

# Sistema de Controle de Potência Ativa e Reativa na Regulação de Baixa Tensão em Redes de Distribuição

Felipe Joel Zimann, Marcello Mezaroba, Alessandro Luiz Batschauer  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC  
Joinville - SC - Brasil

felipezimann@hotmail.com; marcello.mezaroba@udesc.br; alessandrobatschauer@udesc.br

**Resumo** — Este trabalho apresenta a compensação por energia ativa e reativa em redes trifásicas de distribuição, além da capacidade de operar como filtro para frequências harmônicas específicas. As redes de baixa tensão possuem parâmetros resistivos significativos em relação aos parâmetros indutivos, sendo necessária a utilização de potência ativa na compensação da tensão. Tendo em vista as características das impedâncias das linhas, buscou-se utilizar um sistema para gerenciamento do controle modificando as referências de corrente para que seja priorizada a utilização de energia reativa. O controle de corrente tem a referência sincronizada por um *Phase Locked Loop* que tem como base a tensão no ponto de conexão de cargas. O controle da tensão de barramento é efetuado pelo inversor, enquanto o conversor cc-cc bidirecional controla o fluxo de energia entre o sistema de armazenamento e o barramento cc.

**Palavras-chaves** — Conexão com a Rede, Filtro Seletivo de Harmônicas, Inversor Trifásico, Potência Ativa e Reativa.

## I. INTRODUÇÃO

Devido ao consumo crescente de energia elétrica nos últimos anos e a preocupação com a qualidade de energia fornecida aos consumidores a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu diretrizes para o funcionamento e desempenho para os sistemas de distribuição de energia elétrica, que são abordados nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [1]. As características abordadas no Módulo 8 [2] envolvem a tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação da frequência.

Uma das principais características que deve ser atendido pela Companhia de Distribuição é a tensão fornecida em um nível adequado aos consumidores. A tabela I classifica a tensão de 380/220 V em três diferentes grupos: Adequada, Precária e Crítica. Quando identificado alguma violação nos valores limite para tensão de fornecimento, a companhia deve então efetuar a correção dentro de curtos prazos, porém muitas

TABELA I. CLASSIFICAÇÃO DA TENSÃO DE FORNECIMENTO (380/220 V)

Classificação	Faixa da Tensão de Leitura ( $V_L$ )	
	380	220
Adequada	$348 \leq V_L \leq 396$	$201 \leq V_L \leq 231$
Precária	$327 \leq V_L < 348$	$189 \leq V_L < 201$
	$396 < V_L \leq 403$	$231 < V_L \leq 233$
Crítica	$V_L < 327$ ou $V_L > 403$	$V_L < 189$ ou $V_L > 233$

vezes estão envolvidas grandes quantidades de investimentos, planejamento, tempo de projeto e execução.

Os inversores de tensão são topologias adequadas para a regulação de tensão, uma vez que possuem baixo volume, alta resposta dinâmica, controle de potência injetada e sistema de controle adequado para diversas aplicações [3-9]. Diversos trabalhos abordam este tipo de inversor conectado à rede através do ponto de conexão de cargas (PCC), como os *Static Synchronous Compensators* (STATCOMs) [3] [4] [5] [6] [7], porém determinadas cargas e condições da rede podem levar a regiões onde a potência reativa não consegue atuar de forma a regular a tensão para níveis adequados. A injeção e armazenamento de potência ativa já foi abordada em outros trabalhos [8] [9], utilizando fontes de energia renováveis ou armazenamento em baterias integradas ao sistema, porém não tem como objetivo regular a tensão de forma a complementar a energia reativa.

Este trabalho utiliza um inversor de tensão controlado em corrente trifásico a quatro fios com filtro LCL de segunda ordem conectado à rede de distribuição pelo ponto de conexão de cargas. É apresentado uma fonte de energia ativa conectada ao barramento cc para expandir a capacidade de regulação de tensão e um sistema de controle que prioriza a energia reativa em relação a energia ativa, no sentido de minimizar a utilização de potência ativa, sendo que esta é uma fonte limitada. Estruturas de controle, potência e resultados de simulação são apresentados para validação do sistema operando de forma completa.

## II. ANÁLISE DA TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Os ramos do sistema de distribuição são compostos por transformadores de potência, cabos de diferentes comprimentos e cargas para cada trecho do sistema. No final de longas linhas pode ocorrer uma diminuição no valor da tensão fornecida, devido aos parâmetros resistivos e indutivos distribuídos inerentes ao sistema. A Fig. 1 mostra o modelo equivalente para uma linha de distribuição, sendo a rede elétrica de distribuição composta pelos parâmetros da impedância transformador ( $Z_{tr}$ ) mais a impedância dos cabos ( $Z_r$ ) de distribuição. Esse arranjo compõe a impedância total da linha ( $Z_l$ ) que o conversor estará submetido quando conectado no PCC.

