

Optimized Exploitation of Ancillary Services: Compensation of Reactive, Unbalance and Harmonic Currents Based on Particle Swarm Optimization

Augusto M. S. Alonso, Benvindo R. Pereira Junior, Danilo I. Brandao, Fernando P. Marafão

Abstract—Taking into account the growth of distributed generation systems in low-voltage networks, it is important to fully exploit the energy resources and their embedded power converter. Thus, this paper proposes an optimization strategy for controlling the multifunctional inverter endowed in the distributed generator. Such approach allows maximum exploitation of its power capabilities under condition of high active power generation, and limited capability for performing ancillary services. Consequently, grid-support functions can be efficiently provided by the inverter, enhancing the power quality in low-voltage grids. The proposed approach is based on Particle Swarm Optimization and takes advantage of definitions from the Conservative Power Theory to synthesize the control references for the compensation of reactive power, as well as unbalance and harmonic distortion currents. Simulation results performed using Matlab/Simulink are presented to evaluate the optimization model for a three-phase system.

Index Terms — Ancillary services, Conservative Power Theory, optimization, particle swarm optimization, power quality.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de geração de energia baseada em meios renováveis tem impulsionado a dispersão da geração distribuída em sistemas elétricos de baixa tensão ao redor do mundo [1], [2]. Consequentemente, os sistemas de distribuição de baixa tensão (SDBT) apresentam cada vez mais interfaces baseadas em eletrônica de potência, as quais possibilitam que fontes de energia renováveis sejam interconectadas ao sistema elétrico de forma segura e adequada. Dentre tais interfaces, destacam-se os inversores eletrônicos, os quais são capazes de propiciar a conversão de tensões e correntes contínuas (CC), que são por exemplo geradas por um painel fotovoltaico, em componentes alternadas (CA) em sincronismo com a rede elétrica. Entretanto, devido à

The authors are grateful to FAPESP (Grants 2018/22172-1, 2017/24652-8, 2016/08645-9), and the NFR (Grant f261735/H30).

A. M. S. Alonso is with the Group of Automation and Integrated Systems, São Paulo State University (UNESP), Sorocaba, Brazil, and also with the Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway (e-mail: augusto.alonso@unesp.br).

B. R. P. Junior is with the Department of Electrical and Computing Engineering, University of São Paulo (USP), São Carlos, Brazil (e-mail: brjunior@usp.br)

D. I. Brandao is with the Graduate Program in Electrical Engineering, Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte 31270-901, Brazil (e-mail: dibrandao@ufmg.br).

F. P. Marafão is with the Group of Automation and Integrated Systems, São Paulo State University (UNESP), Sorocaba, Brazil (e-mail: fernando.marafao@unesp.br).

intermitência intrínseca às fontes renováveis [3], em alguns períodos do dia esses inversores não utilizam sua capacidade nominal para processar potência ativa.

Considerando tal contexto, o emprego de multifuncionalidades em inversores [4] propicia a oferta de serviços ancilares, concomitantemente à injeção de potência ativa, possibilitando melhorar o desempenho de um SDBT [5]. Isto significa que, à medida que haja capacidade remanescente do inversor, este pode explorar funcionalidades como a compensação de reativos, desequilíbrios, distorções harmônicas, entre outras [6]. Consequentemente, além de propiciar maior integração de geradores distribuídos (GDs) em redes elétricas, tais inversores podem contribuir para a melhoria da qualidade da energia no seu ponto de acoplamento comum (PAC), operando também como um filtro ativo de potência (FAP) [6]-[9]. Tal flexibilidade de operação em tarefas de filtragem ativa é possível pois a infraestrutura de potência e controle de um GD é, de forma geral, a mesma que a de um FAP [8], com exceção da fonte geradora de energia no seu barramento CC. Portanto, mesmo que não seja possível injetar potência ativa durante alguns períodos, apenas adotando as referências de controle adequadas, um GD multifuncional pode operar como um FAP e compensar correntes reativas, de desequilíbrio e de distorção, assim como validado em [6,7,10,11].

Apesar da oferta de multifuncionalidades ser atraente, GDs geralmente possuem capacidade nominal limitada e requerem um gerenciamento adequado para não exceder suas restrições nominais. Portanto, é imprescindível que se determine o ponto operacional de seu inversor, ponderando a contribuição de cada parcela de serviço ancilar provido.

Na literatura, alguns métodos buscam definir tal ponto de operação de forma que maior diversidade de serviços ancilares seja ofertada. Por exemplo, em [10], o conceito de estimação dinâmica é adotado para saturar coeficientes de proporção que ponderam o emprego do inversor na compensação de distúrbios de corrente, tais como reativos, desequilíbrio e distorções harmônicas. Entretanto, o modelo apresentado em [10] não fornece uma tomada de decisão autônoma e otimizada, sendo necessária uma atuação do gestor do sistema. Isto significa que, caso o GD opere sob capacidade de potência limitada, é o gestor do sistema (e.g., o proprietário do inversor ou central de controle remota [10]) que deve reajustar a prioridade de compensação entre os distúrbios elétricos considerados. Já em [12], algoritmos não iterativos são empregados para a

compensação ótima de reativos, desequilíbrio e distorções harmônicas através do cálculo de fatores de condutância. Em contrapartida, uma vez que o método é empregado no controle de um FAP, não se considera a injeção de potência ativa pelo inversor, sendo desprezada a variabilidade na capacidade de geração do mesmo.

Em [11], o controle de um GD é apresentado como um modelo de otimização multiobjetivo, visando a oferta de compensação de reativos, distorções harmônicas e desequilíbrio. Entretanto, tal abordagem apresenta limitações sob condições não senoidais de tensão da rede, uma vez que requer decomposições em componentes de sequência positiva, negativa e zero [13]. Ademais, em [11] busca-se realizar a compensação de correntes com a mínima capacidade de potência possível, diferente da proposta deste artigo, a qual visa extrair o máximo de compensação pelo inversor, dada uma capacidade remanescente após a injeção de energia pelo GD.

É possível também encontrar na literatura modelos de otimização baseados em multiplicadores de Lagrange, como o apresentado em [14], onde se realiza o controle de um GD visando compensação otimizada das parcelas de corrente. Contudo, o objetivo de compensação em [14] é eliminar oscilações de potência, não buscando extrair o máximo do inversor utilizado pelo GD.

Finalmente, em [15] os autores propõem uma abordagem baseada em um modelo de programação linear, formulado com base em definições da Teoria de Potência Conservativa (CPT) [16]. Apesar de eficiente, uma desvantagem da estratégia é dada pela factibilidade do modelo de otimização formulado pelo algoritmo Simplex. Isso significa que, se a capacidade do inversor é insuficiente, ao ponto de não encontrar uma solução factível que atenda todas as restrições, o algoritmo de otimização é desprezado e compensa-se cada parcela não ativa na mesma proporção. Diferente do trabalho proposto aqui, o qual possibilita com que uma solução de boa qualidade seja encontrada para atender o maior número de restrições possível, desde que a capacidade do inversor seja respeitada. Dessa forma, sob tal condição, mesmo que não se atenda alguma das restrições, outras podem vir a ser atendidas.

Portanto, duas principais contribuições são apresentadas neste trabalho:

- A proposta de um modelo de otimização baseado em enxame de partículas, do inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO), o qual auxilia na determinação do ponto operacional das multifuncionalidades de um GD. O algoritmo extrai o máximo da capacidade nominal do inversor do GD perante condições de baixa capacidade de geração, empregando-a na compensação de correntes reativas, de desequilíbrio e de distorção harmônica;
- Comprova-se que a decomposição de correntes da CPT também pode ser integrada a abordagens baseadas em metaheurísticas, possibilitando a busca de pontos operacionais de boa qualidade para um GD ou sistema de filtragem ativa, sob o contexto de controle local. Ressalta-se que, apesar de conceitos da CPT serem adotados em [17] junto ao uso de otimização multiobjetivo, tal abordagem visa o controle de GDs sob uma perspectiva

cooperativa. Ademais, em [17] as parcelas de corrente da CPT não são utilizadas na determinação da operação local de cada GD.

Por fim, destaca-se que as principais características relacionadas à adoção da CPT no método proposto são: *i)* a validade da aplicação da estratégia de compensação mesmo que o SDBT opere sob condições não ideais de tensão (i.e., sob tensões distorcidas e/ou desequilibradas); *ii)* possibilitar a síntese de correntes de referência para o GD sem necessidade de transformações de coordenadas ou implementação de algoritmos de sincronismo (e.g., PLLs); e *iii)* mesmo que o foco deste estudo seja a aplicação em um sistema trifásico, a abordagem pode ser diretamente aplicável a sistemas monofásicos, sem requerer adaptações adicionais na CPT ou no algoritmo de otimização. Apesar da CPT requerer capacidade computacional maior em relação a estratégias de controle mais simples, isto não é uma limitação para o escopo deste trabalho, assim como discutido na Seção VI.

Além desta seção introdutória, este artigo é estruturado conforme segue. A Seção II apresenta o circuito base para as discussões do trabalho, bem como os conceitos da CPT que são utilizados no modelo de otimização e de compensação de correntes. Na Seção III o algoritmo PSO é apresentado, conjuntamente com a modelagem do problema de otimização. Na Seção IV valida-se tal modelo e na Seção V um estudo de caso é apresentado, demonstrando a viabilidade do método em uma aplicação prática. Finalmente, algumas considerações quanto à implementação embarcada da proposta são dadas na Seção VI, e conclusões são apresentadas na Seção VII.

