

Aplicação do Método de Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para um Filtro Ativo Trifásico a Quatro Braços

Lázaro Rubens Araújo Pinto, Sérgio Pires Pimentel, Enes Golçalves Marra e Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - Universidade Federal de Goiás
lazarorubens@gmail.com, sergio_pimentel@ufg.br, enes@ufg.br, bernardo_alvarenga@ufg.br

Resumo: Este trabalho aborda a elaboração de um filtro ativo de potência (FAP) para um sistema trifásico a quatro fios e baseado em um inversor a quatro braços. A estratégia de modulação do inversor é determinada pelo método de controle preditivo baseado em modelo (MPC - Model Predictive Control). Justificativas para a utilização dessa topologia e do método de controle são discutidas. A estrutura escolhida para o controle preditivo MPC objetiva o fornecimento nulo de potência ativa pelo FAP e, em consequência, a maximização do fator de potência visto pela fonte em corrente alternada (CA) a quatro fios (Y-n). Três casos de cargas locais são considerados para análise da proposta. Resultados de simulação exemplificam o alcance dos objetivos propostos e validam o método adotado.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência, Qualidade da Energia Elétrica, Controle Preditivo, Filtro Ativo de Potência, Inversor a Quatro Braços.

I. INTRODUÇÃO

Em virtude do crescente aumento da demanda e proliferação de cargas lineares e não-lineares em consumidores residenciais, comerciais e industriais a qualidade da energia elétrica (QEE) acaba por ser prejudicada. Para tanto, diversos estudos abordam os impactos causados pela presença de componentes harmônicos e métodos para minimizar esses efeitos causados à rede elétrica a montante do ponto de acoplamento comum (PAC) com o uso de filtros passivos, filtros ativos de potência (FAP) e pré-reguladores de fator de potência (PFP) [1].

De acordo com [2], os FAP são dispositivos eletrônicos que possibilitam a compensação em tempo real de distúrbios da rede elétrica através de um conversor de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), CC/CA, conectado em paralelo a um determinado ponto do sistema elétrico, a tensão

neste ponto é estabelecida pela rede CA. Em geral, tais dispositivos permitem: a compensação de harmônicos e reativos; a correção de sistemas desequilibrados; e a maximização do fator de potência (FP).

A ANEEL regulamenta através do Módulo 8 do PRODIST [3] os critérios mínimos de qualidade da energia elétrica e estabelece valores de referência e metodologias para aferição.

Inserido neste contexto, este trabalho apresenta resultados para a aplicação do método de controle preditivo baseado em modelo (MPC - *Model Predictive Control*) na operação de um conversor estático de potência de quatro braços (4-leg) que compõe um filtro ativo trifásico para compensação harmônica de corrente e melhoria do fator de potência. A seguir são descritas a topologia da aplicação trifásica a quatro fios e as metodologias de operação do FAP consideradas neste trabalho.

II. MÉTODO DE FILTRAGEM ATIVA PROPOSTO

O sistema elétrico considerado para o estudo consiste em um FAP conectado em paralelo (*shunt*) ao PAC local que, por sua vez, tem suas tensões pré-estabelecidas pela rede CA conectada a quatro fios. A topologia do sistema de filtragem ativa proposto neste trabalho é apresentada na Fig. 1. Há também no modelo, um grupo de cargas alimentadas no PAC.

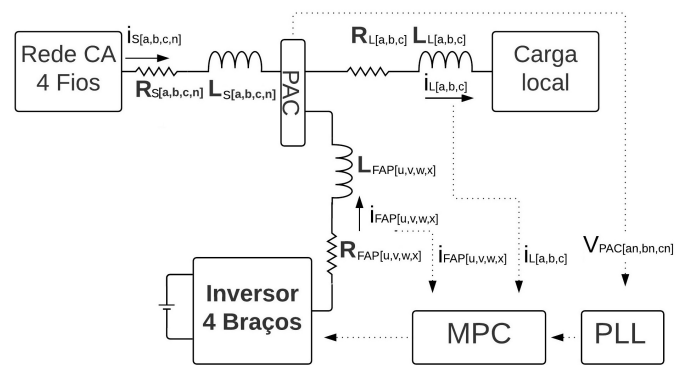


Figura 1. Esquema do circuito elétrico.

