

Aplicação do FCS-MPC para Despacho Econômico em Microrredes Ilhadas

João Paulo de Carvalho Pedroso* Sílvia Costa Ferreira*
Rayane Aparecida Guimarães*

* Departamento de Automação, Universidade Federal de Lavas, MG,
(e-mail: joao.pedroso1@estudante.ufla.br; silvia.ferreira@ufla.br).

Abstract: When a microgrid operate autonomously from the main electrical system, its generation units must be able to provide proper levels of voltage and frequency in order to support local loads. At this condition it is also necessary to coordinate power sharing among multiple distributed generators aiming the reduction of microgrid total generation costs. In this context, this paper presents a proportional power sharing strategy based on the *Droop* concept for converters in island operation. The main innovation of this work lies in the integration of a economic power-dispatch strategy and the *Droop* technique for predominantly resistive microgrids with the finite-control-set model predictive control (FCS-MPC) as converter control technique. The objectives are: a) evaluate the microgrid operational cost reduction using the economic power-dispatch strategy in comparison with the conventional Droop control technique and, b) observe the dynamic response of the system during load transients and the decoupling between the active and reactive power sharing. The results proving the validity of this strategy were obtained using MATLAB/*Simulink* software environment, being achieved a microgrid total operational cost reduction of approximately 19% with the adoption of the proposed economic dispatch strategy compared to the conventional resistive *droop* control over same load demand conditions.

Resumo: Quando uma microrrede encontra-se desconectada do sistema elétrico principal, suas unidades geradoras devem ser capazes de manter níveis adequados de tensão e frequência para atendimento das cargas locais. Além disso, nessa condição também é necessário coordenar o fornecimento de potência de cada gerador com base em seus respectivos custos operacionais, visando minimizar o custo global de operação da microrrede. Nesse contexto, esse trabalho apresenta uma estratégia de compartilhamento de potência baseado no conceito *Droop* aplicada a conversores em operação ilhada. A principal inovação do trabalho está na integração de uma estratégia para o despacho econômico de potência e da técnica *Droop* para microrredes predominantemente resistivas no controle preditivo baseado em modelo com conjunto de controle finito (FCS-MPC) para o controle dos conversores. Os objetivos são: a) avaliar a redução de custos operacionais da microrrede obtida com a estratégia de despacho econômico em comparação à técnica *Droop* convencional e, b) observar a resposta dinâmica do sistema durante transitórios de carga e o desacoplamento entre o compartilhamento de potência ativa e reativa. Os resultados comprovando a validade dessa estratégia foram obtidos em ambiente de simulação MATLAB/*Simulink*, nos quais se verificou uma redução percentual nos custos totais de operação da microrrede de aproximadamente 19% na adoção da estratégia de despacho econômico proposta em comparação à estratégia de controle *droop* resistivo convencional para as mesmas condições de demanda de carga.

Keywords: Microgrids; Economic Strategy; Droop Control; Finite Control Set Model Predictive Control.

Palavras-chaves: Microrredes; Estratégia Econômica; Controle Droop; Controle Preditivo Baseado em Modelo.

1. INTRODUÇÃO

A operação de uma microrrede em modo ilhado possui dois aspectos importantes a serem observados: o compartilhamento da potência demandada pela carga proporcionalmente entre vários conversores conectados em paralelo e a manutenção da estabilidade de tensão e frequência da rede (Han et al., 2016). Por estes motivos, métodos de fornecimento compartilhado de potência entre conversores sem o emprego de sistemas paralelos de comunicação vêm sendo estudados por diversos autores. Dentre estes, vale mencionar o controle *droop* ou por inclinação, que permite realizar o compartilhamento proporcional de potência entre as unidades geradoras com base em parâmetros medidos localmente na saída de cada conversor, tais como a frequência da rede e a amplitude do sinal de tensão.

Diversas metodologias para o controle *droop* são apresentadas na literatura. Inicialmente, essa técnica de controle foi proposta por Chandorkar et al. (1993) como forma de compartilhamento de potência entre unidades UPS (*Uninterruptible Power Supply*) conectadas em paralelo. Han et al. (2016) apresenta diversas estratégias basadas no controle *Droop* para compartilhamento de potência em uma microrrede CA ilhada. Já em Han et al. é realizada uma revisão das estratégias de compartilhamento de potência para microrredes ilhadas com controle hierárquico, tendo em foco os problemas associados ao compartilhamento independente de potência ativa e reativa em uma rede com impedância complexa. De forma a incorporar os custos de operação de cada unidade geradora, Nutkani et al. (2017) apresenta uma estratégia de compartilhamento econômico de potência baseado na técnica *droop* visando a redução do custo de operação da microrrede, onde o compartilhamento de potência ativa é realizado proporcionalmente ao custo de cada gerador.

Neste contexto, esse trabalho vem apresentar a implementação, em ambiente MATLAB/*Simulink*, de uma estratégia de compartilhamento de potência para microrredes ilhadas baseada no controle *Droop* aplicada a conversores formadores de rede empregando a técnica controle preditivo baseado em modelo com conjunto de controle finito (FCS-MPC) para a implantação das referências de tensão e frequência. As principais inovações em relação ao trabalho de Nutkani et al. (2017) incluem: a adaptação da estratégia de despacho econômico uma microrrede com impedância predominantemente resistiva; a implementação do controle *droop* resistivo com compartilhamento proporcional de potências ativa e reativa juntamente com a técnica FCS-MPC; e, também, um controle híbrido de operação para os conversores como fontes de corrente/fontes de tensão é proposto a fim de evitar transitórios durante a conexão ou desconexão dos mesmos.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema estudado neste trabalho é composto por dois conversores monofásicos conectados em paralelo em uma microrrede ilhada (Figura 1). Em geral, os conversores que são controlados como fonte de tensão são alimentados com sistemas de armazenamento de energia, que neste trabalho serão representadas como uma fonte CC (V_{cc}). Apenas o

modo de operação ilhado será considerado e os modos de transição e conectados à rede não serão discutidos.

