



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VICENTE LEONARDO CORDEIRO KOHLER

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE
REFERÊNCIA DE CORRENTE SCR E SCS IMPLEMENTADAS EM INVERSORES
MULTIFUNCIONAIS**

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

VICENTE LEONARDO CORDEIRO KOHLER

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE
REFERÊNCIA DE CORRENTE SCR E SCS IMPLEMENTADAS EM INVERSORES
MULTIFUNCIONAIS**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Doutor Jakson Paulo Bonaldo

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

K79a Kohler, Vicente Leonardo Cordeiro.

Análise comparativa entre as técnicas de geração de referência de corrente scr e scs implementadas em inversores multifuncionais [recurso eletrônico] / Vicente Leonardo Cordeiro Kohler. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 25 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Jakson Paulo Bonaldo.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Filtro Ativo de Potência, Inversores Multifuncionais, Síntese de Carga Resistiva, Síntese de Corrente Senoidal. I. Bonaldo, Jakson Paulo, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.102464/2022-71

Interessado: @interessados_virgula_espaco@

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA DE CORRENTE SCR E SCS IMPLEMENTADAS EM INVERSORES MULTIFUNCIONAIS.

ALUNO: Vicente Leonardo Cordeiro Kohler

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de dezembro de 2022.

Nota: 9,33

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo

Orientador

Prof. Dr. Fabricio Parra Santilio

Examinador

Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes



Documento assinado eletronicamente por **JAKSON PAULO BONALDO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 11/12/2022, às 20:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FABRICIO PARRA SANTILIO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 13/12/2022, às 14:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Helmo Kelis Morales Paredes, Usuário Externo**, em 19/12/2022, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5359750** e o código CRC **45A9F41C**.

DEDICATÓRIA

À Roberto, Adélia e Mariana.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos Gustavo Rondon, Gabriel Caurin, Gabriel Almeida e Ellian Victor (Beleza) pelas risadas e bons momentos.

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo apresentar uma análise de desempenho quanto à qualidade de energia elétrica no ponto de acoplamento comum (PAC) de inversores trifásicos operando de forma multifuncional. Busca-se analisar duas diferentes estratégias de determinação de referência de corrente: a síntese de corrente senoidal (SCS), a qual impõe uma corrente senoidal na rede; e a síntese de carga resistiva (SCR), a qual impõe uma corrente na rede com forma de onda igual à da tensão no PAC. Foi observado que a SCS produz menores índices de distorção harmônica total de corrente e de tensão nos cenários de desequilíbrio de tensão e desbalanço de carga, mantendo um fator de potência alto, apesar de não unitário, em grande parte dos cenários. Já a SCR se destaca amortecendo ressonâncias, mantendo o fator de potência próximo da unidade.

Palavras-chave: Filtro Ativo de Potência. Inversores Multifuncionais. Síntese de Carga Resistiva. Síntese de Corrente Senoidal.

ABSTRACT

This article aims to present a performance analysis regarding the quality of electrical energy at the point of common coupling (PAC) of three-phase inverters operating in a multifunctional way. The aim is to analyze two different current reference determination strategies: the sinusoidal current synthesis (SCS), which imposes a sinusoidal current on the network; and resistive load synthesis (SCR), which imposes a current on the network with a waveform equal to the PAC voltage. It was observed that the SCS produces lower levels of current and voltage total harmonic distortion in voltage unbalance and load imbalance scenarios, maintaining a high power factor, although not unity, in most scenarios. On the other hand, the SCR stands out by damping resonances, keeping the power factor close to unity.

Keywords: Active Power Filter. Multifunctional Inverters. Resistive Load Synthesis. Sinusoidal Current Synthesis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Fig. 1. Corrente na rede e tensão no PAC com a utilização das técnicas: a) SCS; b) SCR.....	16
Fig. 2. Sistema convencional de injeção de energia, advinda de fontes renováveis, na rede: a) Esquema simplificado para conexão entre rede, carga e IEP; b) Estratégia convencional de controle.....	16
Fig. 3. Tensão no PAC e corrente na rede: a) Carga linear conectada ao PAC; b) Carga não linear conectada ao PAC.....	17
Fig. 4. Sistema convencional de filtragem ativa.....	17
Fig. 5. Formas de onda da tensão no PAC, corrente na rede, corrente da carga e corrente do CEP: a) Sem a ativação do FAP; b) Com a ativação do FAP.	17
Fig. 6. Sistema convencional de um inversor multifuncional.	17
Fig. 7. Diagrama esquemático simplificado do Inversor Multifuncional conectado à rede elétrica: a) Circuito de potência; b) Sistema de controle.....	18
Fig. 8. Forma de onda da tensão no PAC e corrente da rede da fase A para tensão do PAC e carga equilibradas: a) CEP desativado; b) FAP ativado, SCS; c) FAP ativado, SCR.....	19
Fig. 9. Formas de onda da fase A da rede para tensão do PAC e carga equilibradas: a) CEP atuando como IEP, injetando 6 A no barramento CC; b) CEP atuando de forma multifuncional, realizando a SCR.	20
Fig. 10. Formas de onda das três fases da rede para tensão do PAC desequilibrada e carga equilibrada: a) CEP atuando como IEP, injetando 6 A no barramento CC; b) CEP atuando de forma multifuncional, realizando a SCS.....	20
Fig. 11. Formas de onda das três fases da rede para tensão do PAC equilibrada e carga desequilibrada: a) CEP atuando como IEP, injetando 6 A no barramento CC; b) CEP atuando de forma multifuncional, realizando a SCR.	21
Fig. 12. Formas de onda das três fases da rede para tensão do PAC e carga desequilibradas: a) CEP desativado; b) CEP atuando de forma multifuncional, injetando 6 A no barramento CC e realizando a SCR.	21
Fig. 13. Formas de onda da fase A da rede com sistema equilibrado: a) Sem ressonância; b) Com ressonância.....	22
Fig. 14. Formas de onda da fase A da rede com sistema equilibrado e com ressonância, com apenas o FAP ativado: a) SCS; b) SCR.....	22

Fig. 15. Formas de onda da fase A da rede com ressonância, inversor atuando de forma multifuncional injetando 6 A no barramento CC: a) SCS; b) SCR.....	22
Fig. 16. Sistema convencional de múltiplos inversores multifuncionais conectados à rede...	23
Fig. 17. Formas de onda da fase A da rede com ressonância, inversores atuando de forma multifuncional, realizando a SCR: a) Apenas um inversor; b) Dois inversores; c) Três inversores; d) Quatro inversores.....	23
Fig. 18. Formas de onda da fase A da rede com ressonância, inversores atuando de forma multifuncional, realizando a SCS: a) Apenas um inversor; b) Dois inversores; c) Três inversores; d) Quatro inversores.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Parâmetros do conversor, rede e carga implementados	18
Tabela II - Dados da fase A da rede com tensão do PAC e carga equilibradas, CEP como FAP	19
Tabela III - Dados da fase A da rede com tensão do PAC e carga equilibradas, CEP multifuncional.....	20
Tabela IV - Dados da fase A da rede com tensão do PAC desequilibrada e carga equilibrada, CEP multifuncional	20
Tabela V - Dados da fase A da rede com tensão do PAC equilibrada e carga desequilibrada, CEP multifuncional	21
Tabela VI - Dados da fase A da rede com tensão do PAC e carga desequilibradas, CEP multifuncional.....	21
Tabela VII - Dados da fase A da rede com ressonância, CEP como FAP	22
Tabela VIII - Dados da fase A da rede com ressonância, CEP multifuncional.....	22
Tabela IX - Dados da fase A da rede com ressonância, CEP multifuncional, injetando 1,5 A no barramento CC e realizando SCR.....	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEP	Conversor Eletrônico de Potência
DHT	Distorção Harmônica Total
FAP	Filtro Ativo de Potência
IEP	Interface Eletrônica de Potência
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Controlador Proporcional-Integral
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RMS	Valor Eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
i_{GA}, i_{GB}, i_{GC}	Corrente instantânea na fase A, fase B e fase C da rede, respectivamente
i_{FA}, i_{FB}, i_{FC}	Corrente instantânea na fase A, fase B e fase C do CEP, respectivamente
i_{LA}, i_{LB}, i_{LC}	Corrente instantânea na fase A, fase B e fase C da carga, respectivamente
i_{conA}	Corrente instantânea de controle do PWM da fase A
i_{conB}	Corrente instantânea de controle do PWM da fase B
i_{conC}	Corrente instantânea de controle do PWM da fase C
v_{PACA}	Tensão instantânea no PAC da fase A
v_{PACB}	Tensão instantânea no PAC da fase B
v_{PACC}	Tensão instantânea no PAC da fase C
V_{CC}^*	Tensão de referência do capacitor do barramento CC

