

# Controle Linear Aplicado a uma Nanorrede de Corrente Contínua que Opera em Modo Ilhado Utilizando Modelo Médio de Pequenos Sinais

Felipe M. L. dos Santos\*, Fernando A. Moreira\*  
Felipe M. de Vasconcellos\*, José Renes Pinheiros\*/\*\*

\* *Electrical Engineering Department, Federal University of Bahia, BA  
Brazil* ([felipemls@ufba.br](mailto:felipemls@ufba.br); [moreiraf@ufba.br](mailto:moreiraf@ufba.br); [felipe.vasconcellos@ufba.br](mailto:felipe.vasconcellos@ufba.br), [jose.renes@ufba.br](mailto:jose.renes@ufba.br)).

\*\* *Electrical Power Processing Department, Federal University of Santa Maria, RS  
Brazil* ([jrenes@gepoc.ufsm.br](mailto:jrenes@gepoc.ufsm.br)).

---

**Abstract**— Direct current (DC) nanogrid have emerged in recent years as an alternative to the growing energy demand of consumer units. For direct current nanogrids, as well as all systems that operate in island mode, the instantaneous power balance is of great importance to keep the bus voltage within the design limits. To this end, in this work the system is linearized (intrinsically non-linear), thus allowing the application of classical control techniques. Therefore, the modeling is done using known techniques of the small signal average model to obtain the transfer functions necessary to control the DC voltage of the nanogrid bus. Additionally, a control system is designed and operating ranges are obtained where the system's stability is guaranteed. The nanogrid is then tested through simulations to validate the proposed control system as well as the stability analysis.

**Resumo**— As nanorredes de corrente contínua (CC) surgiram, nos últimos anos, como alternativa à crescente demanda energética das unidades consumidoras. Para nanorredes de corrente contínua, bem como todos os sistemas que operam em modo ilhado, o balanço instantâneo de potência é de grande importância para manter a tensão do barramento dentro dos limites de projeto. Para tal, nesse trabalho é feita a linearização do sistema (intrinsecamente não-linear), assim possibilitando a aplicação de técnicas clássicas de controle. Portanto, faz-se a modelagem através de técnicas conhecidas do modelo médio de pequenos sinais para obter as funções de transferência necessárias ao controle da tensão CC do barramento da nanorrede. Adicionalmente, projeta-se um sistema de controle e são obtidas as faixas de operação onde a estabilidade do sistema é garantida. A nanorrede é então testada através de simulações para validar o sistema de controle proposto bem como a análise da estabilidade.

**Keywords**— Nanogrids; Voltage Control; Distributed Generation; Island mode.

**Palavras-chave**— Nanorrede; Controle de tensão; Geração Distribuída; Modo ilhado.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As nanorredes (NR) emergiram nos últimos anos como uma possível solução de Geração Distribuída para a constante demanda energética mundial. As nanorredes, sistemas com potência instalada entre 10 kW e 100 kW (Boroyevich, *et al.*, 2012) (Santos, 2018), introduziram um novo conceito ao sistema elétrico de potência (SEP) ao fazer com que parte da energia demandada seja gerada próxima (ou na própria unidade) dos consumidores.

Através da geração por meio de fontes renováveis e um sistema de armazenamento de energia (SAE), as NR possibilitam não apenas o fornecimento da demanda de unidades consumidoras (UCs) como também uma melhora significativa da eficiência do fornecimento de energia. As NR podem operar tanto em corrente contínua (CC) como em corrente alternada (CA).

As nanorredes CC apresentam a vantagem de não enfrentarem os problemas inerentes do controle da frequência dos sistemas CA tais como o controle de reativos e a necessidade de sincronização com a frequência da rede elétrica externa (Zhao, *et al.*, 2017). Adicionalmente, em uma nanorrede CC o balanço entre as potências gerada e demandada reflete na variação da tensão do barramento, e, portanto, manter essa tensão em um valor desejado (dentro dos limites toleráveis de projeto) é realizar o balanço instantâneo de potências no sistema (Zhao, *et al.*, 2017).

Uma NR pode operar tanto conectada com a rede elétrica externa (modo conectado) como desconectada da mesma (modo ilhado). Quando opera em modo conectado, a tensão do barramento na NR é controlada principalmente pelo conversor bidirecional responsável pela conexão entre a NR e a rede externa. Para tal situação, o controle da tensão geralmente não enfrenta problemas com limitação de potência das fontes de energia como acontece para o modo ilhado (Tahim, 2015). Assim, o

presente trabalho aborda apenas o caso do controle da tensão para uma NR operando em modo ilhado, uma vez que se trata do caso mais crítico.

