

ANÁLISE DO CONTROLE DROOP APLICADO À UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA EM UM SISTEMA COM CARGA DESEQUILIBRADA

Nikolas Iohanathan Felipe de Oliveira (UFERSA) - nikolas_iohanathan@hotmail.com

Adriano Aron Freitas de Moura (UFERSA) - adrianoaron@ufersa.edu.br

Cleydson Adler de Castro Nascimento (UFERSA) - cleydsonadller@gmail.com

Ednardo Pereira da Rocha (UFERSA) - ednardo.pereira@ufersa.edu.br

Victor de P. B. Aguiar (UFERSA) - victor@ufersa.edu.br

Ailson P. de Moura (UFC) - ailson@dee.ufc.br

Resumo:

Este artigo apresenta uma análise do comportamento dos controles droop P-f e droop Q-V quando estes são aplicados a uma Central Geradora Hidrelétrica que alimenta uma carga desequilibrada em um sistema de baixa tensão, trabalhando no modo isolado, ou seja, desconectado da rede de distribuição. Avalia-se a ação dos controles na estabilização dos níveis de tensão e frequência, verificando se os valores dessas variáveis estão dentro dos limites estabelecidos em normas vigentes. No estudo realizado, os resultados obtidos através da simulação computacional do sistema mostram que, para o nível de desequilíbrio de cargas adotado, os controles mantêm as variáveis tensão e frequência dentro dos limites aceitáveis. Através da apresentação dos dados de simulação de um sistema com carga equilibrada, compara-se os valores obtidos de tensão e frequência nos sistemas de forma a mostrar a diferença em ambas situações.

Palavras-chave: *Central geradora hidrelétrica, Controle droop, Carga desequilibrada.*

Área temática: *Outras fontes renováveis de energia*

Subárea temática: *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de microcentrais hidrelétricas*

ANÁLISE DO CONTROLE *DROOP* APLICADO À UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA EM UM SISTEMA COM CARGA DESEQUILIBRADA

Nikolas Iohanathan Felipe de Oliveira – nikolas_iohanathan@hotmail.com

Adriano Aron Freitas de Moura – adrianoaron@ufersa.edu.br

Cleydson Adller de Castro Nascimento – cleydsonadller@gmail.com

Ednardo Pereira da Rocha – ednardo.pereira@ufersa.edu.br

Victor de Paula Brandão Aguiar – victor@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia

Ailson Pereira de Moura – ailson@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

6.2. Simulação, análise, equipamentos e sistemas de microcentrais hidrelétricas

Resumo. *Este artigo apresenta uma análise do comportamento dos controles droop P-f e droop Q-V quando estes são aplicados a uma Central Geradora Hidrelétrica que alimenta uma carga desequilibrada em um sistema de baixa tensão, trabalhando no modo isolado, ou seja, desconectado da rede de distribuição. Avalia-se a ação dos controles na estabilização dos níveis de tensão e frequência, verificando se os valores dessas variáveis estão dentro dos limites estabelecidos em normas vigentes. No estudo realizado, os resultados obtidos através da simulação computacional do sistema mostram que, para o nível de desequilíbrio de cargas adotado, os controles mantêm as variáveis tensão e frequência dentro dos limites aceitáveis. Através da apresentação dos dados de simulação de um sistema com carga equilibrada, compara-se os valores obtidos de tensão e frequência nos sistemas de forma a mostrar a diferença em ambas situações.*

Palavras-chave: *Central geradora hidrelétrica, Controle droop, Carga desequilibrada.*

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia através de hidrelétricas é a forma mais consolidada e utilizada no mundo para se gerar energia elétrica a partir de uma fonte de energia renovável. Segundo dados publicados no relatório anual da Associação Internacional de Energia Hidrelétrica (IHA, 2019), estima-se que do total de energia utilizada para gerar eletricidade, 25,6% são produzidas a partir de fontes de energias renováveis, dentre os quais 15,9% são oriundos de hidrelétricas, um número maior que as outras formas de energias renováveis (ex.: fotovoltaica, eólica, biomassa e outras) somadas. Ainda de acordo com o relatório da IHA (2019), a capacidade instalada mundial de hidrelétricas atingiu o patamar de 1.292GW em 2018, equivalendo a 4.200 TWh de energia gerada no mesmo período.

No ranking dos países com maiores capacidades de potências hidrelétricas instaladas, o Brasil possui lugar de destaque ocupando a segunda colocação, com potência instalada de 104 GW, ficando atrás apenas da China que possui uma potência instalada de 352 GW. Destaca-se ainda os Estados Unidos, Canadá e Japão, que possuem capacidade instalada de 103 GW, 81 GW e 50 GW, respectivamente, segundo a IHA (2019).

Apesar da geração de eletricidade proveniente de energia hídrica ser considerada uma tecnologia madura, seu crescimento continua a acontecer. Os dados do relatório da IHA (2019) apontam um incremento na capacidade instalada em terreno brasileiro de aproximadamente 3,8 MW somente em 2018. Um dos fatores que ajudam no crescimento de projetos hidrelétricos, é devido a expansão da geração distribuída fomentada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através da implementação da Resolução Normativa (REN) N° 482/2012 e que posteriormente foi alterada para REN N° 687/2015, que apresenta as regras para que os sistemas de geração distribuída acessem a rede de distribuição (ANEEL, 2015). No Brasil, dados da ANEEL (2019) mostram que existem cerca de 100 unidades de geração hidrelétrica de até 5 MW, conectadas à rede de distribuição, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 97 MW.