Considerando um transformador com potência de 45 kVA, sua impedância base de 3,5% e um cabo nu de alumínio com alma de aço (CAA) com parâmetros de linha de  $(1,485 + j \cdot 0,508) \Omega/\text{Km}$  pode-se compor a impedância total da linha dependente da distância, visto na Fig. 2.

Com o aumento da distância observa-se o aumento do módulo e a queda no ângulo da impedância, isto deve-se a característica predominantemente indutiva do transformador e com o aumento da distância a adição da característica resistiva dos cabos de distribuição. Ainda, pode ser visto que em 57 m as parcelas resistivas e indutivas possuem a mesma proporção.

Portanto as análises que se seguem terão como base a distância de 450 m e o respectivo valor de impedância de  $|Z_L|$  igual a 0,157 p.u., ângulo  $\phi$  igual a 23,92° e relação  $X_L/R$  igual a 0,44, sendo esta relação de impedâncias próximas de valores encontrados em linhas reais. Não pode-se desprezar a componente resistiva do circuito como é feito em redes de média e alta tensão, visto que seu valor é equivalente ao valor da componente indutiva em redes de distribuição e contribui significativamente para a queda de tensão.

A tensão no ponto de conexão de cargas pode ser expressa em função das potências que são fornecidas e consumidas pela carga e pela impedância total da linha, conforme (1).

$$V_{PCC}^4 + V_{PCC}^2 \cdot [2 \cdot A - V_g^2] + [B^2 + A^2] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} A = R_L P_o + X_L Q_o \\ B = R_L Q_o - X_L P_o \end{cases}$$

Onde:

- $V_{PCC}, V_g$  - Módulo da tensão no PCC e na fonte.
- $R_L, X_L$  - Resistência e indutância da linha.
- $P_o, Q_o$  - Potências ativa e reativa da carga.

E o ângulo de abertura ( $\delta$ ) da linha, que é a diferença entre o ângulo da tensão fonte e no PCC, pode ser obtido através da seguinte relação:

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left( \frac{R_L Q_o - X_L P_o}{V_g V_{PCC}} \right) \quad (2)$$

A partir de (1) e (2) pode-se obter a tensão no PCC para diferentes valores de potência da carga mostrado na Fig. 3.

Pode ser observado na Fig. 3 dois planos horizontais, o primeiro define limite para a classificação adequada da tensão, o segundo plano define o limite para a classificação precária e abaixo deste plano a tensão é considerada crítica. A superfície da Fig. 3 representa a tensão eficaz e mostra que com o aumento de potência e do fator de potência da carga a tensão cai abaixo dos limites para fornecimento adequado. Neste caso faz-se necessário alguma medida de correção ou a concessionária estará sujeita a multas e ressarcimentos aos consumidores afetados.

Com a conexão do inversor o sistema fica representado como na Fig. 4, onde a impedância total  $Z_L$  possui uma parcela resistiva e indutiva,  $R_L$  e  $L_L$ , respectivamente. O inversor é conectado ao PCC para fornecer a energia ativa e reativa necessárias para rede e carga.

A partir das malhas de tensão e corrente pode-se obter a função que representa a tensão no PCC em função da potência da carga, potência do conversor e impedância da linha, conforme (3).

$$V_{PCC}^4 + V_{PCC}^2 \cdot [2 \cdot A - V_g^2] + [B^2 + A^2] = 0$$

$$\text{Para: } \begin{cases} A = R_L (P_o - P_{inv}) + X_L (Q_o - Q_{inv}) \\ B = R_L (Q_o - Q_{inv}) - X_L (P_o - P_{inv}) \end{cases} \quad (3)$$

E o ângulo de abertura definido por:

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left( \frac{B}{V_g V_{PCC}} \right) \quad (4)$$

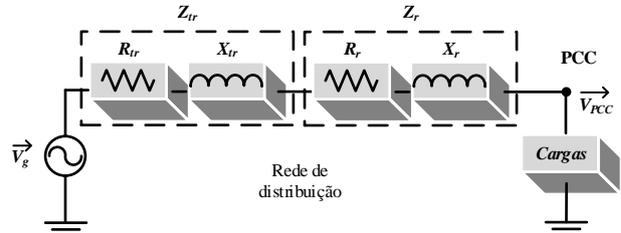


Fig. 1. Modelo do sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.

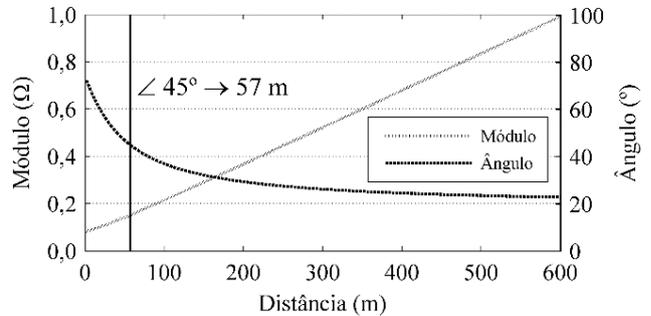


Fig. 2. - Variação da impedância da linha com a distância da linha de distribuição.