Considerando essa limitação de potência, é necessário obter-se as faixas de operação para as quais o sistema de controle é capaz de assegurar a estabilidade da NR. Para determinar essas faixas, é feita a análise das funções de transferência (FTs) de malha fechada e malha aberta do controle da tensão do barramento.

Para utilização de técnicas clássicas de controle linear, o sistema precisa ser modelado adequadamente. Dessa forma, é feita, inicialmente, a análise pelo modelo comutado (não-linear) através do qual é obtido o modelo médio de pequenos sinais (MMPS), que é um modelo linearizado, para realização do projeto do sistema de controle. Para validação do modelo escolhido, são feitas análises das FTs do sistema.

Como forma de verificação final, é feita uma simulação do controle desenvolvido e aplicado ao modelo comutado. Assim, o objetivo do presente trabalho é mostrar como obter as FTs necessárias ao controle de uma NR de corrente contínua que opera em modo ilhado através de sua representação pelo modelo médio de pequenos sinais, com o intuito de projetar um sistema de controle linear que seja capaz de manter a tensão do barramento regulada. Como contribuição final, são obtidas as faixas de operação onde a estabilidade da nanorrede é garantida como função dos ganhos dos controladores lineares projetados, bem como dos parâmetros da NR.

## 2. MODELAGEM DA NANORREDE

### 2.1 Estrutura do sistema

Uma nanorrede operando em modo ilhado tem seu controle principal através do sistema de armazenamento de energia. No presente trabalho, esse sistema é composto por um conjunto de baterias. Alguns trabalhos também consideram um conjunto de supercapacitores como parte do SAE (Grillo, et al., 2013). (Sun, et al., 2011) A nanorrede a ser analisada e controlada/regulada é composta de:

- Uma fonte de tensão  $v_B$  representando um banco de baterias;
- Um conversor bidirecional;
- Uma resistência  $R$  representando as cargas resistivas presentes na nanorrede;
- Uma carga/fonte de potência constante  $P$  representando o somatório entre as potências consumida pelas cargas de potência constante (*Constante Power Loads - CPL*) e injetada pelas fontes renováveis de energia;

O sistema completo é ilustrado na Fig. 1:

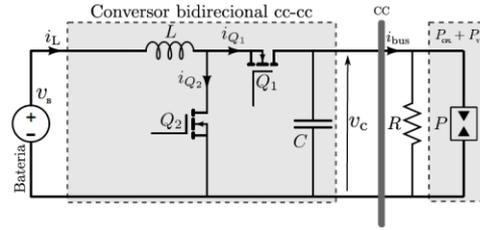


Fig. 1 Nanorrede CC em modo Ilhado

Para a carga/fonte de potência  $P$ , tem-se que:

$$P = P_{CPL} + P_V = kP_R = k \frac{v_C^2}{R} \quad (1)$$

Onde  $P_{CPL}$  representa a potência consumida pelas cargas de potência constante ( $P_{CPL} < 0$ ) e  $P_V$  é a potência extraída das fontes renováveis de energia injetada no sistema ( $P_V > 0$ ). O  $P_R$  representa a potência do resistor  $R$  e  $k$  representa uma relação de proporcionalidade entre  $P$  e  $P_R$ .

Portanto, um dos objetivos do presente trabalho é analisar o comportamento do sistema de controle da NR para variações da potência  $P$ , obtendo assim a faixa de valores para os quais a estabilidade da NR é garantida, visto que a presença das CPL, que são cargas não-lineares, pode levar a NR à instabilidade. Assim, a influência exercida pela presença das CPL nas FTs da NR e sob o comportamento do sistema é analisada através dos valores de  $k$  (conforme (1)).

Adicionalmente, é realizada a regulação da tensão  $v_C$  do barramento através do controle de injeção/absorção de energia por parte do sistema de armazenamento de energia. Para tanto, faz-se necessário o controle da corrente  $i_L$  da bateria através do controle da comutação do conversor buck-boost.

Para a modelagem do sistema e consequente obtenção das FTs necessárias ao controle, algumas abordagens encontradas na literatura são: a modelagem pelo modelo médio do espaço de estados (Sun, et al., 2011) (Zhao, et al., 2017) e pelo modelo médio de pequenos sinais (Eghtedarpour & Farjah, 2013).

Optou-se pelo modelo médio de pequenos sinais por considerar sua abordagem mais intuitiva e que oferece uma aproximação satisfatória do modelo real (não-linear) para as baixas frequências (menores que a frequência de Nyquist) (Erickson & Maksimovic, 2004). Uma breve análise pelo MMPS sinais é mostrada a seguir.

