

INVERSORES FOTOVOLTAICOS MULTIFUNCIONAIS APLICADOS NA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E NA COMPENSAÇÃO DE HARMÔNICOS

Fabricio Nunes Paiva¹, Hélio Marcos André Antunes², Matheus Bassani Luchini³, Augusto César Rueda Medina⁴

¹Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, fabricio.paiva@edu.ufes.br

²Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, helio.antunes@ufes.br

³Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, matheus.luchini@edu.ufes.br

⁴Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, augusto.rueda@ufes.br

RESUMO

Os sistemas elétricos de todo o mundo passam pela crescente inserção de novas fontes de geração de energia elétrica alternativas e renováveis, como a geração solar, eólica, pequenas centrais hidrelétricas, entre outras. Este conceito é conhecido como geração distribuída (GD) e no Brasil o setor fotovoltaico lidera em usinas instaladas, devido a fatores como a grande difusão dessa tecnologia, a facilidade de instalação e a predominância de radiação solar no território brasileiro. A geração de energia elétrica pelos sistemas fotovoltaicos pode ocasionar em uma redução no fator de potência da instalação visto pela rede, pois esta agora irá fornecer uma potência ativa menor para a carga, com a mesma potência reativa fornecida sem o sistema fotovoltaico. Outro problema que pode ser encontrado em uma instalação é devido as correntes harmônicas que transitam no sistema em razão das cargas não lineares, que podem causar danos a equipamentos e condutores. Diante deste cenário, surge a possibilidade da utilização dos inversores não somente para injeção de potência ativa, mas também para a realização de serviços ancilares, como na correção do fator de potência e na compensação de harmônicos da instalação. Portanto, esse trabalho visa realizar um estudo acerca da utilização de inversores fotovoltaicos multifuncionais aplicados na correção do fator de potência e na compensação harmônica de um sistema rede-carga-gerador fotovoltaico modelado no *software Matlab/Simulink*. Tal metodologia demonstrou que para o sistema em questão, a redução da distorção harmônica foi de aproximadamente 61,54%, enquanto que o fator de potência foi elevado de 0,84 atrasado para 0,95 atrasado.

Palavras-chave: Geração distribuída. Sistema fotovoltaico. Inversores multifuncionais. Serviços ancilares.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a energia é um dos fatores-chave de desenvolvimento humano, e a energia renovável se tornou uma solução para a produção de eletricidade (ESSAGHIR *et al.*, 2017). Em razão disso, foi criado o conceito de geração distribuída (GD), que se caracteriza

pela instalação de geradores de pequeno e médio porte, normalmente a partir de fontes renováveis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica (ANEEL, 2016).

A GD está cada vez mais presente em todo mundo, e atualmente, a energia solar é uma das formas mais populares de energia renováveis (SEZEN *et al.*, 2017). Portanto, muitos projetos de pesquisa se concentraram na necessidade urgente de investir nesse tipo de energia, devido a essa ser atualmente uma das melhores opções para um sistema de energia renovável (HUANG *et al.*, 2017).

No Brasil, a GD na modalidade fotovoltaica contribui com mais de 21 GW de potência instalada, distribuídas em aproximadamente 2,5 milhões de unidades consumidoras (ABGD, 2023), sendo a maioria dos sistemas fotovoltaicos ligados à rede, enquanto os sistemas isolados representam apenas uma pequena parte do mercado energético.

Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede têm o benefício de uma utilização mais eficiente da produção de energia, porque não há perdas adicionais de armazenamento de baterias. A busca por uma maior produção de energia a partir do sol através de módulos solares fotovoltaicos é um fator importante.

As cargas não lineares e os dispositivos eletrônicos de potência podem aumentar os níveis de distorção harmônica na rede de energia elétrica. Logo, um sistema de geração de energia solar fotovoltaica incluindo um inversor multifuncional com a capacidade de compensar distorções harmônicas pode ser útil para a melhoria da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), tanto para os consumidores, como para os operadores de serviços públicos.

