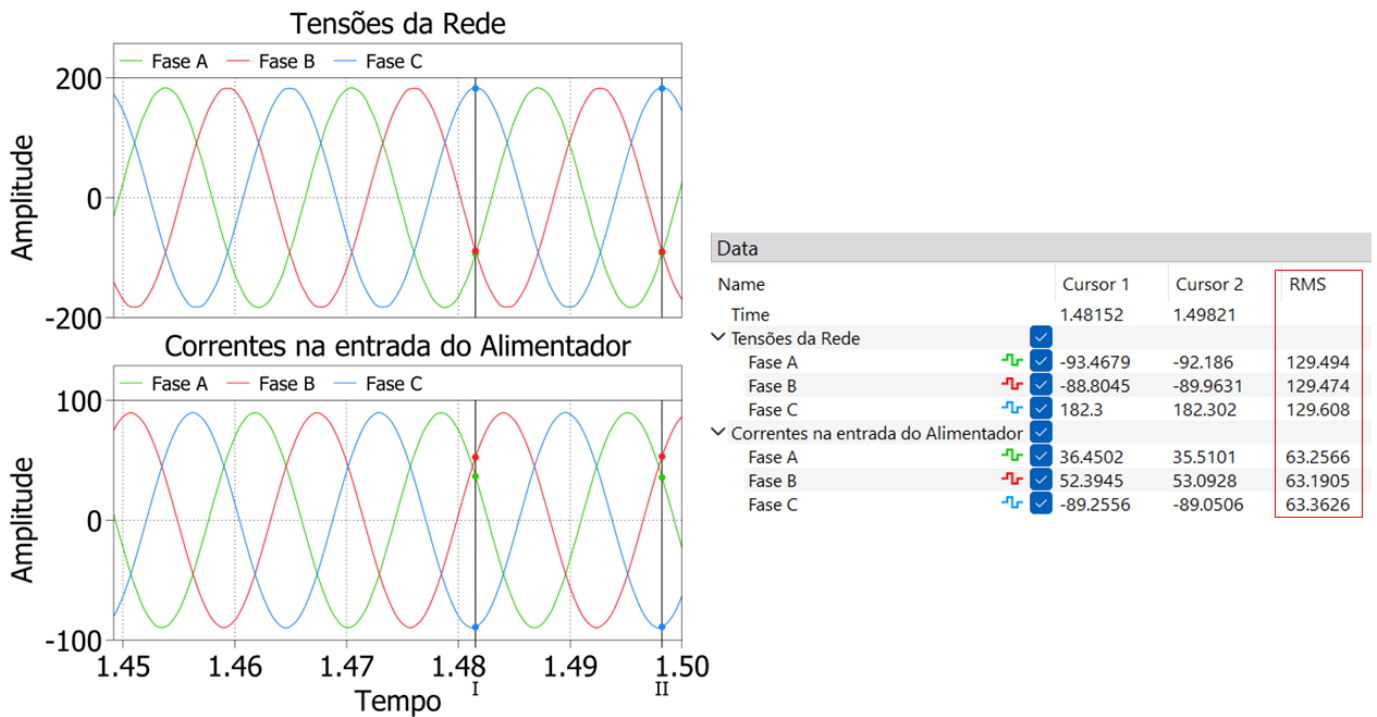


Figura 16 – Sobretensão produzida pelas GDs monofásicas, mesmo com a carga trifásica.