A importância dos sistemas de geração distribuída pode ser vista como processo catalisador de expansão dos sistemas elétricos. A relevância da geração distribuída conectada à rede, se dá pelo fato de aproximar as centrais geradoras dos centros de consumo. Já para os sistemas de geração distribuída isolados, o mesmo assume um papel importante no âmbito do fornecimento de eletricidade para regiões onde a rede convencional de distribuição não consegue suprir (SOSNOSKI, 2015). Em termos de geração hidrelétrica isolada, dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) mostra que em 2018 havia uma capacidade instalada superior aos 700 MW em todo o mundo (IRENA, 2018).

Os sistemas de geração de energia elétrica que trabalham desconectados da rede principal, vêm recebendo atenção de estudiosos e pesquisadores da área, devido a necessidade de se fornecer energia de forma contínua, segura e de qualidade, mantendo-se isolado da rede da concessionária. Um dos desafios nos sistemas isolados é o controle das variáveis frequência e tensão, que são fundamentais para o correto funcionamento das cargas. Em um sistema de distribuição trifásico de baixa tensão, o controle da tensão da rede pode encontrar ainda mais dificuldades devido a existência do desbalanceamento das tensões, fenômeno proveniente principalmente pela existência de inúmeras cargas monofásicas com diferentes níveis de potência a serem atendidas (HU *et al.*, 2016).

Na literatura existem várias formas de controle para frequência e tensão em sistemas elétricos isolados, como o controle *droop*, que controla essas variáveis a partir de sua relação com as potências ativa e reativa. Existem estudos acerca do funcionamento do controle *droop* em redes com cargas desequilibradas, como no trabalho de HU *et al.* (2016) em que é proposto um controle *droop* trifásico independente, ou seja, cada fase possui seu próprio controle com o objetivo de diminuir o efeito do desequilíbrio de tensão, quando analisado em um sistema de armazenamento de energia que fornece eletricidade para uma carga desequilibrada. Já em Griffiths e Coates (2007), é proposto um controle como forma de mitigar o efeito causado pelas tensões de sequência negativa que surgem devido ao desbalanceamento de tensão causado por cargas desequilibradas em um sistema alimentado por geração distribuída conectada através de inversores.

Esse trabalho analisa o comportamento do controle *droop* P-f (controle da frequência com base na potência ativa) e *droop* Q-V (controle da tensão com base na potência reativa), quando este é aplicado a um gerador síncrono de uma central geradora hidrelétrica (CGH) que alimenta um sistema trifásico com carga desequilibrada, para verificar se os níveis de frequência e tensão permanecem dentro dos limites aceitáveis estabelecidos em normas vigentes.

2. CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA (CGH)

A geração distribuída é definida pela ANEEL (2016) como sendo um sistema de instalação de geradores de pequeno porte, podendo a geração ser a partir de fontes de energias renováveis ou não, que são localizados próximos aos centros de consumo. O Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2019) ainda acrescenta os equipamentos de controle e comando dos geradores como sendo parte dos sistemas de geração distribuída. O conceito apresentado pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2019) afirma que a geração distribuída abrange geradores de quaisquer potências que se conectam diretamente ao sistema de distribuição ou de consumidores, que possam operar em modo paralelo ou isolado.

Uma das fontes de energias renováveis que o conceito de geração distribuída abrange são as centrais geradoras hidrelétricas (CGHs). Segundo a Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Centrais Geradoras Hidrelétricas (ABRAPCH, 2019), uma CGH possui uma potência instalada entre 0 e 5 MW, diferenciando, assim, de uma pequena central hidrelétrica (PCH), cuja potência instalada compreende entre 5 e 30 MW.

Segundo a REN N° 587/2015 (ANEEL, 2015), a geração distribuída pode ser classificada em duas categorias de acordo com a capacidade de potência instalada. Os sistemas de microgeração distribuída são aqueles que possuem potência instalada de até 75 kW. Já a minigeração distribuída são os sistemas que possuem potência instalada entre 75 kW e 3 MW, para o caso da energia proveniente de recursos hídricos (ex.: CGHs) e entre 75 kW e 5 MW para os sistemas provenientes das demais fontes de energias renováveis.

Internacionalmente, a classificação de hidrelétricas é diferente do Brasil, pois não há um consenso em relação às categorias. Um exemplo de categorização encontrado na literatura é apresentado na Tab. 1.

Tabela 1 - Categorização de hidrelétricas (BREEZE, 2019)

| Categoria | Potência instalada |
|----------------------|--------------------|
| Micro Hidrelétrica | 1 kW à 100 kW |
| Mini Hidrelétrica | 100 kW à 1 MW |
| Pequena Hidrelétrica | 1 MW à 10-30 MW |
| Grande Hidrelétrica | Acima de 10-30 MW |

3. CONTROLE DROOP

O controle *droop* é a maneira mais utilizada para realizar o controle de tensão e frequência em sistemas de geração distribuída, principalmente quando esse sistema é composto por mais de uma fonte geradora (HU *et al.*, 2016).

Existem dois tipos de controle *droop* convencionais: *Droop* P-f e *Droop* Q-V. Quando aplicado em sistemas que possuem um único gerador de energia, o controle funciona para regular frequência e tensão com base nas medidas de potência ativa e reativa, respectivamente. Em sistemas de geração distribuída que possuem diversos geradores operando em paralelo, o controle *droop* atua para compartilhar toda a potência demandada pelas cargas igualmente entre os geradores (ABDELAZIZ; EL-SAADANY; SEETHAPATHY, 2013).

3.1 Droop P-f

O *droop* P-f é um mecanismo de controle que atua nas máquinas primárias conectadas aos geradores, com objetivo de regular a frequência do sistema com base na variação de potência ativa que ocorre na rede (LA GATTA, 2012). A Eq. (1) mostra matematicamente a relação entre essas grandezas.

$$f = f_0 + k_p(P - P_0) \quad (1)$$

Onde P_0 e f_0 são a potência ativa e frequência de referência, respectivamente; f e P são a frequência e potência medidas no sistema e k_p é o coeficiente do *droop* da potência ativa.