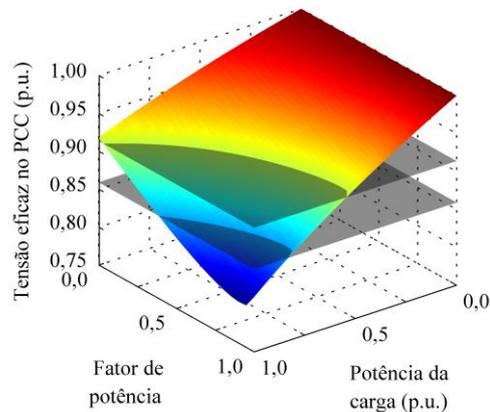


Fig. 3. Gráfico da tensão no PCC (p.u.) em função do fator de potência e potência aparente da carga. ( $|Z_L| = 0,157$  p.u.,  $\phi = 23,92^\circ$ ,  $V_g = 1$  p.u.).

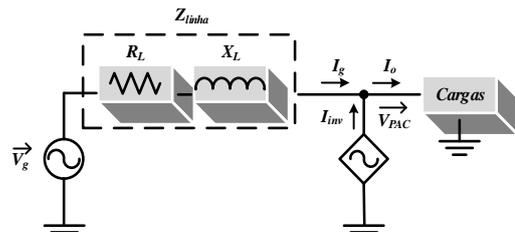


Fig. 4. Modelo de compensação do circuito equivalente da rede de distribuição com conversor conectado ao PCC.

### III. SISTEMA DE CONTROLE E POTÊNCIA

A compensação de tensão utilizando a energia ativa e reativa será analisada considerando que o conversor pode operar até a sua potência aparente máxima (1 p.u.) e o gerenciamento de energia fica a critério estratégico de controle sendo considerado que inicialmente deve-se utilizar energia reativa até que esta não consiga mais elevar a tensão para o nível desejado, somente a partir deste ponto é que a energia ativa é inserida.

Este critério tem como base de que a energia ativa vem de uma fonte armazenadora ou geradora de energia, portanto sendo de disponibilidade limitada e reduzida. Já a energia reativa é obtida da própria rede facilitando sua utilização.

O limite estabelecido para tensão é de 0,9137 p.u. sendo o mínimo exigido para manter o valor de tensão na faixa adequada de fornecimento. Os resultados das equações são mostrados a seguir. Na Fig. 7 é possível observar a regulação da tensão no valor desejado. Na Fig. 8 é mostrado a energia ativa utilizada pelo conversor, na Fig. 5 é apresentado a energia reativa e na Fig. 6 a energia aparente processada pelo inversor.

É importante destacar que a potência total do conversor não é ultrapassada pois mantém-se a potência aparente em 1,0 p.u. e a energia ativa utilizada é a mínima necessária para elevação de tensão, mesmo existindo outras combinações de potência que podem atingir o mesmo objetivo.

A estrutura de potência é composta por um inversor conectado à rede através de um filtro LCL que torna-se vantajoso pois possui maior atenuação de harmônicos de comutação, possibilita na redução do filtro e reduz a interferência eletromagnética [10], [11], [12], [13] comparado a filtros LC comumente utilizados em inversores conectados à rede [14]. Acoplado no barramento cc existe um conversor cc-cc bidirecional para executar o controle da corrente injetada ou absorvida do barramento, mostrado na Fig. 9. O inversor controla a corrente direta e em quadratura injetada na rede. Os parâmetros de potência são apresentados na Tabela II.

Diferentes fontes de energia podem ser utilizadas para fornecer a energia ativa ao barramento, fontes renováveis, baterias, ou outra fonte disponível. A estratégia de controle e gerenciamento da potência proposta colabora com a utilização de baterias, uma vez que minimizando a utilização de energia ativa aumenta-se a vida útil das baterias.

O controle proposto para o inversor, Fig. 10, é composto por três malhas de corrente uma para cada fase. As malhas de tensão total, diferencial e tensão eficaz no PCC fornecem as referências para a malha de corrente. Também é adicionada uma malha que controla as correntes em quadratura e direta, controlando assim a potência que é injetada.

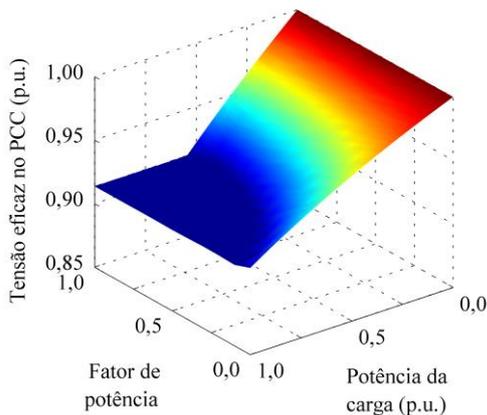


Fig. 7 - Gráfico da tensão no PCC em função do fator de potência e potência aparente da carga. ( $|Z_i| = 0,157$  p.u.,  $\phi = 23,92^\circ$ ,  $V_g = 1$  p.u.).