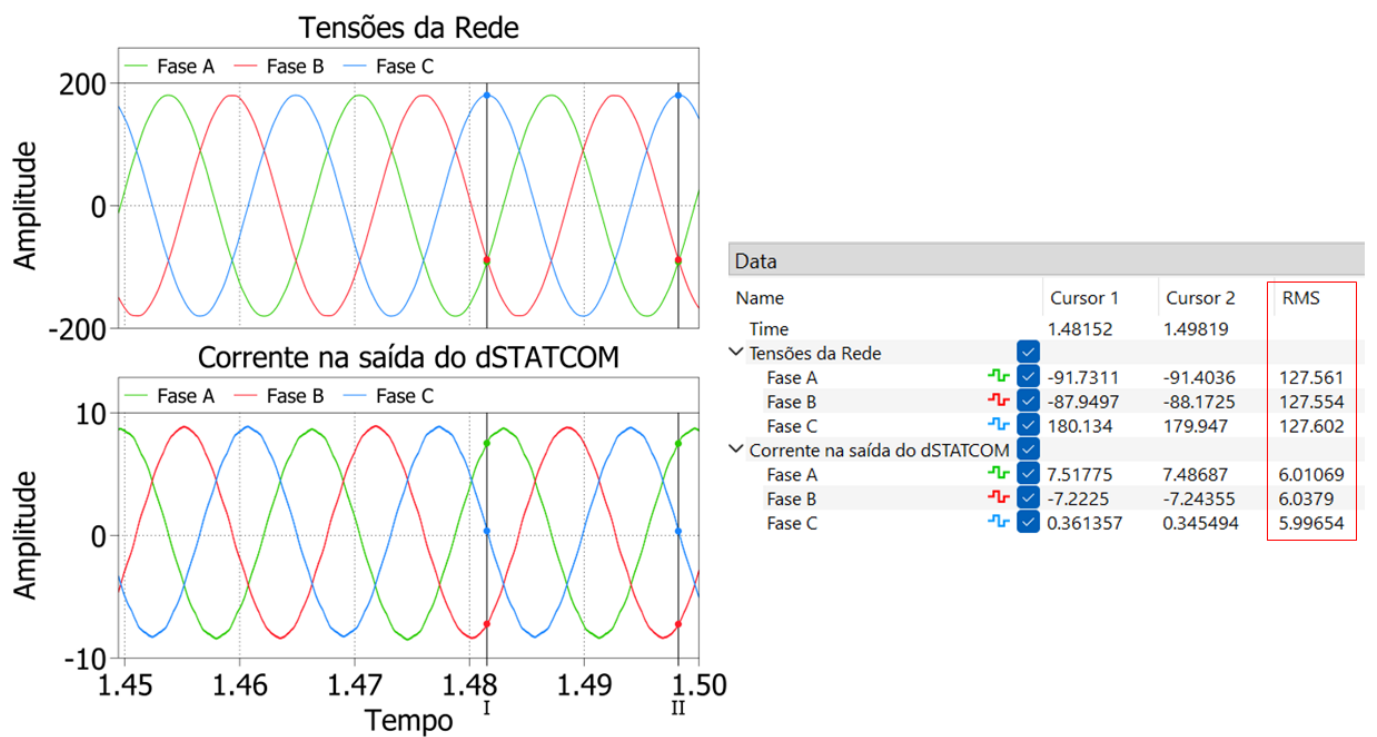


Figura 17 – Sinais de tensão e corrente da rede após a regulação de tensão.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios realizados em laboratório estão completamente alinhados com cenários simulados. Na prática, o sistema de distribuição é considerado fraco, ou seja, uma carga resistiva é capaz de diminuir de maneira significativa a tensão do barramento. Pelo mesmo motivo, um banco de capacitores também é capaz de elevar a tensão sistêmica. A construção do circuito de teste em laboratório teve como objetivo reproduzir os cenários de subtensão e de sobretensão. Nestas condições, é conveniente utilizar o dSTATCOM para regular a tensão. O diagrama unifilar da Figura 18 apresenta o circuito de teste implementado no laboratório. A Tabela III mostra as características elétricas do protótipo implementado.