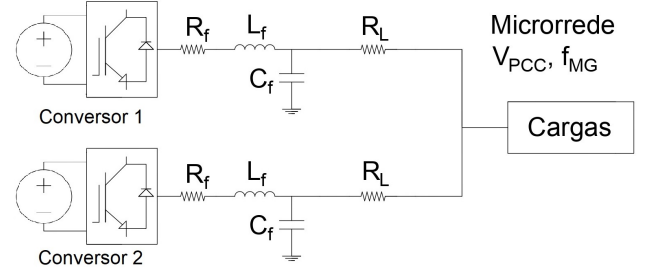


Figura 1. Representação da microrrede com dois CFR's em operação ilhada.

Na Figura 1, R_f , L_f e C_f representam, respectivamente a resistência, o indutância e a capacitância inerentes ao filtro de linha LC; V_{PCC} representa a tensão CA no barramento comum da microrrede; R_L indica a resistência de linha entre as unidades geradores e o barramento comum e f_{MG} é a frequência da tensão no barramento comum.

O foco do trabalho se dá no compartilhamento de potência dos conversores de forma a otimizar o custo com as fontes de geração. A estratégia de controle proposta se baseia na técnica *droop* para redes predominantemente resistivas incorporada a uma técnica de compartilhamento proporcional de potências entre as unidades geradoras baseada nos respectivos custos operacionais e no Controle Preditivo Baseado em Modelo com Conjunto de Controle Finito (FCS-MPC).

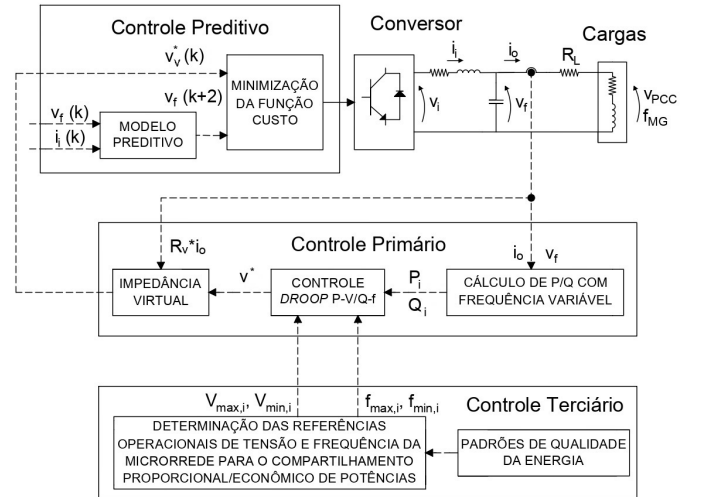


Figura 2. Esquema da estratégia de controle proposta.

A estratégia de controle adotada é apresentada de forma esquematizada na Figura 2. Sendo V_f e i_o a tensão e a corrente fornecidas pelo conversor; P_i e Q_i as respectivas potências ativa e reativa fornecidas pela unidade geradora; $V_{max,i}$, $V_{min,i}$, $f_{max,i}$, $f_{min,i}$ os limites operacionais para tensão e frequência de cada unidade geradora definidos pelo modelo de despacho econômico adotado e V^* o sinal de referência gerado pelo controle *droop*. Para garantir a predominância das características resistivas, uma resistência virtual R_v pode ser empregada para ajustar o sinal

de referência V_v^* quando houver diferenças entre as impedâncias R_L entre os conversores. Dessa forma, a tensão, V_{PCC} , e a frequência da microrrede, f_{MG} , são ajustadas instantaneamente em função das cargas locais, permitindo aos conversores alterar suas condições operacionais sem a necessidade de sistemas de comunicação secundários entre eles.

O controle dos CFRs, proposto neste trabalho, envolve três etapas: uma malha interna de controle de tensão e corrente com o FCS-MPC; o compartilhamento de potência por controle *droop* para geração dos sinais de referência de amplitude de tensão e frequência; definição dos coeficientes das curvas de *droop* visando despacho econômico ótimo. Essas etapas foram organizadas segundo a estratégia de controle hierárquico para microrredes ilhadas conforme apresentada por Olivares et al., Rocabert et al. (2012) e Han et al. e serão detalhadas a seguir.

3. COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ENTRE CONVERSORES FORMADORES DE REDE OU TIPO FONTE DE TENSÃO

Um diagrama representando a conexão de duas fontes de tensão (CFRs) a um barramento comum através de uma impedância de linha genérica, $Z_{oi} = R_{oi} + jX_{oi}$ em um sistema ilhado pode ser visto na Figura 3. Segundo Dragičević (2018), o compartilhamento de potência ativa e reativa entre duas fontes de tensão e a carga é essencialmente definido pela impedância das linhas conectando ambas, sendo essas relações apresentadas em (1) e (2).

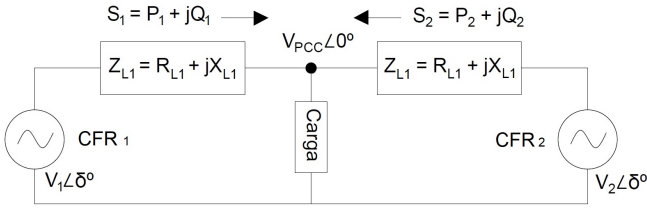


Figura 3. Esquemático para conexão de duas fontes de tensão ao PCC de uma microrrede AC isolada.

$$P_i = \frac{V_i}{R_{Li}^2 + X_{Li}^2} [R_{Li}(V_i - V_{PCC} \cos \delta_i) + X_{Li} V_{PCC} \sin \delta_i] \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{V_i}{R_{Li}^2 + X_{Li}^2} [-R_{Li} V_{PCC} \sin \delta_i + X_{Li} (V_i - V_{PCC} \cos \delta_i)] \quad (2)$$

sendo, V_{PCC} a tensão do ponto de acoplamento comum dos conversores e δ_i a fase da tensão do conversor que possui amplitude de tensão V_i , respectivamente.

