



# CONTROLE SECUNDÁRIO DISTRIBUÍDO EM MICRORREDES: ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA ENTRE UNIDADES GERADORAS DE CAPACIDADES DIFERENTES

Henrique Tannús M. Carvalho<sup>\*1</sup>, Ernane Antônio A. Coelho<sup>1</sup>, Luiz Carlos G. de Freitas<sup>1</sup>, Gustavo Brito de Lima<sup>1</sup>, Luiz Carlos de Freitas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil

**Resumo** – O estudo apresenta um controle secundário de frequência e tensão para operação ilhada de microrredes. É verificada a sua influência na distribuição de potência ativa e reativa na situação de unidades geradoras com capacidades distintas, mostrando que a distribuição proporcional de potência deve ser realizada por intermédio de pesos inseridos nele, e não no controle primário. É também analisada a influência das inclinações do *droop control* nos valores em regime do sistema após inserção do controle secundário, em situações de linhas elétricas de impedâncias iguais e diferentes, rede de comunicação totalmente conectada e rede de comunicação mínima.

**Palavras-Chave** - controle secundário, controle via *droop*, microrredes, paralelismo de inversores, regulação de tensão.

## DISTRIBUTED SECONDARY CONTROL FOR MICROGRIDS: ANALYSIS OF POWER SHARING BETWEEN GENERATION UNITS OF DIFFERENT CAPACITY

**Abstract** – The study presents a secondary control for islanded operation of microgrids. Its influence on active and reactive power sharing for generation units of different capacity is verified, showing that the proportional power sharing is achieved with the insertion of weights on it, and not on the primary control. The *droop control* coefficients effects on the system's steady state after the insertion of secondary control is also analyzed in situations of electric lines with equal and distinct impedances, fully connected network and minimal connected network.

**Keywords** – *droop control* method, secondary control, microgrids, parallel-connected inverters, voltage regulation.

## I. INTRODUÇÃO

As microrredes (MRs) podem ser entendidas como redes elétricas locais, com controle próprio, formadas por geração distribuída, predominantemente advinda de fontes renováveis, cargas locais (consumidores) e elementos armazenadores de energia que poderá estar conectada ao grande sistema elétrico de distribuição [1], [2]. Desse modo, as MRs poderão operar em modo conectado à rede, trocando potência, ou ilhada [3]. No segundo, a MR é capaz de fornecer energia para suas cargas de forma autônoma, mantendo a tensão e frequência dentro dos padrões [4].

Em geral, as fontes primárias de uma MR geram tensão em CC ou em CA com frequência variável. Sendo assim, os inversores são os elementos mais comuns para o processamento de energia [3]. Logo, nesse trabalho as unidades geradoras (UGs) serão consideradas como sendo inversores operando como fontes de tensão controlada.

O sistema de controle de uma MR tem sido tratado como um controle hierárquico multinível, dividido em primário, secundário e terciário [3]. O controle terciário normalmente é aplicado apenas no modo conectado à rede e controla o fluxo de potência entre as duas áreas [3], [5]. O controle primário fornece a referência para a malha interna de tensão dos inversores e é responsável por estabilizar o paralelismo e realizar distribuição de potência entre as UGs. A estratégia frequentemente utilizada para esse controle é o *droop control* convencional, devido a sua facilidade de implementação, por ser descentralizado, não exigir comunicação entre as unidades e basear-se no, já bem conhecido, comportamento em regime permanente dos geradores síncronos e seus reguladores [3], [6], [7].

O *droop control* tem a característica inerente de desviar a frequência e amplitude da tensão de saída da respectiva UG conforme o carregamento. Tais desvios frequentemente precisam ser corrigidos, sendo exatamente essa a responsabilidade do controle secundário [3], que eventualmente também poderá atuar na melhoria da distribuição de potência [1].

Normalmente o controle primário é distribuído, o terciário é centralizado e o secundário pode ser um ou outro. Porém,

\*henrique.tmc@gmail.com

principalmente por questões de confiabilidade, é preferível que o controle secundário seja distribuído [2], [7].

Por questões de flexibilidade, confiabilidade e custo, a necessidade de comunicação entre as unidades de uma MR deve ser evitada, e isso é difícil de ser feito para os controles secundário e terciário. Todavia, nesse caso, como a banda de comunicação requerida é menor, a utilização é aceitável [3].