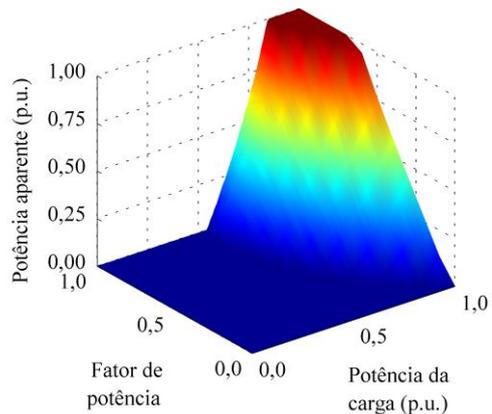


Fig. 5 - Gráfico da potência aparente processada (p.u.) em função do fator de potência e potência aparente da carga. ( $|Z_i| = 0,157$  p.u.,  $\phi = 23,92^\circ$  and  $V_g = 1$  p.u.).

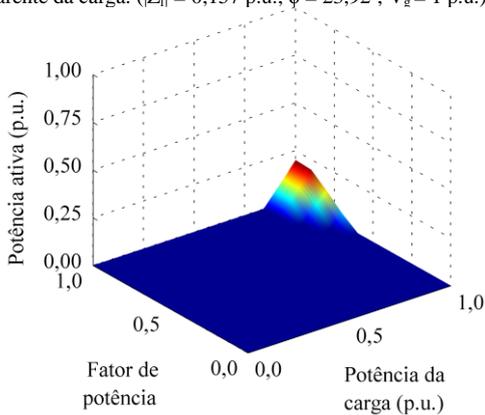


Fig. 8 - Gráfico da potência ativa processada (p.u.) em função do fator de potência e potência aparente da carga. ( $|Z_i| = 0,157$  p.u.,  $\phi = 23,92^\circ$ ,  $V_g = 1$  p.u.).

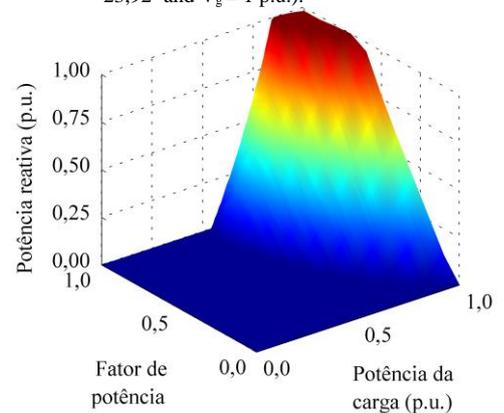


Fig. 6 - Gráfico da potência reativa processada (p.u.) em função do fator de potência e potência aparente da carga. ( $|Z_i| = 0,157$  p.u.,  $\phi = 23,92^\circ$  and  $V_g = 1$  p.u.).

Quando ocorre injeção de energia ativa, esta mesma referência é enviada ao conversor cc-cc para que forneça a corrente para manutenção do barramento.

As malhas de tensão de barramento total e diferencial são comuns a todas as fases fazendo com que a energia necessária do barramento cc seja distribuída uniformemente entre as três fases. O controle em cascata permite que o controlador de corrente opere em alta frequência desacoplando as malhas externas de tensão, reduzindo as interações de mais malhas de controle em uma única dinâmica.

Inicialmente, a compensação inicia somente com a compensação de reativos ( $S_{w1} = S_{w4} = 1$ ) deixando o controlador de energia ativa desativado ( $S_{w2} = S_{w3} = 0$ ). Uma vez que a compensação reativa não seja suficiente para elevar a tensão, o controle ativa a malha de energia ativa ( $S_{w2} = S_{w3} = 1$ ) e desativa a energia reativa ( $S_{w1} = S_{w4} = 0$ ), mantendo a referência reativa sendo o complemento da energia aparente total do inversor.

A malha de controle de harmônicos consiste em um controlador ressonante, nas harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, que estima estas frequências da tensão e fornece para o controle de corrente sintetizar com referência defasada, eliminando assim a maior parte do conteúdo harmônico [15], [16], [17].

Os parâmetros de controle são mostrados na Tabela III, sendo todos os controladores foram projetados no plano digitais com estruturas fixas e frequência de amostragem 38,16 kHz para as malhas rápidas, de corrente e 4,24 kHz para as malhas lentas, de tensão eficaz e de barramento.