Foram considerados três casos de cargas locais para análise da operação do método de filtragem ativa proposto. Foram eles:

- Caso 1: Carga linear desequilibrada em paralelo com carga não-linear variável (*Up/Down*);

⁰Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro à execução desta pesquisa. Em acréscimo, este trabalho foi desenvolvido dentro do contexto de atividades relacionadas a um Projeto P&D registrado na ANEEL através do código PD-3033-0002/2014 e que é patrocinado pelas empresas: Espora Energética S/A; Transenergia São Paulo S/A (TSP); Transenergia Renovável S/A (TER) e Caldas Novas Transmissão (CNT).

- Caso 2: Carga não-linear variável (*Up/Down*).
- Caso 3: Carga linear equilibrada.

A Fig. 2 apresenta em um diagrama o método de filtragem ativa utilizado com os referidos sinais das entradas e saídas. Deferentemente do método utilizado por [4], optou-se pelo ajuste da referência de corrente (i_s^*) a partir de um controlador PI que visa equilibrar o fluxo das potências ativas vinculadas ao PAC. Justificativas a respeito de sua utilização ao invés de um controle da tensão no barramento CC são apresentados em [1].

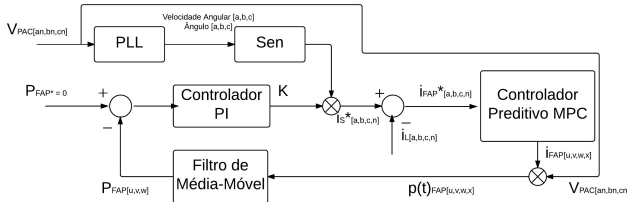


Figura 2. Diagrama de controle do modelo.

As abordagens do modelo do inversor trifásico a quatro braços e do controle MPC estão disponíveis nas seções seguintes.

III. INVERSOR TRIFÁSICO A QUATRO BRAÇOS

A topologia do inversor a quatro braços é apresentada na Fig. 3, onde estão dispostos quatro braços de chaveamento (u , v , w e x) [5][6]. Assim, torna-se possível controlar o desequilíbrio de fases do sistema através das fases do inversor e, consequentemente, melhorar as respectivas formas de onda das correntes da rede elétrica CA que alimentam um provável PAC. O inversor possui um filtro RL na saída, constituindo assim um inversor fonte de tensão controlado por corrente (condição necessária para injeção de corrente no PAC).

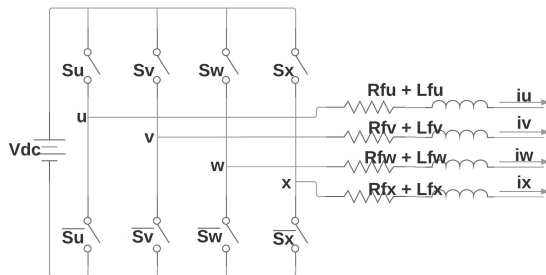


Figura 3. Topologia do inversor trifásico a quatro braços

A corrente no ramo x é dada pelo oposto da soma das correntes nos outros ramos, conforme é exibido em (1).

$$i_x = -(i_u + i_v + i_w) \quad (1)$$

A partir do circuito do inversor apresentado na Fig. 3 e considerando as resistências e indutâncias apresentadas para as três fases e neutro idênticas é possível equacionar o circuito elétrico conforme segue em (2).

$$V_{ix} = R(i_i + i_x) + L \left(\frac{di_i}{dt} + \frac{di_x}{dt} \right) + V_{jn} \quad (2)$$

Onde:

$$[i, j] = [(u, a), (v, b), (w, c)]$$

Baseando-se em (1) e (2), é possível obter a equação de estado do inversor a quatro braços. Esse modelo de estados obtido é descrito em (3), (4) e (5).

Através da equação geral de estado (3) e do conjunto de variáveis de estado (6) é possível obter a modelagem do sistema quando conectado a uma rede do sistema elétrico desde que sejam conhecidas as entradas (7), u , do sistema.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \frac{-R}{L} [\mathbf{I}]_{3 \times 3} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \left(\frac{1}{4L} \right) \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = [i_u \ i_v \ i_x]^T \quad (6)$$

$$u = [(V_{ux} - V_{an}) \ (V_{vx} - V_{bn}) \ (V_{wx} - V_{cn})]^T \quad (7)$$

Conforme pode ser observado em (6), o vetor de estados considerado corresponde às correntes em três dos quatro braços do inversor. Isso é possível graças à consideração apresentada em (1). O vetor de entrada u exibido em (7) corresponde à diferença de potencial presente sobre cada filtro RL conectado aos três braços envolvidos por (6).