Os controles secundários que visam regular as tensões de todos os nós segundo uma referência global poderão piorar o problema da distribuição de potência reativa em caso de redes de impedâncias heterogêneas [5], [8], por retirar as diferenças de tensões entre os barramentos necessárias para controle do fluxo de reativo.

Um controle secundário distribuído que reestabelece frequência, tensões e distribuição de reativo é apresentado em [2]. A regulação de tensão se refere a média das tensões. Todavia, segundo [8] e [9], o sistema precisa de comunicação completa, isto é, cada UG recebe informações de todas as outras. Os resultados foram mostrados apenas com dois inversores e com impedâncias de conexão idênticas.

No trabalho [10] é utilizado um controle secundário totalmente distribuído baseado em consenso que aceita rede de dados esparsa e com atrasos, sem prejuízo de desempenho em regime permanente e com pouca alteração dinâmica. O trabalho apresenta e valida modelagem linearizada em pequeno sinal, compreendendo o controle primário, secundário, impedâncias de cargas e impedâncias de rede englobando ainda, a topologia e atraso da rede de dados. Todavia, apenas a restauração de frequência foi explorada e não foi discutida a utilização da estratégia com UGs de potências nominais distintas.

O conceito de consenso é aplicado em [11] para criação de um controle primário com impedância virtual adaptativa no intuito de realizar a distribuição adequada de potência reativa e um controle secundário para regulação da tensão média das unidades. O controle possui uma complexidade maior, por incluir uma integral e dois PIs (compensador proporcional-integral), possuindo oito parâmetros de projeto: dois coeficientes para cada PI, três pesos para a impedância virtual adaptativa e um ganho para a integral do consenso de tensão. Além disso nos resultados não foram mostradas curvas relacionadas à regulação de tensão e distribuição de reativos de forma simultânea, deixando em falta a validação da proposta de resolução simultânea de ambos problemas.

O presente trabalho visa discutir o desempenho de um controle secundário totalmente distribuído para restauração da qualidade de tensão em uma MR constituída por inversores com controle primário do tipo *droop control* convencional. A estratégia utilizada é de simples implementação, por incluir apenas uma integral, poucas e simples operações algébricas e apenas um parâmetro de ajuste. Para restauração da frequência, o método apresentado em [10] é utilizado, formando um controle secundário completo.

O foco é a análise do desempenho do controle secundário completo frente a situação de UGs com capacidades de potência diferentes. Para isso, é apresentada uma modificação na lei de controle, inserindo pesos para distribuição proporcional de potência. As variáveis observadas são os níveis de tensão, frequência e distribuição de potências ativa e reativa em regime permanente e suas relações com os

coeficientes do controle primário na situação de linhas de impedância iguais ou diferentes e topologia da rede de dados.

## II. CONTROLE PRIMÁRIO

O diagrama geral da MR considerada nesse estudo é mostrado na Figura 1, detalhando a conexão elétrica e o controle. Foi considerado que a impedância dos circuitos alimentadores das cargas é desprezível e não há cargas ligadas diretamente nas UG, portanto todas as cargas serão simuladas como uma carga ligada a um único barramento alimentado pelas UGs através de linhas de transmissão. Todavia, vale ressaltar que o controle apresentado não exige nenhuma medição remota ou central de controle no(s) barramento(s) de carga. As linhas de transmissão poderão ser compreendidas como o efeito do próprio cabeamento da MR (se a distância for suficiente) e/ou indutâncias de acoplamento inseridas intencionalmente na saída de cada inversor.

Ao se tratar do controle da MR, as malhas internas de controle de tensão e corrente dos conversores que compõem as UGs normalmente são desprezadas por possuírem desempenho perfeito em termos de velocidade de resposta, rejeição a distúrbios e seguimento da referência, quando comparado aos controles primário, secundário e terciário [3], [6], [10]. Logo, no presente trabalho os inversores são considerados como fontes ideais de tensão, controladas pelo controle primário e secundário.