TABELA II. PARÂMETROS DE POTÊNCIA.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência	$P_o$	30 kVA
Tensão eficaz da rede	$V_m$	220 V
Tensão total de barramento	$V_B$	800 V
Frequência da rede	$f_{rd}$	60 Hz
Frequência de comutação	$f_s$	19,080 kHz
Capacitância do barramento	$C_B$	14.1 mF
Indutor de saída "A"	$L_A$	560 µH
Indutor de saída "a"	$L_a$	560 µH
Capacitor de saída	$C_f$	22 µF
Resistência série do capacitor de saída	$R_d$	75 mΩ
Resistência da rede	$R_l$	0.691 Ω
Indutância da rede	$L_l$	0.813 mH

TABELA III. PARÂMETROS DE CONTROLE.

Controle de Corrente	
Margem de fase	59 °
Frequência da margem de fase	830 Hz
Margem de ganho	2,76 dB
Controle do barramento total e diferencial	
Margem de fase	63 °; 62 °
Frequência da Margem de fase	12 Hz; 6 Hz
Margem de ganho	-
Controle de harmônicas	
Ganhos	50, 50, 25
Frequências de ressonância	3ª, 5ª e 7ª
Margem de ganho	-
Controle da tensão eficaz no PCC (Q e P)	
Margem de fase	86 °
Frequência da Margem de fase	18 Hz
Margem de ganho	40 dB

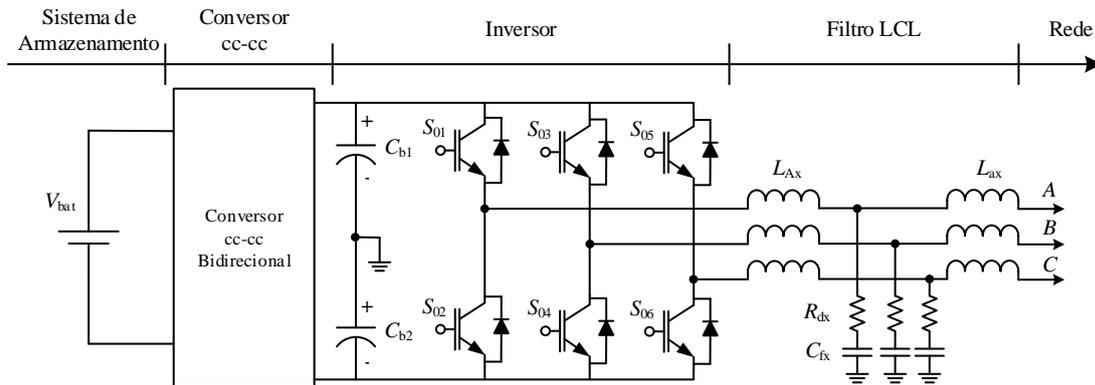


Fig. 9 - Estrutura de potência com sistema de armazenamento, conversor cc-cc bidirecional, inversor e filtro LCL.

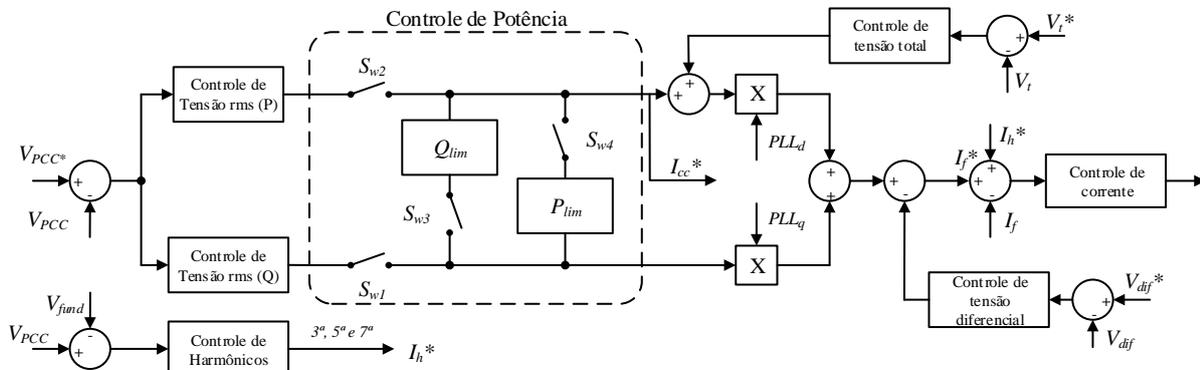


Fig. 10 - Estrutura de controle completa com controle de potência.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema proposto foi inicialmente simulado com cargas equilibradas e utilizando a referência de tensão mínima para regulação de tensão. Com uma carga resistiva-indutiva fator de potência de 0,9 e potência aparente de 0,8 p.u. pode-se observar na Fig. 11 as tensões das três fases no PCC, com e sem compensação. As correntes injetadas são mostradas na Fig. 12, sendo todas de mesmo valor.