IV. CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO (MPC)

Considerando que o controlador preditivo opera sob amostragem discreta de dados, tanto o controlador quanto o modelo do sistema operam no domínio discreto do tempo [7]. Assim, esse modelo em tempo discreto consiste de uma equação com matrizes recursivas que permitem a estimativa do estado do sistema em um instante futuro, ou seja, sendo conhecido o estado do sistema no instante $(k)T_s$ atual, é possível prever os estados do sistema no instante imediatamente seguinte $(k+1)T_s$.

Desta forma, o sistema representado na Fig. 3 pode ter o seu desempenho estimado a partir de (8).

$$\mathbf{i}^*[k+n+1] = \mathbf{F}\mathbf{i}[k+n] + \mathbf{G}u[k+n] \quad (8)$$

O termo $\mathbf{F}$ pode ser obtido por (9) e $\mathbf{G}$ por (10). Ambos correspondem, respectivamente, às frações das respostas natural e forçada do sistema.

$$\mathbf{F} = e^{\mathbf{A}T_s} \quad (9)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{F} - \mathbf{I}_{3 \times 3}) \mathbf{B} \quad (10)$$

O método de controle MPC, ou ainda, controle baseado em modelo, é um método de controle robusto que utiliza sinais instantâneos do sistema acoplado como referência para o cálculo do chaveamento ótimo nas saídas.

Tal qual é descrito em [1], para a aplicação do FAP controlado pelo MPC é necessário que a referência de corrente a ser drenada do inversor a quatro braços (i_{FAP}^*) possa ser estabelecida a partir de (11).

$$i_{FAP}^* = i_L - i_s^* \quad (11)$$

O cálculo de tensão V_{ux} em (2) e da corrente nos instantes $(k+1)T_s$ é realizado por um algoritmo que estima os valores futuros de tensões em seus terminais e as correntes possíveis para cada estado de chaveamento.

A quantidade de estados possíveis para o inversor é dada por (12). Para o inversor trifásico a quatro braços, $n=4$, e consequentemente, $N_{Estados}=16$.

$$N_{Estados} = 2^n \quad (12)$$

A Tabela I descreve os estados para o inversor trifásico de quatro braços. Os termos S_u , S_v , S_w , e S_x representam as chaves da Fig. 3 na parte superior de cada ramo do inversor, as inferiores estão sempre em posição de chaveamento oposta de modo que não ocorram curto-circuitos no inversor. V_{ux} , V_{vx} e V_{wx} são as tensões entre os respectivos braços do circuito.

Tabela I
POSSÍVEIS ESTADOS DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR TRIFÁSICO DE QUATRO BRAÇOS

Estados das chaves				Tensões nos terminais		
S_u	S_v	S_w	S_x	V_{ux}	V_{vx}	V_{wx}
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
0	0	1	0	0	0	V_{dc}
0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
0	1	0	0	0	V_{dc}	0
0	1	0	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
0	1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}
0	1	1	1	$-V_{dc}$	0	0
1	0	0	0	V_{dc}	0	0
1	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
1	0	1	0	V_{dc}	0	V_{dc}
1	0	1	1	0	$-V_{dc}$	0
1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}	0
1	1	0	1	0	0	$-V_{dc}$
1	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
1	1	1	1	0	0	0

Com os valores das correntes estimados para o período de amostragem futuro, $i[k+1]$ e da corrente de referência para o instante futuro $i^*[k+1]$ é possível calcular pelo algoritmo elaborado o custo $g[k+1]$ para cada estado de chaveamento antes que este ocorra. Em (13) é apresentada a função custo adotada para as 16 possibilidades da Tabela I. O algoritmo seleciona o estado que resultar em menor custo para o chaveamento no instante futuro $[k+1]$ predito.

$$g[k+1] = \|i^*[k+1] - i[k+1]\|^2 + i_{u_{REF}}^*[k+1] - i_u[k+1]^2 + i_{v_{REF}}^*[k+1] - i_v[k+1]^2 + i_{w_{REF}}^*[k+1] - i_w[k+1]^2 \quad (13)$$

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são discutidos os três casos de estudo envolvendo o inversor trifásico a quatro braços atuando como filtro ativo de potência. Os resultados apresentados foram obtidos a partir de simulações realizadas no software MATLAB, versão 2015a. A Tabela II apresenta os valores dos componentes utilizados nas simulações.