Uma microrrede em operação ilhada a nível de distribuição, em geral, possui comportamento tipicamente resistivo, $X_L/R_L < 1$, uma vez que, esse tipo de sistema muitas vezes não requer transformadores conectados entre os barramentos locais (Chen et al., 2020). Para redes predominantemente resistivas, as equações (1) e (2), podem ser aproximadas por:

$$P_i = \frac{V_i}{R_{Li}} (V_i - V_{PCC}) \quad (3)$$

$$Q_i = - \left(\frac{V_i V_{PCC}}{R_{Li}} \right) \delta_i \quad (4)$$

Dessa forma, a potência ativa (P_i) fornecida por cada conversor torna-se proporcional à diferença entre a amplitude da tensão fornecida pelo conversor (V_i) e a tensão do PCC (V_{PCC}), e a potência reativa (Q_i) fornecida torna-se proporcional ao ângulo de fase (δ_i).

3.1 Controle *droop* convencional para redes tipicamente resistivas

O controle *droop* busca simular o comportamento de geradores síncronos em um sistema elétrico de potência. A Figura 4 ilustra as relações existentes entre as potências ativa e reativa e suas variáveis de controle para redes tipicamente resistivas.

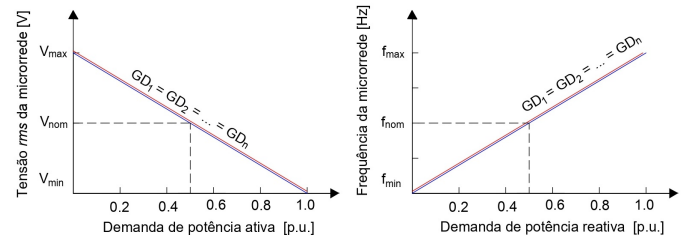


Figura 4. Controle *droop* convencional para redes tipicamente resistivas.

As relações estabelecidas pelo controle *droop* necessitam de pontos de referência de tensão e frequência entorno dos quais serão realizados o despacho de potências. Nesse sentido, podem ser adotados os valores nominais de tensão (V_{nom}) e frequência (f_{nom}) como referências a fim de garantir níveis adequados desses parâmetros para a microrrede em operação ilhada. A estratégia de controle *droop* é responsável por definir as referências de tensão (V^*) e frequência (f^*) em função das potências ativa e reativa demandadas instantaneamente pelas cargas locais, P_{cal} e Q_{cal} respectivamente. Os valores das referências são dados por:

$$V^* = V_{nom} - k_p P_{cal} \quad (5)$$

$$f^* = f_{nom} + k_q Q_{cal} \quad (6)$$

Os coeficientes k_p e k_q estabelecem a inclinação das retas de *droop* para as potências ativa e reativa, respectivamente. Para a potência ativa, o coeficiente k_p é definido como a razão entre a variação máxima de tensão permitida para a microrrede e potência nominal do conversor. Já para a potência reativa, o coeficiente k_q é calculado como a razão entre o limite máximo tolerável para variação da frequência do sistema isolado e a potência nominal do conversor.

3.2 Controle *droop* com estratégia de despacho econômico para redes tipicamente resistivas

De acordo com Nutkani et al. (2017), os custos relacionados a uma unidade geradora com despacho de potência controlável, ou UPS, dependem da natureza da fonte primária utilizada (recurso renovável ou não-renovável) e

geralmente incluem: manutenção (M_i); aquisição de combustível (F_i); substituição de baterias (B_i) e penalidades de emissão ou incentivos fiscais para a utilização da fonte em questão (ε_i). Outros custos relacionados à operação dos geradores distribuídos, tais como perdas na transmissão, revisão e substituição periódica de equipamentos também podem ser incluídos no modelo de custo em função da potência ativa fornecida. A estratégia proposta não depende do modelo de função-custo adotado, apresentando significativa generalidade ao se integrar funções-custo diversas para as unidades geradoras de diferentes características que venham a integrar uma microrrede. A equação (7) apresenta um modelo geral para obtenção das funções-custo das unidades geradoras com controle de fornecimento de potência em função da potência ativa fornecida, P_i , sendo dado por:

$$C_i(P_i) = M_i(P_i) + F_i(P_i) + B_i(P_i) \pm \varepsilon_i(P_i) \dots \quad (7)$$

Para ilustrar, nesse trabalho são consideradas duas unidades geradoras com fontes primárias distintas e integradas à microrrede através de conversores eletrônicos monofásicos. Para a função-custo do conversor 1, esta é modelada levando-se em consideração uma fonte baseada em combustível renovável, e, para o conversor 2, este foi modelado adotando-se uma fonte primária não-renovável, conforme apresentado por Nutkani et al. (2017). As equações (8) e (9) apresentam as funções-custo para os conversores 1 e 2, respectivamente, as quais consideram custos associados ao consumo de combustível, manutenção e emissão.

$$C_1(P_1) = (F_1 + M_1 + \varepsilon_1) \times (P_1 + 0,05 + 0,01P_1 + 0,12P_1^2) \quad (8)$$

$$C_2(P_2) = M_2P_2 + F_2(4 + 12P_2 + 2P_2^2) + \varepsilon_2(1 + 2P_2 + 6,5P_2^2 + 0,0002exp(3P_2)) \quad (9)$$

sendo adotados os seguintes valores para custos com combustível: $F_1 = 0,1$ e $F_2 = 0,01$; manutenção: $M_1 = 0,01$ e $M_2 = 0,02$, e emissão: $\varepsilon_1 = 0,005$ e $\varepsilon_2 = 0,01$ para os conversores 1 e 2, respectivamente.

A Figura 5 apresenta o comportamento das funções-custo em relação à capacidade nominal normalizada das unidades, sendo possível observar o menor custo operacional associado à unidade 1 para qualquer ponto de operação.

Ao contrário da estratégia de controle *droop* convencional proposta por Chandorkar et al. (1993), a estratégia de despacho econômico proposta por Nutkani et al. (2017) permite que sejam priorizados os conversores com unidades geradoras com menor custo operacional conforme ilustrado na Figura 6.