Ainda no aspecto da QEE, vale ressaltar que a conexão da GD no SEP causa uma redução do fator de potência visto pela rede, pois esta agora injeta uma potência ativa menor ou até nula para a carga, com a mesma potência reativa de antes. Tal problema pode ser resolvido com a inserção de bancos de capacitores fixos ou chaveados, porém, essa opção pode se tornar não muito eficaz ou custosa (GUSMAN, 2020).

Diversos estudos vêm sendo realizados em relação a utilização de inversores fotovoltaicos na área de microrredes e da QEE devido a sua capacidade de poder contribuir com a melhoria na energia elétrica da rede.

REVELES-MIRANDA *et al.*, (2020) implementaram uma técnica de controle híbrida para compensação de harmônicos, correção de fator de potência e operação noturna de um inversor fotovoltaico conectado à rede. A estratégia de controle melhorou a QEE sob condições de presença de cargas não lineares e potência reativa. Nesse trabalho, o inversor

multifuncional pode injetar energia ativa, energia reativa e energia harmônica de compensação ao mesmo tempo. Foi verificado que o modelo proposto pôde efetivamente reduzir o valor do THD (*Total Harmonic Distortion*) e melhorar o fator de potência.

HOSEINI *et al.*, (2016) discutiram sobre um novo método para a correção do fator de potência ativa usando um inversor de dupla finalidade em um conversor de *flyback*. Este trabalho apresentou uma nova estratégia de controle para conversores monofásicos e obteve a redução da corrente de linha harmônica, a melhora do fator de potência e a confiabilidade do conversor.

ALBUQUERQUE e TRISTÃO (2020) realizaram uma análise teórica e experimental sobre a capacidade de injeção de reativos por inversores fotovoltaicos sendo estudados os modos para esse controle de compensação. Nesse trabalho foi proposto ensaios utilizando uma fonte CC com simulador de painéis fotovoltaicos, um inversor trifásico e um analisador de energia Fluke 325-II. Foram realizados vários ensaios com o inversor fornecendo potência ativa e reativa (ora indutiva, ora capacitiva) e pôde-se investigar que houve a possibilidade da utilização do inversor fotovoltaico para correção do fator de potência e que a geração de reativos para tal não afeta a injeção de potência ativa extraída dos módulos fotovoltaicos, desde que a potência aparente fornecida pelo inversor não ultrapasse sua potência nominal.

CARVALHO *et al.*, (2022) desenvolveram um projeto de um sistema fotovoltaico no *software* PSIM capaz de realizar a injeção de potência ativa e a compensação de reativos, além de injetar no PAC corrente com baixo conteúdo harmônico. Nesse trabalho foi realizada uma simulação com módulos fotovoltaicos, conversor *boost*, inversor trifásico (VSI), filtro L e controladores. Tal projeto demonstrou que o controle da potência reativa transferida pelo inversor é robusto aos transitórios de carga e que o controle da potência ativa não foi afetado pelas variações de potência de saída dos módulos.

SOUZA (2018) desenvolveu simulações de um inversor fotovoltaico para compensação do fator de potência na rede de distribuição e para mitigação de correntes harmônicas através de controladores proporcionais-ressonantes. Além disso, também foi implementado um conversor CC-CC isolado *full-bridge* do tipo *boost* de modo a rastrear o ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos. Nesse trabalho, concluiu-se que o inversor foi capaz de manter o fator de potência da rede próximo da unidade, mesmo para situação com acentuadas variações de carga e de irradiação solar, bem como para casos com a presença de cargas não-lineares, apresentando um perfil de tensão entregue à carga com baixa distorção harmônica.