Tabela II
DADOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.

Dados	Valores
V_{dc}	$380 * \sqrt{2} * 1,2 V$
V_{PAC}	$220 / 380 V$
$R_{INV[u,v,w,x]}$	$0,05 \Omega$
$L_{INV[u,v,w,x]}$	$6 mH$
$RS_{[A,B,C,N]}$	$0,01 \Omega$
$LS_{[A,B,C,N]}$	$0,6 mH$
$RL_{Caso1[A,B,C]}$	$100 \Omega, 50 \Omega, 25 \Omega$
$RL_{Caso2[A,B,C]}$	$100 \Omega, 100 \Omega, 100 \Omega$
$RL_{Caso3[A,B,C]}$	$100 \Omega, 100 \Omega, 100 \Omega$
Para os casos 1 e 2, carga não-linear	
$LL_{[A,B,C]}$	$1,5 mH$
$R1_{Carga constante}$	50Ω
$R2_{Carga variável}$	50Ω

A. Caso 1

Em um primeiro caso, a fonte CA a quatro fios alimenta, através de um ponto de acoplamento comum (PAC) duas cargas: A primeira, uma carga linear desequilibrada ligada em estrela por quatro fios. A segunda, uma carga não-linear equilibrada. O FAP é acoplado ao PAC em $t = 0,02 s$. No instante $t = 0,08 s$ a carga não linear é aumentada, e em $t = 0,14 s$ é reduzida ao valor inicial. Entre a Fig. 4 e a Fig. 11 são exibidas as grandezas observadas para o caso 1.

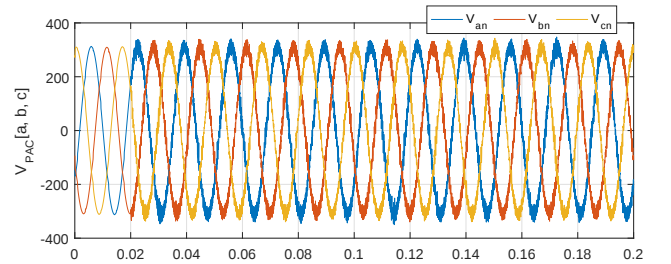


Figura 4. Formas de onda das tensões observadas no PAC.

Na Fig. 4 são mostradas as tensões de fase no PAC, estabelecida pela rede CA. A Fig. 5 apresenta o comportamento da corrente elétrica fornecida pela fonte. É possível observar a correção das formas de onda das correntes entre a fonte e o PAC após o acoplamento do FAP, conforme Fig. 6.

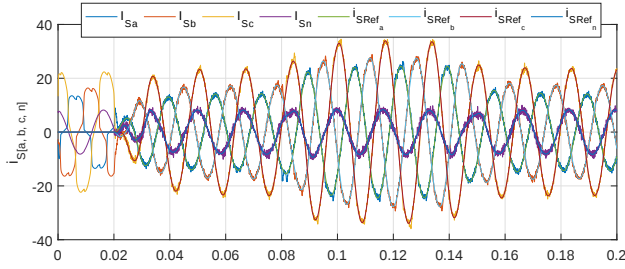


Figura 5. Formas de onda da corrente observada pela fonte.

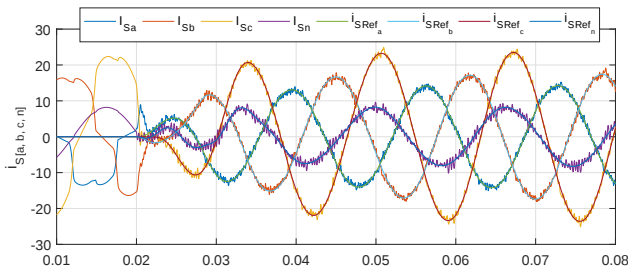


Figura 6. Versão ampliada da Fig. 5 entre 0,01 s e 0,08 s.