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
V	Volts
R	Resistência Ôhmica

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	15
II. CONVERSORES MULTIFUNCIONAIS.....	16
C. Inversores Multifuncionais	17
III. IMPLEMENTAÇÃO DE UM INVERSOR TRIFÁSICO MULTIFUNCIONAL	18
IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	19
A. Tensão do PAC equilibrada e carga equilibrada	19
B. Tensão do PAC desequilibrada e carga equilibrada.....	20
C. Tensão do PAC equilibrada e carga desequilibrada	20
D. Tensão do PAC desequilibrada e carga desequilibrada.....	21
E. Ressonância na rede	21
V. CONCLUSÕES	23

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA DE CORRENTE SCR E SCS IMPLEMENTADAS EM INVERSORES MULTIFUNCIONAIS

Vicente Leonardo Cordeiro Kohler, Jakson Paulo Bonaldo

Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá – Mato Grosso,
vicleonardock@gmail.com, jakson.bonaldo@ufmt.br

Resumo - Esse artigo tem por objetivo apresentar uma análise de desempenho quanto à qualidade de energia elétrica no ponto de acoplamento comum (PAC) de inversores trifásicos operando de forma multifuncional. Busca-se analisar duas diferentes estratégias de determinação de referência de corrente: a síntese de corrente senoidal (SCS), a qual impõe uma corrente senoidal na rede; e a síntese de carga resistiva (SCR), a qual impõe uma corrente na rede com forma de onda igual à da tensão no PAC. Foi observado que a SCS produz menores índices de distorção harmônica total de corrente e de tensão nos cenários de desequilíbrio de tensão e desbalanço de carga, mantendo um fator de potência alto, apesar de não unitário, em grande parte dos cenários. Já a SCR se destaca amortecendo ressonâncias, mantendo o fator de potência próximo da unidade.

Palavras-Chave - Filtro Ativo de Potência. Inversores Multifuncionais. Síntese de Carga Resistiva. Síntese de Corrente Senoidal.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN CURRENT REFERENCE GENERATION TECHNIQUES SCR AND SCS IMPLEMENTED IN MULTIFUNCTIONAL INVERTERS

Abstract - This article aims to present a performance analysis regarding the quality of electrical energy at the point of common coupling (PAC) of three-phase inverters operating in a multifunctional way. The aim is to analyze two different current reference determination strategies: the sinusoidal current synthesis (SCS), which imposes a sinusoidal current on the network; and resistive load synthesis (SCR), which imposes a current on the network with a waveform equal to the PAC voltage. It was observed that the SCS produces lower levels of current and voltage total harmonic distortion in voltage unbalance and load imbalance scenarios, maintaining a high power factor, although not unity, in most scenarios. On the other hand, the SCR stands out by damping resonances, keeping the power factor close to unity.

Keywords – Active Power Filter. Multifunctional Inverters. Resistive Load Synthesis. Sinusoidal Current Synthesis.

NOMENCLATURA

i_G	Corrente instantânea da rede.
i_F	Corrente instantânea do CEP.
i_L	Corrente instantânea da carga.
i_{con}	Corrente instantânea de controle do PWM.
FP_S	Fator de potência da fonte.
v_{PAC}	Tensão instantânea no PAC.
V_{CC}^*	Tensão de referência do capacitor do barramento CC.

I. INTRODUÇÃO

Além dos impactos positivos trazidos pelo avanço de tecnologias baseadas na eletrônica de potência, tal como o aumento da eficiência energética na utilização de equipamentos, surgiram também novos desafios, dentre os quais se destaca a distorção harmônica inserida na tensão do ponto de acoplamento comum (PAC) pelas cargas não lineares [1] [2]. Os efeitos provocados pela presença de harmônicas nos sistemas de energia são diversos [1], tais como a interferência em sistemas de comunicação próximos de linhas de transmissão, aumento da corrente de neutro, mal funcionamento de equipamentos de medição, ressonância e entre outros, possuindo até mesmo impacto econômico [3].

Atualmente, dado o crescimento da geração distribuída, o conceito de microrredes vem ganhando espaço na literatura científica, especialmente atrelado a utilização de eletrônica de potência para realizar o controle de fluxo de potência e de qualidade de energia. Atualmente, vários trabalhos estudam as formas de implementação, formas de controle e implicações das microrredes no sistema elétrico brasileiro [4] [5] [6] [7].

Esta tecnologia está intimamente relacionada com o reaproveitamento de energias renováveis, como solar e eólica. Os equipamentos responsáveis por permitir o aproveitamento da energia gerada por fontes renováveis são os conversores CC-CA utilizados como inversores conectados à rede, que no presente trabalho são chamados de conversores eletrônicos de potência (CEP). Quando conectados à rede elétrica, os CEPs podem injetar energia na rede CA e, simultaneamente, atuar compensando potência reativa e correntes harmônicas, sem perder sua característica de injeção de energia [5].

Entretanto, a operação adequada dos CEPs depende de estratégias de controle que permitam aproveitar ao máximo sua capacidade de compensação, sem prejudicar sua função primária de injetar energia na rede, a fim de maximizar sua utilização [5]. Um dos controles necessários aborda a definição do sinal de referência de corrente, responsável por definir a corrente que o inversor sintetizará em sua saída.

Em [8] e [9] são apresentadas algumas das mais conhecidas técnicas de determinação de corrente de referência, das quais é possível citar a Técnica de Transformada de Fourier, a

Teoria da Potência Reativa Instantânea e a Técnica de Detecção Síncrona, as quais se baseiam em cálculos para determinar a corrente de referência. Já em [10] é abordado a utilização de dois métodos que determinam o sinal de referência com base na forma de onda de corrente desejada no lado da rede por meio de cálculos mais simples. Estas estratégias são: a Síntese de Corrente Senoidal (SCS), a qual impõe na rede uma corrente senoidal em fase com a tensão do PAC, mesmo que a tensão do PAC seja distorcida, como pode ser observado na Figura 1(a); e a Síntese de Carga Resistiva (SCR), a qual impõe na rede uma corrente com mesma forma de onda que a tensão do PAC, apresentada na Figura 1(b).

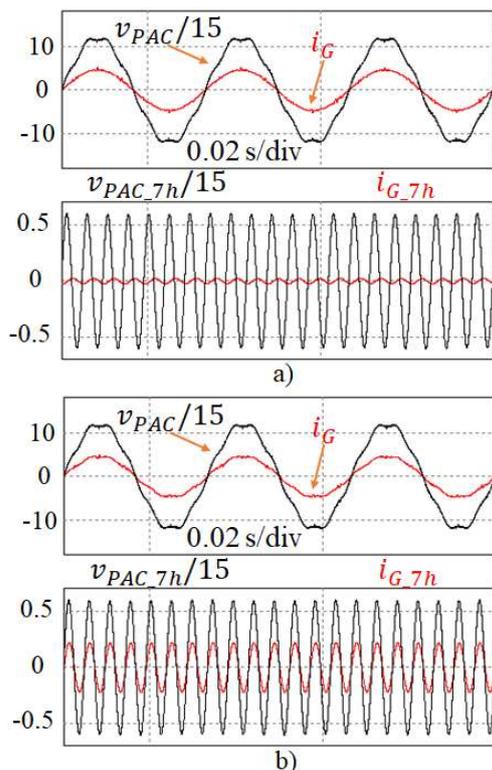


Fig. 1. Corrente na rede e tensão no PAC com a utilização das técnicas: a) SCS; b) SCR.

As duas técnicas apresentam resultados iguais para redes com tensão senoidal no PAC. Contudo, os resultados se diferem quando há distorção harmônica na tensão do PAC. Em [10] a SCR é apresentada como uma alternativa em relação à SCS quando se trata de redes com distorção harmônica na tensão no PAC, tendo em vista que a utilização da SCS resulta em corrente e tensão com formas de onda diferentes, reduzindo o fator de potência (FP). Por outro lado, a utilização da SCR faz com que a corrente e tensão apresentem mesma forma de onda, implicando em um FP próximo de 1. Além disso, [10] também apresenta uma importante característica da SCR, a capacidade de amortecer ressonâncias devido o conjunto formado pela carga e pelo CEP ser visto como uma resistência pela rede, reduzindo a distorção harmônica da tensão no PAC.