O controle primário utilizado é o *droop control* convencional [10], definido em (1a) e (1b). Para cada enésima UG,  $\omega_n$  é a sua frequência angular,  $E_{drn}$  é a amplitude da tensão de saída,  $\omega_0$  e  $E_0$  são a frequência e a amplitude de equilíbrio (normalmente iguais para toda a MR),  $k_{pn}$  e  $k_{vn}$  são os coeficientes de inclinação do *droop* de frequência e tensão, respectivamente,  $P_n$  e  $Q_n$  são as potências ativa e reativa de saída e  $P_{refn}$  e  $Q_{refn}$  são as potências ativa e reativa de referência, atualizadas pelo controle secundário. No caso de sistemas sem controle secundário,  $P_{refn}$  e  $Q_{refn}$  são constantes.

$$\omega_n = \omega_0 - k_{pn}(P_n - P_{refn}) \quad (1a)$$

$$E_{drn} = E_0 - k_{vn}(Q_n - Q_{refn}) \quad (1b)$$

As potências  $P_n$  e  $Q_n$  são calculadas pelo controle embarcado na UG, através de filtros passa-baixa de 1ª ordem [6], [10] tendo frequência de corte  $\omega_f$  normalmente escolhida como 1/10 da frequência nominal da MR.

No caso de UGs com capacidades distintas, a distribuição proporcional das potências é feita através do balanceamento dos coeficientes  $k_{pn}$  e  $k_{vn}$ , de modo que:

$$k_{p_1} \cdot P_{no_1} = k_{p_2} \cdot P_{no_2} = (\dots) = k_{p_n} \cdot P_{no_n} = C_1 \quad (2a)$$

$$k_{v_1} \cdot Q_{no_1} = k_{v_2} \cdot Q_{no_2} = (\dots) = k_{v_n} \cdot Q_{no_n} = C_2 \quad (2b)$$

Em que  $P_{no_n}$  e  $Q_{no_n}$  são as potências ativa e reativa nominais da enésima UG.  $C_1$  e  $C_2$  são constantes de projeto para que os valores numéricos dos coeficientes fiquem de acordo com os critérios dinâmicos necessários [6] e para ajuste

do grau das variações de tensão e frequência mediante variações nas potências ativa e reativa [3]. Com os coeficientes do controle primário devidamente balanceados, a distribuição em regime permanente da potência ativa é perfeitamente obtida. Porém, a distribuição de potência reativa é apenas aproximada [5].

### III. CONTROLE SECUNDÁRIO

#### A. Controle Secundário de Frequência

O controle secundário utilizado restaura com exatidão a frequência da MR para o valor nominal. É totalmente distribuído e possui apenas um parâmetro de ajuste ( $k_{pr}$ ) e sua operação foi verificada com atrasos de até 200ms na comunicação e probabilidade de perdas de pacote de 0,01 [10]. Este requer que cada unidade receba o valor da potência ativa de pelo menos uma outra ( $P_j$ ) e que envie o valor de sua potência ativa ( $P_n$ ) para pelos menos uma outra. O controle atua no valor de  $P_{refn}$  do controle primário da sua unidade mediante o valor de potência ativa recebido de outra(s) unidade(s). Isso é obtido a partir da lei de controle aplicada em cada UG apresentada em (3), adaptada de [10].

$$P_{refn} = -k_{pr} \int \sum_{j \neq n} (P_{refn} - P_j) dt \quad (3)$$

Os valores assumidos por  $j$  dependem da topologia da comunicação, ou seja, de quais inversores o inversor  $n$  receberá o valor de potência ativa.

#### B. Controle Secundário de Tensão

O controle de tensão foi baseado em (3) e é apresentado em (4). De modo análogo, esse requer que cada unidade receba o valor da potência reativa de pelo menos uma outra ( $Q_j$ ) e que envie o valor de sua potência reativa ( $Q_n$ ) para pelos menos uma outra. O controle calcula o valor de  $Q_{refn}$  para o controle primário da sua unidade. O único parâmetro de projeto é  $k_{qr}$ , que controla a velocidade de convergência.

$$Q_{refn} = -k_{qr} \int \sum_{j \neq n} (Q_{refn} - Q_j) dt \quad (4)$$

Novamente, os valores que  $j$  assume dependem da topologia da comunicação.

Em sua operação ideal, o controle deverá fazer com que a média das tensões de saída de cada UG seja igual a  $E_0$ , buscando restaurar a qualidade da tensão na(s) carga(s), com pouco ou nenhum prejuízo na distribuição de potência reativa. O desvio padrão das tensões dependerá do fluxo de reativo, que depende das impedâncias de linha e topologia elétrica da MR.