Sendo $V_{max,i}$ e $V_{min,i}$ os valores máximos e mínimos para tensão atribuídos a cada gerador distribuído i participante da estratégia de despacho econômico. ΔV_{max} e ΔV_{min} representam os intervalos de máxima variação para a tensão máxima e mínima, respectivamente. $k_{p(i)}$ e $P_{max,i}$ representam, respectivamente, a inclinação das curvas *droop* e a potência máxima nominal de cada unidade geradora. Por fim, ΔP_{online} indica a reserva de potência de segurança desejada para microrrede.

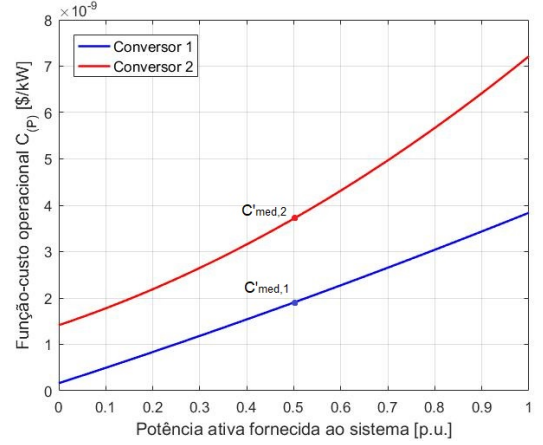


Figura 5. Funções-custo normalizadas para potência ativa fornecida pelos conversores 1 e 2.

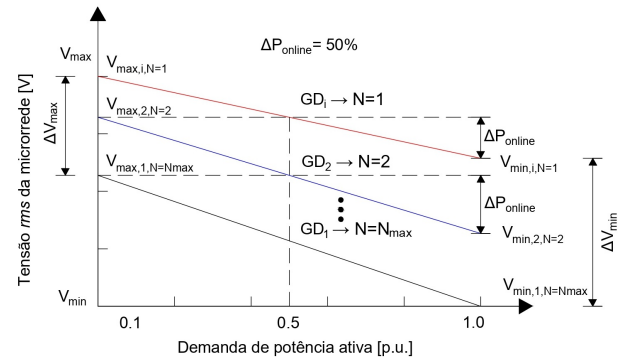


Figura 6. Controle *droop* com estratégia de despacho econômico para redes tipicamente resistivas.

A equação (10) apresenta a atribuição das prioridades de despacho, N_{GD_i} , para unidades geradoras baseando-se em seus respectivos custos operacionais médios, $C'_{med,i}$.

$$C'_{med,1} > C'_{med,2} > \dots > C'_{med,i} \rightarrow N_{GD_i} = 1, \dots, N_{GD_2} = n - 1, N_{GD_1} = n \quad (10)$$

Para microrredes predominantemente resistivas, a estratégia de despacho econômico, adaptada neste trabalho conforme as relações P/V e Q/f do controle *droop* resistivo, é apresentada nas equações (11), (12) e (13). Essas equações são empregadas para se obter os valores de tensão de referência máximos e mínimos para cada gerador proporcionas a seus respectivos custos operacionais e, ao mesmo tempo, garantindo-se a reserva de potência desejada.

$$V_{max,i} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_{max} - \Delta V_{max} \times \frac{(N_{GD,i}-1)}{(N_{max}-1)}}{\text{Determinado pela ordem de prioridade}}, \\ \frac{V_{min,i,N-1} + k_{p(i,N-1)} \times \Delta P_{online}}{\text{Determinado pela reserva de potência}} \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$V_{min,i} = V_{min,MG} + \Delta V_{min} \times \frac{\max(C''_{i,N}) - C''_{i,N}}{\max(C''_{i,N}) - \min(C''_{i,N})} \quad (12)$$

$$k_{p(i)} = \frac{V_{max,i} - V_{min,i}}{P_{max,i}} \quad (13)$$

sendo $C''_{i,N}$ o custo médio descontado do custo de operação sem carga de cada unidade.

Em situações de baixa demanda essa estratégia também permite que unidades mais onerosas fiquem desativadas enquanto a carga é suprida unicamente pelas unidades de menor custo. Ao se aumentar a demanda, as unidades são gradualmente acionadas e, instantaneamente, irão fornecer potência ativa e reativa de modo proporcional a seus respectivos custos até o limite máximo possível presente na microrrede ilhada. Outro benefício dessa estratégia de controle é a possibilidade de se manter uma reserva de potência ativa, ΔP_{online} , a qual permite que aumentos repentinos de demanda sejam absorvidos pelas unidades geradoras que já estejam em operação antes do acionamento das unidades geradoras subsequentes.

3.3 Modos de operação

De acordo com a estratégia de despacho econômico proposta por Nutkani et al. (2017) as unidades geradoras são controladas como formadores de rede (CFR). Ao se atingir determinadas condições limites de demanda, as quais são informadas à toda microrrede pela amplitude instantânea do sinal *rms* de tensão local para cada conversor (V_f), tais unidades devem ser desconectadas ou reconectadas à microrrede de maneira escalonada em relação a seus respectivos custos operacionais médios.

Visando evitar efeitos transitórios pela conexão ou desconexão das unidades geradoras, este trabalho propõe que os conversores continuem conectados ao barramento comum da microrrede, porém sem entregar potência em um momento inicial. Estes passam a ser controlados como alimentadores de rede (CAR) com referência de corrente igual a zero. Em (14) é apresentada a lógica de controle proposta.

$$V_i^* = \begin{cases} (V_{max,i} - k_{p(i)} \times P_i), & V_f < V_{max,i} \\ \text{GD opera como CAR,} & V_f > V_{max,i} \end{cases} \quad (14)$$

4. APLICAÇÃO DO FCS-MPC PARA CONTROLE DE CONVERSORES

A Figura 7 apresenta um CFR monofásico com a topologia em ponte H, o qual tem sido empregado em fontes de energias renováveis (Queiroz et al., 2017). A tensão de saída do inversor é representada por (v_i) e a tensão de saída do filtro que será aplicada a carga por (v_f). As correntes i_i , i_f e i_o representam as correntes do inversor, do capacitor do filtro e da carga, respectivamente.