Alguns trabalhos como [5] e [11] consideraram o que foi exposto por [10] e utilizaram a SCR. Em [11] é proposto uma estratégia para controle de inversores conectados à sistemas de geração distribuída atuando de forma multifuncional, o

qual é baseado na SCR. Já em [5] é implementado um inversor monofásico multifuncional que utiliza a técnica SCR, injetando energia renovável na rede CA e paralelamente compensando harmônicas e potência reativa.

No entanto, no contexto da utilização de inversores multifuncionais no aproveitamento de energia advinda de fontes renováveis, não há trabalhos disponíveis abordando as diferenças entre a implementação da SCS e SCR. Por isso o presente trabalho visa identificar os cenários nos quais cada uma das estratégias impõe na rede os melhores indicadores de qualidade de energia elétrica (QEE), assim como destacar as vantagens e desvantagens de cada estratégia em diversos cenários. Para tanto, foi utilizada a versão gratuita do *software* de simulação de circuitos eletrônicos PSIM para simular o circuito do inversor trifásico multifuncional em cenários como desbalanço de carga, desequilíbrio de tensão e ressonância.

II. CONVERSORES MULTIFUNCAIONAIS

Neste item são apresentados diferentes modos de operação dos conversores.

A. Interface Eletrônica de Potência

Quando o CEP apenas injeta energia na rede, este é comumente denominado de Interface Eletrônica de Potência (IEP). Neste modo de operação a tensão do barramento CC do inversor é mantida constante, sendo esta regulação responsável por definir o montante de potência/corrente a ser injetada na rede. À vista disso, a fonte de energia renovável pode ser, a priori, modelada como uma fonte de tensão CC. A Figura 2(a) mostra um esquema simplificado para permitir o aproveitamento de energia advinda de fontes renováveis e na Figura 2(b) é apresentado o controle convencional para a operação do CEP como IEP.

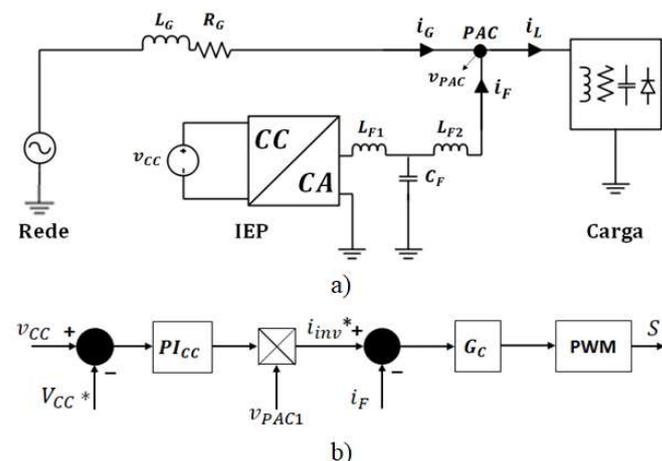


Fig. 2. Sistema convencional de injeção de energia, advinda de fontes renováveis, na rede: a) Esquema simplificado para conexão entre rede, carga e IEP; b) Estratégia convencional de controle.

Visto que a atuação como IEP não pode compensar distúrbios, a corrente da rede ficará distorcida caso cargas não lineares sejam conectadas ao PAC, como pode ser visto na Figura 3.

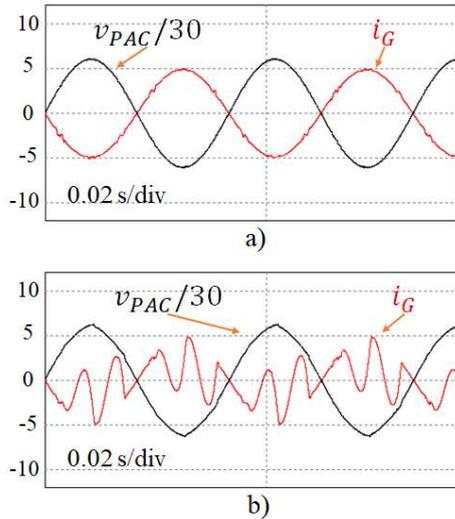


Fig. 3. Tensão no PAC e corrente na rede: a) Carga linear conectada ao PAC; b) Carga não linear conectada ao PAC.

B. Filtro Ativo de Potência

Um Filtro Ativo de Potência (FAP) é implementado como um CEP conectado à rede CA, de forma bastante similar à topologia do CEP operando apenas como IEP, como pode ser observado na Figura 4. Entretanto, sem a necessidade de uma fonte de energia no barramento CC, uma vez que um capacitor no barramento CC mantém a tensão CC estável, permitindo a síntese de qualquer forma de onda de corrente na saída CA do CEP, contanto que a tensão CC seja superior a máxima tensão de linha. Essa característica permite que o FAP seja utilizado para filtragem de cargas dinâmicas, podendo compensar potência reativa, corrigir fator de potência, compensar harmônicas de tensão ou corrente, entre outros [1].

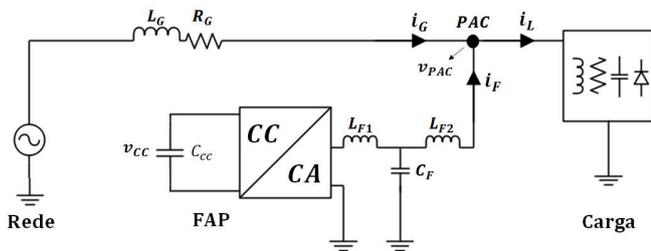


Fig. 4. Sistema convencional de filtragem ativa.

Os FAPs podem ser utilizados em paralelo, em série ou de forma híbrida com a carga [1] [8] [9], apresentando funcionalidades diferentes para cada topologia. Neste trabalho é implementado o FAP paralelo, permitindo a compensação da corrente distorcida da carga, potência reativa e desequilíbrios de corrente. É possível compreender a relação entre a corrente injetada pelo filtro e a corrente da rede por meio da aplicação da lei de Kirchoff para o nó do PAC:

$$i_G + i_F = i_L \quad (1)$$

$$i_G = i_L - i_F \quad (2)$$

Nota-se que a corrente do FAP compensa a corrente da carga (i_L). Logo, basta determinar a corrente que se espera na rede (após a compensação) para que então o filtro sintetize

uma forma de onda de corrente específica que garanta isso. Portanto, basta definir a estratégia responsável por determinar a referência da corrente da rede. A SCS utiliza o sinal da componente fundamental da tensão no PAC para determinar a forma de onda da corrente, dessa forma é obtido um sinal de corrente senoidal e em fase com a tensão do PAC. Já a SCR utiliza o sinal de tensão do PAC sem filtragem para definir a forma de onda da corrente na rede.

Na Figura 5 são apresentadas as correntes e tensão do PAC para um sistema com cargas não lineares conectadas ao PAC sem a ativação do FAP e com a ativação do FAP.

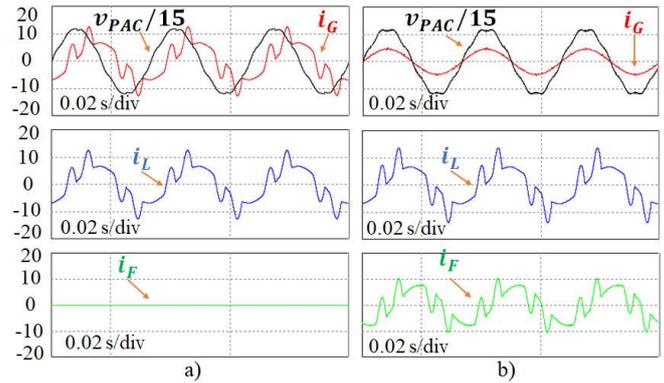
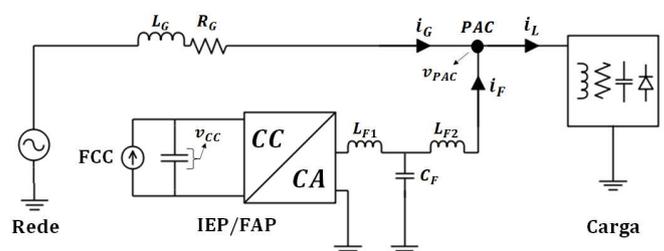


Fig. 5. Formas de onda da tensão no PAC, corrente na rede, corrente da carga e corrente do CEP: a) Sem a ativação do FAP; b) Com a ativação do FAP.