II. TOPOLOGIA ELÉTRICA E TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA

A. Topologia Elétrica para Compensação Através de Inversores Multifuncionais

Em redes SDBT, o emprego de inversores multifuncionais para a melhoria da qualidade da energia tem sido amplamente explorada [4]-[6], sendo que, de forma geral, segue a topologia sumarizada na Fig. 1. Nesta topologia, a presença de uma carga (a qual representa um consumidor de energia) faz com que uma corrente i_L seja drenada da rede, resultando em $i_{pac} = i_L$. Neste artigo, o termo subscrito “L” se refere às parcelas de corrente da carga, “pac” se refere às quantidades vistas pela rede, e o índice “GD” às parcelas de corrente do inversor. Dependendo

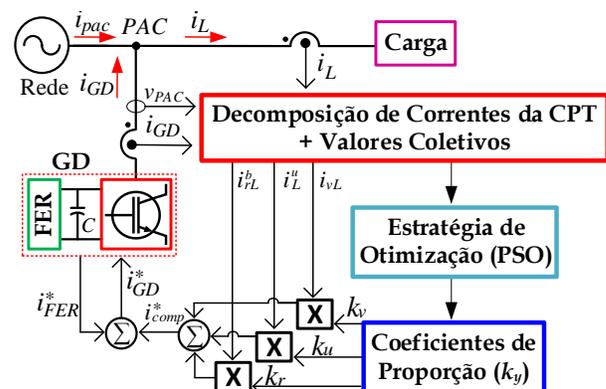


Fig. 1. Topologia do GD proposta para a estratégia de compensação.

da natureza da carga, tal corrente drenada pode apresentar componentes não ativas, como reativos, distorções harmônicas e/ou de desequilíbrio. Entretanto, existindo um inversor multifuncional alocado em um nó como o PAC, é possível fazer com que este injete/absorva correntes de forma a anular parcelas não ativas vistas pela rede. Dessa forma, pela lei de Kirchhoff, a corrente da rede é dada por $i_{pac} = i_L - i_{GD}$. Ainda, para que o inversor opere como um GD (isto é, injetando potência ativa na rede) é necessário que haja uma fonte de energia renovável (FER) em seu barramento CC. Para operar como um FAP compensando termos não ativos de corrente, de forma geral, o GD multifuncional não requer uma FER [7], [8].

Portanto, assim como visto na Fig. 1, o esquema de compensação de parcelas não ativas requer que as correntes do inversor do GD e de carga sejam medidas e alguma estratégia seja adotada no gerenciamento do sistema. Neste contexto, métodos de otimização podem ser empregados para determinar de forma mais adequada o montante de cada parcela de corrente a ser ofertada pelo inversor, no caso de limitação de capacidade para compensação total [10], [15]. No esquema proposto neste artigo e visto na Fig. 1, os coeficientes k_y (isto é, k_r , k_u , k_v) atuam como constantes de proporção que ponderam o montante de correntes reativas (i.e., subscrito “r”), de desequilíbrio (i.e., índice “u”), e de distorção (i.e., subscrito “v”) a serem compensadas respectivamente. Note que a somatória das correntes de compensação gera a referência i_{comp}^* para o controle do GD. De forma análoga, a referência da corrente ativa balanceada, que pode ser gerada devido à presença da FER, é dada por i_{FER}^* . Portanto, este trabalho visa determinar tais coeficientes k_y para uma operação otimizada.

B. Teoria de Potência Conservativa

A CPT [16] é uma teoria de potência baseada no domínio do tempo (abc) que possibilita a análise de circuitos elétricos sobre condições generalizadas de tensão, isto é, sob condições senoidais ou distorcidas, bem como sob tensões balanceadas ou não. Tal método é aplicável a qualquer circuito elétrico mono ou trifásico baseado em quantidades elétricas (tensões e correntes) periódicas no tempo. Componentes de corrente e potência são decompostas pela CPT baseando-se nos termos de potência ativa e reativa [16], [18], sendo apresentados a seguir.

Primeiramente, a potência ativa (P) definida para um sistema trifásico é dada por (1). Em tal definição, v_m é a tensão da fase m (i.e., $m = a, b, c$) em relação ao condutor neutro ou a um ponto virtual de medição. i_m é a corrente circulante na respectiva linha e T é o período de tais sinais.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt \quad (1)$$

De maneira análoga, a potência reativa (Q) é definida por (2), onde \hat{v}_m é a integral imparcial da tensão, a qual é calculada através da integral de v_m e subtraindo o seu valor médio [16]. Em (2), ω é definido como a frequência angular fundamental.

$$Q = \frac{\omega}{T} \int_0^T (\hat{v}_a i_a + \hat{v}_b i_b + \hat{v}_c i_c) dt \quad (2)$$

Considerando P e Q , as correntes circulantes na fase m podem ser decompostas em termos ortogonais relacionadas às componentes ativa e reativa, considerando tanto cargas balanceadas como desbalanceadas. Ademais, a componente remanescente de corrente (definida como residual, do inglês, *void*), representa as distorções harmônicas. Considerando os subíndices a, r, e, v , respectivamente representando os termos ativo, reativo e residual, e ainda os índices b e u para os termos balanceados e de desequilíbrio, a decomposição de correntes instantâneas da CPT é dada por (3). Note que a corrente residual é dada por (4). Ainda, considerando a definição de valor coletivo dada por (5) e representada por variáveis em negrito, é possível calcular as correntes de desequilíbrio de cada fase m por (6). Note que, X_m (i.e., I_m ou V_m) representa o valor eficaz de qualquer componente de corrente ou tensão de uma fase m .

$$i_m = i_{am}^b + i_{rm}^b + i_m^u + i_{vm} \quad (3)$$

$$i_{vm} = i_m - (i_{am}^b + i_{rm}^b + i_m^u) \quad (4)$$

$$X = \sqrt{X_a^2 + X_b^2 + X_c^2} \quad (5)$$

$$i_m^u = \left(\frac{P_m}{V_m^2} - \frac{P}{V^2} \right) \cdot v_m + \left(\frac{Q_m}{\omega \cdot \hat{V}_m^2} - \frac{Q}{\omega \cdot \hat{V}^2} \right) \cdot \hat{v}_m \quad (6)$$

Dessa forma, a CPT define as potências elétricas existentes no circuito, sendo estas, a ativa (P), a reativa (Q), a de desequilíbrio (N) e a harmônica (D) através de (7), onde cada termo de corrente coletivo é multiplicado pela tensão coletiva.

$$A^2 = V^2 \cdot I^2 = P^2 + Q^2 + N^2 + D^2 \quad (7)$$

III. MODELO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Dentre diversas técnicas de otimização encontradas na literatura, as metaheurísticas se destacam por sua versatilidade e capacidade de encontrar soluções de boa qualidade para problemas complexos [19]. Neste sentido, destacam-se os algoritmos genéticos, colônia de formigas, *simulated aneling*, PSO, e métodos mono ou multiobjetivo. Ainda, diversos destes métodos de programação evolutiva podem ser satisfatoriamente aplicados ao controle da filtragem ativa em um SDBT [12], [20]. Este trabalho, por sua vez, foca na aplicação de uma metaheurística baseada em PSO devido: *i*) à natureza do problema a ser tratado, o qual pode ser numericamente representado por uma abordagem através de números reais; *ii*) à sua rápida convergência e necessidade de configuração de poucos parâmetros; *iii*) a não requerer a adoção de operadores evolucionários como cruzamentos e mutações [21], simplificando sua implementação; e *iv*) a requerer baixo esforço computacional em comparação a outros métodos [22].

Métodos de PSO são caracterizados por algoritmos populacionais nos quais suas partículas interagem para buscar soluções de boa qualidade para um determinado problema [19], [23]. Cada partícula “ r ”, que neste problema é definido como o conjunto de parcelas de corrente coletiva ($I_{r_{pac}}^b, I_{v_{pac}}^*$ e I_{pac}^u) desejadas no PAC, encontra-se em uma posição x_i do espaço n -dimensional de soluções, e movimentada-se considerando uma velocidade v_i , dados respectivamente por (8) e (9).

$$x_i = [x_{i,1}; x_{i,2}; \dots; x_{i,n}]' \quad (8)$$

$$v_i = [v_{i,1}; v_{i,2}; \dots; v_{i,n}]' \quad (9)$$

A cada iteração do algoritmo, a qual é nomeada pelo sobrescrito k , a posição e a velocidade de cada partícula são atualizadas por meio das equações (10) e (11). w representa a inércia das partículas, c_1 e c_2 são respectivamente os fatores cognitivo e social de interação, e r_1 e r_2 são constantes randômicas necessárias para tornar aleatória as buscas locais de cada partícula. Ainda, p_i^k , nomeado “*personal best* (P_{best})”, é a melhor solução encontrada por cada uma das partículas na iteração k , enquanto g^k , nomeado “*global best* (G_{best})”, é a melhor solução encontrada pelo conjunto de partículas considerando todas as iterações ocorridas.