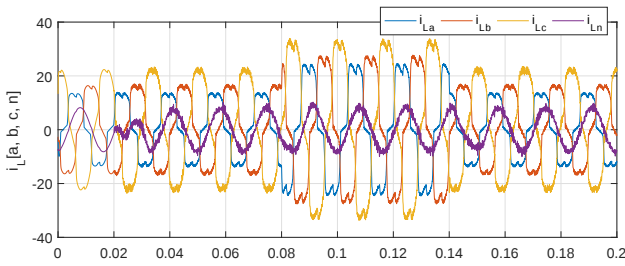


Figura 7. Formas de onda da corrente na carga.

A Fig. 7 apresenta o comportamento da corrente desbalanceada e não-linear na carga, devido à sua natureza. É possível observar na Fig. 8 que a corrente na carga (i_L), a corrente de referência na fonte (i_{SRef}) e a corrente na fase (i_{Sa}) estão em fase e com um erro. A resposta a (11) é o sinal de referência descrito em (11) é exibido na Fig. 9.

As distorções harmônicas totais (DHT) das tensões e correntes para o caso 1 são apresentadas na Fig. 10. A DHT das tensões estabilizam em torno de 8% e a DHT das correntes em torno de 6% com picos em torno de 18% nos transitórios de incremento e decremento de carga e em torno de 40% a 50% antes da aplicação do FAP. O fator de potência (FP), calculado em (14), estabiliza em torno do valor unitário e apresenta variações nos períodos de transitórios da carga, conforme é exibido na Fig. 11. Observa-se que o FP foi corrigido após a conexão do FAP.

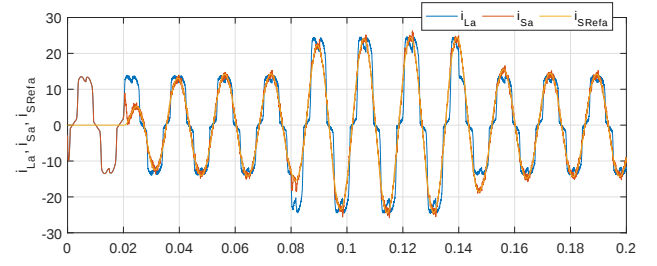


Figura 8. Formas de onda da corrente na carga, corrente da fonte e corrente de referência para a fonte.

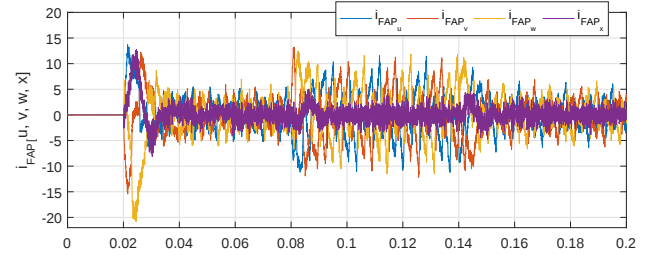


Figura 9. Formas de onda das correntes injetadas pelo FAP.

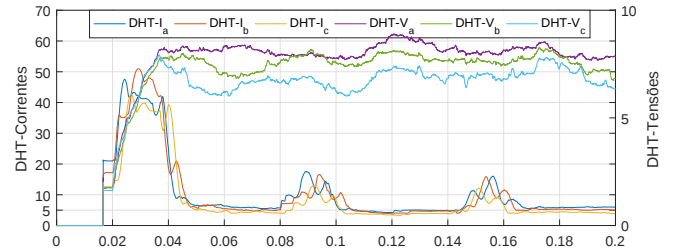


Figura 10. DHT das correntes (esquerda) e das tensões (direita).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (14)$$

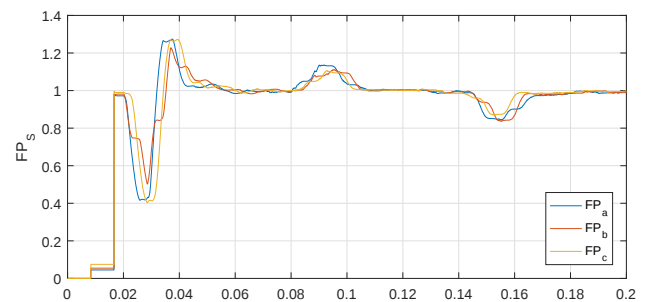


Figura 11. Fator de potência (FP) visto pela rede CA a quatro fios.