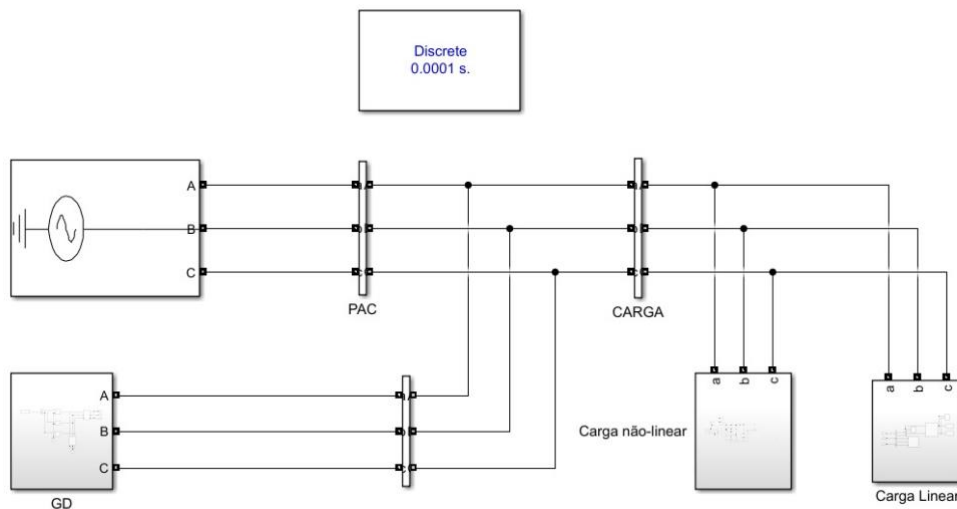
Diante desse cenário, os inversores que outrora tinham apenas funcionalidade durante o dia devido à presença da radiação luminosa nesse período, agora também são estudados para realizar serviços ancilares no período noturno, como na correção do fator de potência, na regulação de tensão, na compensação de harmônicos, etc.

Portanto, esse trabalho tem como foco de avaliar o desempenho do inversor multifuncional fotovoltaico na compensação harmônica e na correção do fator de potência da rede por meio de um modelo implementado no *software Matlab/Simulink*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O esquemático implementado no *Matlab/Simulink* é apresentado na Figura 1. Foi utilizado um bloco de fonte de tensão ideal para representar a rede, medidores de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) e na carga, um bloco de carga linear e outro de carga não linear.

Figura 1. Modelo do sistema implementado no *Matlab/Simulink*

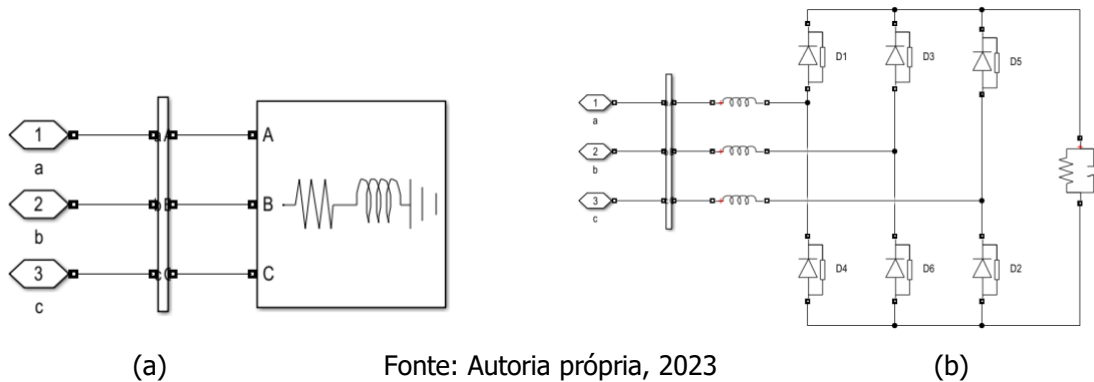


Fonte: Autoria própria, 2023

2.1 Carga elétrica

A carga elétrica é composta por dois ramos em paralelo. O primeiro ramo tem impedância constante e é representada por uma carga linear RL série. O segundo é do tipo não linear e é representado por um retificador trifásico de seis pulsos a diodo com filtro indutivo na entrada e carga RC em paralelo. As Figura 2(a) e 2(b) apresentam respectivamente as cargas linear e não linear.