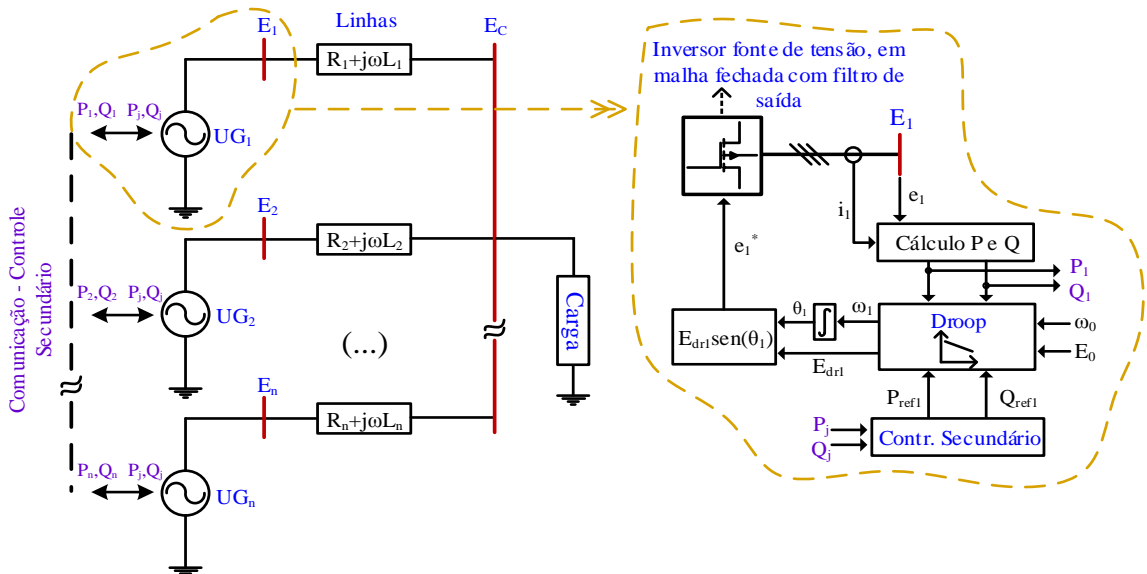
#### C. Rede de Comunicação

Com o controle hierárquico utilizado, o controle secundário é ajustado com dinâmica mais lenta que o primário, que também é limitada pelos filtros [3]. Além disso, na estratégia apresentada, as variáveis que trafegarão pela rede de comunicação (potências ativa e reativa) são de dinâmica lenta, por serem valores médios. Logo, a largura de banda requerida para a rede é baixa. Como controle secundário também não é essencial para a estabilidade e continuidade da MR, tendo caráter de restaurador da qualidade da tensão quando o sistema opera ilhado, eventuais falhas de curta duração na comunicação poderão ser toleradas.

Neste documento, será chamada de rede mínima a topologia em que a maioria dos inversores trocará informações com apenas um outro inversor e algumas unidades se comunicarão com mais de uma apenas se necessário para garantir que todos os nós existentes tenham alguma maneira de se comunicar. Também pode ser interpretada como uma rede esparsa.

Já na topologia de rede de dados com comunicação completa, cada nó da MR se comunica com todos os outros nós e será aqui denominada de rede de dados totalmente conectada. Ou seja, nesse caso cada um dos inversores receberá informações de todos os outros. Essa discussão se diz respeito aos caminhos e possibilidades de troca de informação entre as unidades e não necessariamente ao esquema físico de conexão entre elas.

Figura 1: Diagrama da MR estudada com detalhamento do controle distribuído em cada unidade



#### IV. UGs COM CAPACIDADES DISTINTAS

O controle secundário em foco altera os valores de  $P_{ref_n}$  e  $Q_{ref_n}$  de (1a) e (1b) através de ação integral, o que afeta o efeito em regime permanente dos coeficientes  $k_{p_n}$  e  $k_{v_n}$ . Conforme será mostrado nos resultados, em caso de unidades de potências diferentes, o uso de (3) e (4) não traz bons resultados de distribuição proporcional das potências, mesmo com o “balanceamento” através de (2a) e (2b). Dessa maneira, as equações do controle secundário deverão ser modificadas para (5a) e (5b), mediante inclusão de pesos na potência recebida por cada unidade, compreendidos pela razão entre sua potência nominal e a potência nominal da unidade cuja potência está sendo recebida.

$$P_{ref_n} = -k_{pr} \int \sum_{j \neq n} \left[ P_{ref_n} - \left( \frac{P_{no_n}}{P_{no_j}} \right) P_j \right] dt \quad (5a)$$

$$Q_{ref_n} = -k_{qr} \int \sum_{j \neq n} \left[ Q_{ref_n} - \left( \frac{Q_{no_n}}{Q_{no_j}} \right) Q_j \right] dt \quad (5b)$$