A este conversor é aplicado o Controle Preditivo Baseado em Modelo com Conjunto de Controle Finito (FCS-MPC). Os principais elementos deste esquema de controle são o

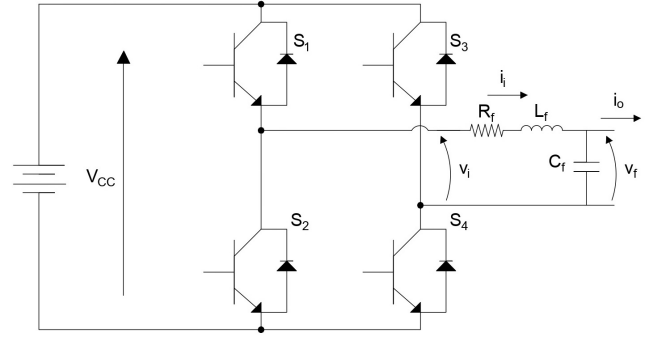


Figura 7. Topologia do CFR com filtro LC.

modelo matemático do sistema e a função custo (Cortes et al., 2008; Kouro et al., 2009; Innocent et al., 2018). Neste trabalho, também será incorporada possibilidade de mudança da estratégia de controle, por meio da adequação da função custo, de acordo com a demanda de carga visando viabilizar a implementação do despacho econômico. Essas três etapas serão descritas a seguir.

4.1 Modelo discreto do conversor com filtro LC

A partir da topologia do conversor apresentado na Figura 7 é possível encontrar o modelo discreto do sistema a partir da tensão do conversor (v_i), tensão no filtro (v_f) a qual é a mesma aplicada na carga (v_o), corrente do conversor (i_i) e a corrente do filtro (i_f). Para representar esse modelo em um sistema em espaço de estados, (15), é considerado que i_i e v_f são as variáveis de estado e v_i e v_o são as de controle. Posteriormente, o sistema pode ser discretizado como em Panten et al. (2016), da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} i_i(k+1) \\ v_f(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{T_s R_f}{L_f}\right) & \frac{-T_s}{L_f} \\ \frac{T_s}{C_f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i(k) \\ v_f(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{-T_s}{C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i(k) \\ v_o(k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde, T_s é o período de amostragem adotado na discretização.

4.2 Definição da função custo: controle tensão

No modo de controle de tensão, a variável a ser controlada é a tensão de saída do filtro (v_f) e o conversor opera como formador de rede (CFR). Entretanto, este trabalho utiliza uma função custo multivariável, já avaliada por Ferreira et al. (2018) e Panten et al. (2016) para controle de conversores com filtro LCL. Essa função custo inclui a corrente de saída do inversor (i_i) para aumentar estabilidade e permitir a inclusão de limites para essa variável.

Na função custo v_f^* e i_i^* são os valores de referência e v_f^p e i_i^p são os valores previstos a partir do modelo discreto do sistema para tensão do filtro e corrente do inversor respectivamente (Ferreira et al., 2018).

$$J = \lambda_1 (v_f^* - v_f^p)^2 + \lambda_2 (i_i^* - i_i^p)^2 + k_e \quad (16)$$

As variáveis λ_1 e λ_2 representam pesos que visam estabelecer prioridade sobre determinada variável de controle.

Em complemento, esse trabalho utiliza uma restrição para evitar que o mesmo estado de chaveamento seja escolhido repetidas vezes. Essa condição resulta em frequências de chaveamento baixas, que podem excitar ressonâncias indesejadas. Para implementação desta restrição, adiciona-se um termo k_e à função custo, de forma que:

$$k_e = \begin{cases} \infty & \text{Se } N_S \geq W \\ 0 & \text{Se } N_S < W \end{cases} \quad (17)$$

A variável N_S representa o número de vezes consecutivas que um dado estado é aplicado, e W o limite máximo permitido para N_S .

A tensão de referência (v_f^*) é somada ao termo $R_V i_{oh}$ para o amortecimento de ressonâncias, resultando em:

$$v_f^* = V^* \sin(\omega^* t) + R_V i_{oh} \quad (18)$$

onde, V^* e $\omega^* = 2\pi f^*$ são as referências de amplitude e frequência da tensão do CRF. A corrente de referência (i_i^*) é obtida a partir do modelo do sistema e dos valores de tensão de referência definidos anteriormente, como:

$$i_i^* = i_o - j(\omega^* C_f) v_f^* \quad (19)$$

4.3 Definição da função custo: controle corrente

Para operação no modo controle de corrente, ao menos um dos conversores necessita seguir como fonte de tensão, CFR, fornecendo a referência de tensão v_f^* à microrrede ilhada, e os demais conversores podem então ser controlados como fontes de corrente (CAR). Um PLL é necessário para sincronizar o CAR e garantir que este siga à referência de corrente estabelecida (i_i^*). Dessa forma, a tensão v_f não é mais controlada e a função custo é modificada para:

$$J = (i_i^* - i_i^p)^2 + k_e \quad (20)$$

Neste caso, opta-se por um controle indireto da variável i_i^* devido à sua relação direta com a tensão do inversor (v_i). A referência de corrente é obtida da seguinte maneira:

$$i_i^* = i_o^* - j(\omega_{pll} C_f) v_f(k) \quad (21)$$

onde, ω_{pll} é a frequência do sistema obtida por meio do PLL, $v_f(k)$ é a tensão do capacitor medida no intervalo (k) e i_o^* é a referência de corrente desejada na saída do conversor. O controle da corrente i_i em substituição ao controle direto da corrente i_o evita que horizontes de predição maiores sejam adotados para garantir estabilidade e evitar ressonâncias (Panten et al., 2016). Para esta aplicação, quando o conversor estiver operando no modo CAR, $i_o^* = 0$, pois o objetivo é que este se mantenha conectado, porém sem entregar potência ao sistema. O PLL utilizado neste trabalho empregou a técnica filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência (FAS-Estimador) tal como apresentado por Ferreira (2012), para a estimação da frequência fundamental instantânea a partir do sinal sinusoidal de tensão da microrrede.