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i^k - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g^k - x_i^k) \quad (10)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

Baseando-se em tal conceito, o modelo de otimização proposto neste trabalho é apresentado a seguir, bem como discussões a respeito de sua implementação.

A. Modelo de Otimização Baseado em PSO e na CPT

A modelagem do sistema de compensação ótima proposto é sumariamente baseada nas definições de decomposição de termos de corrente e potência dados pela CPT, assim como apresentado Seção II e similar a [15]. Inicialmente, requer-se que a função custo, também chamada de função objetivo (FO), seja apresentada, sendo responsável por mensurar a existência de termos não ativos de corrente no PAC, os quais devem ser compensados pelo GD, assim como dado na Fig. 1. Portanto, considerando que a oferta de serviços ancilares se caracterize pela compensação de correntes não ativas drenadas pela carga, apresenta-se a seguinte FO:

$$\min f = W_r \cdot (I_{r_{pac}}^b)^2 + W_v \cdot (I_{v_{pac}})^2 + W_u \cdot (I_{pac}^u)^2 + \sum \text{penalidades} \quad (12)$$

Em (12) o objetivo principal é a redução de parcelas de corrente. Os termos coletivos das correntes reativa, de distorção harmônica e de desequilíbrio existentes no PAC, respectivamente, $I_{r_{pac}}^b$, $I_{v_{pac}}$, e I_{pac}^u , são considerados quadráticos devido à ortogonalidade existente entre eles [16]. Entretanto, diferente de [15], tal definição pode ser alterada. Ainda, os termos W_r , W_v e W_u são dados, respectivamente, pelos valores coletivos de corrente reativa ($I_{r_L}^b$), residual (I_{v_L}) e de desequilíbrio (I_L^u) da carga, necessários para priorizar a compensação de cada componente de acordo com a proporção existente de cada uma delas no circuito.

Uma vez que a formulação de tal problema apresenta limitações físicas (e.g., capacidade restrita de potência do inversor) e matemáticas (e.g., correntes coletivas apresentarem valores não negativos), requer-se que o modelo considere penalizações para o possível não atendimento dessas restrições. Portanto, a cada restrição não atendida, a penalidade dada por (13) é adicionada ao custo da solução. Assim, devido a (12) ser uma função de minimização, soluções de boa qualidade são caracterizadas por custos inferiores, o que indica penalizações

reduzidas ou inexistentes (i.e., no caso de soluções factíveis).

$$\begin{aligned} \text{penalidades} &= 100 \cdot I_{naL} \\ &= 100 \cdot \sqrt{(I_{r_L}^b)^2 + (I_{v_L})^2 + (I_L^u)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

A justificativa para (13) ser formulada com base na corrente não ativa da carga (I_{naL}) está relacionada à capacidade de generalização do problema ótimo de compensação. Por exemplo, dado que a condição de carga de um sistema possa mudar ao longo do período operacional, e que sua máxima variação ainda possa ser desconhecida, é importante que as penalizações se adequem à variação da magnitude do custo da FO. Desta forma, o espaço de soluções se torna mais heterogêneo entre soluções de boa e má qualidade, facilitando a convergência em busca da melhor solução. Neste caso, o fator multiplicador 100 adotado em (13) facilita tal heterogeneização. Ademais, adotando (13) a possível variação de magnitude de todos os distúrbios alvo da compensação são levados em consideração. Destaca-se que, embora esteja fora do escopo deste trabalho, (13) poderia ainda ser ajustada dinamicamente (i.e., a penalização para cada restrição pode ser diferente e levar em consideração a magnitude do desvio entre seu valor de referência e o resultado dado pela melhor solução).

Finalmente, define-se então como limitações para o problema quatro restrições com base nas definições da CPT e nas limitações de projeto do inversor, sendo estas:

$$\frac{I_{a_{pac}}^b}{\sqrt{(I_{a_{pac}}^b)^2 + (I_{r_{pac}}^b)^2 + (I_{v_{pac}})^2 + (I_{pac}^u)^2}} \leq \lambda^* \quad (14)$$

$$\frac{I_{r_{pac}}^b}{\sqrt{(I_{a_{pac}}^b)^2 + (I_{r_{pac}}^b)^2}} \leq \lambda_Q^* \quad (15)$$

$$\frac{I_{v_{pac}}}{\sqrt{(I_{a_{pac}}^b)^2 + (I_{r_{pac}}^b)^2 + (I_{v_{pac}})^2 + (I_{pac}^u)^2}} \leq \lambda_D^* \quad (16)$$

$$\frac{I_{pac}^u}{\sqrt{(I_{a_{pac}}^b)^2 + (I_{r_{pac}}^b)^2 + (I_{pac}^u)^2}} \leq \lambda_N^* \quad (17)$$

As equações (14) a (17) são determinadas com base em limites normativos a serem atendidos, assim como os definidos em [15]. λ^* são fatores de conformidade definidos pela CPT [6], [16], e dados como entrada do problema de otimização. (14) a (17) são, respectivamente, os índices (ou fatores de conformidade) de potência ativa, reativa, de distorção e desequilíbrio desejados no PAC após a compensação. Note que, outras restrições podem ser adotadas para o problema de otimização, assim como a consideração de fatores como os estabelecidos em [24], desde que uma relação adequada com os termos da FO seja estabelecida.

De forma análoga, requer-se que sejam estabelecidas restrições para que as correntes coletivas do PAC não assumam valores negativos, dado em (18) a (20). Ainda, em (21) a capacidade coletiva do inversor disponível para ofertar compensação (ΔI_{GD}) é considerada para que não extrapole seu valor nominal. Isto é, a corrente não ativa remanescente no PAC ($I_{na_{pac}}$) deve ser limitada à diferença entre a corrente não ativa

da carga (I_{naL}) e a capacidade de compensação.

$$I_{r_{pac}}^b \geq 0 \quad (18)$$

$$I_{v_{pac}} \geq 0 \quad (19)$$

$$I_{u_{pac}} \geq 0 \quad (20)$$

$$I_{naL} - I_{na_{pac}} \leq \Delta I_{GD} \quad (21)$$

Por fim, destaca-se que a saída do algoritmo de otimização é dada pelos valores coletivos de corrente que devem permanecer no PAC após a compensação, isto é, $I_{r_{pac}}^{b*}$, $I_{v_{pac}}^*$ e I_{pac}^{u*} . E para que isto ocorra, tais valores de referência são utilizados para calcular os coeficientes de proporção (k_y) que ponderam as parcelas da CPT processadas pelo inversor, como visto na Fig. 1 e definido em (22). Em (22), y refere-se às parcelas reativas (r), de desequilíbrio (u) e harmônicas (v). Note que, se $k_y = 0$, a compensação da respectiva parcela de corrente é nula; e se $k_y = 1$, todo o conteúdo do respectivo termo é compensado.

$$k_y = \frac{I_{yL} - I_{y_{pac}}^*}{I_{yL}} \quad (22)$$

B. Implementação do Algoritmo PSO

Com relação à implementação do algoritmo PSO para o modelo proposto, faz-se necessário seguir as etapas apresentadas no fluxograma da Fig. 2. Periodicamente, considerando uma taxa de processamento muito mais lenta que o chaveamento do inversor, aproximadamente na ordem de centenas de milissegundos a minutos, a estratégia de otimização é processada para atualizar os coeficientes de proporção (k_y) adotados na geração das referências de controle. É importante ressaltar que, devido ao método proposto ser processado a taxas relativamente lentas quando comparado à frequência de chaveamento, a adoção de estratégias de saturação de corrente é essencial na implementação prática do GD, a fim de evitar sobrecorrentes e manter sua operação estável.

Portanto, ao iniciar um novo ciclo de operação, são computadas as parcelas coletivas de corrente da CPT, referentes ao PAC e à carga, além da capacidade de corrente do GD, e ainda se iniciam aleatoriamente a posição (x_i) e velocidade (v_i) das partículas do algoritmo PSO. Posteriormente, a FO é avaliada para determinar o custo de cada partícula, bem como penalizações são calculadas e adicionadas a cada custo final. Caso a iteração atual determine que posição de uma partícula (p_i^k) é melhor que sua P_{best} , o valor de P_{best} é atualizado. Dessa forma, a melhor solução (G_{best}) é atualizada com base nos valores de P_{best} das partículas, apenas quando um custo menor que o atual é obtido, considerando todas as iterações ocorridas até o critério de parada. Na sequência, as posições e velocidades são atualizadas para serem usadas na próxima iteração, caso o critério de parada não seja atingido. Ao final do processamento do algoritmo PSO, a melhor solução é dada pelo conjunto $G_{best} = [I_{r_{pac}}^{b*}, I_{v_{pac}}^*, I_{pac}^{u*}]'$, o qual é utilizado no cálculo dos coeficientes de proporção (i.e., k_y).

IV. ANÁLISE DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Com o intuito de certificar a viabilidade do método proposto, esta seção apresenta discussões referentes ao comportamento da estratégia perante cenários hipotéticos de capacidade de

inversor. São analisados três principais casos, representando as condições possíveis a serem processadas pelo algoritmo. Primeiramente, apresenta-se um caso no qual o inversor possui capacidade (ΔI_{GD}) total para compensar todo conteúdo de corrente reativa, de desequilíbrio e distorção. No segundo, avalia-se quando não há capacidade remanescente significativa para compensação. E por fim, demonstra-se o comportamento do algoritmo perante um caso de capacidade limitada.