A Fig. 13 mostra as referências para as correntes direta e em quadratura. Pode-se observar três setores distintos de operação, no Setor 1 não há compensação, no Setor 2 ocorre a injeção de corrente em quadratura, consequentemente de potência reativa no sistema, até chegar em sua capacidade

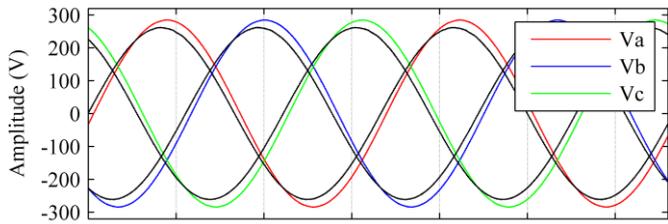


Fig. 11 - Tensão no PCC sem ( $V_a = V_b = V_c = 0,8400$  p.u.) e com ( $V_a = V_b = V_c = 0,9136$  p.u.) compensação.

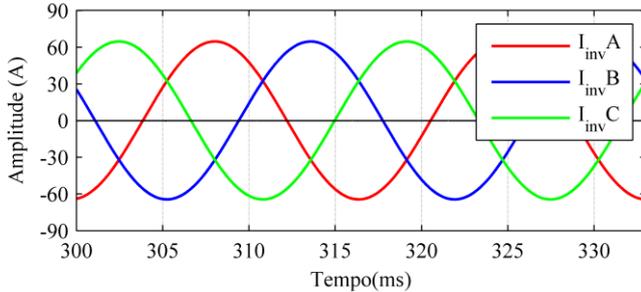


Fig. 12 - Correntes injetadas antes ( $I_{Ainv} = I_{Binv} = I_{Cinv} = 0$  A) e depois ( $I_{Ainv} = I_{Binv} = I_{Cinv} = 45,7$  A) nas fases pelo inversor.

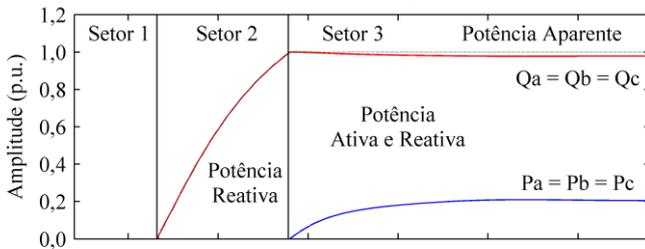


Fig. 13 - Setores de operação e níveis de potência reativa ( $Q_a = Q_b = Q_c = 0,98$  p.u.), ativa ( $P_a = P_b = P_c = 0,20$  p.u.) e aparente ( $S_a = S_b = S_c = 1,00$  p.u.).

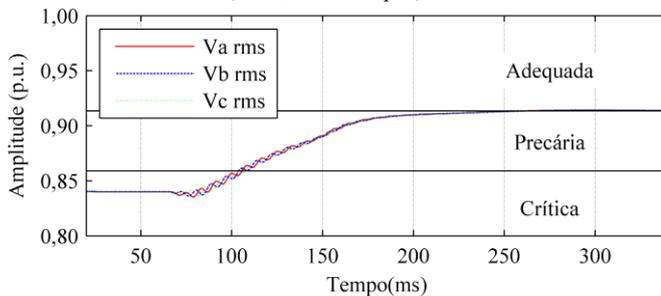


Fig. 14 - Valores eficazes das tensões de fase, antes ( $V_a = V_b = V_c = 0,8400$  p.u.) e depois ( $V_a = V_b = V_c = 0,9136$  p.u.) da compensação de tensão por energia ativa e reativa.

máxima. No Setor 3 a referência para corrente direta é ativada, injetando potência ativa. Para não exceder a potência total do inversor a referência de energia reativa é diminuída.

Na Fig. 14 são mostrados os valores de tensão eficaz das fases no PCC, a partir do início da compensação ocorre a elevação no valor eficaz da tensão até atingir o valor de regulação desejado.

Quando simulado com cargas desequilibradas, também foi utilizada a referência de tensão mínima para regulação de tensão. Com cargas de fator de potência de 0,9, 0,9 e 0,7 e potência aparente de 0,8, 1,0 e 0,8 p.u., respectivamente.

Pode-se observar na Fig. 15, tensões desequilibradas e após a compensação a elevação dos valores eficazes e balanço entre as fases, isso porque o sistema opera de forma independente em cada fase. As correntes assumem valores distintos, cada um

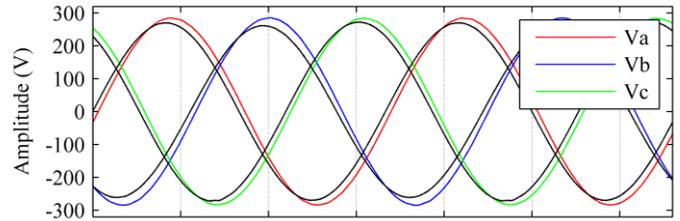


Fig. 15 - Tensão no PCC sem ( $V_a = 0,8674$  p.u.  $V_b = 0,8400$  p.u.  $V_c = 0,8745$  p.u.) e com ( $V_a = V_b = V_c = 0,9136$  p.u.) compensação.