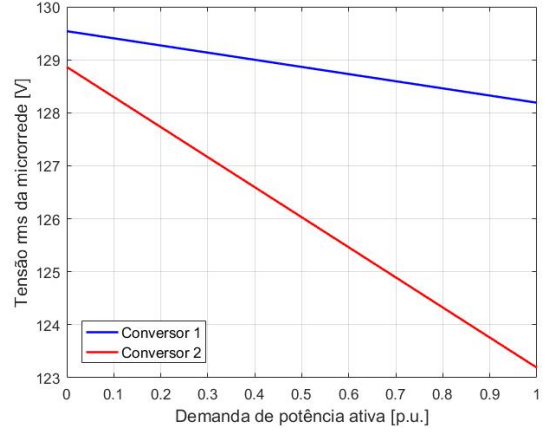


Figura 8. Controle *droop* com estratégia de despacho econômico para definição das referências *rms* de tensão V_1^* e V_2^* para os conversores 1 e 2.

5. METODOLOGIA PROPOSTA

A validação da estratégia proposta é realizada a partir de simulação no *software* MATLAB/Simulink. Para avaliar a eficácia da estratégia de despacho econômico em uma microrrede de característica resistiva empregando o controle FCS-MPC, são empregados dois conversores com custos operacionais distintos conforme apresentado na Figura 5. Essas unidades são conectadas em paralelo em um sistema de impedância predominantemente resistiva com razão de impedâncias X_{Li}/R_{Li} igual a 0,31.

Inicialmente, são determinados os parâmetros de referência $V_{max,i}$, $V_{min,i}$, $f_{max,i}$ e $f_{min,i}$ e as respectivas curvas *droop*, Figura 8, para cada conversor a partir de seus custos operacionais através do nível hierárquico terciário de controle, implementado de maneira global a microrrede.

A partir dos parâmetros de referência provenientes do controle terciário, o controle primário local de cada conversor pode então ser implementado utilizando-se como técnica de controle o FCS-MPC. Este método permite readequar de maneira fácil e intuitiva a estratégia de controle do conversor eletrônico. Essa capacidade auxilia na incorporação do despacho econômico no controle primário do conversor. A Figura 9 apresenta um fluxograma com a etapas de implementação do controle primário proposto.

A fim de avaliar a resposta dinâmica da estratégia de controle proposta em simulação, a microrrede em questão é submetida a variações graduais na demanda das cargas locais. É solicitado aos conversores suprir de modo proporcional uma carga puramente resistiva, a qual é incrementada gradualmente em quatro patamares de 200 W.

6. RESULTADOS

Para a microrrede simulada operando em modo ilhado composta por dois conversores conforme a Figura 1, são utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 1.

A Figura 10 ilustra a evolução da potência ativa fornecida por cada conversor e a demanda total da carga, bem como o sinal senoidal de tensão proveniente de cada conversor. É possível verificar que em situações de baixa demanda

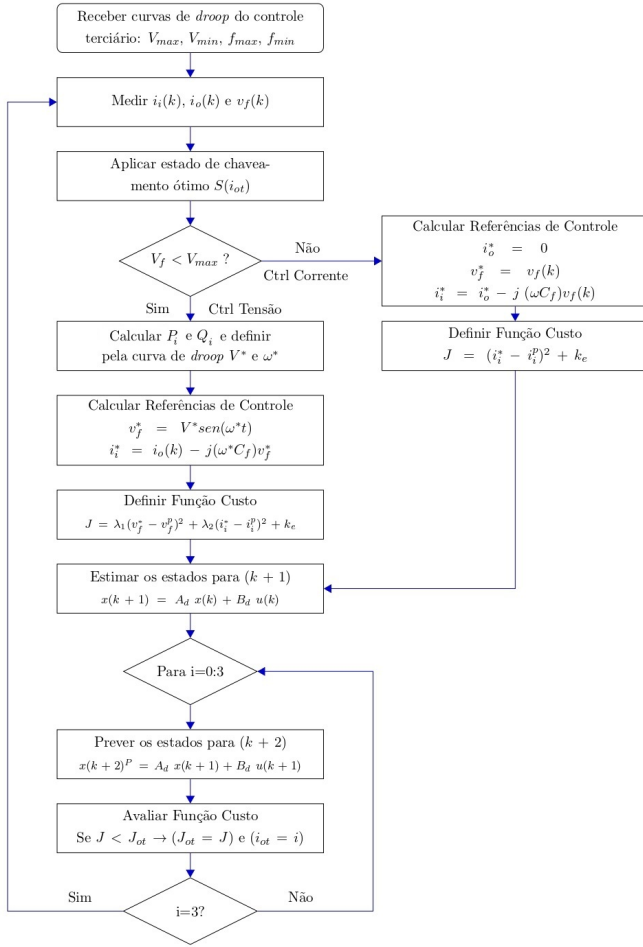


Figura 9. Fluxograma da estratégia de controle proposta.

Tabela 1. Parâmetros de Simulação.

PARÂMETROS		
Potência Nominal dos Conversores	P_o	500 W
Tensão Barramento CC	V_{cc}	310 V
Reserva de Potência <i>online</i>	ΔP_{online}	50 %
Indutância do Filtro	L_f	2,5 mH
Capacitância do Filtro	C_f	40 μ F
Tensão de Referência	V_o	127 V
Limites definidos de Tensão	ΔV	$\pm 4\%$
Frequência de Referência	F_o	60 Hz
Limites definidos de Frequência	F_{mx}	58-62 Hz
Resistência de linha	R_L	3,0 Ω
Frequência de Amostragem	T_s	40080 kHz

as cargas são supridas unicamente pelo conversor 1 de menor custo operacional médio, enquanto o conversor 2 permanece conectado à microrrede operando no modo CAR sem realizar entrega de potência à mesma. Também se observa que o controle FCS-MPC foi capaz de seguir as referências de tensão V_1^* e V_2^* individualmente para os conversores 1 e 2 em paralelo de maneira satisfatória, resultando em uma THD_V (Total Harmonic Distortion) de 0,33% no sinal de tensão V_{PCC} do barramento comum da microrrede.