C. Inversores Multifuncionais

Tendo em vista a similaridade das topologias de implementação dos conversores atuando como IEP ou como FAP, além da necessidade de conexão das fontes de energias renováveis à rede elétrica com garantia de atendimento à requisitos de QEE no lado da rede, surge a implementação dos inversores atuando de forma multifuncional, que agregam em um único dispositivo a capacidade de injetar energia na rede CA e ainda compensar os distúrbios de QEE gerados pela carga.

Portanto, tendo em vista que no FAP há um capacitor no estágio de entrada do inversor, é conveniente modelar a fonte de energia renovável como uma fonte de corrente controlada ao invés de uma fonte de tensão. O circuito convencional de um inversor atuando de forma multifuncional é mostrado na Figura 6.



FCC: Fonte de Corrente Controlada

Fig. 6. Sistema convencional de um inversor multifuncional.

III. IMPLEMENTAÇÃO DE UM INVERSOR TRIFÁSICO MULTIFUNCIONAL

O circuito trifásico de um CEP implementando um inversor multifuncional acionado por Pulse Width Modulation (PWM) utilizado para realizar as simulações deste trabalho é mostrado na Figura 7. Esse circuito foi baseado no sistema monofásico de um CEP implementando um inversor multifuncional desenvolvido em [5]. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados no sistema.

O controlador de tensão CC é do tipo proporcional Integral (PI), responsável por garantir que a tensão no barramento CC seja mantida em um valor constante V_{CC}^* . A técnica de determinação de referência de corrente é definida selecionando qual sinal de tensão será multiplicado pelo valor de amplitude de I_{Gpico}^* (sendo este o pico de corrente desejado no lado da rede), caso seja utilizado o sinal v_{PAC} , o inversor realizará a SCR. Caso seja selecionado v_{PAC1} , que representa a componente fundamental do sinal de tensão, o inversor realizará a SCS.

A ativação e desativação da compensação realizada pelo inversor é feita selecionando qual sinal será subtraído do sinal de referência de corrente na rede i_G^* , caso seja selecionado a corrente da carga (i_L) o inversor compensará a potência reativa e as correntes harmônicas impostas pela carga. Se for selecionado 0, o CEP atuará apenas como IEP, isto é, sem realizar a compensação de distúrbios de QEE.

TABELA I
Parâmetros do conversor, rede e carga implementados

Parâmetros		Valores
Rede	Tensão de pico em 60 Hz	180 V
	Tensão de pico em 420 Hz	9 V
	Resistência da rede, R_G	100 m Ω
Carga Linear	Indutância da rede, L_G	0.56 mH
	Resistência da carga linear, R_B	3 Ω
Carga Não Linear	Indutância da carga linear, L_B	70 mH
	Resistência da carga não linear, R_L	95 Ω
CEP	Capacitância da carga não linear, C_L	1000 μ F
	Indutância de Acoplamento, L_A	1 mH
	Indutâncias do filtro LCL, $L_1 = L_2$	0.5 mH
	Resistência interna dos indutores do filtro LCL, $R_1 = R_2$	100 m Ω
	Capacitância do filtro LCL, C_o	3 μ F
	Resistência equivalente dos capacitores do filtro LCL, R_o	10 m Ω
Circuito de Controle	Tensão no barramento CC, V_{DC}	400 V
	Capacitância do barramento CC, C_{DC}	5 mF
	Corrente CC injetada pela fonte, I_{CC}	0 A, 3 A e 6 A
Circuito de Controle	Frequência da portadora	26 kHz
	Ganho do controlador de tensão	5
	Ganho do controlador de corrente	-2
	Normalização das correntes do circuito	1/15
	Normalização da tensão V_{DC}	1/500
Normalização das tensões do PAC	1/180	

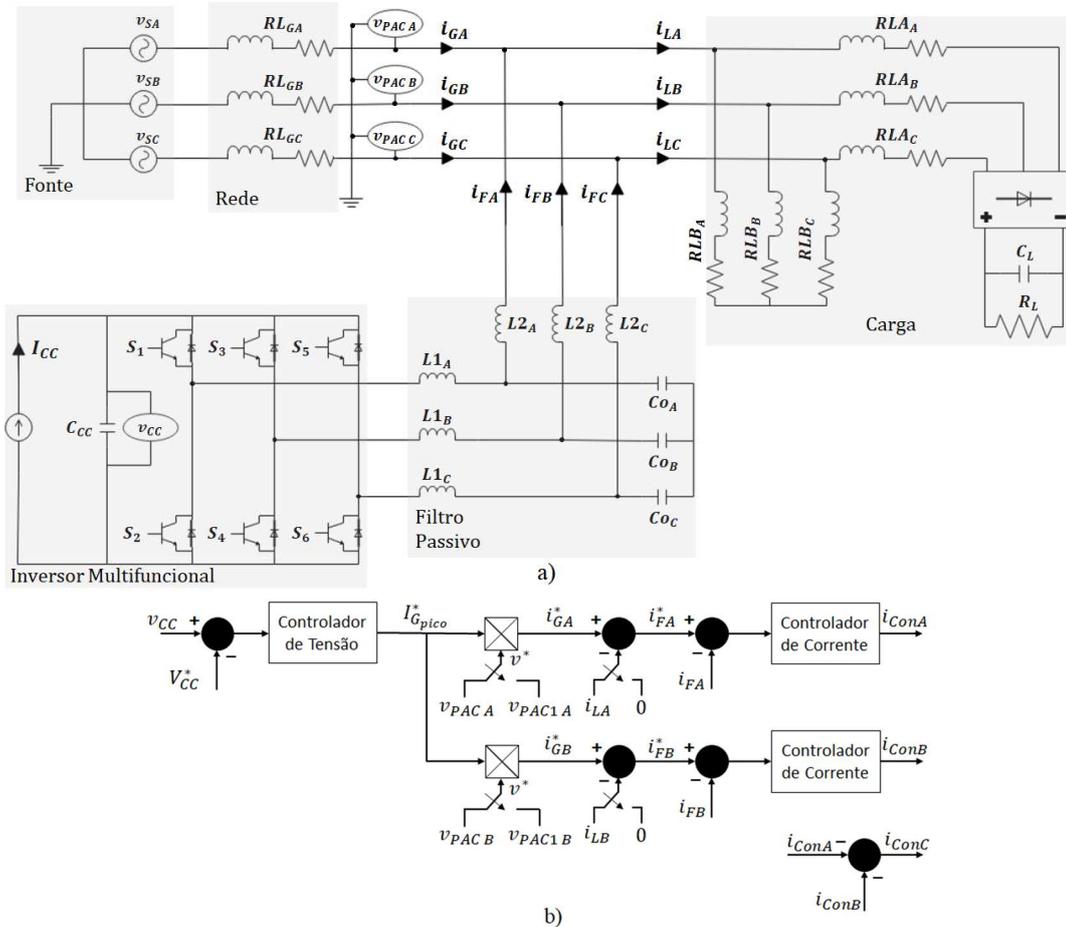


Fig. 7. Diagrama esquemático simplificado do Inversor Multifuncional conectado à rede elétrica: a) Circuito de potência; b) Sistema de controle.

Por fim, é preciso garantir que a corrente na saída do CEP siga a referência de corrente i_F^* , o que é feito utilizando um controlador proporcional ressonante harmônico, implementado conforme demonstrado em [5]. Tendo em vista que é desejado impor nas fases da rede correntes trifásicas balanceadas, para um sistema trifásico a 3 condutores, a referência da corrente da fase C pode ser obtida usando a soma das referências da fase A e fase B.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para demonstrar as peculiaridades de cada uma das técnicas de geração de referência abordadas neste trabalho foram realizadas simulações considerando os diferentes cenários:

- Tensão da fonte equilibrada e carga equilibrada;
- Tensão da fonte desequilibrada e carga equilibrada;
- Tensão da fonte equilibrada e carga desequilibrada;
- Tensão da fonte e carga desequilibrada;
- Ressonância na rede.

Nas simulações foram considerados diferentes modos de operação do CEP, tais como operando apenas como FAP ou operando apenas como IEP, bem como a ativação concomitante dos dois modos. Além disso, foram considerados diferentes valores de corrente injetada no barramento CC, isto é, diferentes valores de potência ativa a ser injetada na rede CA.