A Fig. 1 mostra graficamente o comportamento da Eq. (1) para um controle *droop* do tipo P-f.

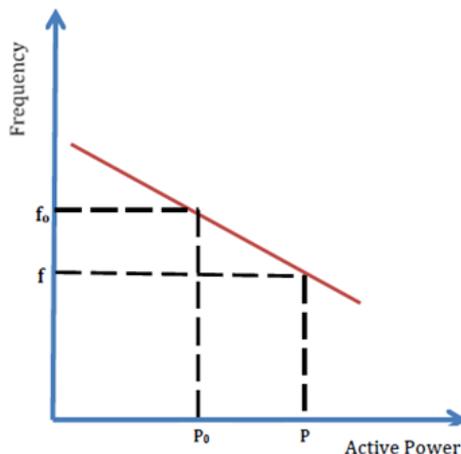


Figura 1 - Representação gráfica do *Droop* P-f (SENANAYAKA, 2014)

Pode-se observar que o *droop* representa o coeficiente angular da reta e é comumente expresso em porcentagem. Seu valor em si, representa a porcentagem de queda que haverá no valor da frequência em relação ao seu valor nominal, quando houver uma variação de 100% no valor da potência ativa, ou seja, sair da condição sem carga para a condição de plena carga. Como exemplo, um sistema com frequência nominal de 60 Hz e *droop* de 5% apresenta uma frequência em plena carga de 57 Hz.

Através da Fig. 1 é possível analisar as características de funcionamento do controle *droop* P-f. Observa-se que para um acréscimo na demanda de potência ativa do sistema haverá uma redução proporcional na frequência. E em caso de queda na frequência da rede, significa que o gerador está habilitado a injetar mais potência no sistema de modo a reestabelecer a relação frequência-potência ativa (SENANAYAKA, 2014).

3.2 Droop Q-V

O *droop* Q-V é um controle aplicado ao sistema de excitação dos geradores para estabilizar a tensão com base na variação de potência reativa no sistema (SENANAYAKA, 2014). A Eq. (2) mostra a equação que relaciona essas variáveis.

$$V = V_{grid} + k_q(Q - Q_0) \quad (2)$$

Onde V_{grid} e Q_0 , são os valores de referências para tensão e potência reativa, respectivamente; V e Q são a tensão e potência reativa medidas do sistema e k_q é o coeficiente do *droop* da potência reativa.

A Fig. 2 apresenta graficamente o comportamento da Eq. (2) para um controle *droop* do tipo Q-V.

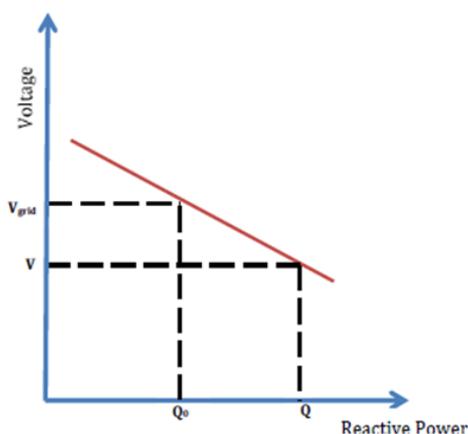


Figura 2 - Representação gráfica do *Droop* Q-V (SENANAYAKA, 2014)

A análise apresentada na seção 3.1 para mostrar o funcionamento e as características do *droop* P-f, pode ser aplicada de forma similar para o *droop* Q-V. A Fig. 2 mostra que o *droop* é o coeficiente angular da reta e seu valor em porcentagem representa a variação máxima de tensão que haverá quando houver demanda máxima de potência reativa sendo solicitada no sistema. Para qualquer variação de potência reativa, acréscimo ou decréscimo, haverá uma variação proporcional na tensão do sistema.

4. METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de uma simulação computacional para verificar o comportamento dos controles *droop* P-f e *droop* Q-V quando estes são aplicados a um gerador síncrono acoplado a uma turbina hidráulica compondo uma CGH, ou de acordo com classificação apresentada na Tab. 1, uma Micro Hidrelétrica. O sistema analisado é trifásico de baixa tensão e trabalha no modo isolado, ou seja, desconectado da rede da concessionária, na qual a CGH fornece eletricidade através de uma linha de distribuição para um conjunto de consumidores representados por uma carga desequilibrada. A Fig. 3 mostra um esquema do sistema estudado. Vale salientar que os parâmetros utilizados nesse estudo se baseiam em normas vigentes da agência reguladora e concessionária que mais se adequam ao cenário adotado.

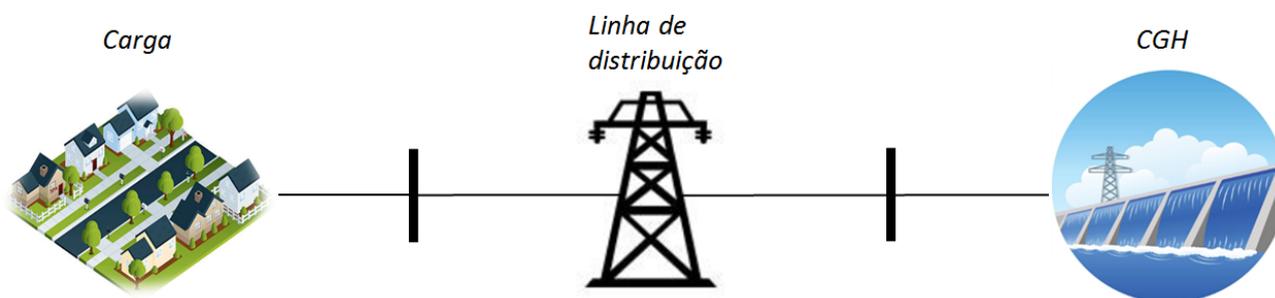


Figura 3 - Esquema do sistema

A ANEEL (2017) aborda a possibilidade de operação isolada de uma central geradora no Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição presente nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), desde que esteja de comum acordo entre a central geradora e a distribuidora de energia, bem como seja apresentado estudos que garantam a qualidade de energia e obedeça aos procedimentos operativos descritos no Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição do PRODIST.