Ao se atingir o limite de reserva de potência *online* estabelecido no instante 0,08s, Figura 10, este é percebido pelo conversor 2 através da amplitude do sinal de tensão

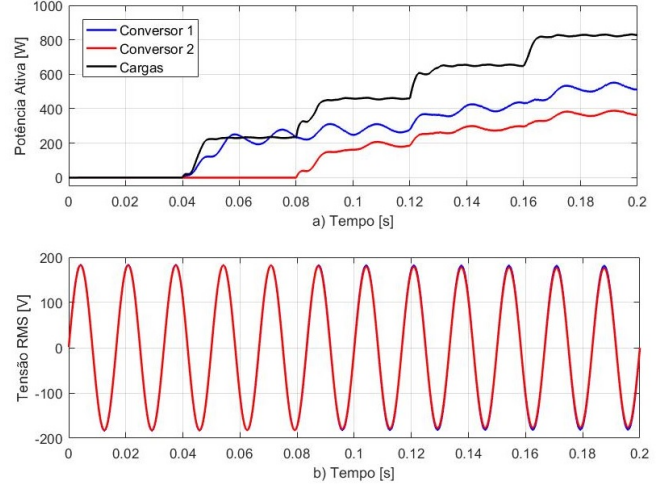


Figura 10. Simulação da microrrede com demanda de potência ativa: a) Potência ativa fornecida pelos conversores 1 e 2 (P_1 e P_2) e potência ativa entregue às cargas (P_{carga}); b) Sinal senoidal de tensão proveniente dos conversores 1 e 2 (v_{f1} e v_{f2}).

V_{f2} em seu ponto de conexão à microrrede, o qual altera seu modo de operação de CAR para CFR. Os conversores passam então a compartilhar a demanda de potência ativa das cargas entre si, sendo ao conversor 1 de menor custo exigido uma maior proporção no fornecimento de potência ao sistema à medida que há o aumento na demanda.

Na Figura 11 é possível verificar um baixo acoplamento entre o fornecimento de potência ativa, P_i , e reativa, Q_i , pelos conversores 1 e 2. É possível identificar pequenos transitórios na potência reativa fornecida no momento de acionamento das cargas. A frequência também apresentou pequenas variações transitórias, porém permaneceu em 60Hz durante operação em estado permanente dado a ausência de demanda por potência reativa no sistema.

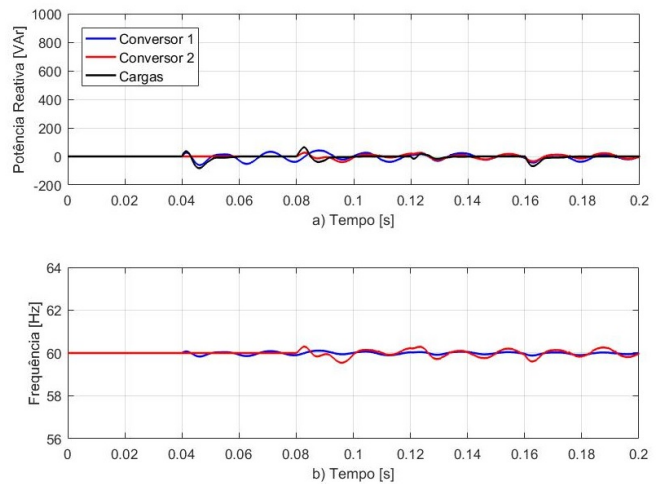


Figura 11. Simulação da microrrede com demanda de potência ativa: a) Potência reativa fornecida pelos conversores 1 e 2 (Q_1 e Q_2) e potência reativa entregue às cargas (Q_{carga}); b) Frequência do sinal de tensão proveniente dos conversores 1 e 2 (f_1^* e f_2^*).

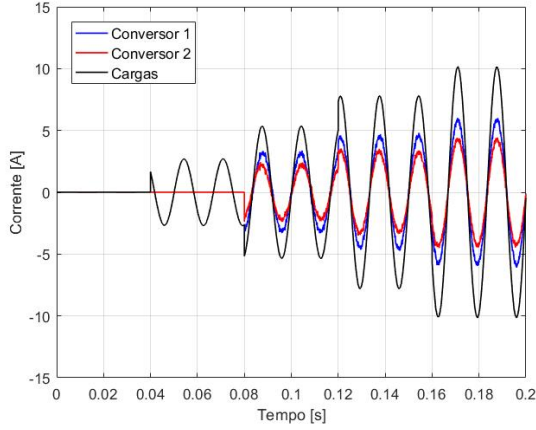


Figura 12. Sinais de corrente na saída dos filtros LC dos conversores 1 e 2 (i_{o1} e i_{o2}) e corrente fornecida às cargas (i_{carga}).

Os sinais de corrente fornecidos pelos conversores 1 e 2, i_{o1} e i_{o2} respectivamente, e a corrente fornecida às cargas, i_{carga} , são apresentados na Figura 12. Se observa que até o instante 0,08s apenas o conversor 1 fornece corrente à carga ($i_{carga} = i_{o1}$), enquanto o conversor 2, operando como CAR, segue a referência $i_{o2} = 0$ estabelecida. A partir desse instante, a demanda das cargas passa a exigir o fornecimento de potência por ambas unidades geradoras operando como CFR, havendo um aumento gradual na corrente i_{o1} e i_{o2} proveniente dos conversores. A amplitude de i_{o1} aumenta em relação a i_{o2} proporcionalmente aos custos de operação das unidades geradoras. A variação proporcional entre as correntes i_{o1} e i_{o2} fornecidas à microrrede segue o aumento gradual na diferença de amplitude existente entre os sinais de referência de tensão V_1^* e V_2^* das curvas de *droop* para os conversores 1 e 2 (Figura 8).

Na Figura 12 se verifica também que o sinal de corrente de carga, i_{carga} , é composto principalmente por componente na frequência fundamental, com THD_i de 0,46% em estado permanente. Entretanto, nos sinais de corrente i_{o1} e i_{o2} é verificada uma maior presença de componentes harmônicas com THD_i de 4,28% e 4,22%, respectivamente, em estado permanente, indicando a troca de correntes harmônicas entre os conversores 1 e 2.