Os casos de estudos consideram a existência de uma carga não linear e um inversor (com três instantes de capacidade de compensação (ΔI_{GD}): 40,0 A, 0,0 A e 18,0 A), considerando um conteúdo de correntes assim como dado na Tabela I. Os fatores de conformidade adotados foram $\lambda^* = 0,92$, $\lambda_Q^* = 0,40$, $\lambda_D^* = 0,08$ e $\lambda_N^* = 0,07$. Tais valores são adotados conforme proposto e validado em [15], perante um cenário de aplicação similar ao abordado neste artigo. Para cada caso testado, o algoritmo PSO foi simulado 20 vezes, sob as mesmas condições, com o intuito

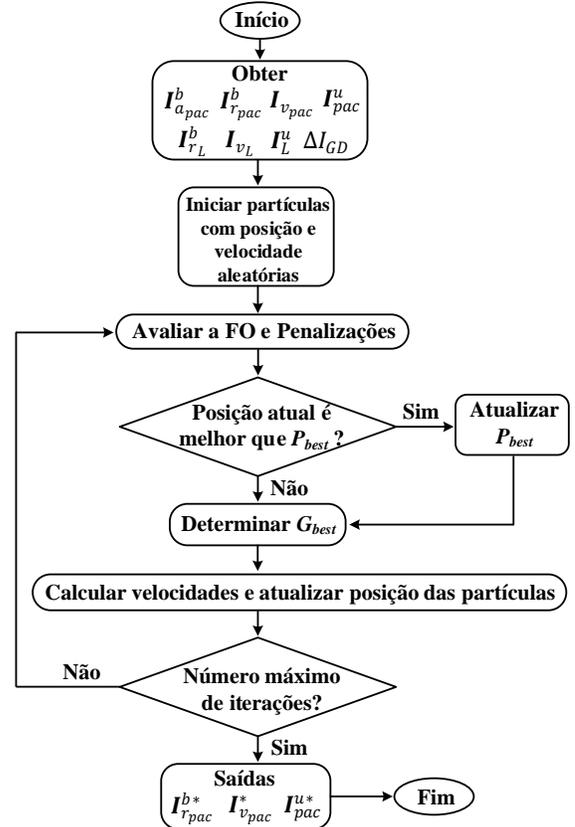


Fig. 2. Fluxograma da implementação do algoritmo PSO e modelo ótimo.

TABELA I. CORRENTES HIPOTÉTICAS USADAS NA ANÁLISE E PARÂMETROS DO ALGORITMO PSO.

Corrente (Carga) [A]	Corrente (PAC) [A]	Algoritmo PSO		
I_{aL}^b 21,7	$I_{a_{pac}}^b$ 13,2	Núm. Partículas (i)	30	w Inicial 0,9
I_{rL}^b 23,3	$I_{r_{pac}}^b$ 23,3	Núm. Iterações (k)	60	w Final 0,2
I_{vL} 4,3	$I_{v_{pac}}$ 4,3	Limite Superior	$\begin{bmatrix} I_{rL}^b \\ I_{vL} \\ I_L^u \end{bmatrix}$	c_1 2,0
I_L^u 5,8	I_{pac}^u 5,8	Limite Inferior	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	c_2 2,0

de certificar a repetitividade do método.

Os parâmetros adotados para o algoritmo também estão dispostos na Tabela I. Assim como comumente reconhecido [19], [25], a parametrização de algoritmos PSO geralmente é realizada com base em valores amplamente utilizados na literatura, ou pelo método empírico. Neste trabalho, devido à dimensão do problema de otimização ser pequena, sendo apenas tridimensional, um número relativamente pequeno de partículas é considerado. De forma similar, devido à ortogonalidade e independência entre as poucas parcelas de corrente a serem tratadas, poucas iterações são requeridas. Portanto, tais valores dados na Tabela I são determinados de maneira empírica. Já os valores dos pesos inerciais das partículas, assim como os dos fatores cognitivo e social, são adotados com base em [19].

A. Capacidade Nominal de Compensação

Devido à intermitência de cargas na rede elétrica, demandas diferentes de corrente podem ocorrer, resultando em um caso hipotético no qual o inversor poder ter capacidade nominal maior do que o conteúdo drenado pelas cargas. Desta forma, o algoritmo PSO proposto deve fornecer uma saída adequada para gerenciar a operação do GD. Portanto, considerando o caso no qual a capacidade remanescente do inversor é $\Delta I_{GD} = 40 A$, a análise da resposta do algoritmo é apresentada com base no custo da FO e os valores de G_{best} , sendo dispostos na Fig. 3.

É possível notar na Fig. 3(a) que o custo da FO convergiu rapidamente (isto é, com menos de 25 iterações), considerando até o limite de 60 iterações estabelecido como critério de parada. Tal convergência ocorreu para as 20 rodadas simuladas, resultando em um custo final praticamente nulo. Por meio da Fig. 3(b) demonstra-se que o custo da melhor solução encontrada, a cada uma das rodadas, é desprezível em relação aos valores coletivos das correntes não ativas da Tabela I. Ademais, observa-se que a variabilidade das soluções é desprezível, uma vez que o valor de G_{best} não varia

significativamente ao longo das rodadas.

Este resultado é esperado pois, à medida que a capacidade do GD se torna maior do que os valores de corrente coletiva drenados pela carga, todas as parcelas de corrente não ativas podem ser compensadas, o que resulta em montantes nulos no PAC. Portanto, note nas Figs. 3(c) a 3(e) que a saída do algoritmo PSO, a qual é dada pelo vetor G_{best} , constitui valores de referência praticamente nulos para I_{rpac}^{b*} , I_{vpac}^* e I_{pac}^{u*} . Consequentemente, resultando em $k_y = 1$, o que significa a compensação total das parcelas de corrente não ativas em uma aplicação prática. Nota-se também nas Figs. 3(c) a 3(e) que houve variabilidade insignificante nas soluções encontradas ao longo das 20 rodadas, mantendo as saídas em valores próximos a zero.

B. Sem Capacidade de Compensação

Este segundo caso demonstra o comportamento do algoritmo sob a condição de indisponibilidade de capacidade de operação para realizar compensação, isto é, $\Delta I_{GD} = 0,0 A$. Os resultados são apresentados na Fig. 4. É possível notar na Fig. 4(a) que, perante uma capacidade nula de processamento de correntes não ativas, a FO apresenta um custo muito elevado (neste caso, na ordem de 10^{10}). Isto representa um caso prático inviável, uma vez que se impossibilita a minimização do custo da FO.

Como consequência de não ser possível minimizar a FO, observa-se na Fig. 4(b) que o custo da melhor solução é, analogamente, intangível. Ademais, devido à inviabilidade de encontrar um ponto operacional de menor custo, o algoritmo PSO determina que o ponto operacional mais adequado é a solução tendo G_{best} composto pelos mesmos valores das correntes coletivas não ativas da carga. Por exemplo, as Figs. 4(c) a 4(e) demonstram que os valores de I_{rpac}^{b*} , I_{vpac}^* e I_{pac}^{u*} são iguais à componentes da carga apresentadas na Tabela I. Em outras palavras, a saída do algoritmo resulta em $k_y = 0$, o que indica a não compensação de nenhuma componente de corrente.

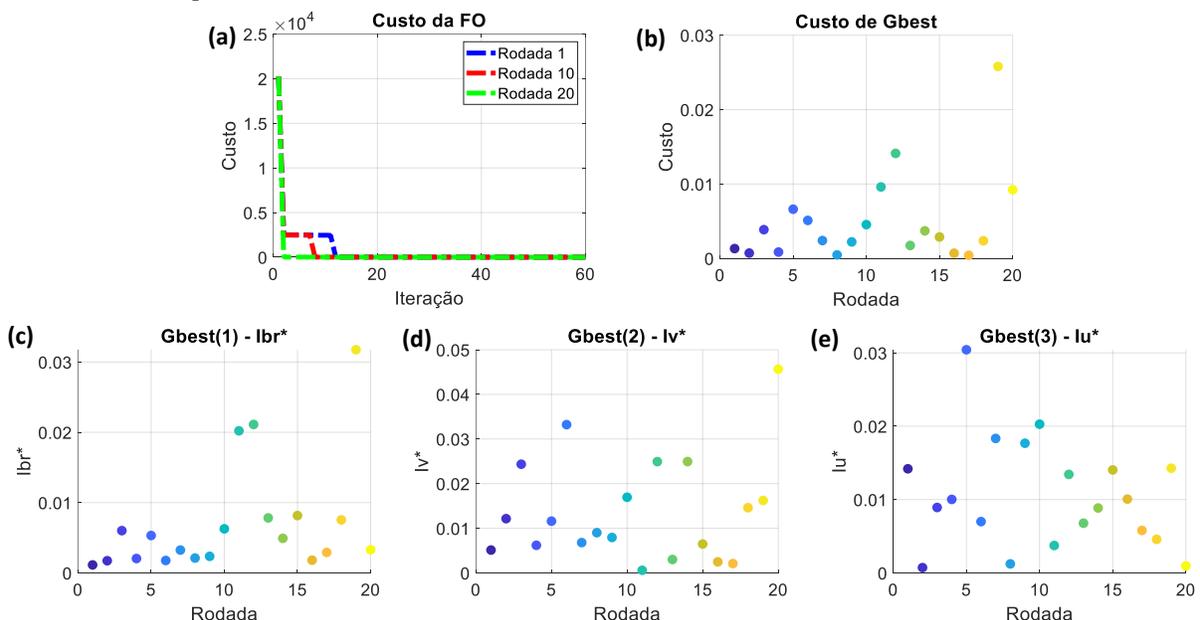


Fig. 3. Análise do modelo de otimização e algoritmo PSO considerando capacidade total de compensação. (a) Custo da FO ao longo das iterações durante as rodadas 1, 10 e 20; (b) Custo da melhor solução (G_{best}) durante as 20 rodadas; (c), (d) e (e) são as melhores soluções durante as 20 rodadas.