Em relação aos controles de tensão e frequência, o Módulo 3 (ANEEL, 2017) e Módulo 4 (ANEEL, 2010) do PRODIST afirmam que estes controles devem existir em centrais geradoras com potência inferior a 300 kW e quando da operação das mesmas no modo isolado de forma permanente.

4.1 Especificações da CGH

A CGH utilizada nesse trabalho é do tipo trifásica conectada em estrela aterrada e fornece uma tensão de linha de 380 V diretamente conectada à linha de distribuição. A potência nominal do gerador é de 20 kVA, sendo assim classificada como microgeração distribuída de acordo com a ANEEL (2015).

Baseando-se na norma NOR.DISTRIBU-ENGE-0002 – Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição da COSERN (2016), em que estabelece que as microgerações distribuídas sem inversores devem trabalhar com

frequência entre 60,5 Hz e 59,5 Hz, o coeficiente do *droop* P-f foi ajustado em 1,65% e com frequência nominal de 60,5 Hz. Dessa forma, em vazio o gerador trabalha no limite superior da frequência permitida e em plena carga estabelece a frequência no limite inferior, respeitando assim os valores dispostos em norma.

O *droop* Q-V foi ajustado em 5%, ou seja, quando não houver nenhuma demanda de potência reativa sendo exigida pela carga, a tensão de linha nos terminais da máquina deverá ser próxima aos 380 V e quando houver a máxima demanda de potência reativa a tensão de linha será aproximadamente 361 V. A norma de conexão de microgeradores da COSERN (2016), estabelece que a tensão em condições normais de operação pode variar entre 80% e 110% do valor nominal. Como o valor nominal da tensão de linha adotado é 380 V, a tensão deve ficar entre 304 V e 418 V.

4.2 Especificações de linha de distribuição e carga

Com a função de transportar a energia gerada pela CGH até as cargas, foi adotada uma linha de distribuição com comprimento de 1 km e desconsiderou-se o efeito capacitivo da mesma, uma vez que pode-se adotar o modelo de linha curta sem perdas significativas nos resultados.

As cargas adotadas nesse estudo são trifásicas conectadas em estrela-aterrada, operando na faixa de tensão nominal 380V/220V. O sistema possui um carregamento aproximado de 75%, ou seja, tomando como base a potência da CGH, a potência das cargas corresponde à 15 kVA com fator de potência de 0,9 atrasado, sendo 13,50 kW de potência ativa e 6,54 kVAR de potência reativa indutiva. Como esse trabalho aborda o comportamento dos controles para um sistema desequilibrado, a Tab. 2 apresenta a distribuição das potências destinadas a cada fase. Os valores foram escolhidos para que o sistema possua um desequilíbrio de carga de +/-5% em relação ao valor que seria atribuído em caso de um sistema equilibrado.

Tabela 2 - Distribuição de potências entre as fases

| | Potência Ativa (W) | Potência Reativa (VAR) |
|--------|--------------------|------------------------|
| Fase A | 3.825 | 2.507 |
| Fase B | 4.500 | 2.180 |
| Fase C | 5.175 | 1.853 |

5. RESULTADOS

Os resultados para analisar o comportamento dos controles *droop* aplicados a uma CGH foram obtidos a partir de uma simulação computacional durante 2s. O sistema inicialmente foi simulado com a carga desequilibrada e posteriormente o sistema foi testado com carga equilibrada para fins de comparação. Os parâmetros em ambas simulações foram os apresentados na seção 4 desse trabalho.

5.1 Potência

A potência ativa e potência reativa obtidas na simulação do sistema desequilibrado podem ser observadas através das Fig. 4 e Fig 5, respectivamente. Vale ressaltar que os dados estão com seus valores em por unidade (pu), sendo 20 kVA o valor da potência de base.