Figura 2. Modelo da carga elétrica: (a) carga linear; (b) carga não linear



(a)

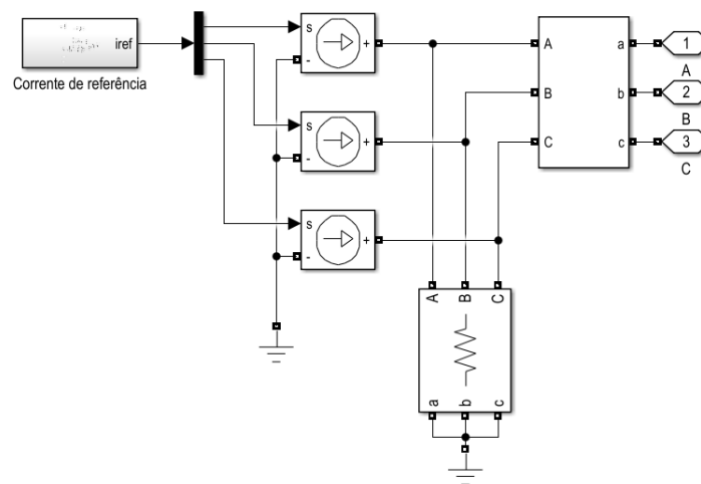
Fonte: Autoria própria, 2023

(b)

2.2 Gerador fotovoltaico

O inversor do gerador fotovoltaico foi implementado através de um bloco de geração distribuída utilizando como modelagem, fontes de corrente controladas ideais. O bloco de GD é apresentado na Figura 3. Para efeitos de simulação, foi acrescentado um bloco de resistores de alto valor (100.000Ω) em paralelo com as fontes de corrente, uma vez que no *MATLAB/Simulink* não é permitido conectar fonte de corrente em série com outro elemento que tem característica de fonte de corrente (no caso, a rede elétrica), o que gera um erro.

Figura 3. Modelagem da GD por fontes de corrente controladas

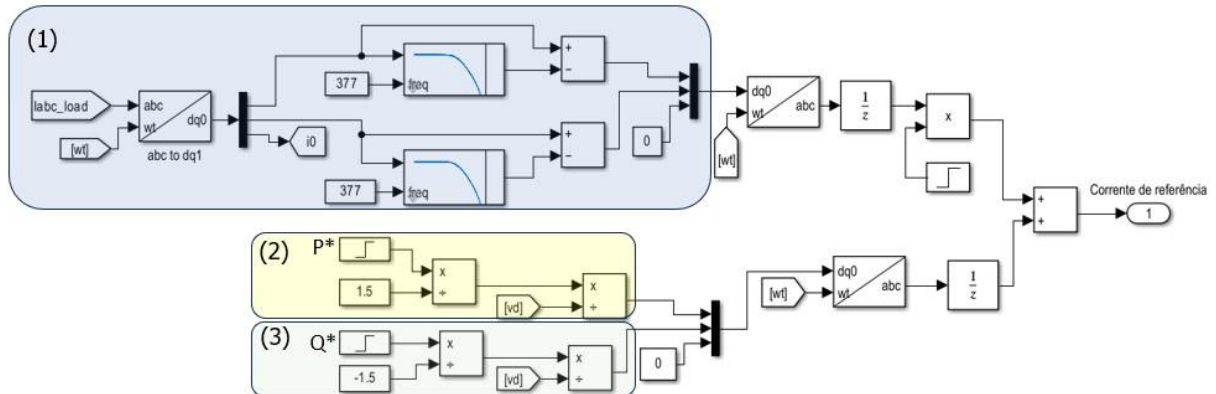


Fonte: Autoria própria, 2023

2.3 Geração da corrente de referência

A corrente de referência foi gerada a partir do diagrama de blocos apresentado na Figura 4, e é dividido em três partes.

Figura 4. Diagrama de blocos para geração da corrente de referência



Fonte: Autoria própria, 2023

O bloco (1) é responsável por inserir a corrente para compensação harmônica. O método do eixo de referência síncrono, comumente chamado de SRF (*Synchronous Reference Frame*) foi utilizado neste trabalho para determinar as características específicas das componentes harmônicas (frequência, amplitude, fase, tempo de duração) do sinal de corrente da carga. Neste algoritmo, as correntes nas coordenadas abc da carga é amostrada através de sensores e transformadas para as coordenadas dq0 no referencial síncrono, através da transformação de Park. Um PLL (*Phase Locked Loop*) trifásico foi necessário para se obter o ângulo de referência wt da frequência fundamental, e desta forma efetuar o cálculo da transformação dq0 no referencial síncrono. O inversor multifuncional modelado pela corrente de referência implementou uma estratégia de mitigação dos harmônicos injetando uma corrente harmônica na rede em fase contrária da corrente harmônica gerada pela carga não linear, de modo a cancelar esta corrente, resultando em uma forma de onda próxima a senoidal. O bloco (1) é também composto de um componente do tipo degrau para representar o fechamento de uma chave, de modo com que essa corrente seja gerada apenas a partir do instante $t = 0,4s$.