Tendo em vista que as duas estratégias apresentam resultados iguais para cenários sem distorção harmônica na tensão da rede, apenas os cenários com distorção são relevantes para este trabalho. A fim de melhorar a visualização das diferenças nas formas de ondas das duas técnicas foi definido um nível de distorção harmônica de 5% na 7ª harmônica.

A abordagem do conteúdo harmônico e da DHT foi feita considerando apenas as 20 primeiras componentes harmônicas, 1ª (60 Hz) até a 20ª (1200 Hz), uma vez que os resultados obtidos com essa consideração se tornam mais relevantes para o estudo dos impactos da SCS e SCR, visto que desconsidera as componentes de alta frequência que estão relacionadas com o chaveamento em alta frequência do CEP.

A. Tensão do PAC equilibrada e carga equilibrada

No cenário de tensão do PAC e carga equilibradas os valores dos parâmetros da rede para todas as fases são iguais. Logo, os dados observados na fase A são os mesmos observados nas demais fases.

Na Figura 8(a) é possível observar a corrente na rede com formato distorcido devido de uma carga não linear conectada à rede. Ao ativar a função de FAP do CEP é possível notar que tanto as componentes harmônicas da corrente da rede quanto a defasagem em relação à tensão são corrigidas, como é possível observar na Figura 8(b) com a SCS e na Figura 8(c) com a SCR.

Na Tabela II são apresentados os dados da fase A da rede para esse cenário. É observado que independente da estratégia de acionamento utilizada o FAP compensa efetivamente a potência reativa da carga, tendo em vista que o FP fica igual a

0,99 nos dois casos. Isso se deve ao reativo exigido pela carga que era anteriormente fornecido pela fonte ser, agora, fornecido pelo FAP. A potência aparente da rede é reduzida e,

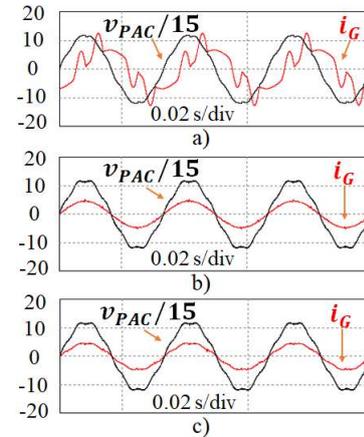


Fig. 8. Forma de onda da tensão no PAC e corrente da rede da fase A para tensão do PAC e carga equilibradas: a) CEP desativado; b) FAP ativado, SCS; c) FAP ativado, SCR.

TABELA II
Dados da fase A da rede com tensão do PAC e carga equilibradas, CEP como FAP

Dado Medido	CEP	CEP operando como FAP	
	desabilitado	SCS	SCR
$i_{G\text{RMS}H}$ (A)	3,963	0,054	0,233
$i_{G\text{RMS}}$ (A)	6,47	3,297	3,292
$i_{F\text{RMS}}$ (A)	0	5,904	5,888
$i_{L\text{RMS}}$ (A)	6,7	6,659	6,666
$v_{PAC\text{RMS}}$ (V)	125,97	127,111	127,106
FP_{SA}	0,465	0,998	0,999
S_{SA} (VA)	815,138	419,186	418,542
S_{LA} (VA)	815,138	846,513	847,361
S_{FA} (VA)	0	750,495	748,461
DHT_{VPAC} (%)	3,907	5,01	4,989
DHT_{IGA} (%)	38,567	0,565	4,72

dessa forma, o valor RMS da corrente na rede também, diminuindo de 6,47 A para 3,29 A independente da técnica utilizada.

Além disso, é possível observar que as duas estratégias reduzem de forma relevante o conteúdo harmônico da corrente da rede. No entanto, enquanto a DHT de corrente passa de 38,5% para 0,56% na SCS, na SCR esse valor vai para 4,72%, tendo em vista que a forma de onda da corrente na SCR é baseada na forma de onda da tensão, cujo valor de DHT é de aproximadamente 5%. Ou seja, apesar das duas compensarem efetivamente os distúrbios da carga, a SCS se destaca apresentando uma maior redução no conteúdo harmônico para esse cenário. Nota-se, ainda, que nas duas estratégias a DHT da tensão aumenta quando o FAP é ativado, tendenciando para mais próximo do valor original de DHT de tensão da fonte (5%).

Na Figura 9 é possível observar o comportamento do CEP quando opera de forma multifuncional, injetando 6 A no barramento CC e compensando harmônicas e potência reativa usando a SCR. Nessa situação o inversor fornece potência superior à demanda pela carga. Logo, o excedente de potência

ativa não demandado pela carga é injetado na rede, como observado pela defasagem de 180° graus entre a tensão do PAC e corrente da rede.

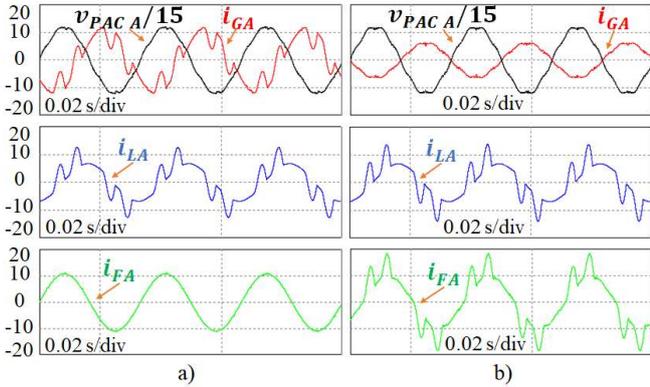


Fig. 9. Formas de onda da fase A da rede para tensão do PAC e carga equilibradas: a) CEP atuando como IEP, injetando 6 A no barramento CC; b) CEP atuando de forma multifuncional, realizando a SCR.

A Tabela III mostra os dados da fase A da rede para esse caso. É observado que o inversor não perde sua capacidade de compensar distúrbios de QEE quando atua de forma multifuncional, o que pode ser observado pelos valores de FP da fonte e DHT de tensão do PAC e da corrente da rede.

Tabela III

Dados da fase A da rede com tensão do PAC e carga equilibradas, CEP multifuncional

Dado Medido	CEP	CEP operando como IEP e FAP	
	operando como IEP	SCS	SCR
i_{GARMSH} (A)	4,072	0,091	0,308
i_{GARMS} (A)	7,43	4,438	4,432
i_{EARMS} (A)	7,687	9,612	9,618
i_{LARMS} (A)	6,523	6,717	6,707
$v_{PAC ARMS}$ (V)	126,723	127,883	127,89
FP_{SA}	-0,626	-0,998	-0,999
S_{SA} (VA)	941,592	567,673	566,882
S_{LA} (VA)	826,631	859,097	857,844
S_{FA} (VA)	974,228	1229,344	1230,177
$DHT_{VPAC A}$ (%)	3,899	4,977	4,995
$DHT_{IG A}$ (%)	33,397	0,977	5,281

B. Tensão do PAC desequilibrada e carga equilibrada

O segundo cenário estudado foi o de tensão desequilibrada e carga equilibrada, com desequilíbrio de amplitude de tensão de 20% da tensão nominal. O desequilíbrio de tensão pode ser observado nas formas de onda das três fases do sistema apresentadas na Figura 10(a), resultado do desequilíbrio de tensão somado ao fato do IEP estar injetando 6 A no barramento CC. Já na Figura 10(b) são mostradas as formas de onda após o FAP ser ativado, realizando a SCS. É possível notar que mesmo nesse cenário o inversor é capaz de impor a forma de onda desejada de corrente na rede.

No entanto, é importante frisar que mesmo após a atuação do FAP as correntes da rede permanecem desequilibradas, tendo em vista que as referências de amplitude das correntes

nas redes de cada fase advêm da tensão no PAC das suas respectivas fases, as quais se mantêm desequilibradas.

Apesar das fases se diferirem nesse cenário, os resultados relacionados aos índices de QEE e FP são semelhantes para todas as fases após o FAP ser ativado e por isso apenas os dados da fase A são apresentados na Tabela IV, a qual apresenta os parâmetros da rede após o FAP ser ativado.