#### V. RESULTADOS

A MR utilizada para análise via simulação computacional é composta por três UGs trifásicas, com configuração elétrica e controle conforme representados na Figura 1. As unidades são de potências distintas e é suposto que a unidade 1 deverá assumir metade da potência ativa e reativa da unidade 2 e que a unidade 3 deverá assumir 25% a mais que a unidade 2. Na falta de normas brasileiras específicas para o caso, [12] foi considerado e dita que as faixas adequadas são de 202 a 231 V, para tensão de fase em sistemas de distribuição de classe 380/220 V, e de 59,9 a 60,1 Hz para a frequência em regime permanente.

Na Tabela I são apresentados os parâmetros gerais do sistema. Notar que a tensão nominal do sistema é 380/220 V, porém a tensão de fase de referência escolhida é 225 V, que será a tensão a vazio em todos os barramentos e referência para a média das tensões sob carga, quando o controle secundário de tensão entra em ação. Os ensaios foram realizados envolvendo duas situações com relação aos valores das linhas elétricas: Iguais (I) ou diferentes (D). Duas situações com relação aos coeficientes do controle primário: Iguais (I) ou balanceados (B). E duas situações para a topologia da rede de dados: rede mínima ou rede totalmente conectada. A Tabela II apresenta os valores de resistência e indutância para as três linhas de transmissão, para as duas situações.

A Tabela III mostra os valores utilizados para os coeficientes dos *droops*. Na situação “I”, os valores de  $k_p$  e  $k_v$  para todas as unidades são iguais a 0,002. Na situação “B”, os coeficientes são “balanceados”, conforme a capacidade nominal, para cada uma das UGs visando distribuição proporcional de potência ativa e reativa seguindo (2a) e (2b) - sendo que os valores de  $C_1$  e  $C_2$  foram escolhidos de modo a manter a média entre  $k_{p1}$  ( $k_{v1}$ ),  $k_{p2}$  ( $k_{v2}$ ) e  $k_{p3}$  ( $k_{v3}$ ) igual a 0,002.

Tabela I: Parâmetros gerais do sistema analisado

Parâmetros		Valor
Potência nominal da unidade 1	$P_{no_1}$	0,5 p.u.
Potência nominal da unidade 2	$P_{no_2}$	1 p.u.
Potência nominal da unidade 3	$P_{no_3}$	1,25 p.u.
Tensão de equilíbrio de referência (fase)	$E_0$	225 V
Tensão nominal (fase/linha)	$E_n$	220/380 V
Frequência de equilíbrio	$\omega_0$	2 $\pi$ 60 rad/s
Freq. de corte do filtro das potências	$\omega_f$	2 $\pi$ 6 rad/s
Resistência da carga	$R_L$	5 $\Omega$
Indutância da carga	$L_L$	15 mH
Ganho do secundário de frequência	$k_{pr_{1,2,3}}$	10 W/s
Ganho do secundário de tensão	$k_{qr_{1,2,3}}$	100 Var/s
Atraso de tempo da comunicação	$t_d$	100 ms

Tabela II: Linhas elétricas do sistema analisado

Situação	Parâmetros das Linhas					
	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$L_1$ (mH)	$L_2$ (mH)	$L_3$ (mH)
I	0,13	0,13	0,13	7,5	7,5	7,5
D	0,11	0,13	0,15	7,5	8,8	6,0

Tabela III: Coeficientes para o controle primário

Situação	Coeficientes do Droop Control		
	$k_{p_1}$ e $k_{v_1}$	$k_{p_2}$ e $k_{v_2}$	$k_{p_3}$ e $k_{v_3}$
I	0,002	0,002	0,002
B	0,003158	0,001579	0,001263