O controle *droop* convencional para redes com impedância resistiva foi implementado em conjunto na simulação para a microrrede em questão para efeito comparativo da eficácia da estratégia econômica em estudo. A Figura 13 apresenta a evolução dos custos instantâneos de ambas estratégias de controle. A redução percentual do custo de operação total obtida ao se adotar a estratégia de despacho econômico em relação a implementação do controle *droop* convencional foi de 18,9% para atendimento do conjunto de cargas nas mesmas circunstâncias.

7. CONCLUSÃO

Esse trabalho propôs uma adaptação à estratégia para compartilhamento proporcional de potência baseado em aspectos econômicos apresentada por Nutkani et al. (2017) para operação em microrredes com impedância predomi-

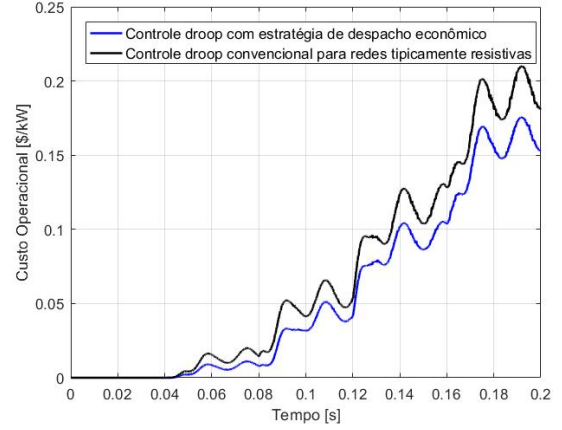


Figura 13. Custo instantâneo de operação da microrrede para controle *droop* convencional e controle *droop* com estratégia de despacho econômico para redes com impedância predominantemente resistiva.

nantemente resistivas em operação ilhada. Também foi adaptada a essa estratégia a técnica FCS-MPC para o controle primário dos conversores, a qual mostrou-se adequada durante as simulações ao seguir referências de tensão distintas estabelecidas pela estratégia econômica para conversores conectados em paralelo. O FCS-MPC também apresentou resultado satisfatório em simulação ao responder rapidamente a distúrbios ocasionados pela mudança no modo de operação dos conversores e transitórios de cargas.

O sistema simulado permitiu o compartilhamento adequado potência com base apenas em variáveis medidas localmente no ponto de conexão de cada conversor, sendo, portanto, dispensada a utilização de sistemas secundários de comunicação entre as unidades geradoras. Todavia, conforme constatado por Han et al. e Rocabert et al. (2012) o controle *droop* apresenta como desvantagem a necessidade do conhecimento prévio das impedâncias de linha Z_{Li} do sistema, bem como sensibilidade no compartilhamento das potências ativa e reativa entre os conversores à diferença nesses valores.

Esse trabalho também utilizou um modelo híbrido de controle para os conversores, realizando a alternância entre modos de operação como fonte de tensão (CFR) e fonte de corrente (CAR) em substituição ao método tradicional de conexão e desconexão dos conversores. Com isso, obteve-se menores efeitos transitórios ao se realizar o acionamento da unidade geradora subsequente no modelo de despacho econômico.

Foi possível observar que sob a variação gradual de demanda, os conversores realizaram a priorização de unidades de menor custo operacional e o acionamento gradual de unidades mais dispendiosas conforme necessário. As unidades geradoras também foram capazes de compartilhar potência entre si, de modo proporcional e instantâneo à diferença de custos operacionais entre elas, mantendo níveis adequados para tensão no barramento comum da microrrede dentro de parâmetros de qualidade pré-estabelecidos. Por fim, foi possível observar que a estratégia econômica apresentou redução dos custos operacionais

no atendimento a um conjunto similar de cargas em relação ao controle *droop* convencional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFLA, ao Departamento de Automática e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação.

REFERÊNCIAS

- Chandorkar, M.C., Divan, D.M., and Adapa, R. (1993). Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(1), 136–143.
- Chen, T., Abdel-Rahim, O., Peng, F., and Wang, H. (2020). An improved finite control set-mpc-based power sharing control strategy for islanded ac microgrids. *IEEE Access*, 8, 52676–52686.
- Cortes, P., Kazmierkowski, M.P., Kennel, R.M., Quevedo, D.E., and Rodriguez, J. (2008). Predictive control in power electronics and drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), 4312–4324.
- Dragičević, T. (2018). Model predictive control of power converters for robust and fast operation of ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(7), 6304–6317.
- Ferreira, S.C., Gonzatti, R.B., Pereira, R.R., da Silva, C.H., da Silva, L.E.B., and Lambert-Torres, G. (2018). Finite control set model predictive control for dynamic reactive power compensation with hybrid active power filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2608–2617.
- Ferreira, S.C. (2012). *Aplicação de Filtros Adaptativos em Compensadores Híbridos de Reativo*. Master's thesis, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.
- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M., and Guerrero, J.M. (2016). Review of power sharing control strategies for islanding operation of ac microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 200–215.
- Han, Y., Li, H., and Shen, P. (????).
- Innocent, L.A., Lamine, D.M., Joseph, S.M., and Yaramasu, V. (2018). Finite control set-model predictive control for power converters multilevel symmetric cascaded h-bridge inverters-fed drive. In *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–7.
- Kouro, S., Cortes, P., Vargas, R., Ammann, U., and Rodriguez, J. (2009). Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 1826–1838. doi:10.1109/TIE.2008.2008349.
- Nutkani, I.U., Loh, P.C., Wang, P., and Blaabjerg, F. (2017). Decentralized economic dispatch scheme with online power reserve for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 139–148.
- Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H., Cañizares, C.A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A.H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., and Jiménez-Estévez, G.A. (????).
- Panten, N., Hoffmann, N., and Fuchs, F.W. (2016). Finite control set model predictive current control for grid-connected voltage-source converters with lcl filters: A study based on different state feedbacks. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 5189–5200.
- Queiroz, A.P.D., Jacobina, C.B., de Freitas, N.B., Maia, A.C.N., and Melo, V.F.M.B. (2017). Single-phase ac-dc-ac multilevel converter based on h-bridges and three-leg converters connected in series. In *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2129–2136.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., and Rodríguez, P. (2012). Control of power converters in ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734–4749. doi:10.1109/TPEL.2012.2199334.