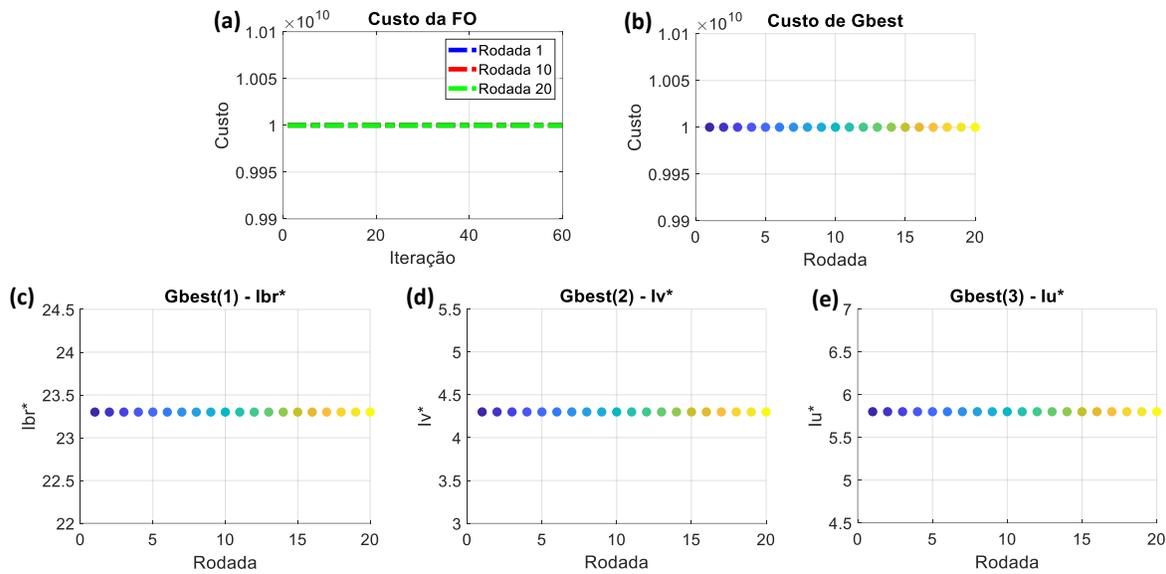


Fig. 4. Análise do modelo de otimização e algoritmo PSO considerando capacidade nula de compensação. (a) Custo da FO ao longo das iterações durante as rodadas 1, 10 e 20; (b) Custo da melhor solução (G_{best}) durante as 20 rodadas; (c), (d) e (e) são as melhores soluções durante as 20 rodadas.

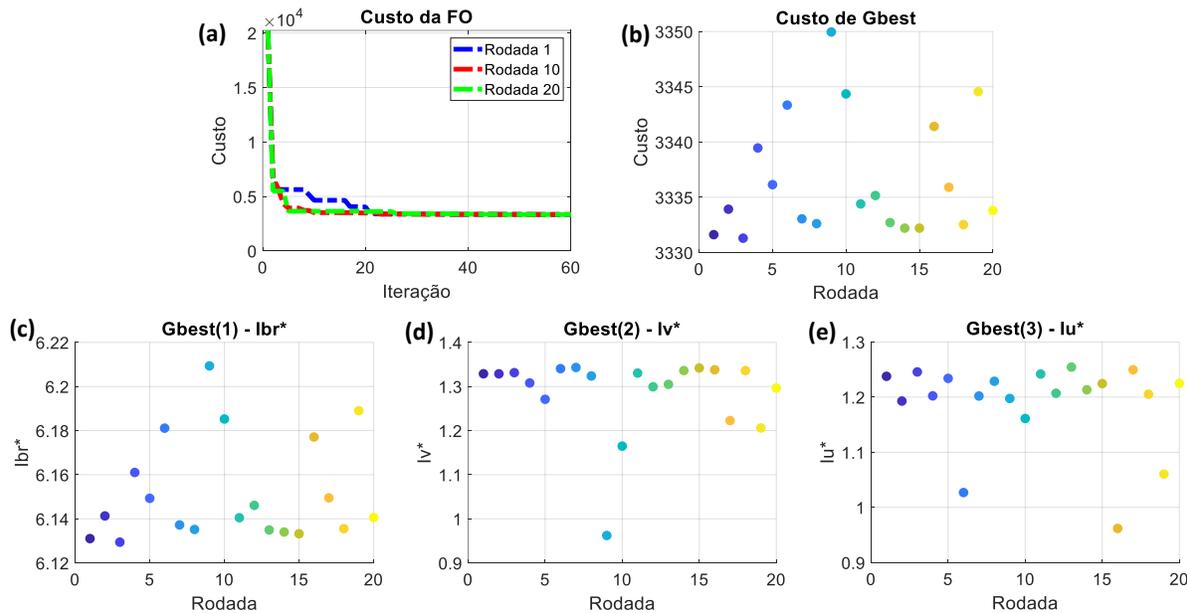


Fig. 5. Análise do modelo de otimização e algoritmo PSO considerando capacidade limitada de compensação. (a) Custo da FO ao longo das iterações durante as rodadas 1, 10 e 20; (b) Custo da melhor solução (G_{best}) durante as 20 rodadas; (c), (d) e (e) são as melhores soluções durante as 20 rodadas.

C. Capacidade Limitada - Compensação Otimizada

Este caso representa o principal cenário de estudo proposto por este trabalho, o qual visa determinar as correntes a serem compensadas, considerando uma capacidade remanescente limitada para o inversor (ΔI_{GD}). Neste caso, $\Delta I_{GD} = 18 A$, e as saídas do algoritmo PSO são apresentadas na Fig. 5.

Primeiramente, com base no custo da FO demonstrado na Fig. 5(a), é possível notar que o algoritmo apresentou comportamentos diferentes ao longo das 20 rodadas simuladas, assim como esperado pela característica randômica intrínseca à estratégia PSO adotada. Entretanto, assim como no caso com capacidade total de compensação discutido anteriormente, após aproximadamente 30 iterações houve convergência nas soluções. Destaca-se que, comparado aos casos anteriores, o custo da FO não convergiu em torno de zero, tampouco obteve

um valor intangivelmente alto. Ao longo das iterações o custo foi reduzido, o que indica que compensação pode ser efetuada pelo GD, finalmente convergindo a um valor não nulo, representando também que o GD não é capaz de processar todo o conteúdo não ativo das correntes.

Ao analisar a Fig. 5(b) é possível comprovar que o custo da melhor solução manteve sua ordem de grandeza constante ao longo das rodadas. Portanto, mais uma vez certifica-se que o algoritmo é capaz de demonstrar baixa variabilidade nos resultados encontrados. Ressalta-se ainda que, considerando todas as 20 rodadas, a grandeza da máxima variação encontrada para G_{best} na Fig. 5(b) (isto é, diferença entre os valores máximo e mínimo) é praticamente desprezível em relação ao valor do custo mínimo, sendo aproximadamente 0.6 %.

As saídas do algoritmo apresentadas nas Figs. 5(c) a 5(e)

também demonstram que as referências de compensação respondem conforme esperado e com pouca variabilidade. Por exemplo, destaca-se que a maior parte da capacidade do inversor é alocada para a compensação da corrente reativa, já que $W_r = I_{rL}^b$ é significativamente maior que os demais pesos da FO. Similarmente, uma vez que o peso W_u é maior que W_v , a saída de I_{pac}^{u*} representa maior compensação que I_{pac}^{v*} . Finalmente, comprova-se a importante característica do algoritmo de respeitar a capacidade do GD. Tomando como exemplo a solução da primeira rodada, nota-se que a corrente de compensação a ser processada é $\sqrt{(I_{rL}^b - I_{rpac}^{b*})^2 + (I_{vL} - I_{vpac}^{v*})^2 + (I_L^u - I_{pac}^{u*})^2} = 17.988 A$, o que respeita o limite de 18 A estipulado.

V. ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a operacionalidade do método, considerando uma aplicação prática com um GD, o circuito apresentado na Fig. 6 foi implementado em Matlab/Simulink, sendo simulado em modo discreto, com frequência de amostragem igual a 12 kHz. O esquema abordado baseia-se em um circuito trifásico a três condutores com: *i*) a rede sendo emulada por fontes senoidais de tensão de 220 V_{linha} em 60 Hz; *ii*) um inversor trifásico representado por fontes ideais de corrente, com corrente nominal coletiva de 25 A; e *iii*) diversas cargas lineares e não lineares hipotéticas para caracterizar a existência de correntes reativas, de desequilíbrio e distorção harmônica. O conteúdo harmônico da corrente drenada pela carga não linear é composto pela componente fundamental (i.e., 11,34 A_{pico}), além de componentes predominantemente da 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, as quais apresentam valor coletivo de 4,28 A, e respectivamente 3,27, 0,92, 0,65 e 0,34 A_{pico} por fase.