No sistema de coordenadas dq0, as potências ativa (P^*) e reativa (Q^*) de referência injetadas pelo inversor são dadas pelas equações (1) e (2). A geração das correntes de referência pelos blocos (2) e (3) do diagrama de blocos da Figura 4 implementa uma versão simplificada dessas equações.

$$P^* = \frac{3}{2}(v_d \cdot i_d) \quad (1)$$

$$Q^* = -\frac{3}{2}(v_d \cdot i_q) \quad (2)$$

O bloco (2) é responsável por gerar a corrente ativa para suprimento da carga a partir do instante $t = 0,8s$, enquanto o bloco (3) gera a corrente reativa para correção do fator de potência, a partir do instante $t = 1,2s$. Assim como no bloco (1), os blocos (2) e (3) são compostos por componentes do tipo degrau para representar o fechamento de uma chave, de modo com que essas correntes sejam geradas apenas no tempo determinado.

A correção do fator de potência foi realizada utilizando o próprio modelo do gerador fotovoltaico que faz a interface com a rede, visto que a opção de injeção de potência reativa é fornecida por alguns fabricantes de inversores. Essa corrente foi gerada pelo diagrama de blocos a partir do instante $t = 1,2s$ e foi ajustada após análise das potências ativa e reativa no PAC de forma a resultar em um valor de potência reativa que tornasse o fator de potência acima de 0,92.

A análise descrita acima se dividiu em quatro estágios de modo a se obter uma melhor compreensão dos resultados obtidos. A Tabela 1 apresenta um resumo dos quatro estágios possíveis para o inversor nesse trabalho. Vale ressaltar que a função desempenhada para cada estágio do inversor a partir de $t = 0,4s$ permanecerá até o fim da simulação.

Tabela 1. Estágios de funcionamento do inversor

Período	Estágio do inversor
$0 < t < 0,4s$	Inoperante
$0,4s < t < 0,8s$	Compensação de harmônicos
$0,8s < t < 1,2s$	Injeção de potência ativa
$1,2s < t < 1,5s$	Injeção de potência reativa para correção do fator de potência

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros elétricos para a simulação da microrrede.

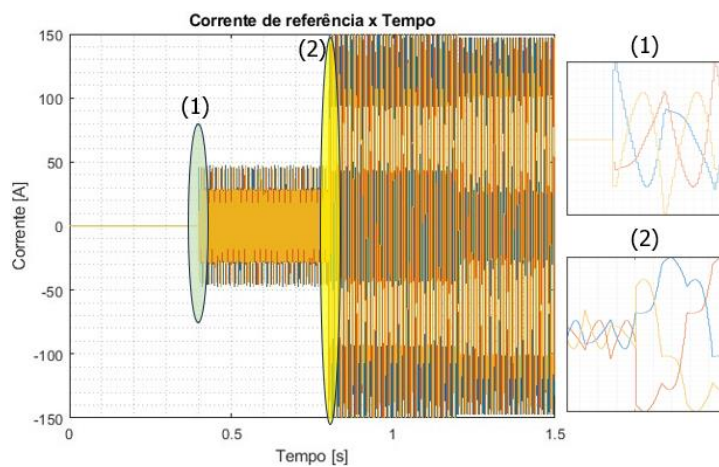
Tabela 2. Características elétricas da microrrede

Sistema	Características
Gerador fotovoltaico	37,8kVA, 220V, 60Hz
Carga elétrica linear	32,87kVA, 220V, $f_p=0,68$ atrasado
Carga elétrica não linear	Retificador trifásico a diodos, 32,36kVA, 220V, $f_p=0,93$ atrasado, $L=0,5mH$, $C=18,8mF$, $R=2,5\Omega$
Rede elétrica	220V, 60Hz

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta o sinal da corrente de referência. A simulação foi iniciada sem a presença do bloco de GD, contando apenas com a rede e a carga. Com isso, a corrente de referência é nula até o instante $t = 0,4s$, como pode ser observado. Neste instante, é gerada a parcela da corrente de referência para compensação e em $t = 0,8s$ se inicia a geração da parcela ativa da corrente do GD. A parcela da corrente reativa para correção do fator de potência é gerada no instante $t = 1,2s$.