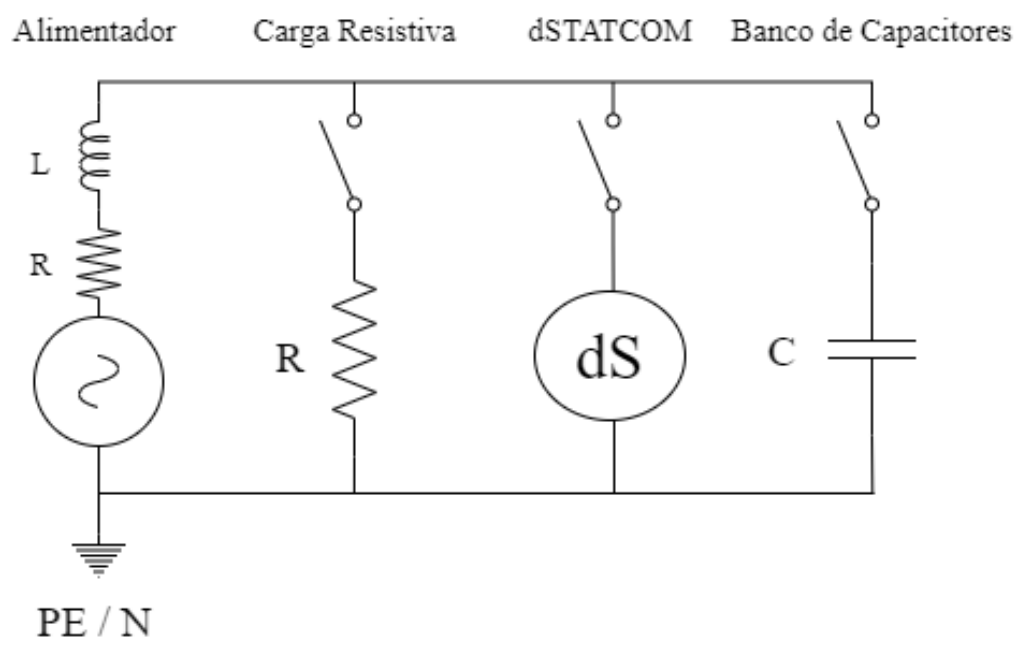


Figura 18– Representação unifilar do circuito de teste implementado em laboratório.

Tabela III – Parâmetros do protótipo implementado em laboratório.

Características Elétricas	
Alimentador	
Tensão F-F	220 V
Tensão F-N	127 V
Frequência	60 Hz
Impedância da Linha	
R	900 mΩ
L	8 mH
X / R	3,35
dSTACOM	
Potência	2,5 kVA
Filtro (LC)	
L	3,1 mH
C	12,8 uF
Frequência de chaveamento	15 kHz
Banco equivalente de capacitores (Elo CC)	7050 uF
Banco de Capacitores CA	
C	91,7 uF
Carga Trifásica	
Potência	2 kW

O dSTATCOM deve regular a tensão de duas maneiras: com a injeção de corrente capacitiva e injeção de corrente indutiva na rede. A Figura 19 apresenta a oscilografia dos sinais de corrente (C1) e tensão (C2) da rede, como também o sinal de corrente (C4) na saída do dSTATCOM. Neste caso, o dSTATCOM está em flutuação, visto que a sua corrente é muito próxima de zero. Além disso, o sistema está a vazio, ou seja, não possui cargas conectadas. Ainda na Figura 21, ao lado da oscilografia foi posicionado um circuito unifilar para exemplificar o estado atual.