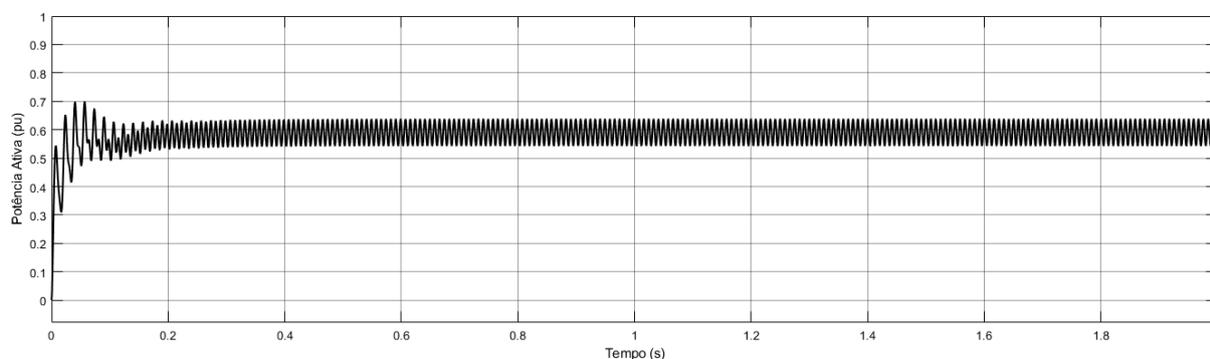


Figura 4 - Potência ativa para o sistema desequilibrado

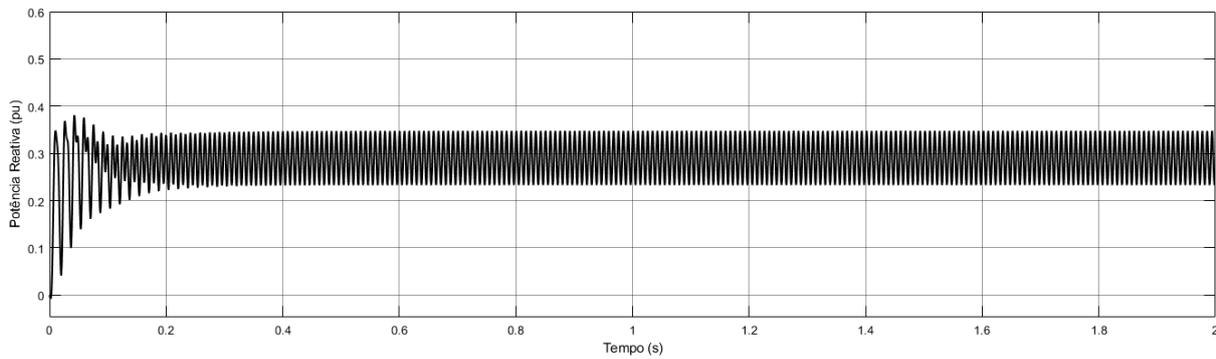


Figura 5 - Potência reativa para sistema desequilibrado

Analisando a Fig. 4 é possível observar que ocorre oscilação nos valores de potência ativa causada pelo desequilíbrio de potência entre as fases, sendo o valor máximo obtido de aproximadamente 0,64 pu e valor mínimo de 0,54 pu. Considerando um valor médio dentro dessa faixa, a potência ativa é aproximadamente 0,59 pu, o que equivale a 11,80 kW. Ressalta-se que o valor de potência fornecido é próximo do valor nominal da carga que é 13,5 kW, ou seja, 0,67 pu.

Já a potência reativa mostrada na Fig. 5 possui um gráfico com comportamento semelhante ao da potência ativa. Seu valor oscila entre 0,35 pu e 0,23 pu, apresentado valor médio de 0,29 pu, o qual equivale a 5,80 kVAR. Esse número é próximo ao demandado pela carga, que é de aproximadamente 0,33 pu.

5.2 Frequência

O controle *droop* P-f tem a função de estabilizar a frequência com base na sua relação com a potência ativa gerada pela CGH. A Fig. 6 apresenta o comportamento da frequência do sistema.

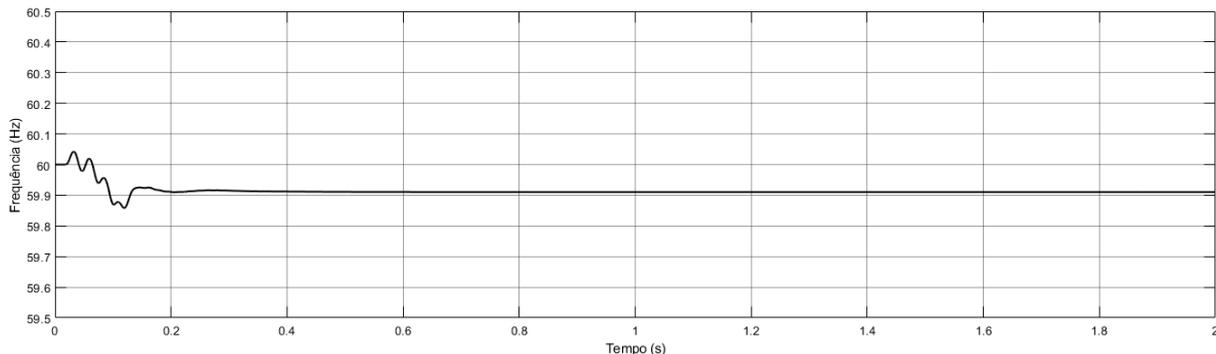


Figura 6 - Frequência

Analisando o comportamento da frequência, observa-se que o gráfico possui um período transitório que dura aproximadamente 0,2s, porém em nenhum momento seu valor encontra-se fora da faixa estabelecida por norma. Durante a simulação, o valor da frequência é estabilizado em 59,91 Hz, ficando próximo do valor ideal de 60 Hz. Considerando que o valor teórico de potência ativa do sistema é 0,67 pu, o valor em que a frequência deveria se estabilizar é 59,82 Hz. Isso não ocorre devido a potência ativa estar abaixo do seu valor nominal, elevando assim o valor correspondente de frequência, conforme as características de funcionamento do controle *droop* P-f.

5.3 Tensões

Analisa-se o parâmetro tensão para saber o comportamento do controle *droop* Q-V para a carga desequilibrada. As Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9 mostram as tensões em seus valores RMS nas fases A, B e C respectivamente.