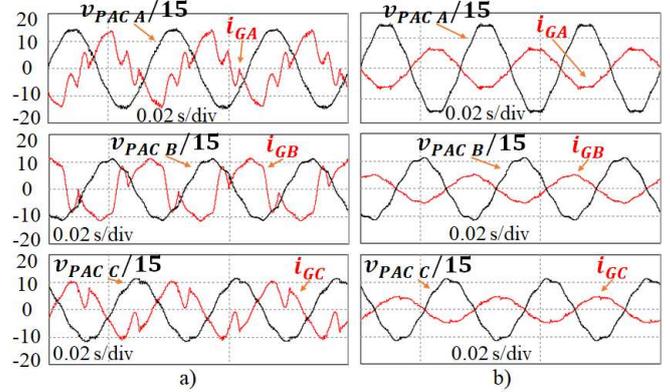


Fig. 10. Formas de onda das três fases da rede para tensão do PAC desequilibrada e carga equilibrada: a) CEP atuando como IEP, injetando 6 A no barramento CC; b) CEP atuando de forma multifuncional, realizando a SCS.

O conteúdo harmônico da corrente na rede, a DHT de tensão e de corrente reduzem e o FP aumenta com a ativação do FAP, de forma semelhante ao que ocorre no cenário de tensão do PAC e carga equilibradas, com a DHT de tensão e corrente sofrendo baixas alterações.

TABELA IV

Dados da fase A da rede com tensão do PAC desequilibrada e carga equilibrada, CEP multifuncional

Dado Medido	CEP	CEP operando como IEP e FAP	
	operando como IEP	SCS	SCR
i_{GARMSH} (A)	5,974	0,238	0,424
i_{GARMS} (A)	7,919	4,494	4,489
i_{EARMS} (A)	8,859	11,913	11,913
i_{LARMS} (A)	8,566	8,694	8,687
$v_{PAC ARMS}$ (V)	151,863	153,306	153,315
FP_{SA}	-0,481	-0,998	-0,998
S_{SA} (VA)	1202,754	689,063	688,382
S_{LA} (VA)	1300,892	1332,967	1332,003
S_{FA} (VA)	1345,409	1826,411	1826,47
$DHT_{VPAC A}$ (%)	3,037	4,154	4,167
$DHT_{IG A}$ (%)	36,563	2,345	5,051

C. Tensão do PAC equilibrada e carga desequilibrada

Para este cenário foi utilizada a mesma metodologia aplicada em [12], que consiste na remoção da impedância de uma das fases da carga em estrela que se encontra antes da carga não linear, conforme mostrado na Figura 7(a). Nesse caso foi retirada a impedância da fase C, isto é, RLB_C .

Os resultados de QEE e FP obtidos com o inversor multifuncional no cenário de tensão equilibrada e carga desequilibrada permanecem semelhantes aos obtidos nos outros dois cenários, como é possível observar na Tabela V.

No entanto, é importante destacar o comportamento observado na corrente da rede quando o FAP é ativado. Observando a Figura 11(b) é possível notar que a ativação do FAP não só compensa as correntes harmônicas e o reativo como também impõe na rede uma corrente balanceada, visto que as tensões do PAC das três fases são equilibradas.

TABELA V

Dados da fase A da rede com tensão do PAC equilibrada e carga desequilibrada, CEP multifuncional

Dado Medido	CEP	CEP operando como IEP e FAP	
	operando como IEP	SCS	SCR
i_{GARMSH} (A)	4,380	0,124	0,363
i_{GARMS} (A)	5,349	4,724	4,72
i_{FARMS} (A)	7,625	10,833	10,84
i_{LARMS} (A)	6,666	6,907	6,9
$v_{PAC\ ARMS}$ (V)	126,86	127,907	127,914
FP_{SA}	-0,519	-0,998	-0,999
S_{SA} (VA)	678,59	604,316	603,879
S_{LA} (VA)	845,688	883,538	882,676
S_{EA} (VA)	967,36	1385,731	1386,626
$DHT_{VPAC\ A}$ (%)	4,003	4,976	4,995
DHT_{IGA} (%)	48,554	1,101	5,304

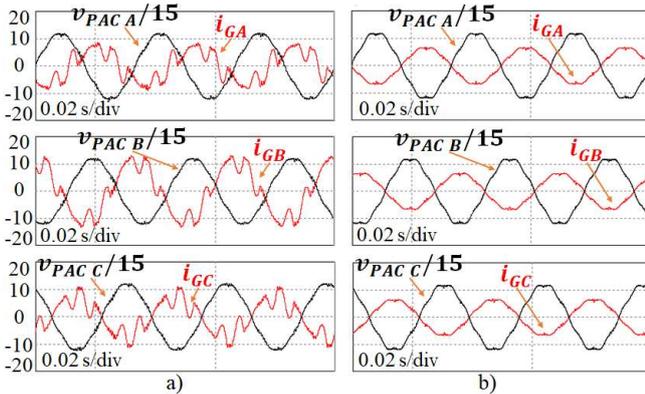


Fig. 11. Formas de onda das três fases da rede para tensão do PAC equilibrada e carga desequilibrada: a) CEP atuando como IEP, injetando 6 A no barramento CC; b) CEP atuando de forma multifuncional, realizando a SCR.

D. Tensão do PAC desequilibrada e carga desequilibrada

No cenário em que tanto a tensão do PAC quanto a carga são desequilibradas os valores de QEE e FP obtidos também foram semelhantes aos outros casos após o FAP ser ativado. Contudo, observando os valores apresentados na Tabela VI é possível notar que tanto na SCS quanto na SCR o conteúdo harmônico apresenta uma redução inferior à redução observada nos outros cenários, apesar do inversor multifuncional reduzir de forma eficaz grande parte do conteúdo harmônico.

Além disso, tendo em vista que a tensão do PAC é desequilibrada, o FAP apenas compensa o reativo e as correntes harmônicas da carga, sendo incapaz de balancear as correntes de cada fase da rede, como é possível observar na Figura 12(b).

Na Figura 12(a) são apresentadas as formas de onda da fase A quando o CEP está desativado, permitindo notar o

desequilíbrio de tensão e desbalanceamento de carga sem o efeito do IEP injetando energia na rede.

TABELA VI

Dados da fase A da rede com tensão do PAC e carga desequilibradas, CEP multifuncional

Dado Medido	CEP	CEP operando como IEP e FAP	
	desativado	SCS	SCR
i_{GARMSH} (A)	5,837	0,279	0,465
i_{GARMS} (A)	8,605	4,77	4,764
i_{FARMS} (A)	0,186	12,769	12,758
i_{LARMS} (A)	8,491	8,775	8,761
$v_{PAC\ ARMS}$ (V)	151,132	153,327	153,337
FP_{SA}	0,769	-0,998	-0,998
S_{SA} (VA)	1300,587	731,407	730,573
S_{LA} (VA)	1283,269	1345,451	1343,409
S_{EA} (VA)	28,129	1957,886	1956,286
$DHT_{VPAC\ A}$ (%)	3,018	4,154	4,166
DHT_{IGA} (%)	32,622	2,736	5,214

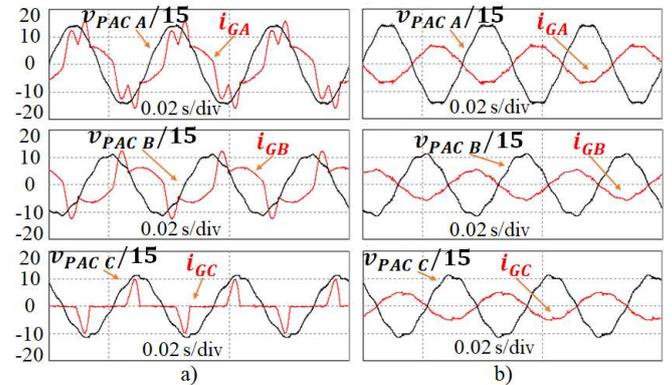


Fig. 12. Formas de onda das três fases da rede para tensão do PAC e carga desequilibradas: a) CEP desativado; b) CEP atuando de forma multifuncional, injetando 6 A no barramento CC e realizando a SCR.

E. Ressonância na rede

O cenário de ressonância na rede foi simulado considerando tensão da rede e carga equilibradas, visto que o objetivo é analisar o comportamento das duas técnicas frente à ressonância.

A ressonância na rede foi simulada inserindo um banco de capacitores de 256,421 μF e 0,02 Ω por fase, em estrela, logo após a reatância da rede, criando, desta forma, uma ressonância na 7ª harmônica.