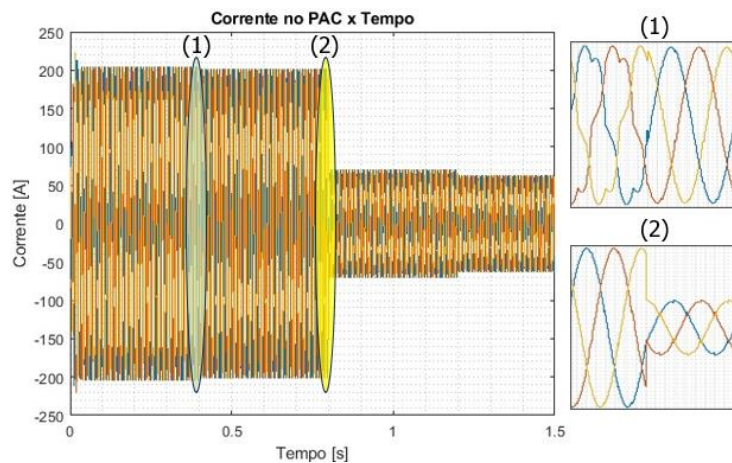
Figura 5. Sinal da corrente de referência



Fonte: Autoria própria, 2023

A Figura 6 apresenta o sinal da corrente no PAC. Como esperado, ela segue o padrão oposto da corrente de referência. Até o instante $t = 0,4s$, apenas a rede fornece corrente para a carga, gerando uma corrente maior nesse intervalo em comparação com o restante do tempo, onde o bloco de GD irá também suprir a carga.

Figura 6. Sinal da corrente no PAC

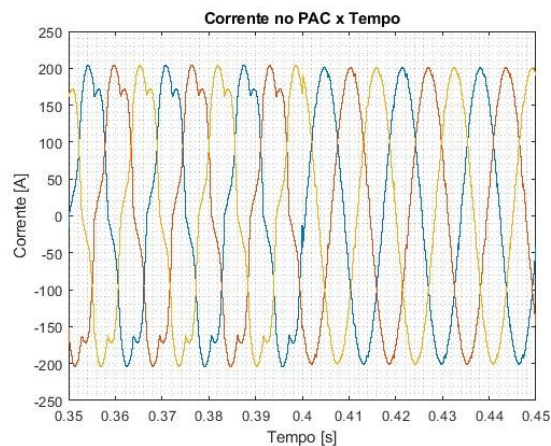


Fonte: Autoria própria, 2023

As Figuras de 7 a 9 apresentam uma visão ampliada dos instantes anterior e posterior aos fechamentos de chave (representados pela subida de nível do bloco degrau no diagrama de blocos da Figura 4) para cada transição ocorrida no sistema.

A Figura 7 apresenta o intervalo da inserção da corrente para compensação harmônica. Pode ser observado que antes do instante $t = 0,4s$ a corrente no PAC é distorcida pela presença das componentes harmônicas, e após $t = 0,4s$, a corrente apresenta uma forma senoidal.

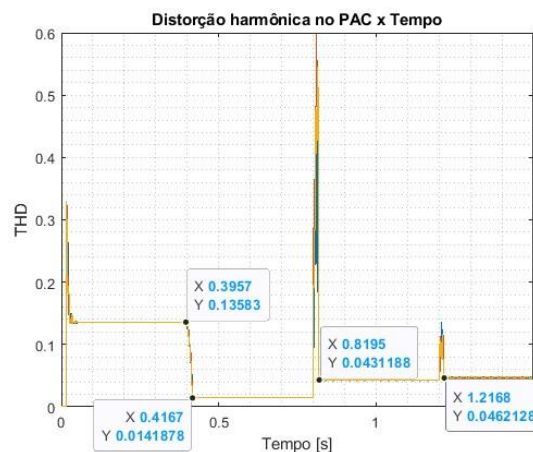
Figura 7. Sinal de corrente no PAC no instante da inserção da corrente para compensação harmônica



Fonte: Autoria própria, 2023

Na Figura 8, é apresentado o valor da distorção harmônica total (THD_i) da corrente no PAC. Pode ser observado que até o instante $t = 0,4s$, o THD_i é de 13,58%. Após o instante $t = 0,4s$, o THD_i reduz para 4,16% e após a inserção da corrente reativa, ele aumenta ligeiramente para 4,62%.