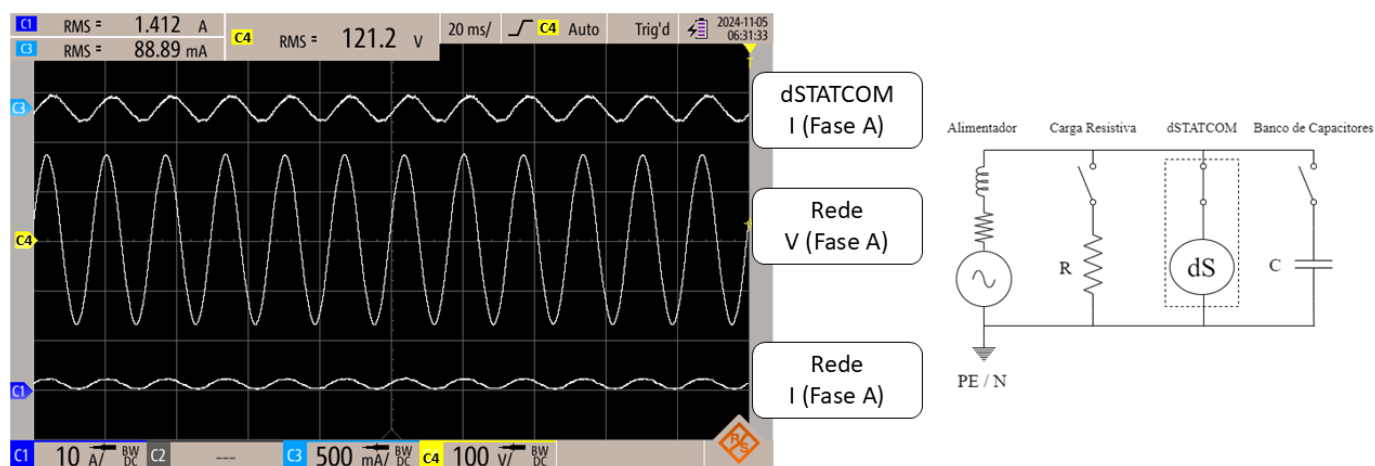


Figura 19 – Oscilografia da tensão (V – C4) e corrente (I – C1) da rede, corrente (I – C3) na saída do dSTACOM e circuito unifilar do sistema a vazio.

A partir do momento em que a carga resistiva entra no sistema, observa-se um afundamento significativo da tensão. Conforme a Tabela II, o nível de tensão atingido compreende a faixa precária. Nesta condição, é necessário o uso do dSTACOM para realizar a injeção de corrente reativa capacitiva, visando o restabelecimento do nível de tensão para a faixa de tensão adequada. A Figura 20 apresenta a oscilografia dos

sinais de tensão (C4) e corrente (C1) da rede, o sinal da corrente (C3) na saída do dSTACOM e o circuito unifilar com carga resistiva.

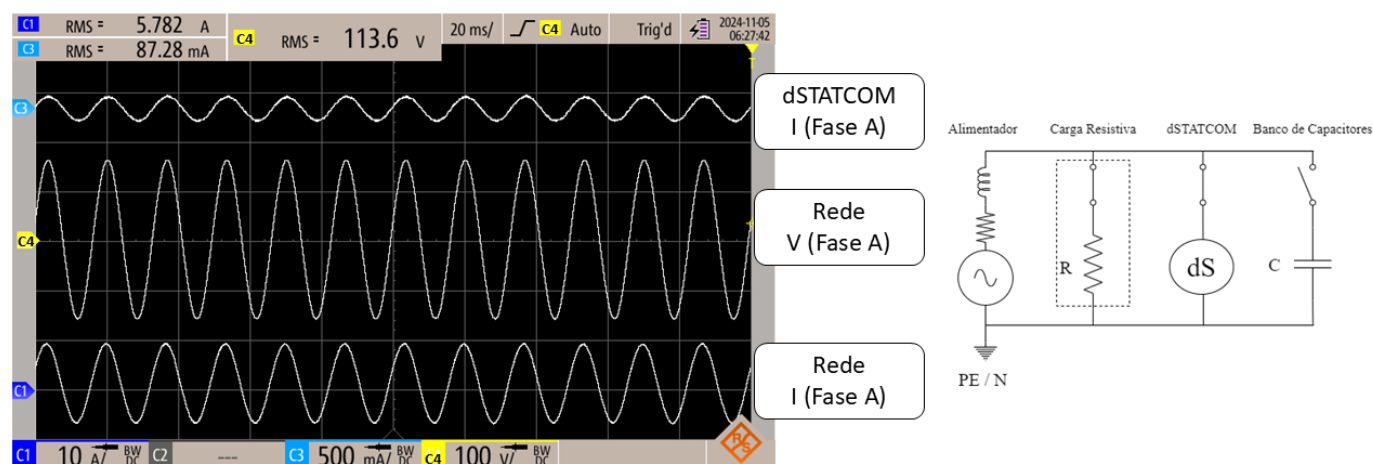


Figura 20 – Oscilografia da tensão (V – C4) e corrente (I – C1) da rede, corrente (I – C3) na saída do dSTACOM e circuito unifilar com carga resistiva.

Outra situação é quando os bancos de capacitores entram no sistema. Neste caso, observa-se uma sobretensão significativa. Embora, a faixa de atendimento para este caso seja adequada, conforme a Tabela I, é visível que o sistema de teste utilizado é fraco. As oscilações de tensão a vazio confirmam a afirmação anterior, Figura 19. Então, se as tensões estivessem mais próximas de 127 V, ao adicionar o banco de capacitores na rede, o nível de tensão de atendimento atingiria a faixa precária. Nesta condição, é necessário o uso do dSTACOM para realizar a injeção de corrente reativa indutiva, visando o restabelecimento do nível de tensão para a faixa de tensão adequada. A Figura 21 apresenta a oscilografia dos sinais de tensão (C4) e corrente (C1) da rede, o sinal da corrente (C3) na saída do dSTACOM e o circuito unifilar com o banco de capacitores.