Na simulação desse cenário foram realizadas algumas alterações nos parâmetros do sistema mostrado na Figura 7(a), tal como a remoção do C_L , a alteração do valor de R_L para $R_L = 45 \Omega$ e a alteração da tensão de referência do barramento CC para $V_{DC} = 650 \text{ V}$. Tais modificações foram realizadas para permitir uma melhor observação do fenômeno de ressonância e garantir que o inversor pudesse ainda seguir a referência de corrente.

1) Atuação de apenas um inversor

Na Figura 13 é possível observar as formas de onda da rede com distorção harmônica de 5% na 7ª harmônica, sem a inserção do banco de capacitores e após a inserção do banco de capacitores. A ressonância é facilmente observada.

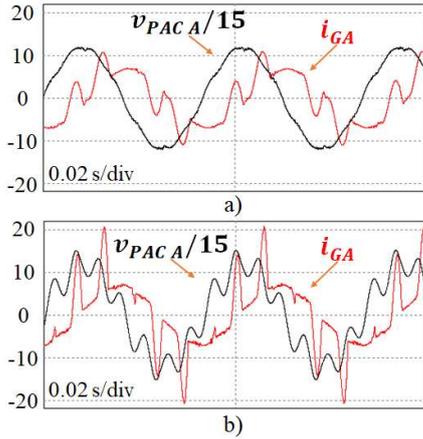


Fig. 13. Formas de onda da fase A da rede com sistema equilibrado: a) Sem ressonância; b) Com ressonância.

Já na Figura 14 é possível observar o comportamento da tensão do PAC e corrente na rede quando o FAP é ativado. Nota-se que nesse cenário as duas técnicas apresentam resultados distintos.

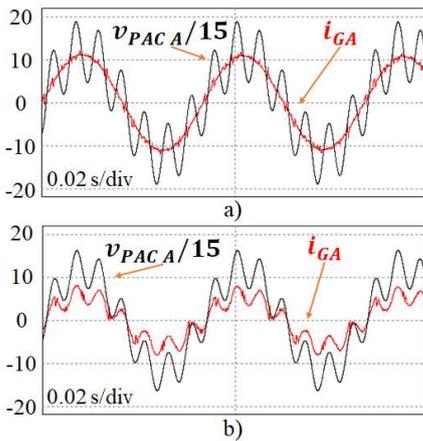


Fig. 14. Formas de onda da fase A da rede com sistema equilibrado e com ressonância, com apenas o FAP ativado: a) SCS; b) SCR.

Observando a Tabela VII é possível verificar que independente da técnica utilizada o valor RMS da corrente e seu conteúdo harmônico é reduzido. Entretanto, na SCS a redução do conteúdo harmônico é superior à SCR, com a DHT da corrente na rede sendo reduzida de 65,98% para 1,99% na SCS e para 37,22% na SCR. Já no que tange ao valor RMS da corrente da rede, a SCR apresenta maior redução.

TABELA VII

Dados da fase A da rede com ressonância, CEP como FAP

Dado Medido	CEP desativado	CEP operando como FAP	
		SCS	SCR
$i_{GA\text{RMS}H}$ (A)	9,425	0,263	1,817
$i_{GA\text{RMS}}$ (A)	7,873	6,14	4,402
$v_{PAC\text{A}RMS}$ (V)	133,8	150,8	138,8
FP_{SA}	0,504	0,858	0,996
$DHT_{VPAC\text{A}}$ (%)	29,51	58,92	37,22
$DHT_{i_{GA}}$ (%)	65,98	1,99	37,58

O fator de potência também aumenta com a aplicação das duas técnicas. Entretanto a SCR impõe um FP próximo de 1, enquanto que na SCS o FP ficou por volta de 0,85.

Ainda, é observado que a DHT de tensão do PAC aumenta com a ativação do FAP. Contudo, enquanto que na SCS a DHT da tensão aumenta para 58,9%, na SCR a DHT da tensão se eleva para 37,2%.

Diferente dos demais cenários, nos quais o aumento da corrente injetada pela IEP não surtia grandes alterações nos resultados, no cenário com ressonância a injeção de potência pelo IEP implica diferentes resultados, especialmente na SCR. A Tabela VIII mostra dados da fase A para a rede com ressonância quando o inversor atua de forma multifuncional, injetando 1,5 A e posteriormente 6 A no barramento CC.

TABELA VIII

Dados da fase A da rede com ressonância, CEP multifuncional

Dado Medido	CEP multifuncional 1,5 A		CEP multifuncional 6 A	
	SCS	SCR	SCS	SCR
$i_{GA\text{RMS}H}$ (A)	0,208	1,125	0,346	1,595
$i_{GA\text{RMS}}$ (A)	3,21	2,315	2,873	1,608
$v_{PAC\text{A}RMS}$ (V)	150,2	142,6	150,6	159,3
FP_{SA}	0,855	0,985	-0,851	-0,956
$DHT_{VPAC\text{A}}$ (%)	58,67	45,81	58,19	70,76
$DHT_{i_{GA}}$ (%)	3,33	46,1	5,54	71,3

Com a utilização da SCR a DHT de tensão se altera drasticamente, aumentando de 37,22% quando o IEP não injeta corrente no barramento CC para 45,81% com injeção de 1,5 A e para 70,76% com injeção de 6 A, superando a DHT de tensão da SCS de 58%, que é fixa independente da injeção de potência. O aumento na ressonância da tensão com a injeção de 6 A pode ser observado até mesmo na forma de onda da tensão apresentada na Figura 15(b).

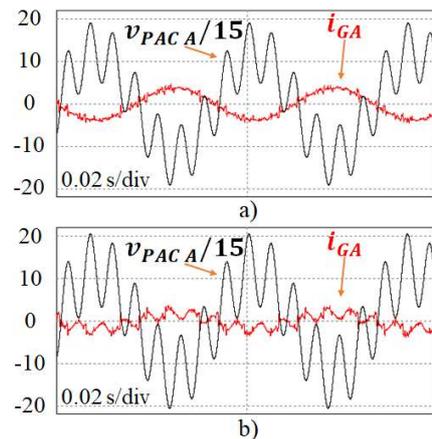


Fig. 15. Formas de onda da fase A da rede com ressonância, inversor atuando de forma multifuncional injetando 6 A no barramento CC: a) SCS; b) SCR.

Na SCS o FP e a DHT de tensão praticamente não se alteram, diferente da SCR, na qual o FP vai de 0,99 quando o IEP não injeta corrente no barramento CC para 0,98 com a injeção de 1,5 A e para 0,95 com a injeção de 6 A, apesar da SCR apresentar ainda assim um FP superior ao que é imposto pela SCS.

2) Atuação de múltiplos inversores em paralelo

Neste subitem é verificado o impacto da utilização de múltiplos inversores em paralelo. A cada novo inversor inserido no sistema é alocado também uma nova carga, com as mesmas características da carga inicial, de tal forma que as características iniciais de inversor e carga sejam apenas replicadas, conforme mostrado na Figura 16.

Cada novo inversor tem um circuito de controle definido para que compense a corrente não ativa de sua respectiva carga. Logo, apesar de todos os inversores injetarem corrente no mesmo ponto, no PAC, cada um está injetando uma corrente específica que é destinada à sua carga local. Entretanto, tendo em vista que as cargas são iguais, a corrente de compensação injetada pelos inversores também será. Logo, o que se obtém nos parâmetros da rede é a intensificação do efeito que seria produzido por um único inversor.

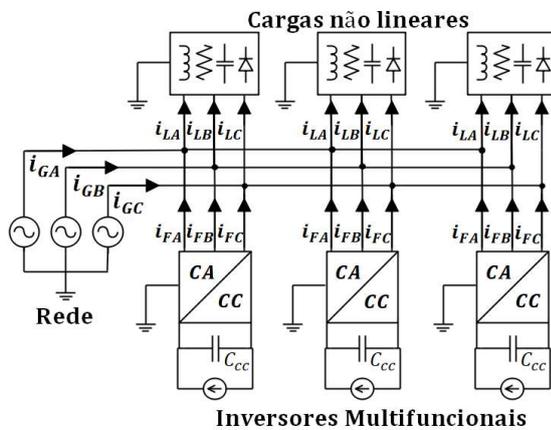


Fig. 16. Sistema convencional de múltiplos inversores multifuncionais conectados à rede.

A Figura 17 mostra as formas de onda da fase A da rede com ressonância para diferentes quantidades de inversores multifuncionais atuando paralelamente, realizando a SCR e injetando 1,5 A no barramento CC.