B. Caso 2

No segundo caso, a fonte CA a quatro fios alimenta, através do PAC, uma carga não-linear equilibrada. O FAP é acoplado ao PAC em $t = 0,02$ s. No instante $t = 0,08$ s a carga não-linear é aumentada, e em $t = 0,14$ s é reduzida ao valor inicial. Entre a Fig. 12 e a Fig. 18 são exibidas as grandezas observadas para o caso 2. Trata-se do pior caso observado,

no qual a corrente fornecida pelo FAP deve ser nula dada a ausência de desequilíbrio e de distorções na corrente da carga.

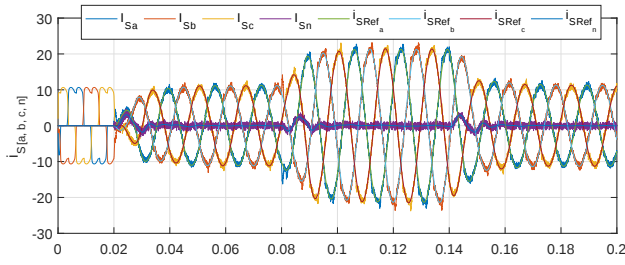


Figura 12. Formas de onda das correntes observada pela fonte.

O comportamento da corrente elétrica caracterizada nos terminais da fonte é apresentado na Fig. 12. A correção na forma de onda da corrente entre a fonte e o PAC a partir do acoplamento do FAP pode ser melhor visualizada na Fig. 13. Na carga, a corrente permanece equilibrada e distorcida, devido às características pertinentes da carga, Fig. 14.

Na Fig. 15 podem ser observadas as formas de onda das correntes na carga e na fonte devido a ação do inversor. Na Fig. 16, é representada a corrente emitida pelo FAP em reação referência repassada ao controle preditivo MPC dada a deformidade da corrente da carga.

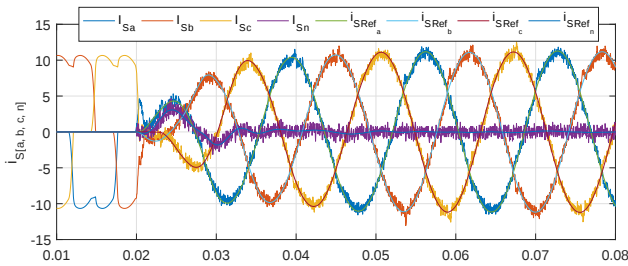


Figura 13. Ampliação da forma de onda de (10) no intervalo de 0,01 s a 0,08 s.

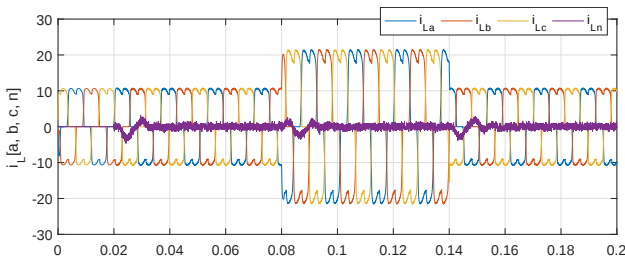


Figura 14. Formas de onda da corrente na carga.

A DHT da tensão estabiliza em torno de 12% enquanto a DHT da corrente por volta de 7% a DHT da corrente atinge certa de 57% antes do FAP começar a atuar no PAC, Fig. 17. Quanto ao FP o controlador é robusto adequando-o no prazo de um período da forma de onda ($\frac{1}{60}$ s) a uma unidade ou ao mais próximo de tal valor, conforme Fig. 18.

C. Caso 3

No terceiro caso são utilizadas apenas cargas resistivas e de forma equilibrada para análises da resposta do sistema. A Fig.

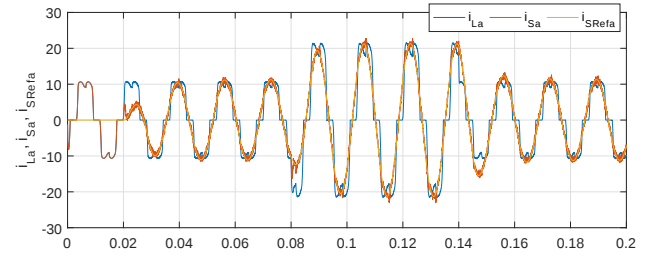


Figura 15. Formas de onda da corrente na carga, corrente da fonte e corrente de referência para a fonte.