Nos resultados apresentados a seguir, são mostrados os valores da frequência do sistema, amplitude das tensões nos três barramentos das UGs, amplitude da tensão no barramento de carga ( $E_c$ ), o valor - em volts - do desvio entre a média das tensões dos barramentos das UGs e a referência  $E_0$  ( $\Delta \bar{E}$ ), os desvios percentuais ( $DP_n$  e  $DQ_n$ ) entre as potências ativas e reativas fornecidas por cada unidade e os valores que deveriam fornecer idealmente ( $P_n^*$  e  $Q_n^*$ ), obtidos como 18,18% da potência total para a unidade 1, 36,36% da potência total para a unidade 2 e 45,45% da potência total para a unidade 3. Por exemplo:

$$DP_n(\%) = \frac{P_n - P_n^*}{P_n^*} \cdot 100 \quad (6)$$

Na Tabela IV são apresentados os resultados de simulação em regime permanente para o sistema com apenas o controle primário, tendo os valores de  $P_{ref_n}$  e  $Q_{ref_n}$  mantido zerados para todas as unidades, de modo que a frequência e tensão a vazio de todas unidades sejam iguais a  $\omega_0$  e  $E_0$ . Os coeficientes  $k_{p_n}$  e  $k_{v_n}$  são “balanceados” (situação B na Tabela III) para distribuição de potência. Os resultados são mostrados para linhas com impedâncias idênticas (situação I) ou diferentes (situação D).

Na Tabela V, o controle secundário completo é implementado com (3) e (4), ou seja, sem os pesos apresentados na seção IV e o controle primário é mantido com os coeficientes da situação B. As condições testadas foram de rede de comunicação totalmente conectada (TC), rede de

comunicação mínima (M), linhas elétricas na situação I, linhas elétricas na situação D e combinações entre tais situações. Em todos os resultados, a situação M da linha de dados corresponde à ausência de comunicação entre as unidades 1 e 3. Ou seja, as unidades 1 e 3 trocam informações apenas com a unidade 2.

Os resultados da Tabela IV confirmam que, mediante escolha adequada dos coeficientes das inclinações, o controle primário convencional é capaz de distribuir perfeitamente (proporcionalmente) a potência ativa e incapaz de distribuir com precisão a potência reativa.

Há queda na frequência e nas tensões, deixando os valores no barramento de carga abaixo dos adequados. A Tabela V comprova que a utilização do controle secundário na forma de (3) e (4) prejudica fortemente a distribuição de potência mesmo com os coeficientes balanceados no controle primário, independentemente de as linhas elétricas serem iguais ou diferentes e a comunicação ser TC ou M. Independentemente da topologia da rede de dados e das linhas elétricas, o controle secundário de frequência igualou as potências ativas das três unidades.

Já nas Tabelas VI e VII, o controle secundário com pesos (5a) e (5b) é utilizado. Os resultados são verificados para linhas elétricas iguais ou diferentes e coeficientes do controle primário iguais ou balanceados. Na Tabela VI a rede de comunicação é do tipo TC e na Tabela VII é do tipo M.

Com uso do controle secundário com pesos, a distribuição de potência ativa voltou a ser precisa e a frequência se manteve em 60 Hz, independentemente dos valores de  $k_{p_n}$  e  $k_{v_n}$ , da topologia da rede de dados e de similaridade ou não das linhas elétricas. Os valores de  $k_p$  também não influenciaram o controle de tensão nem na distribuição de reativos.

Para a rede de dados de topologia TC (Tabela VI) a média das tensões foi regulada com precisão apenas com  $k_v$ s balanceados, independentemente das linhas elétricas. A distribuição de potência reativa não foi perfeita em nenhuma situação, tendo ficado melhor para  $k_v$ s balanceados. Porém, os resultados foram melhores que os para o sistema com apenas controle primário.

Para a rede de dados de topologia M (Tabela VII) a média das tensões não é regulada com precisão absoluta em

Tabela IV: Resultados para sistema apenas com controle primário ( $k_p$  e  $k_v$  balanceados)

Condição		Resultados										
Linhas elétricas	Freq. (Hz)	DP <sub>1</sub> (%)	DP <sub>2</sub> (%)	DP <sub>3</sub> (%)	DQ <sub>1</sub> (%)	DQ <sub>2</sub> (%)	DQ <sub>3</sub> (%)	E <sub>1</sub> (V)	E <sub>2</sub> (V)	E <sub>3</sub> (V)	$\Delta\bar{E}$ (V)	E <sub>c</sub> (V)
I	59,01	0,0	0,0	0,0	59,8	-4,7	-20,2	217,57	220,57	221,29	-5,19	199,88
D	59,00	0,0	0,0	0,0	56,2	-17,6	-8,4	217,74	221,17	220,74	-5,12	200,50

Tabela V: Resultados para sistema com controle secundário sem pesos ( $k_p$  e  $k_v$  balanceados)