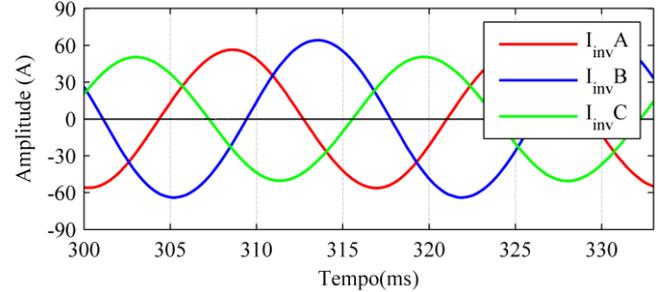


Fig. 16 - Correntes injetadas antes ( $I_{Ainv} = I_{Binv} = I_{Cinv} = 0$  A) e depois ( $I_{Ainv} = 39,9$  p.u.  $I_{Binv} = 45,33$  p.u.  $I_{Cinv} = 35,6$  A) nas fases pelo inversor.

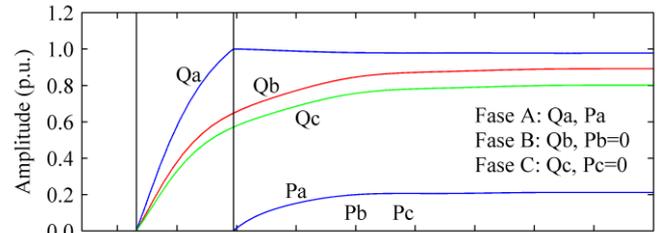


Fig. 17 - Setores de operação e níveis de potência reativa ( $Q_a = 0,97$  p.u.  $Q_b = 0,89$  p.u.  $Q_c = 0,80$  p.u.), ativa ( $P_a = 0,20$  p.u.  $P_b = P_c = 0,0$  p.u.) e aparente ( $S_a = 1,00$  p.u.  $S_b = 0,89$  p.u.  $S_c = 0,80$  p.u.).

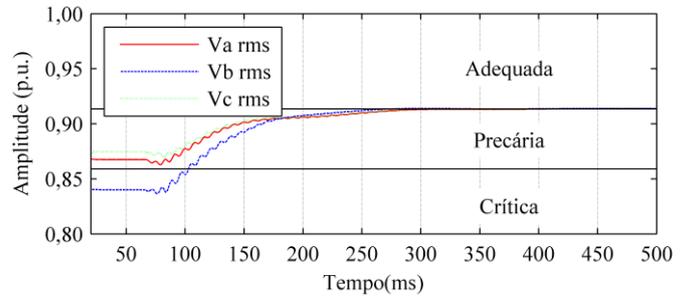


Fig. 18 - Valores eficazes das tensões de fase, antes ( $V_a = 0,8674$  p.u.  $V_b = 0,8400$  p.u.  $V_c = 0,8745$  p.u.) e depois ( $V_a = V_b = V_c = 0,9136$  p.u.) da compensação de tensão por energia ativa e reativa.

## VI. REFERÊNCIAS

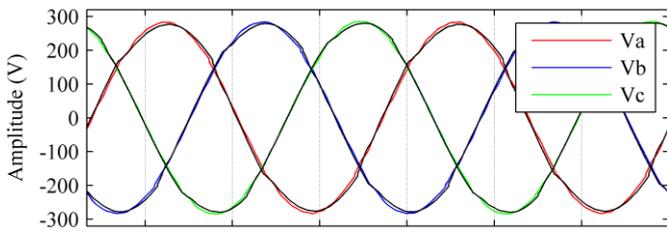


Fig. 19 - Tensão no PCC compensada (0,9136 p.u.) sem (5,1%, 3,7% e 2,6%) e com compensação (1,3%, 1,1% e 0,9%) do conteúdo harmônico.

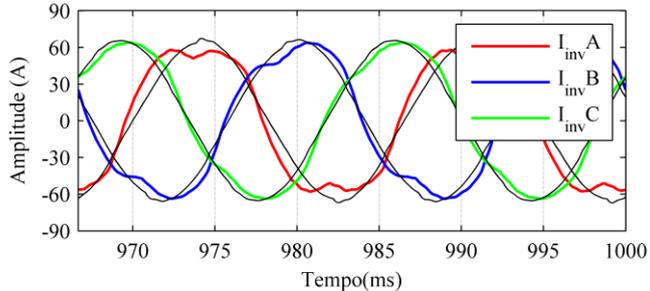


Fig. 20 - Correntes senoidais com conteúdo harmônico (fundamental, 3ª, 5ª e 7ª) injetadas nas fases pelo inversor.

apenas o necessário para a compensação em sua respectiva fase, como pode ser visto na Fig. 16. Como cada fase necessita uma quantidade diferente de energia ativa e reativa, diferentes valores podem ser observados na Fig. 17, sendo que a fase A necessita de energia ativa e reativa, e as fases B e C necessitam apenas de energia reativa porém de diferentes valores.