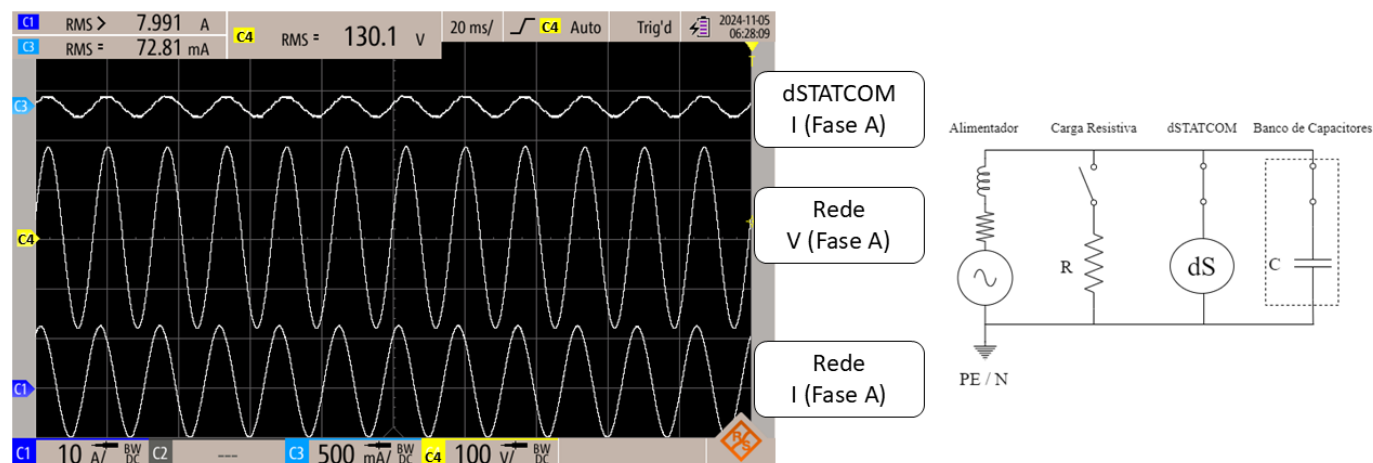


Figura 21 – Oscilografia da tensão (V – C4) e corrente (I – C1) da rede, corrente (I – C3) na saída do dSTACOM e circuito unifilar banco de capacitores.

Os cenários anteriormente construídos possibilitam a aplicação do dSTACOM para a regulação de tensão, entretanto, nas situações apresentadas o equipamento estava no estado de flutuação. No modo regulação de tensão, o equipamento irá aproximar as tensões da rede para a referência pré-definida, sendo esta 127 Vrms, independentemente do perfil da carga. A Figura 22 e Figura 23 apresentam as tendências dos sinais de tensão trifásico da rede diante da inserção de cargas resistivas, capacitivas e do dSTACOM. A Figura

22 mostra o comportamento do sistema após a inserção de uma carga resistiva, ou seja, o nível de tensão diminuiu. Criado o subtensão, o dSTACOM inicializou a sua operação ativa, pois estava em flutuação, tendo em vista a regulação da tensão. Nesta situação, o equipamento está injetando corrente reativa capacitiva no sistema, consequentemente, o nível de tensão aumenta e atinge a referência desejada.