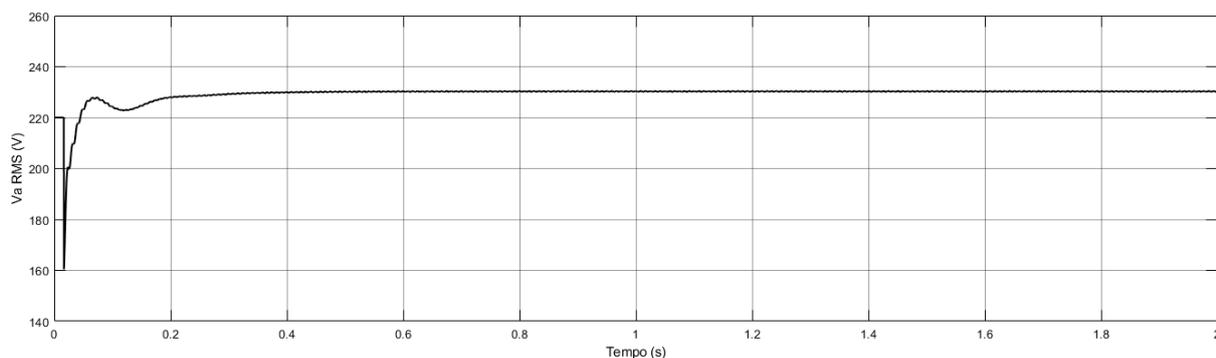


Figura 7 - Tensão RMS na fase A

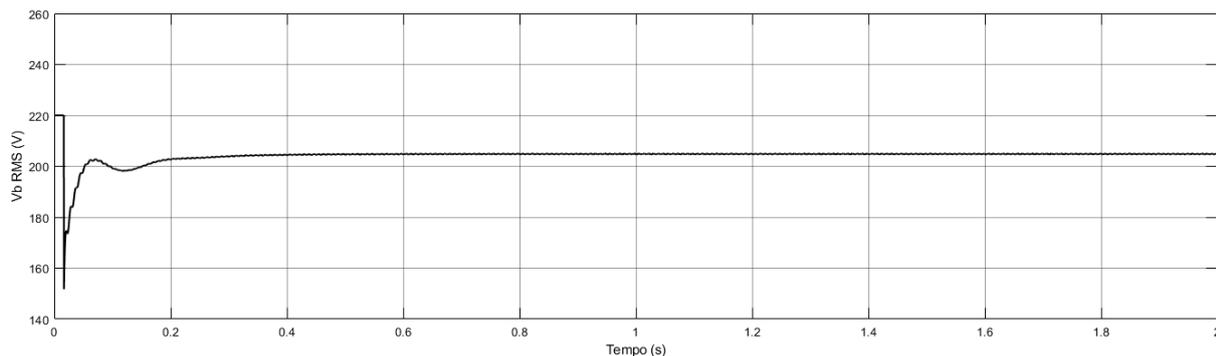


Figura 8 - Tensão RMS na fase B

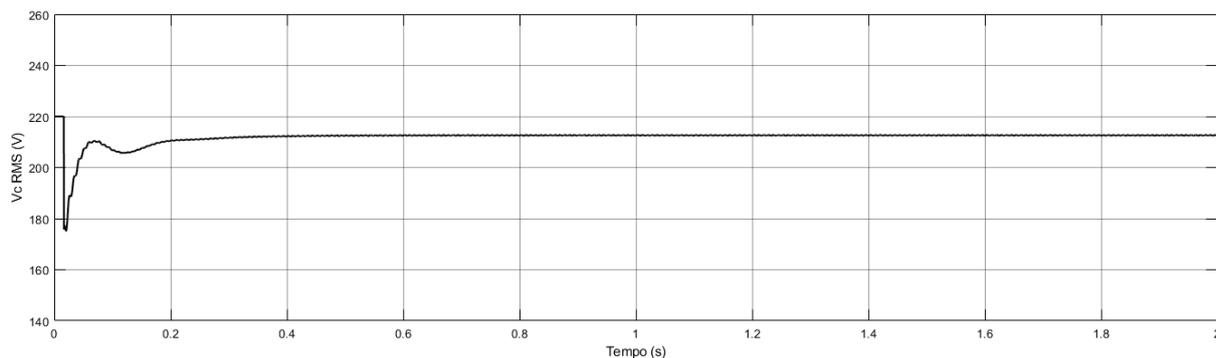


Figura 9 - Tensão RMS na fase C

Nota-se pelas tensões de fase que todas possuem um comportamento gráfico semelhante. Na fase A, que possui menor carregamento de potência ativa e o maior de potência reativa, observou-se dentro do regime transitório um valor mínimo de tensão aos 17ms de 160,70 V, porém a tensão em regime permanente foi de 230,20 V, sofrendo pequenas variações em torno desse valor. A tensão na fase B atingiu seu patamar mínimo aos 17ms apresentando um valor de 152 V, entretanto se tornou estável em um valor inferior ao da fase A, apresentando 204,85 V na simulação realizada para carga desequilibrada, sofrendo poucas variações em torno dessa medida. Já na fase C, a fase do sistema que possui maior carga de potência ativa e o menor de potência reativa, o valor da tensão apresentou seu valor mínimo em 175,10 V próximo aos 20ms, estabilizando seu valor em 212,75 V, sofrendo baixas variações.

Com relação às tensões de linha do sistema, a Fig. 10 mostra a forma de onda durante um curto intervalo de tempo, mas que reflete seu comportamento em regime permanente durante o período de simulação. A tensão V_{ab} apresenta valor máximo de amplitude de 531,10 V, com valor RMS de 375,75 V, sofrendo baixas variações em torno desse valor. Já a tensão V_{bc} possui valor máximo de 532,80 V e valor RMS aproximado em 374,55 V, com pequenas variações. A tensão de linha V_{ca} apresenta seu valor de pico sendo 520,20 e tensão RMS de 369,65 V, com alguma variação em torno dessa medida.