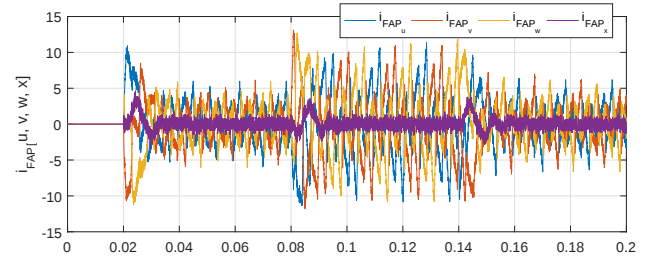


Figura 16. Formas de onda de corrente injetada pelo FAP.

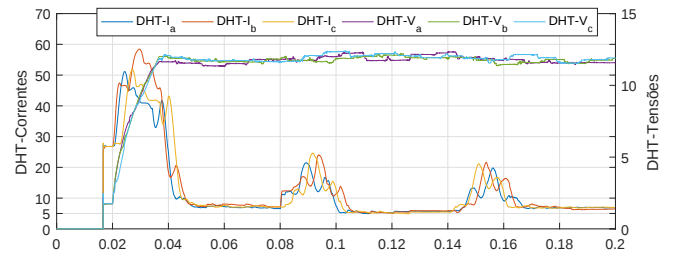


Figura 17. DHT das correntes (esquerda) e das tensões (direita).

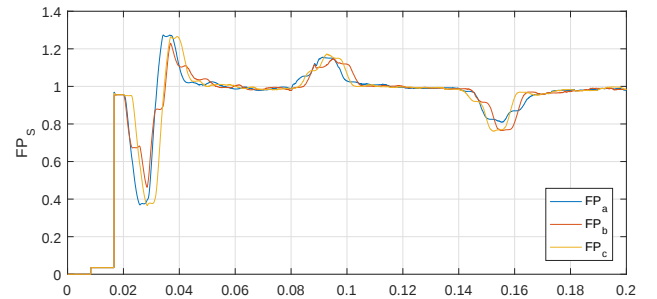


Figura 18. Fator de potência (FP) visto pela rede CA a quatro fios.

19 apresenta a corrente na fonte em mesma fase e amplitude correspondentes à referência, entretanto, com níveis elevados de ruídos, devido ao tipo de carga conectada neste terceiro caso. Pelo mesmo motivo, a Fig. 20, que representa a corrente na carga, não apresenta distorções como nos outros casos. O instante do acionamento do FAP pode ser melhor observado na Fig. 21.

A DHT das tensões estabiliza em torno de 8% enquanto a DHT das correntes por volta de 25% sendo que esta atinge certa de 65% antes do FAP começar a atuar no PAC, Fig. 22. Quanto ao FP o controlador mantém este acima de 0,92 ou mais próximo de uma unidade, conforme Fig. 23.

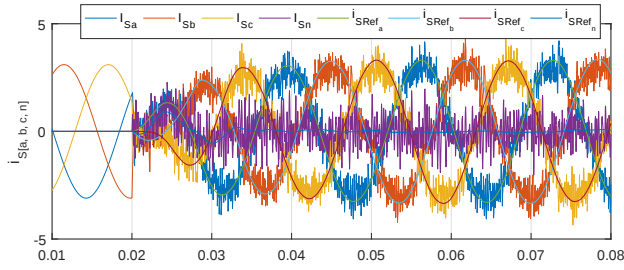


Figura 19. Formas de onda da corrente observada pela fonte.

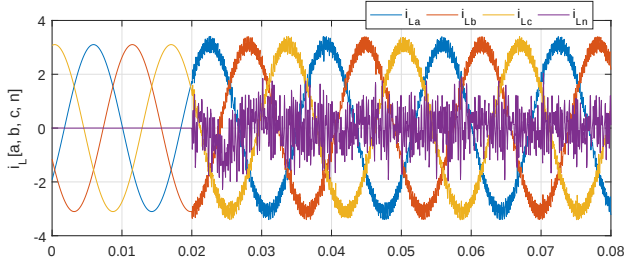


Figura 20. Formas de onda da corrente na carga.

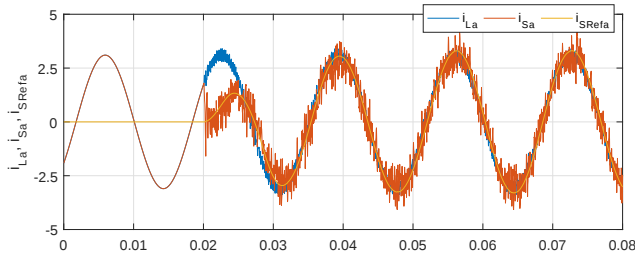


Figura 21. Formas de onda da corrente na carga, na fonte e da referência para a fonte.