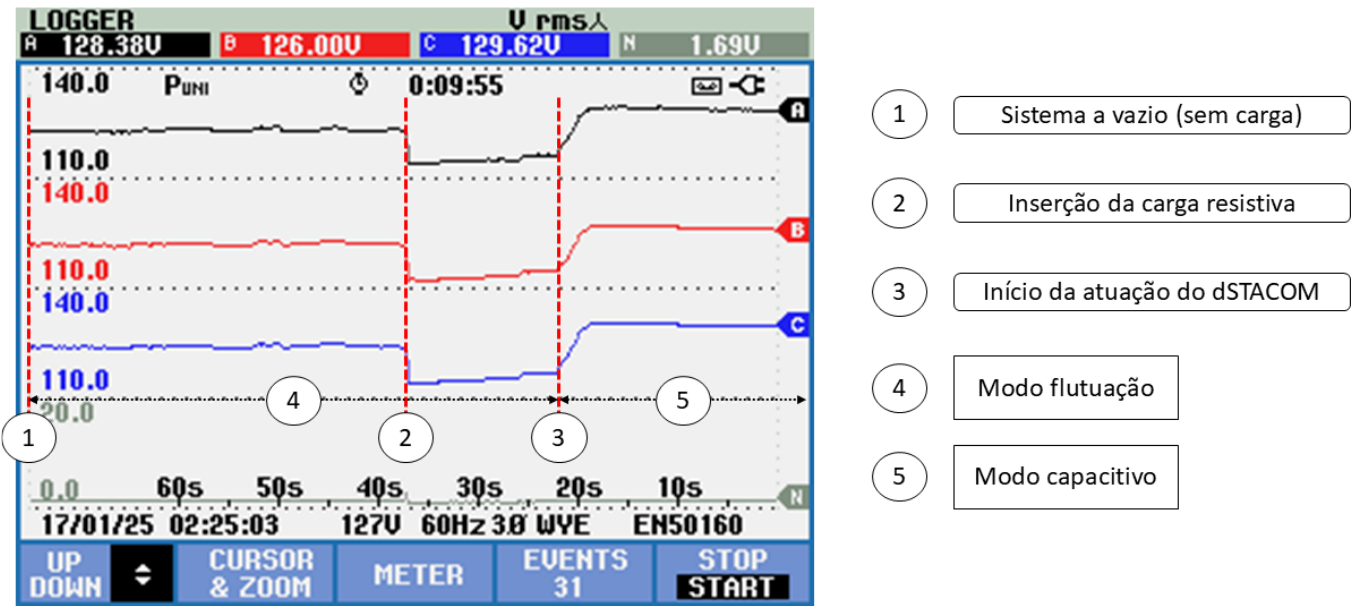


Figura 22 – Tendência dos níveis de tensão da rede diante da atuação do dSTACOM perante a uma subtensão.

Na Figura 23, houve a inserção de banco de capacitores na rede e com isso o nível de tensão aumentou. No primeiro momento, o dSTACOM estava em flutuação. Portanto, criado a sobretensão, o dSTACOM iniciou a sua atuação para regular a tensão. Neste caso, o equipamento absorve corrente reativa indutiva da rede, promovendo o ajuste para a referência desejada. Atingido o regime permanente, após alguns segundos, foi inserido uma carga resistiva e foi observado uma queda de tensão significativa. Com isso, o dSTACOM identificou a alteração repentina e alterou o modo de operação em tempo real. Assim, o equipamento passou a injetar corrente reativa capacitiva no sistema, objetivando a manutenção da referência de tensão predefinida.