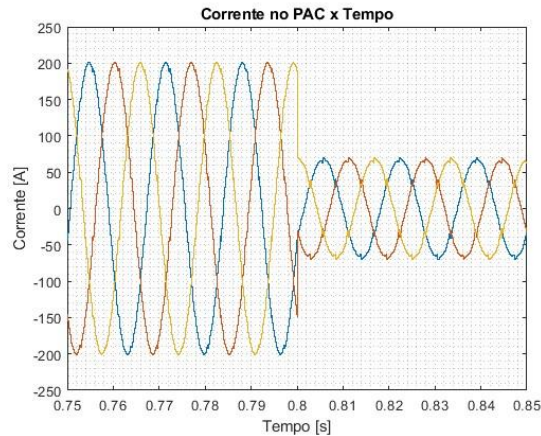
Figura 8. Distorção harmônica total da corrente no PAC



Fonte: Autoria própria, 2023

A Figura 9 apresenta o intervalo anterior e posterior da inserção da corrente ativa. Pode ser observado que após o instante $t = 0,8s$, a corrente no PAC tem seu valor reduzido. Isso se deve ao fato de que agora o bloco de GD também está suprindo a carga.

Figura 9. Sinal de corrente no PAC no instante da inserção da corrente ativa



Fonte: Autoria própria, 2023

Com a presença da GD, a rede agora passa a fornecer uma potência ativa menor para a carga, com a mesma potência reativa fornecida, como pode ser observado na Figura 10. Isso ocasiona em uma redução considerável do fator de potência da rede (vide Figura 11, no intervalo de $t = 0,8s$ a $t = 1,2s$). Com isso, no instante $t = 1,2s$ é gerada a corrente reativa para corrigir o fator de potência, elevando este novamente para acima de 0,92, como é estabelecido pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional).

Figura 10. Potência ativa e reativa no PAC

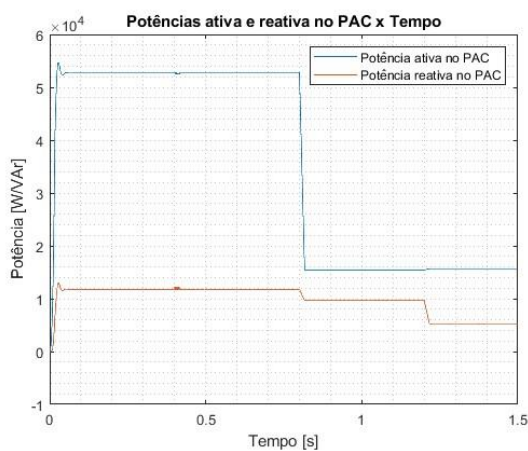
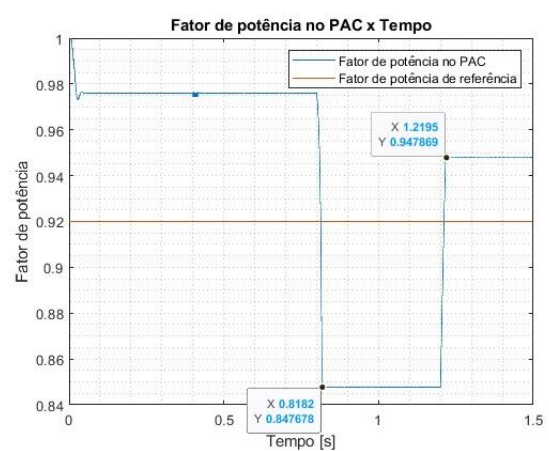