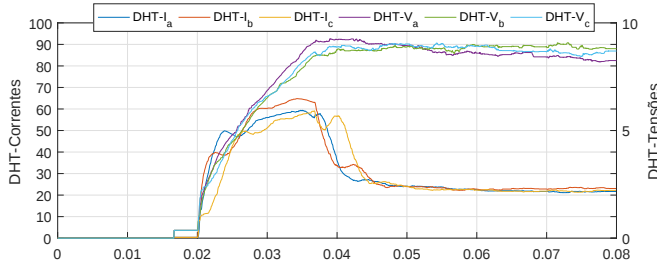


Figura 22. DHT das correntes (esquerda) e das tensões (direita).

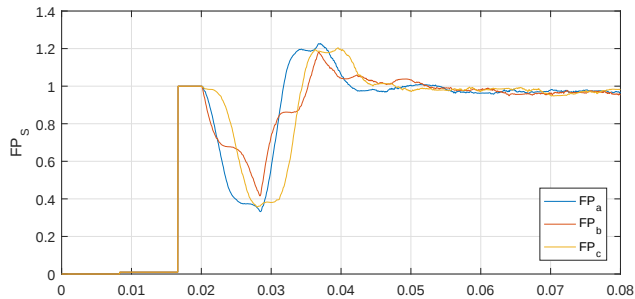


Figura 23. Fator de potência (FP) visto pela rede CA a quatro fios.

VI. CONCLUSÕES

Um filtro ativo de potência trifásico baseado em um inversor a quatro braços foi proposto para compensação de correntes em uma rede CA de quatro fios (Yn). Essa rede trifásica CA foi escolhida por tratar-se de um caso comum entre as topologias de sistemas de distribuição de baixa tensão presentes no sistema elétrico brasileiro.

Para a operação do filtro ativo proposto, foi sugerido um método de controle preditivo baseado em modelo (MPC) que fosse capaz de igualar as potências ativas requeridas por diferentes tipos de carga lineares e não-lineares com as respectivas potências ativas fornecidas pelo alimentador da rede CA trifásica. Para tanto, a potência ativa fornecida pelo filtro ativo deve ser nula e o fator de potência equivalente deve se aproximar do valor unitário.

Resultados de simulações envolvendo três conjuntos de carga local, com variação dinâmica, foram apresentados e discutidos. A partir deles pode-se concluir que a proposta de aplicação do controle preditivo MPC é robusta o suficiente para apresentar resultados satisfatórios e o pleno alcance dos objetivos propostos. Além disso, dentre as demais vantagens verificadas pela proposta de filtro ativo apresentada, é possível destacar: a realimentação e utilização dos sinais no tempo (sem decomposição ou transformações) a partir do modelo de estados; a característica de compensação individual e independente para cada fase da rede CA, mesmo para situações de desequilíbrio de carga.

Os autores continuam observando a aplicabilidade e uma possível implementação do método de controle preditivo MPC em outras aplicações de compensação harmônica e de conversores estáticos de potência.

REFERÊNCIAS

- [1] Sérgio Pires Pimentel. Aplicação de inversor multinível como filtro ativo de potência. Master's thesis, UNICAMP, 2006.
- [2] Fernando Pinhabel Marafão. *Análise e controle da energia elétrica através de técnicas de processamento digital de sinais*. PhD thesis, UNICAMP, 2004.
- [3] ANEEL. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL., 2015.
- [4] A. Ozdemir and Z. Ozdemir. Digital current control of a three-phase four-leg voltage source inverter by using p-q-r theory. *IET Power Electronics*, March 2014.
- [5] I. Vechiu, O. Curea, and H. Camblong. Transient operation of a four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Feb 2010.
- [6] S. R. Naidu and D. A. Fernandes. Dynamic voltage restorer based on a four-leg voltage source converter. *IET Generation, Transmission Distribution*, May 2009.
- [7] M. Rivera, V. Yaramasu, A. Llor, J. Rodriguez, B. Wu, and M. Fadel. Digital predictive current control of a three-phase four-leg inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Nov 2013.