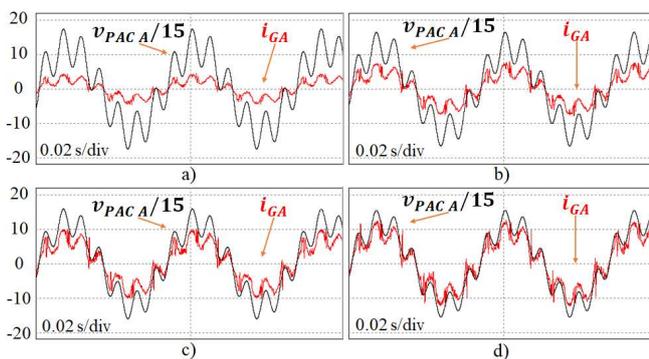


Fig. 17. Formas de onda da fase A da rede com ressonância, inversores atuando de forma multifuncional, realizando a SCR: a) Apenas um inversor; b) Dois inversores; c) Três inversores; d) Quatro inversores.

É observado que conforme o número de inversores aumenta a corrente da rede também aumenta, o que era esperado devido ao aumento da carga. Além disso, é possível notar que a ressonância é reduzida com o aumento do número de

inversores. Ou seja, é verificado que a atuação conjunta de inversores em paralelo realizando a síntese de carga resistiva melhora o amortecimento de ressonâncias.

A Tabela IX apresenta os valores dos parâmetros da rede para os diferentes números de inversores atuando em paralelo. É notado que a DHT da corrente é reduzida, apesar do conteúdo harmônico aumentar, o que se deve ao aumento da corrente fundamental na rede. Comparando os valores de DHT de tensão no PAC é observado a capacidade dos múltiplos inversores de intensificar o amortecimento de ressonância da SCR. Entretanto, o FP não se altera com a adição de mais inversores em paralelo, visto que as cargas são iguais.

Já na Figura 18 são apresentadas as formas de onda para os múltiplos inversores realizando a SCS. Observa-se que, tal como na SCR, a corrente da rede aumenta em decorrência do aumento da carga no PAC, elevando o conteúdo harmônico da corrente da rede, apesar de não haver impacto na DHT de tensão do PAC ou no FP da fonte. Permitindo constatar que o uso de múltiplos inversores usando a técnica SCS não traz benefícios quanto ao amortecimento.

TABELA IX
Dados da fase A da rede com ressonância, CEP multifuncional, injetando 1,5 A no barramento CC e realizando SCR

Dado Medido	Número de múltiplos inversores			
	1	2	3	4
$i_{GA\text{RMS}H}$ (A)	1,125	2,508	3,180	3,701
$i_{GA\text{RMS}}$ (A)	2,315	4,103	5,636	6,994
$v_{PAC\text{ARMS}}$ (V)	142,669	138,938	136,741	135,291
FP_{SA}	0,985	0,985	0,985	0,984
$DHT_{v_{PAC A}}$ (%)	45,80%	38,81%	34,24%	30,99%
$DHT_{i_{GA}}$ (%)	46,11%	39,14%	34,62%	31,48%

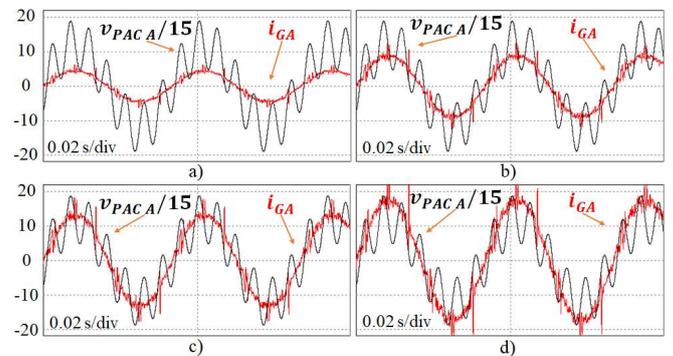


Fig. 18. Formas de onda da fase A da rede com ressonância, inversores atuando de forma multifuncional, realizando a SCS: a) Apenas um inversor; b) Dois inversores; c) Três inversores; d) Quatro inversores.

V. CONCLUSÕES

Foi verificado que independente da estratégia o inversor multifuncional é capaz de injetar energia na rede, compensar distúrbios de QEE e aumentar o FP em diversos cenários.

Considerando distorções harmônicas de 5% na tensão da fonte, a SCS se destaca tanto nos cenários de tensão do PAC e carga equilibradas quanto nos cenários em que esses parâmetros estão desequilibrados, tendo em vista que a SCS consegue manter um FP igual ao obtido com a SCR, com a

vantagem de impor uma maior redução no conteúdo harmônico da corrente na rede.

Cabe ressaltar que, para distorções de tensão da rede mais acentuadas, a SCS apresentará menor fator de potência frente a SCR. No entanto, na prática, a distorção de tensão tende a ser baixa.

Devido sua capacidade de amortecer ressonâncias a utilização da SCR impõe melhores resultados de DHT de tensão e maiores valores de fator de potência nos cenários com ressonância harmônica. No entanto, essa capacidade é enfraquecida e os índices de QEE pioram quando o CEP passa a injetar mais potência ativa do que a demanda da carga, fazendo com que o excedente flua pela rede, agravando o problema da ressonância. Já a SCS não reduz seu desempenho de compensação com o aumento da injeção de potência pela IEP, porém também não contribui para a melhora da QEE da tensão no PAC.

Por outro lado, com a utilização de múltiplos inversores em paralelo é possível intensificar o amortecimento de ressonância e melhorar os índices de QEE obtidos com a SCR, o que não ocorre com a SCS.

Em resumo, foi constatado que a SCR apresenta vantagens em relação a SCS nos cenários com ressonância. Já a SCS se sobressai em relação a SCR nos cenários com baixa distorção harmônica na tensão da fonte.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pela FAPEMAT/UFMT (Termo de Cooperação Técnica nº 0298/2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Emadi, A.; Nasiri, A.; Bekiarov, S. B. *Uninterruptible power supplies and active filters*. 1. Ed. Chicago: CRC Press LLC, 2005.
- [2] Akagi, H.; Watanabe, E. H.; Aredes, M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [3] SILVA, L. R. *Avaliação de perdas na presença de cargas não lineares na rede elétrica utilizando o software OPENDSS*. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/20236>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- [4] ANDRADE, H. de S. et al. *Análise dos níveis de tensão no alimentador da UFMT como uma função do índice de penetração da geração distribuída fotovoltaica*. Contemporânea – Revista de Ética e Filosofia Política, v. 2, n. 5, set./out. 2022.
- [5] Bonaldo, J. P. *Multifuncionalidade de conversores eletrônicos de potência utilizados em micro redes inteligentes*. Tese de Doutorado – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2015. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_5defd51bc81b6d31eb06c7f3f1e3f2e0. Acesso em: 28 jul. 2021.
- [6] Meng, L. et al. *Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University*. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015, pp. 2585-2592, doi: 10.1109/APEC.2015.7104716.
- [7] Carneiro, A. V. *Projeto, desenvolvimento e implementação de micro redes em campus universitário com tecnologia solar fotovoltaica e de armazenamento*. Dissertação de mestrado – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2017.
- [8] Salam, Z.; Cheng, T. P.; Jusoh, A. *Harmonics Mitigation Using Active Power Filter: A Technological Review*. ELEKTRIKA, Skudai, v. 8, n. 2, p. 17-26, jan. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/41057887_Harmonics_mitigation_using_active_power_filter_A_technological_review. Acesso em: 01 jul. 2021.
- [9] El-Habrouk, M.; Darwish, M.; Metha, P. *Active power filters: A review*. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Uxbridge, v. 147, n. 5, p. 403-413, set. 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/3353359_Active_Power_Filters_A_Review. Acesso em: 19 out. 2021.
- [10] Zuniga, T. E. N.; Pomilio, J. A. *Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Loads*. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 17, n. 2, p. 273-278, mar. 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/880475>. Acesso em: 30 out. 2021.
- [11] Brandão, D. I. et al. *Estratégia de controle multifuncional para sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica*. Eletrônica de Potência, Campo Grande – Mato Grosso do Sul, v.18, n.4, p.1206-1214, set. 2013. Disponível em: <https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/07/rvol18no4p18.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2022.
- [12] Singh, B.; Verma, V. *Selective Compensation of Power-Quality Problems Through Active Power Filter by Current Decomposition*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 2, abr. 2008.