Os parâmetros de configuração apresentados anteriormente, dados na Tabela I, foram adotados para o algoritmo PSO. Analogamente, os fatores de conformidade da CPT, usados como referência para o algoritmo de otimização (isto é, λ^* , λ_Q^* , λ_D^* , λ_N^*), consistem dos mesmos valores apresentados na Seção IV. O algoritmo PSO foi configurado para ser processado a cada três ciclos do período da fundamental, ou seja, 50 ms.

Os resultados de simulação são separados em três casos. No primeiro caso é considerado uma condição similar à apresentada na Seção IV-A, na qual toda a capacidade nominal do inversor multifuncional está disponível para que seja empregada na compensação de correntes não ativas ($\Delta I_{GD} = 25 A$). Este caso representa um GD durante períodos de geração

de energia praticamente nula ($I_{aGD}^b = 0 A$) (por exemplo, representando um GD fotovoltaico durante a noite). Já o segundo caso apresenta uma situação de capacidade limitada de operação, no qual o GD é capaz de gerar 40 % da potência ativa sendo consumida pelas cargas. Consequentemente, o algoritmo proposto deve encontrar um ponto operacional para que a oferta de serviços de compensação possa ser ofertada concomitantemente. Finalmente, no terceiro caso, a condição de capacidade nula de compensação é apresentada.

A. Caso 1: Capacidade Nominal de Compensação

Para este caso, os resultados de simulação são apresentados na Fig. 7. Inicialmente, até o instante a 0,1 s, o inversor está inoperante, portanto circulam no PAC apenas as correntes das cargas. Nota-se que tais correntes no PAC apresentam alta distorção, desequilíbrio significativo, bem como correntes defasadas com relação às respectivas tensões de cada fase. A partir da Tabela II observa-se que os valores de todas as parcelas de corrente coletiva das cargas são significantes, e que, além da corrente ativa balanceada (I_{aL}^b), o termo não ativo

($\sqrt{(I_{rL}^b)^2 + (I_{vL})^2 + (I_L^u)^2} \cong 28 A$) é maior do que a capacidade nominal do inversor ($\Delta I_{GD} = 25 A$). Assim como visto na Tabela III, os fatores de conformidade da CPT também não são atendidos neste instante, devido à significativa presença das correntes não ativas. A Tabela IV ainda mostra outros fatores de mérito comumente adotados para avaliação da qualidade da energia, calculados assim como definido em [24], como o fator de potência clássico (FP), os fatores de desequilíbrio de tensão (FD_V) e de corrente (FD_I), e o índice de distorção harmônica total da corrente ($DHTI$). Apresenta-se também o valor eficaz da corrente fundamental (I_1^{RMS}).

A partir do instante 0,1 s, o inversor é habilitado, concomitantemente ao método de otimização proposto. Uma vez que neste intervalo considera-se uma geração nula de energia ($I_{aGD}^b = 0 A$), espera-se que o algoritmo baseado em PSO encontre um ponto operacional no qual a capacidade do GD possa ser empregada na compensação de componentes não ativas de corrente. Como resultado das saídas do algoritmo PSO, tem-se $k_r = 0,90$, $k_v = 0,60$ e $k_u = 0,98$. Então, nota-se que o inversor passa a compensar a parte mais significativa das correntes não ativas. Consequentemente, as correntes fluindo pelo PAC apresentam distorção menos evidente, encontram-se com pouca defasagem com relação às respectivas tensões, e ainda estão praticamente balanceadas (isto é, com amplitudes

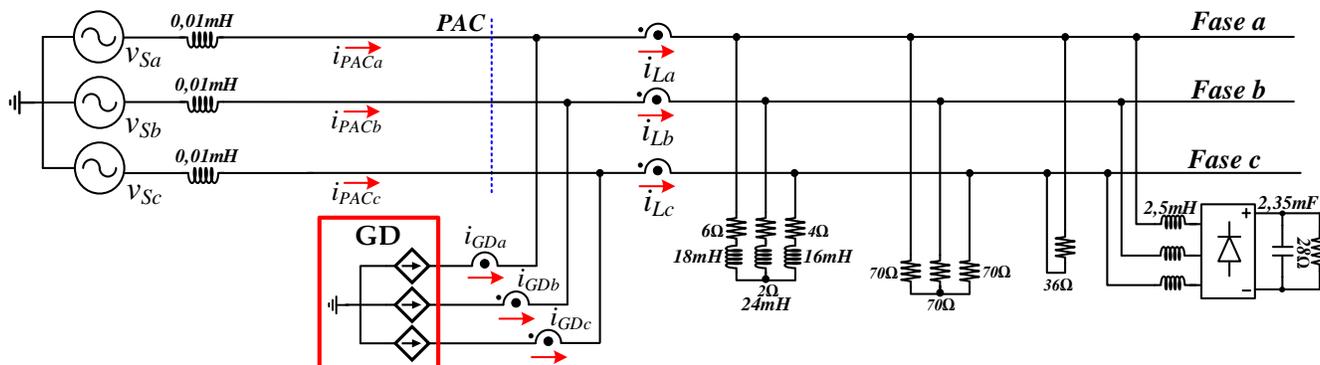


Fig. 6. Circuito adotado para resultados do estudo de caso.

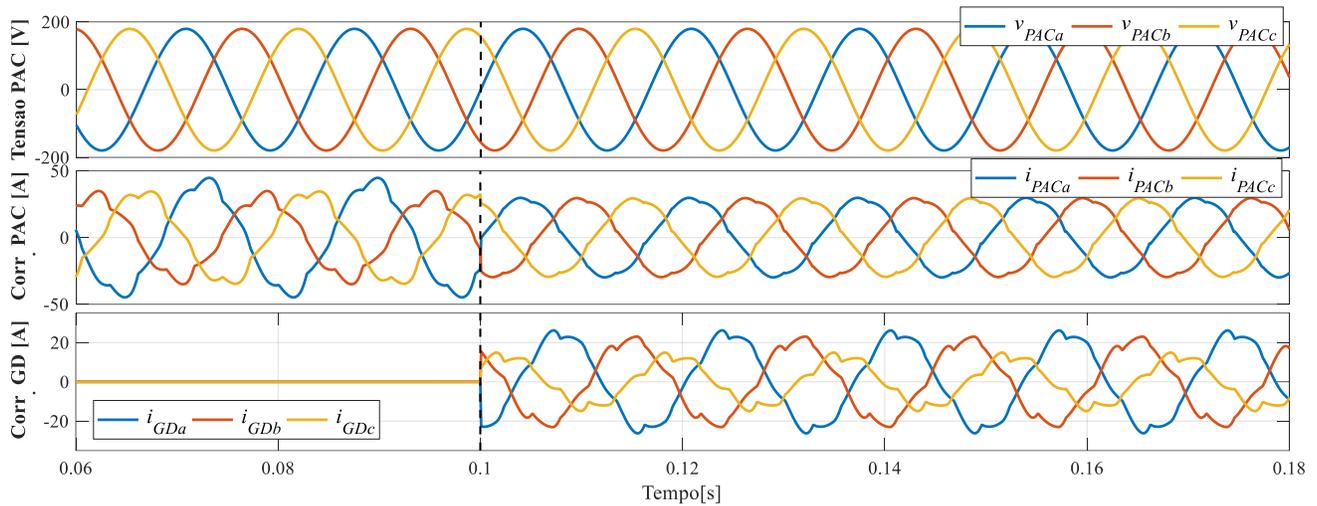


Fig. 7. Resultado de simulação para o Caso 1. De cima para baixo: tensões no PAC, correntes do PAC e correntes injetadas pelo GD

TABELA II. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO (CORRENTES COLETIVAS).

Correntes Coletivas					
(Carga) [A]	PAC [A]				
	Caso 1		Caso 2	Caso 3	
$I_{a_l}^b$	35,08	$I_{a_{pac}}^b$	35,83	21,66	9,66
$I_{r_l}^b$	26,36	$I_{r_{pac}}^b$	2,48	6,63	25,96
I_l^u	8,34	I_{pac}^u	0,26	0,27	8,34
I_{v_l}	4,28	$I_{v_{pac}}$	1,79	1,80	4,28

TABELA III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO (FATORES DA CPT).

Referência (λ^* , λ_Q^* , λ_D^* , λ_N^*)	Carga	PAC			
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	
λ	0,920	0,78	0,99	0,95	0,33
λ_Q	0,400	0,60	0,06	0,29	0,93
λ_D	0,080	0,09	0,04	0,07	0,14
λ_N	0,070	0,18	0,01	0,01	0,29

TABELA IV. ÍNDICES DE MÉRITO ADICIONAIS MEDIDOS NO PAC.