São inseridas cargas não-lineares, retificadores monofásicos com filtro capacitivo de diferentes potências em cada fase, injetando assim conteúdo harmônico da tensão do PCC. O controle do conversor projetado sintetiza as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, onde está concentrada a maior energia para compensação. Na Fig. 19 observa-se as tensões de fase  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  com conteúdo harmônico sem compensação (5,1%, 3,7% e 2,6%), respectivamente. Em seguida a redução dos harmônicos de maior ordem para valores de distorção harmônica aceitáveis (1,3%, 1,1% e 0,9%).

## V. OBSERVAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado o sistema de controle de potência ativa e reativa para regulação da tensão em redes de distribuição juntamente com a compensação seletiva de harmônicos. A utilização do inversor trifásico a quatro fios, com controle em corrente e filtro LCL realizou a injeção de corrente no PCC até a elevação dos valores eficazes de tensão para os níveis desejados e a eliminação dos harmônicos propostos.

Todo o sistema de controle foi testado em simulação em condições de cargas equilibradas, desequilibradas e com distorção harmônica comprovando a eficácia deste tipo de regulação. Foram verificadas que as equações obtidas do estudo analítico correspondem aos resultados de simulação obtidos.

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST," 2011.
- [2] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, "PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," Brasil, 2012.
- [3] T.P. Enderle et al., "D-STATCOM applied to single-phase distribution networks: Modeling and control," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct 2012, pp. 321-326.
- [4] Rubens Tadeu Hock, Yales Romulo De Novaes, and Alessandro Luiz Batschauer, "A voltage regulator based in a voltage-controlled DSTATCOM with minimum power point tracker," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, Sept 2014, pp. 3694-3701.
- [5] C. Kumar and M.K. Mishra, "A Voltage-Controlled DSTATCOM for Power-Quality Improvement," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 3, pp. 1499-1507, June 2014.
- [6] M.K. Mishra, A. Ghosh, and A. Joshi, "Operation of a DSTATCOM in voltage control mode," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 258-264, Jan 2003.
- [7] M. Hagiwara, R. Maeda, and H. Akagi, "Negative-Sequence Reactive-Power Control by a PWM STATCOM Based on a Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC-SDBC)," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 2, pp. 720-729, March 2012.
- [8] S. Adhikari and Fangxing Li, "Coordinated V-f and P-Q Control of Solar Photovoltaic Generators With MPPT and Battery Storage in Microgrids," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 3, pp. 1270-1281, May 2014.
- [9] D. I. Brandão, F. P. Marafão, F. A. S. Gonçalves, M. G. Villalva, and J. R. Gazoli., "Estratégia de controle multifuncional para sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica," *Power Electronics Conference (COBEP)*, vol. 18, no. 4, pp. 1206-1214, 2013.
- [10] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 5, pp. 1281-1291, Sept 2005.
- [11] Y.A.-R.I. Mohamed, M. A-Rahman, and R. Seethapathy, "Robust Line-Voltage Sensorless Control and Synchronization of LCL - Filtered Distributed Generation Inverters for High Power Quality Grid Connection," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 1, pp. 87-98, Jan 2012.
- [12] Dongsheng Yang, Xinbo Ruan, and Heng Wu, "Impedance Shaping of the Grid-Connected Inverter with LCL Filter to Improve Its Adaptability to the Weak Grid Condition," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 11, pp. 5795-5805, Nov 2014.
- [13] Erika Twining and D.G. Holmes, "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 888-895, May 2003.
- [14] Shuitao Yang, Qin Lei, F.Z. Peng, and Zhaoming Qian, "A Robust Control Scheme for Grid-Connected Voltage-Source Inverters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 1, pp. 202-212, Jan 2011.
- [15] Yun Wei Li and Jinwei He, "Distribution System Harmonic Compensation Methods: An Overview of DG-Interfacing Inverters," *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 4, pp. 18-31, Dec 2014.
- [16] C.H. Ng, K. Busawon, G.A. Putrus, and L. Ran, "Fast-individual-harmonic-extraction technique," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 152, no. 4, pp. 556-562, July 2005.
- [17] P.C. Tan, P.C. Loh, and D.G. Holmes, "High-Performance Harmonic Extraction Algorithm for a 25 kV Traction Power Quality Conditioner," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol. 151, no. 5, pp. 505-512, Sept 2004.