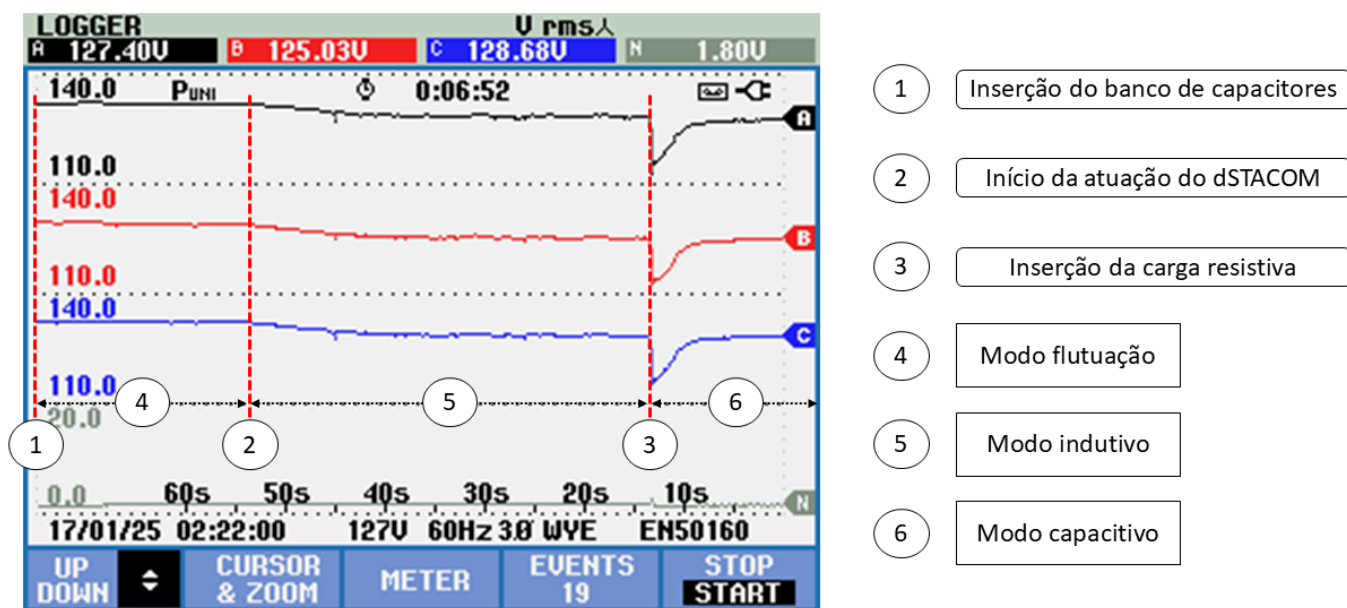


Figura 23 – Tendência dos níveis de tensão da rede diante da atuação do dSTACOM perante a uma sobretensão e uma subtensão.

3. Conclusão

Neste trabalho foi realizado a regulação de tensão de um sistema simplificado de distribuição mediante a aplicação de um dSTATCOM. Os resultados de simulação e experimentais permitiram concluir que os controles implementados são eficientes.

A regulação de tensão foi atingida para os três cenários de simulação: com carga trifásica; com usinas fotovoltaicas monofásicas; com carga trifásica e usinas fotovoltaicas monofásicas. Os resultados práticos mostraram o equipamento atuando tanto no modo indutivo, como no modo capacitivo. O dSTACOM foi capaz de adaptar-se a dinâmica da rede, ou seja, mesmo em condições de inserção e remoção de carga. Os resultados de simulação e experimentais mostraram a capacidade do equipamento em atuar em condições de subtensão e sobretensão, promovendo o reajuste do sistema para a faixa de tensão adequada. Deste modo, foi provado que com o dSTACOM é possível aumentar da qualidade da energia elétrica na distribuição. Além da regular a tensão, este equipamento também produz outros benefícios à rede, pois é aplicável para redução de perdas de energia (correção do fator de potência); no apoio a integração de fontes renováveis (solar e eólica); flexibilidade operacional e modularidade; e redução de custos com infraestrutura (recondutoramento).

4. Referências bibliográficas

XU, Junjun et al. On state estimation modeling of smart distribution networks: a technical review. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 1891, 2023.

Micro e Minigeração Distribuída — Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Disponível em:<<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ARRITT, Robert F.; DUGAN, Roger C. Distribution system analysis and the future smart grid. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 47, n. 6, p. 2343-2350, 2011.

HOLGUIN, Juan P.; RODRIGUEZ, David C.; RAMOS, Gustavo. Reverse power flow (RPF) detection and impact on protection coordination of distribution systems. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 56, n. 3, p. 2393-2401, 2020.

MISHRA, Mahesh K.; KARTHIKEYAN, K. A fast-acting dc-link voltage controller for three-phase DSTATCOM to compensate ac and dc loads. IEEE transactions on power delivery, v. 24, n. 4, p. 2291-2299, 2009.

ECHAVARRÍA, Rodolfo; CLAUDIO, Abraham; COTOROGEA, Maria. Analysis, design, and implementation of a fast on-load tap changing regulator. IEEE transactions on power electronics, v. 22, n. 2, p. 527-534, 2007.

HINGORANI, Narain G. et al. Concepts and technology of flexible ac transmission systems. Understanding Facts, v. 210, 2000.

WATANABE, Edson H.; AREDES, Maurício. Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS. Laboratório de Eletrônica de Potência - UFRJ. Rio de Janeiro.

ANEEL. Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. Acesso em: 15 dez. 2024.