Índice	Sem Comp.	Com Compensação			
	Cargas	Caso 1	Caso 2	Caso 3	
FP	0,79	0,99	0,95	0,35	
FD_v [%]	0,01	0,00	0,00	0,01	
FD_i [%]	19,01	0,73	1,16	30,53	
I₁^{RMS} [A]	Fase a	30,06	20,85	13,17	20,37
	Fase b	22,38	20,77	13,14	15,68
	Fase c	24,31	20,60	12,93	12,47
DHT_i [%]	Fase a	8,28	5,06	7,95	12,18
	Fase b	11,07	5,06	7,94	15,78
	Fase c	10,21	5,11	8,08	19,84

similares). Observe na Tabela IV que, para o Caso 1, o FP é elevado (isto é, 0,99). Assim, também vendo a redução de $I_{r_{pac}}^b$, comprova-se que a porção mais significativa das correntes reativas foram compensadas. Ainda, além de I_1^{RMS} apresentar praticamente o mesmo valor para as fases a , b e c , a redução

dos fatores de desequilíbrio e do DHT_i demonstram que as correntes I_{pac}^u e $I_{v_{pac}}$ foram compensadas significativamente.

Analisando a Tabela II pode-se destacar que a corrente ativa da CPT ($I_{a_{pac}}^b$) permaneceu praticamente inalterada com relação ao estado anterior, enquanto as outras foram reduzidas. É importante ressaltar que, apesar do algoritmo PSO ter encontrado um ponto ótimo de operação, não foi possível realizar a compensação total dos termos não ativos pela limitação da capacidade do GD. Finalmente, é possível observar na Tabela III que os fatores de conformidade para este Caso 1 indicam o atendimento das demais restrições impostas para o algoritmo. Isto é comprovado pelo valores de λ_Q , λ_D , λ_N serem menores que as respectivas referências, e ainda, por λ (que representa o fator de potência definido por [16]) ser maior que seu valor mínimo estabelecido.

B. Caso 2: Capacidade Limitada de Compensação

Este segundo caso representa uma situação na qual o GD opera gerando potência ativa correspondente a apenas um percentual de sua capacidade nominal. Para inversores fotovoltaicos, tal condição é típica fora de períodos de pico de geração, bem como sob condições de sombreamento [3]. Considera-se que uma capacidade de 40 % da corrente ativa drenada pelas cargas possa ser fornecida pelo inversor neste caso. Os resultados de simulação são apresentados na Fig. 8 e Tabelas II a IV.

Primeiramente, na Tabela II é possível notar que o montante da corrente coletiva ativa de balanço no PAC é $I_{a_{pac}}^b = 21,66 A$, o que comprova que o inversor injeta a quantidade esperada de 40 % potência ativa consumida pelas cargas. Devido a esta operação de injeção de correntes ativas, o GD apresenta uma capacidade remanescente limitada para ofertar serviços de compensação, isto é, $\Delta I_{GD} = \sqrt{25^2 - (I_{a_{GD}}^b)^2}$.

Portanto, o algoritmo PSO é responsável por fornecer a decisão do montante de correntes reativa, de distorção e de desequilíbrio que devem ser adicionalmente processadas pelo GD, com base nesta capacidade remanescente (ΔI_{GD}).

Com as saídas de, $k_r = 0,73$, $k_v = 0,60$ e $k_u = 0,99$, nota-se na Fig. 8 e na Tabela II que foi possível tornar as correntes

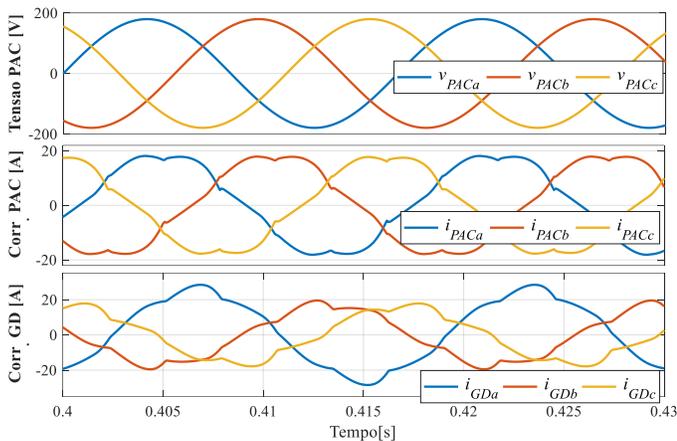


Fig. 8. Resultado de simulação para o Caso 2. De cima para baixo: tensões no PAC, correntes do PAC e correntes injetadas pelo GD.

do PAC praticamente balanceadas. A Tabela IV também demonstra que FD_I se manteve baixo, principalmente em comparação ao índice das cargas. Com relação ao conteúdo de correntes reativas no PAC, mesmo que o valor de $I_{r_{pac}}^b$ tenha se elevado em comparação ao Caso 1 (veja Tabela II), ainda houve uma diminuição de aproximadamente 74 % do montante sem compensação. O índice I_1^{RMS} ainda demonstra que, mesmo efetuando menor compensação de $I_{r_{pac}}^b$, as componentes fundamentais de corrente são menores no Caso 2 do que no Caso 1. Isto se deve à injeção de correntes ativas pelo GD, as quais parcialmente suprem as cargas, sendo o resto provido pela rede.

Outra consequência da injeção de ativos e diminuição de I_1^{RMS} é que, apesar da corrente coletiva das correntes de distorção manter-se praticamente inalterada com relação ao estágio anterior (Caso 1), não linearidades nas correntes se tornam visualmente mais significativas, tal como visto na Fig. 8. Assim como esperado, mesmo com a compensação de aproximadamente 58 % de $I_{v_{pac}}$, tal comportamento também impacta na elevação do DHT_I devido ao método de cálculo [24].

Na Tabela III é possível observar que, mesmo com capacidade limitada de compensação, o algoritmo PSO foi capaz de encontrar uma solução de boa qualidade, na qual os fatores de referência da CPT (λ^*) puderam ser atingidos satisfatoriamente.

C. Caso 3: Sem Capacidade de Compensação

Este último caso é apresentado na Fig. 9. O intuito é demonstrar que o método proposto fornece saídas de controle adequadas também sobre condições de incapacidade de operação multifuncional. Para tal, considera-se que a totalidade da capacidade nominal do inversor (isto é, 25 A) seja empregada na injeção de potência ativa. Ao detectar que não há capacidade remanescente para ofertar serviços ancilares ($\Delta I_{GD} = 0$), o algoritmo PSO determina como saída $I_{y_{pac}}^* = I_{y_L}$, o que resulta em um comportamento similar ao discutido na Seção IV-B, fornecendo $k_r = k_v = k_u = 0$.

Portanto, somente correntes ativas balanceadas são injetadas pelo GD, assim como pode ser visto na Fig. 9, e na Tabela II por somente $I_{a_{pac}}^b$ ter seu valor inicial reduzido. Observa-se

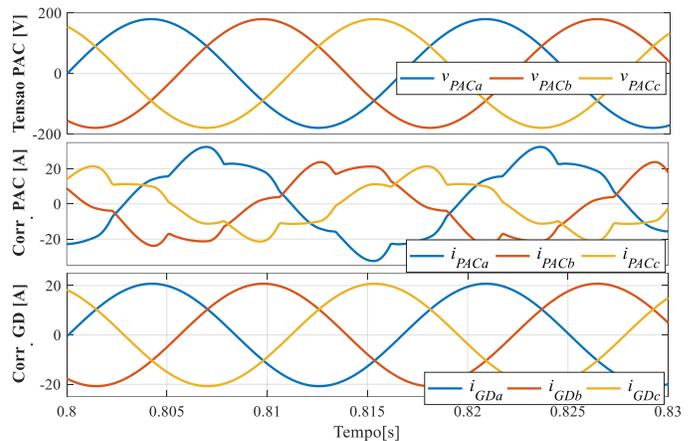


Fig. 9. Resultado de simulação para o Caso 3. De cima para baixo: tensões no PAC, correntes do PAC e correntes injetadas pelo GD.

também na Tabela II que o GD não forneceu toda a corrente ativa de balanço da carga (isto é, $I_{a_{pac}}^b$ ainda existe no PAC), para que sua capacidade nominal fosse respeitada. Com a diminuição de $I_{a_{pac}}^b$, a não compensação das outras parcelas de corrente faz com que os índices de qualidade da energia sejam deteriorados, assim como observado na Tabela IV pelo aumento dos fatores de desequilíbrio e do DHT_I .

Finalmente, como consequência da não oferta de multifuncionalidades, nota-se ainda na Tabela III que a conformidade com os valores de referência dos fatores da CPT não pôde ser obtida, já que nenhum tipo de compensação foi possível.

VI. DISCUSSÕES A RESPEITO DO RECURSO COMPUTACIONAL

Uma questão importante a ser ressaltada ao empregar a estratégia proposta está relacionada à implementação embarcada dos algoritmos requeridos. Particularmente neste trabalho, os algoritmos que requerem maiores recursos computacionais são o da CPT e o do método de otimização baseado em PSO. Entretanto, vale destacar que aplicações trifásicas empregando a CPT em filtragem ativa já foram amplamente validadas experimentalmente na literatura [7], [15]. Tais estudos comprovaram a viabilidade de implementação da CPT tanto em processadores digitais de sinais (DSPs) baseados em aritmética ponto fixo, quanto em ponto flutuante [18]. De forma análoga, a implementação de algoritmos baseados em PSO também já foi explorada em literatura sendo embarcada em DSPs [22], [26], demonstrando sua viabilidade prática.