Figura 11. Fator de potência no PAC



Fonte: Autoria própria, 2023

4. CONCLUSÕES

A partir da metodologia implementada neste trabalho, foi possível alcançar bons resultados para a compensação harmônica gerada pela carga não linear e para a correção do fator de potência devido a inserção do GD ao sistema. Foi observado que o THD_i da corrente no PAC reduziu de aproximadamente 13% para abaixo de 5% após a inserção da corrente de compensação harmônica pelo GD, resultando em uma redução de aproximadamente 61,54%. O fator de potência que após a inserção da potência ativa pelo GD caiu para 0,84 foi corrigido para aproximadamente 0,95 após a inserção da potência reativa pelo GD. Vale ressaltar que tal metodologia requer sensores de corrente de carga, entretanto, esse custo pode ser compensado pelo fato de não ser mais necessário utilizar bancos de capacitores para a correção do fator de potência, principalmente para consumidores do Grupo A, os quais são tarifados caso o fator de potência fique abaixo de 0,92.

Os resultados deste trabalho mostraram que a utilização de inversores para realização de serviços ancilares aparece como uma ótima alternativa para o sistema elétrico em geral, pois uma vez que o inversor fotovoltaico era majoritariamente projetado para atuar apenas de dia, surge essa opção de utilizá-lo para melhorar a qualidade de energia elétrica da rede, podendo o cliente ainda ter uma compensação econômica em razão disso. É importante salientar que o inversor pode ter que ser sobredimensionado para poder injetar potência ativa e reativa ao mesmo tempo, entretanto, também é possível reduzir a injeção de potência ativa em momentos que seja necessária a injeção de potência reativa, de modo a não haver sobrecarga. Tal função pode ser avaliada em trabalhos futuros.

Por fim, espera-se que esse estudo em conjunto com outros possa ser utilizado pelos órgãos regulamentadores dos serviços de eletricidade no Brasil para futuramente permitir a realização de serviços ancilares através da geração distribuída.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Fundação de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e a Universidade Federal do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.** Cadernos temáticos ANEEL, v.2, 7 p, 2016.

ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 90 p, 2017.

ALBUQUERQUE, B. F.; TRISTÃO, L. G. O. **Avaliação experimental de inversor fotovoltaico para compensação de potência reativa em sistemas de geração distribuída**. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8, p. 2-8, 2020.

CARVALHO, J. H. S.; JUNIOR, B. F. S.; BARCELOS, S. L.; SANTOS, W. M. **Sistema fotovoltaico conectado à rede com capacidade de compensação de potência reativa**. Sociedade Brasileira de Automática (SBA), 9, p. 1-8, 2022.

ESSAGHIR, S.; BENCHAGRA, M.; BARBRI, N.E. **Power factor control of a photovoltaic system connected to grid under load variation**. International Conference on Electrical and Information Technologies ICEIT, v.3, p. 1–5, 2017.

GUSMAN, L. S. **Design for reliability of multifunctional PV inverters used in industrial power factor regulation**. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2020.

HOSEINI, S.M.; SADEGHZADEH, S.M.; BEROMI, Y.A. **A new method for active power factor correction using a dual-purpose inverter in a flyback converter**. Turkish Journal of Electrical Engineering Computer Sciences, v.24, p. 1–16, 2016.

HUANG, L.; QIU, D.; XIE, F.; CHEN, Y.; ZHANG, B. **Modeling and stability analysis of a single-phase two-stage grid-connected photovoltaic system**. Energies, v.10, p. 1–3, 2017.

REVELES-MIRANDA, M.; FLOTA-BAÑUELOS, M.; CHAN-PUC, F.; RAMIREZ-RIVERA, V.; PACHECO-CATALÁN, D. **A hybrid control technique for harmonic elimination, power factor correction, and night operation of a grid-connected pv inverter**. IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, v.10, p. 1–5, 2020.

SEZEN, S.; AKTAS, A.; AR, M.U.; OZDEMIR, E. **Design and operation of a multifunction photovoltaic power system with shunt active filtering using a single-stage three-phase multilevel inverter**. Turkish Journal of Electrical Engineering Computer Sciences, v.25, p. 1–2, 2017.

SOUZA, W. G. **Estudo de um inversor fotovoltaico para controle e compensação de reativos e harmônicos**. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018.