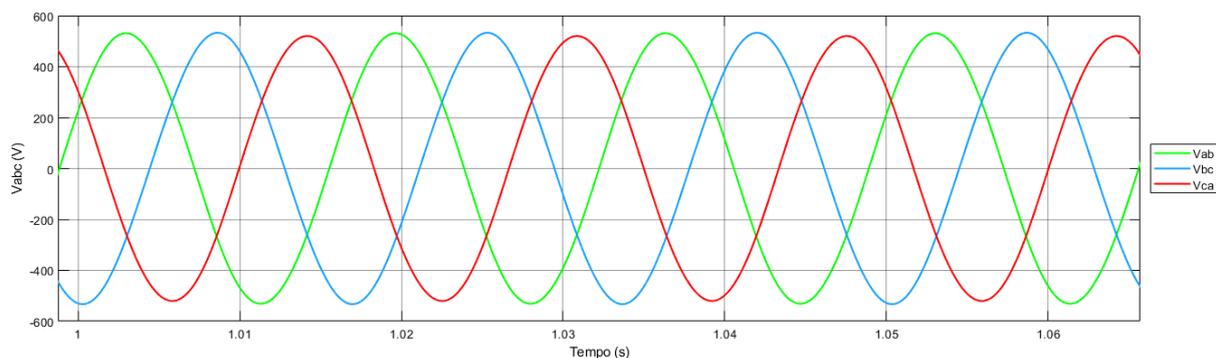


Figura 10 - Tensões de linha do sistema desequilibrado

Observando os gráficos das tensões do sistema, é importante ressaltar que o desequilíbrio de tensão é ocasionado pelo fato dos diferentes carregamentos de potências entre as fases, além da queda de tensão em relação ao valor nominal ser proporcionada pelo comportamento característico do controle *droop* a partir da potência reativa existente em cada fase.

A Tab. 3 mostra em resumo os valores RMS das tensões obtidas durante a simulação do sistema desequilibrado.

Tabela 3 - Valores RMS das tensões

| Parâmetro | Valor (V) |
|-----------|-----------|
| V_a | 230,20 |
| V_b | 204,85 |
| V_c | 212,75 |
| V_{ab} | 375,75 |
| V_{bc} | 374,55 |
| V_{ca} | 369,65 |

Com os valores das tensões de linha mostrados na Tab. 3 é possível calcular o fator de desequilíbrio de tensão presente no sistema a partir da aplicação da metodologia apresentada no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST (ANEEL, 2018). Portanto, o fator de desequilíbrio de tensão calculado com base nas tensões de linha do sistema é de aproximadamente 1,0%.

Com intuito de comparar o comportamento dos controles *droop*, o sistema foi simulado de forma que o montante de potência ativa e reativa fosse preservado, porém distribuído de forma igualitária entre as fases, ou seja, o sistema encontra-se equilibrado. Em princípio, o sistema foi simulado com a carga possuindo apenas potência ativa no valor total de 13,5 kW e após 1s de simulação foi introduzida a potência reativa de 6,54 kVAR. Objetivo é verificar a queda de tensão gerada pelo efeito da inserção de potência reativa, analisando assim o funcionamento do controle *droop* Q-V. A Fig. 11 mostra o comportamento das tensões de linha em seus valores RMS.

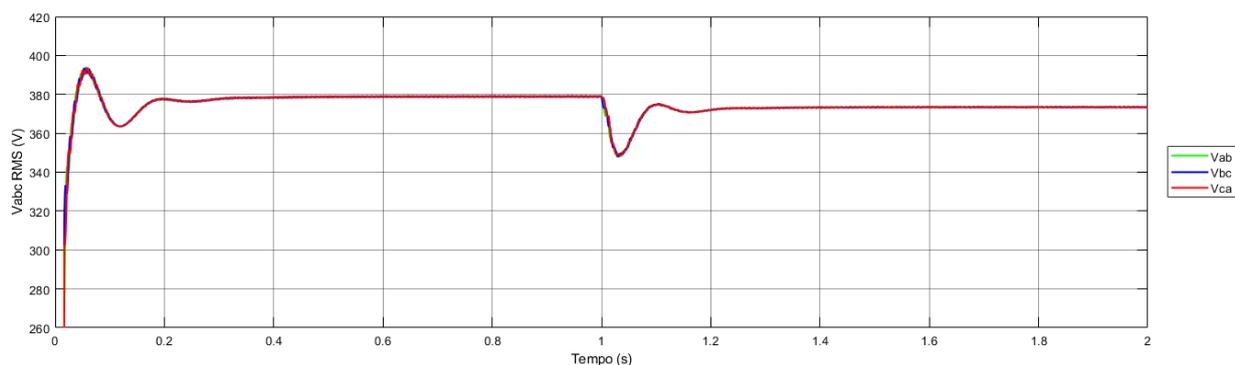


Figura 11 – Tensões de linha RMS para um circuito equilibrado com transição de potência ativa-reativa

Inicialmente, o nível das tensões de linha observado é de 378,85 V com pequenas variações em torno desse valor, estando próximo do valor nominal de 380 V. Como o sistema é equilibrado, o mesmo valor foi obtido em todas as tensões de linha, fato que pode ser observado pela sobreposição dos sinais na Fig. 11. Decorridos 1s de simulação e com a inserção de potência reativa, verificou-se uma queda de tensão de 5,45 V em cada tensão de linha, atingindo o valor de 373,40 V. Para um valor de potência reativa nominal da carga de 0,33 pu e tensão de linha nominal de 380 V, previa-se uma queda de tensão teórica motivada pelas características do *droop* Q-V de aproximadamente 6,2 V. Isso não ocorre

devido a potência consumida pela carga ser de aproximadamente 0,29 pu e a tensão estar próxima do seu valor nominal. Não foi observada alterações na frequência no sistema equilibrado, mantendo assim o mesmo valor, ou seja, 59,91 Hz em regime permanente e comportamento do sistema desequilibrado.

6. CONCLUSÃO

Diante do que foi apresentado, é possível concluir que os controles *droop* são uma forma adequada de controlar frequência e tensão em um sistema que trabalha de forma isolada, ou seja, desconectado da rede de distribuição da concessionária.