Condição			Resultados										
Rede de Dados	Linhas elétricas	Freq. (Hz)	DP <sub>1</sub> (%)	DP <sub>2</sub> (%)	DP <sub>3</sub> (%)	DQ <sub>1</sub> (%)	DQ <sub>2</sub> (%)	DQ <sub>3</sub> (%)	E <sub>1</sub> (V)	E <sub>2</sub> (V)	E <sub>3</sub> (V)	$\Delta\bar{E}$ (V)	E <sub>c</sub> (V)
TC	I	60	83,4	-8,3	-26,7	83,4	-8,3	-26,7	225,00	225,00	225,00	0,00	204,44
TC	D	60	83,4	-8,3	-26,7	80,7	-19,9	-16,3	225,19	225,84	224,25	0,1	205,0
M	I	60	83,4	-8,3	-26,7	83,4	-8,3	-26,7	225,00	225,00	225,00	0,00	204,44
M	D	60	83,4	-8,3	-26,7	76,06	-18,73	-15,42	224,35	225,75	224,06	-0,28	204,67

Tabela VI: Resultados para sistema com controle secundário com pesos e rede de dados totalmente conectada

Condição				Resultados										
Linhas elétricas	$k_p$	$k_v$	Freq. (Hz)	DP <sub>1</sub> (%)	DP <sub>2</sub> (%)	DP <sub>3</sub> (%)	DQ <sub>1</sub> (%)	DQ <sub>2</sub> (%)	DQ <sub>3</sub> (%)	E <sub>1</sub> (V)	E <sub>2</sub> (V)	E <sub>3</sub> (V)	$\Delta\bar{E}$ (V)	E <sub>c</sub> (V)
I	B	B	60	0,0	0,0	0,0	52,5	-3,6	-18,1	221,93	226,01	227,06	0,00	204,37
I	I	B	60	0,0	0,0	0,0	52,5	-3,6	-18,1	221,93	226,01	227,06	0,00	204,37
I	B	I	60	0,0	0,0	0,0	54,1	-5,6	-17,1	222,97	226,49	228,20	0,89	205,18
I	I	I	60	0,0	0,0	0,0	54,1	-5,6	-17,1	222,97	226,49	228,20	0,89	205,18
D	B	B	60	0,0	0,0	0,0	49,2	-15,7	-7,1	222,06	226,78	226,16	0,00	204,94
D	I	B	60	0,0	0,0	0,0	49,2	-15,7	-7,1	222,06	226,78	226,16	0,00	204,94
D	B	I	60	0,0	0,0	0,0	51,3	-16,5	-7,3	223,05	227,38	226,90	0,78	205,66
D	I	I	60	0,0	0,0	0,0	51,3	-16,5	-7,3	223,05	227,38	226,90	0,78	205,66

Tabela VII: Resultados para sistema com controle secundário com pesos e rede de dados mínima

Condição				Resultados										
Linhas elétricas	$k_p$	$k_v$	Freq. (Hz)	DP <sub>1</sub> (%)	DP <sub>2</sub> (%)	DP <sub>3</sub> (%)	DQ <sub>1</sub> (%)	DQ <sub>2</sub> (%)	DQ <sub>3</sub> (%)	E <sub>1</sub> (V)	E <sub>2</sub> (V)	E <sub>3</sub> (V)	$\Delta\bar{E}$ (V)	E <sub>c</sub> (V)
I	B	B	60	0,0	0,0	0,0	57,4	-2,1	-21,3	222,12	225,98	225,92	-0,33	204,07
I	I	B	60	0,0	0,0	0,0	57,4	-2,1	-21,3	222,12	225,98	225,92	-0,33	204,07
I	B	I	60	0,0	0,0	0,0	60,5	-3,1	-21,7	223,04	226,38	226,43	0,28	204,63
I	I	I	60	0,0	0,0	0,0	60,5	-3,1	-21,7	223,04	226,38	226,43	0,28	204,63
D	B	B	60	0,0	0,0	0,0	52,8	-13,5	-10,3	221,80	226,67	224,85	-0,56	204,36
D	I	B	60	0,0	0,0	0,0	52,8	-13,5	-10,3	221,80	226,67	224,85	-0,56	204,36
D	B	I	60	0,0	0,0	0,0	57,8	-13,4	-12,4	222,82	227,21	224,93	-0,01	204,82
D	I	I	60	0,0	0,0	0,0	57,8	-13,4	-12,4	222,82	227,21	224,93	-0,01	204,82

nenhum caso, ficando mais próxima para  $k_v$ s iguais, tanto para redes elétricas iguais quanto diferentes. Entretanto, a distribuição de reativos é melhor para  $k_v$ s balanceados. Nesse caso, o projetista deverá optar por melhor regulação da tensão ou melhor distribuição de potência reativa.