É importante ressaltar que, apesar do algoritmo PSO requerer maior capacidade computacional que a CPT, não é requerido que o método de otimização seja processado considerando a mesma frequência de interrupção que a de chaveamento do GD. Contrariamente, devido ao modelo de otimização apenas levar em consideração valores coletivos de corrente, o algoritmo PSO pode ser processado em uma taxa muito mais lenta, na ordem de segundos a minutos, aumentando a viabilização de sua implementação embarcada. Destaca-se que, devido a esta possibilidade de implementação em taxas lentas, a estratégia também pode ser implementada em DSPs ou outros processadores paralelos, como realizado em [27]. Ainda, a

capacidade de comunicação remota exigida em normativas [28] para GDs possibilita que processadores centrais ou distribuídos ao longo do SDBT sejam empregados nos cálculos, na mesma perspectiva de [17].

Finalmente, para fins de exemplificação, destaca-se que o algoritmo PSO implementado nos resultados das Seções IV e V apresentou um tempo médio de execução consideravelmente baixo, sendo de 38 ms. Tal resultado reforça a discussão que, se implementado em taxas lentas, entre segundos a minutos, tal método pode ser embarcado em processadores digitais. O hardware utilizado nesta quantização foi um processador Intel i7-8550U com 8 GB de memória RAM, tendo o algoritmo codificado em linguagem C e sistema operacional Windows 10.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de gerenciamento de inversores multifuncionais, na qual suas capacidades remanescentes podem ser empregadas em serviços ancilares como compensação de reativos, desequilíbrio e distorções harmônicas. O método se fundamenta na decomposição de parcelas de correntes definidas pela CPT, e propõe um algoritmo de otimização baseado em PSO para a tomada de decisão sobre a proporção mais adequada de compensação de cada parcela de corrente não ativa. A metodologia se mostrou eficiente sob diferentes condições operacionais, considerando capacidades distintas de compensação, e os resultados de simulação comprovam a viabilidade de aplicação do método em um cenário com conversor estático de potência.

Trabalhos futuros pretendem: *i*) expandir a análise da aplicabilidade da metodologia proposta para cenários de condições de tensão não ideais, como a existência de distorções harmônicas e de desequilíbrios nas tensões; *ii*) avaliar o impacto da escolha de diferentes pesos considerados na função objetivo para cada parcela a ser compensada; bem como *iii*) validar a aplicação do método em um protótipo experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Mohandes et al, "A Review of Power System Flexibility With High Penetration of Renewables," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no 4, pp. 3140-3155, Jul. 2019.
- [2] A. B. A. Amaral, A. K. Z. L. G. Mendonca, A. A. M. Resende, E. E. Rego, "Solar Energy and Distributed Generation: 2015, a Year of Inflection in Brazil?," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 14, no 8, pp. 3731-3737, Aug. 2016.
- [3] J. L. S. Silva et al, "Study of Power Optimizers for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 17, no 01, pp. 127-134, Sep. 2019.
- [4] B. A. Zacar et al, "Smart Inverters for Microgrid Applications: A Review," *MDPI Energies*, vol. 12, Mar. 2019.
- [5] S. R. Abate et al, "Smart inverter settings for improving distribution feeder performance," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, July 2015.
- [6] F. P. Marafao, D. I. Brandao, A. Costabeber, H. K. M. Paredes, "Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on conservative power theory," *IET Renew. Power Gen.*, vol. 9, no. 2, Feb. 2015.
- [7] H. K. M. Paredes et al, "Shunt Active Compensation Based On The Conservative Power Theory," *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, v. 17, Fev. 2012.
- [8] J. Crepaldi, M. M. Amoroso, O. H. A. Junior, "Analysis of the Topologies of Power Filters Applied in Distributed Generation Units - Review," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 16, no 7, pp. 1892-1897, Aug. 2018.
- [9] M. F. Oliveira, J. A. Vilela Jr, "Active Filters for Harmonic Current Compensation in Low-Voltage Grid," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 15, no 5, pp. 1340-1347, May 2015.
- [10] J. P. Bonaldo, H. Paredes, J. A. Pomilio, "Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low-Voltage Distorted Power Systems With Variable Compensation Objectives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no 3, pp. 2039-2052, Jun. 2015.
- [11] Z. Zeng et al, "Multi-objective control of multi-functional grid-connected inverter for renewable energy integration and power quality service," *IET Power Electronics*, vol. 9, no 4, pp. 761-770, Mar. 2016.
- [12] P. Kanjiya et al, "Optimal control of shunt active power filter to meet IEEE Std. 519 current harmonic constraints under nonideal supply condition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no 2, pp. 724-734, Fev. 2015.
- [13] M. Savaghebi et al, "Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no 4, pp. 1390-1402, Apr. 2013.
- [14] S. S. Acevedo, M. Molinas, "Evaluation of non-active current compensation in smart grids," in *Proc. ISGT Europe*, pp. 1-8, Oct. 2012.
- [15] D. I. Brandao et al, "Optimized Compensation of Unwanted Current Terms by AC Power Converters Under Generic Voltage Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no 12, pp. 7743-7753, Dez. 2016.
- [16] P. Tenti, H. K. M. Paredes, P. Mattavelli, "Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 664-673, Mar. 2011.
- [17] D. I. Brandao et al, "Optimal Multiobjective Control of Low-Voltage AC Microgrids: Power Flow Regulation and Compensation of Reactive Power and Unbalance," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no 2, pp. 1239-1252, Aug. 2019.
- [18] W. A. Souza et al, "Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 13, no 01, pp. 158-155, Jan. 2015.
- [19] J. Y Lee, M. A. El-Sharkawi, *Modern Heuristic Optimization Techniques*, Wiley, Ed. 1, Fev. 2018.
- [20] P. Kumar, A. Mahajan, "Soft Computing Techniques for the Control of an Active Power Filter," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no 1, pp. 452-462, Jan. 2009.
- [21] S. Sarkar, A. Roy, B. S. Purkayastha, "Application of particle swarm optimization in data clustering: A survey," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 65, no 25, pp. 38-46, Mar. 2013.
- [22] D. Cao et al, "DSP Implementation of the Particle Swarm and Genetic Algorithms for Real-Time Design of Thinned Array Antennas," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 1170-1173, Out. 2012.
- [23] J. S. Souza et al, "Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Sizing Photovoltaic System," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 15, no 2, pp. 283-289, Feb. 2017.
- [24] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia", Jan. 2018.
- [25] A. R. Jordehi, J. Jasni, "Parameter Selection in Particle Swarm Optimisation: A Survey," *J. Exper. Theor. Artificial Intel.*, vol. 25, pp. 527-542, Jul. 2012.
- [26] J. B. L. Femeiro et al, "A New Controller for DC-DC Converters Based on Particle Swarm Optimization," *Applied Soft Comp.*, vol. 52, pp. 418-434, Mar. 2017.
- [27] H. K. M. Paredes, J. P. Bonaldo, J. A. Pomilio, "Centralized Control Center Implementation for Synergistic Operation of Distributed Multifunctional Single-Phase Grid-Tie Inverters in a Microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no 10, pp. 8018-8029, Oct. 2018.
- [28] *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*, IEEE Standard 1547; 2018.



Augusto Matheus dos Santos Alonso é bolsista FAPESP e doutorando, candidato a dupla diplomação, em Engenharia Elétrica pela UNESP/FEB e Norwegian University of Science and Technology (NTNU)/Noruega. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela UNESP em 2018. Possui graduação sanduíche em Engenharia de Controle e Automação (2014) pela Universidade Federal de Ouro Preto e University of New Mexico – EUA. Em 2019 recebeu o prêmio SOBRAEP de melhor dissertação de mestrado do ano de 2018. Atua nas áreas de geração distribuída de energia, qualidade da energia e controle de conversores eletrônicos.



Benvindo Rodrigues Pereira Junior possui grau de bacharel, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (UNESP). Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP) e atua como orientador e pesquisador junto ao Laboratório de Análise de Sistemas de Energia Elétrica (LASEE) da USP. Desenvolve pesquisas nas áreas de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente no desenvolvimento de modelos matemáticos e aplicação de técnicas metaheurísticas para planejamento e operação de sistemas de distribuição de energia elétrica.



Danilo Iglesias Brandão, nascido em 1986, em São Gonçalo do Sapucaí (MG), é engenheiro de controle e automação pela UNESP/Sorocaba (2011). Mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela UNESP/Bauru (2013) e pela UNICAMP (2015), respectivamente. Foi pesquisador visitante na Colorado School of Mines, EUA, em 2009 e 2013, na Università degli Studi di Padova, Itália, em 2014, e professor convidado na Norwegian University of Science and Technology, Noruega, em 2018 e 2020. Atualmente é professor da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) e Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). Suas áreas de interesse são: controle coordenado de inversores, geração distribuída e microrrede.



Fernando Pinhabel Marafão é graduado em engenharia elétrica pela UNESP, tem mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP. Foi pesquisador visitante na Universidade de Padova (Itália) e na Colorado School of Mines (EUA) em 2002 e 2013, respectivamente. Desde 2015, é livre docente no Campus de Sorocaba da UNESP, onde liderou o Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), de 2007 a 2011. Suas principais áreas de interesse são análise e controle da qualidade da energia, teorias de potência, técnicas de processamento e controle digital aplicadas a sistemas de potência.