Com relação ao comportamento do *droop* P-f em um sistema com cargas desequilibradas, observou-se que a frequência se manteve dentro dos limites adequados, tomando como referência os valores estabelecidos em normas vigentes. A comparação foi realizada através da simulação de um sistema equilibrado, mantendo a mesma potência ativa utilizada no sistema desequilibrado, e verificou-se que o controle *droop* P-f não sofreu qualquer alteração, portanto, estabilizando a frequência no mesmo nível em ambas situações.

Analisando o parâmetro tensão e o funcionamento do controle *droop* Q-V, foi visto que os desequilíbrios das tensões são decorrentes dos diferentes valores de potência entre as fases do sistema e que as características do controle *droop* contribuem para gerar uma queda de tensão de acordo com a interação entre tensão e potência reativa.

Considerando um sistema equilibrado como o ideal para o funcionamento de um sistema elétrico, e observando o caso analisado nesse trabalho em que o valor da tensão de linha de 378,85 V é a tensão sem influência de desequilíbrios gerados pela carga ou interferência do controle *droop* Q-V, como mostrado na simulação do sistema com cargas equilibradas, verifica-se que uma queda de 5,45 V na tensão de linha influenciada pela inserção de potência reativa mostrada na Fig. 11, seguindo as características do controle *droop*. Já para o sistema desequilibrado, houve uma diferença de tensão de 3,1 V, 4,3 V e 9,2 V, nas tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , respectivamente, em relação à tensão de linha nominal causados pelo efeito conjunto do desbalanceamento das tensões e do controle *droop*.

Outro parâmetro analisado foi o fator de desequilíbrio de tensão, tendo sido obtido um valor de aproximadamente 1,0%, encontrando-se dentro dos limites indicados em norma, uma vez que o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) afirma que o grau de desequilíbrio deve estar abaixo de 3,0% para sistemas com tensões nominais inferiores a 1 kV.

De modo geral, os valores das variáveis analisadas ficaram próximos dos valores nominais e permaneceram dentro dos limites estabelecidos seguindo as normas adotadas como parâmetro, tendo como base as circunstâncias adotadas nesse trabalho. Pôde ser visto que o controle *droop* Q-V aplicado a uma CGH que fornece energia ao sistema desequilibrado em questão, teve seu desempenho afetado pelo desequilíbrio de tensão gerado pela carga, não permanecendo com as mesmas características do controle *droop* observadas em um sistema equilibrado, enquanto o controle *droop* P-f manteve seu desempenho inalterado.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, Morad M. A.; EL-SAADANY, Ehab F.; SEETHAPATHY, Ravi. Assessment of droop-controlled islanded microgrid maximum loadability. 2013 Ieee Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, jul. 2013. IEEE.
- ABRAPCH. Associação Brasileira de PCHs e CGHs. O que são PCHs e CGHs. 2019. Disponível em: < <http://www.abrapch.org.br> >. Acesso em: 04 nov. 2019.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Cadernos temáticos da ANEEL - Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed - Brasília : ANEEL, 2016.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. Brasília: ANEEL, 2017. 7º rev., 74p.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição. Brasília: ANEEL, 2ª rev., 2010. 27p.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 10ª rev., 2018. 88p.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 687. Brasília: ANEEL, 2015. 26p.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída: Unidades consumidoras com geração distribuída com Tipo de Geração: CGH. 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- BREEZE, Paul. Power Generation Technologies. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2019. 449 p.
- COPEL. Companhia Paranaense de Energia. Geração Distribuída. 2019. Disponível em: < <http://www.copel.com> >. Acesso em: 04 nov. 2019.
- COSERN. Companhia Energética do Rio Grande do Norte. Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição – NOR.DISTRIBU-ENGE-0002. COSERN, 2016.
- GRIFFITHS, Michaela; COATES, Colin. Behaviour of microgrids in the presence of unbalanced loads. 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, Perth, dez. 2007. IEEE.
- HU, Jinhang et al. An improved droop control strategy of energy storage system for unbalanced load in micro-grid. 2016 Ieee 8th International Power Electronics And Motion Control Conference (ipemc-ecce Asia), Hefei, maio 2016.

- IHA. International Hydropower Association. Hydropower Status Report – sector trends and insights: IHA, 2019. 56p.
- INEE. Instituto Nacional de Eficiência energética. O que é Geração Distribuída. 2019. Disponível em: < <http://www.inee.org.br> >. Acesso em: 04 nov. 2019.
- IRENA. International Renewable Energy Agency. Renewable Capacity Statistics 2018: IRENA, 2018. 60p.
- LAGATTA, Paula Oliveira. Um novo modelo para representação da regulação primária e secundária de frequência no problema de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo. 2012. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- SENANAYAKA, Jagath Sri Lal. Power Dispatching of Active Generators using Droop Control in Grid Connected Micro-grid. 2014. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia e Ciência, Universidade de Agder, Grimstad – Noruega, 2015.
- SOSNOSKI, André Sandor Kajdacsy Balla. Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água. 2015. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Analysis of Droop Control applied to a Micro-Hydropower Plant for Unbalanced Load System

Abstract. *This paper presents an analysis of droop P-f and droop Q-V controls behavior as they are applied to a micro-hydropower plant that feeds an unbalanced load in a low voltage system, operating in island mode, this means disconnected from the distribution network. The action of the controls to maintain voltage and frequency levels is evaluated, verifying if the values of these variables are within the limits established in current standards. In this study, a simulation of the system was performed and results obtained through a computational simulation shows that, for the level of load imbalance adopted, the controls sustains voltage and frequency within the acceptable limits. Presenting simulation data of a balanced load system, the values obtained are compared in order to demonstrate the difference in both situations.*

Key words: *Micro-Hydropower plant, Droop control, Unbalanced loads*