Em todas as situações com o controle secundário a tensão no barramento de carga e a frequência ficaram dentro dos valores adequados, mesmo nos casos em que a média não foi perfeitamente regulada, mostrando eficácia na correção dos desvios causados pelo controle primário.

## VI. CONCLUSÕES

O trabalho utilizou uma estratégia de controle secundário de simples implementação, distribuída, com pouca dependência da topologia de comunicação, sem prejuízo na distribuição de potência ativa e com melhora na distribuição de potência reativa na maioria das situações. O foco deste trabalho foi a sua utilização em sistemas com UGs de capacidade de potência diferentes. Foi mostrado que, com o seu uso, a distribuição de potência de forma proporcional deverá ser feita através de pesos no controle secundário, e não através das inclinações do *droop control*, como seria em um sistema sem controle secundário. Foram apresentadas as novas equações para o controle secundário incluindo os pesos referidos.

A distribuição proporcional de potência ativa e regulação da frequência são obtidas com precisão independentemente das inclinações dos *droops* de frequência e de tensão, da topologia da rede de dados e da similaridade ou não das linhas elétricas.

A inclinação do *droop* de frequência ( $K_p$ ) das unidades deixou de exercer qualquer função em regime permanente no sistema, permitindo projeto apenas por critérios dinâmicos, independentemente da topologia da rede de dados e da similaridade ou não das linhas elétricas.

A inclinação do *droop* de tensão ( $K_v$ ) não ofereceu efeito cruzado com o controle de potência ativa / frequência em nenhum caso, porém afeta o controle de tensão / potência reativa. Com comunicação totalmente conectada, a média das tensões das UGs é perfeitamente regulada pelo controle secundário e apenas com uso de valores de  $K_v$ s balanceados conforme a capacidade de potência das unidades, de modo idêntico ao que é realizado em sistemas sem controle secundário, apresentando também melhora na distribuição de potência reativa. Com comunicação mínima, a regulação exata da média das tensões não é obtida, atingindo valores mais próximos com  $K_v$ s iguais entre as unidades e a distribuição de potência reativa continua melhor para  $K_v$ s balanceados.

Mesmo nas situações de teste em que o controle secundário teve pior desempenho, ele foi capaz de restaurar a qualidade das tensões dos barramentos, no tocante à frequência e amplitude.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), da Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – processo APQ-03554-16 e do

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch, e T. Sezi, “Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-Based Microgrids With Consensus-Based Distributed Voltage Control”, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no 1, p. 96–109, jan. 2016.
- [2] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, e J. C. Vasquez, “Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, n° 2, p. 1018–1031, fev. 2014.
- [3] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, e M. Castilla, “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, n° 1, p. 158–172, jan. 2011.
- [4] D. He, D. Shi, e R. Sharma, “Consensus-based distributed cooperative control for microgrid voltage regulation and reactive power sharing”, in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, p. 1–6.
- [5] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, e J. M. Guerrero, “Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, n° 3, p. 2427–2451, mar. 2017.
- [6] E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo, e P. F. D. Garcia, “Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, n° 2, p. 533–542, 2002.
- [7] A. Dehghan Banadaki, F. D. Mohammadi, e A. Feliachi, “State space modeling of inverter based microgrids considering distributed secondary voltage control”, in *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, 2017, n° 1, p. 1–6.
- [8] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dorfler, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, e F. Bullo, “Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n° 11, p. 7025–7038, nov. 2015.
- [9] F. Guo, C. Wen, J. Mao, e Y.-D. Song, “Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n° 7, p. 4355–4364, jul. 2015.
- [10] E. A. A. Coelho *et al.*, “Small-Signal Analysis of the Microgrid Secondary Control Considering a Communication Time Delay”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, n° 10, p. 6257–6269, out. 2016.
- [11] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, e J. Zhou, “Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, n° 4, p. 1749–1761, jul. 2017.
- [12] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. “*Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*”, Revisão 10 (Resolução Normativa n° 794/2017), 2012.