### 2.2 Modelagem pelo MMPS

Considerando o modelo ilustrado na Fig. 1, temos que a operação dos transistores de potência  $Q1$  e  $Q2$  ocorre de forma síncrona e complementar, ou seja, quando  $Q1$  está conduzindo ( $Q1=ON$ ) a chave  $Q2$  se encontra aberta ( $Q2=OFF$ ) e vice-versa.

Graças à presença desses dispositivos de comutação, bem como das CPL, o sistema apresenta um comportamento não-linear. Considerando que estratégias clássicas de controle requerem ser representadas por um modelo linear, faz-se

necessária a linearização do mesmo através do MMPS. O sistema da Fig. 1 possui dois estados topológicos, conforme ilustram as Figs. 2 e 3. Para o caso em que Q2 conduz e Q1 está aberto, o circuito assume a configuração ilustrada na Fig. 2:

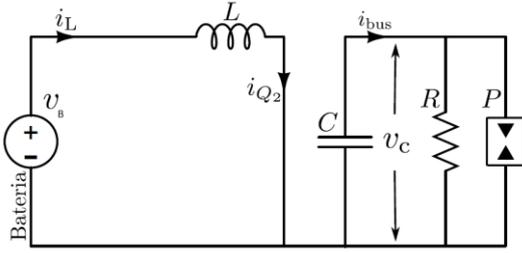


Fig. 2 Configuração da Nanorrede em que Q2 conduz e Q1 está aberto.

Para essa configuração obtemos as seguintes dinâmicas através da análise de malha e nós do circuito da Fig. 2:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_B) \quad (2.1)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{1}{C}\left(\frac{v_C}{R} + \frac{P}{v_C}\right) \quad (2.2)$$

Para o caso em que Q2 está aberto e Q1 está conduzindo, o circuito assume a configuração da Fig. 3:

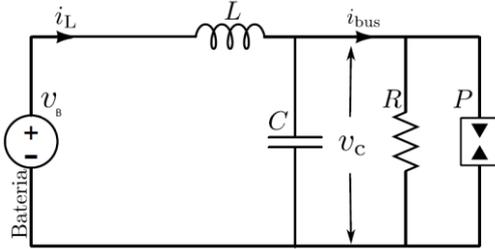


Fig. 3 Configuração da Nanorrede para Q2 está aberto e Q1 conduz.

Através das mesmas análises de malha e nó da Fig. 3, obtêm-se as equações:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_B - v_C) \quad (3.1)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{v_C}{R} - \frac{P}{v_C}\right) \quad (3.2)$$

Através de (2.1), (2.2), (3.1) e (3.2) é possível obter o modelo comutado dado por:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_B - (1-u)v_C) \quad (4.1)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}\left((1-u)i_L - \frac{v_C}{R}(1-k)\right) \quad (4.2)$$

Em que  $u$  é a variável de comutação que pode assumir os valores 0 ou 1, sendo que para  $u = 0$  temos o circuito da Fig. 3 e para  $u = 1$  temos o circuito da Fig. 2. Esse é o modelo comutado (não-linear) a ser simulado no software MATLAB® /

SIMULINK. Contudo, para o projeto do sistema de controle proposto faz-se necessária a linearização do sistema descrito em (4.1) e (4.2). Para tal, é utilizada a aproximação de pequenos sinais que resulta na obtenção do MMPS (linear) (Erickson & Maksimovic, 2004). Essa linearização é feita analisando-se pequenas variações em torno de um ponto de operação ( $I_L, V_C$ ) (Santos, 2018).

O MMPS obtido como resultado dessa linearização fornece as FTs características da NR em modo ilhado e necessárias para o projeto do sistema de controle. São elas:

$$G_{v_B}(s) = \frac{\Delta v_C(s)}{\Delta v_B(s)} = \frac{1}{(1-D)} \frac{1}{1 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)s + \left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)s^2} \quad (5.1)$$

$$G_{v_{iL}}(s) = \frac{\Delta v_C(s)}{\Delta i_L(s)} = \frac{1}{(1-D)} \frac{R(1-D)^2 - L(1-k)s}{RCs + 2(1-k)} \quad (5.2)$$

$$Z_{out}(s) = -\frac{\Delta v_C(s)}{\Delta i_{BUS}(s)} = -\frac{1}{(1-D)^2} \frac{Ls}{1 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)s + \left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)s^2} \quad (5.3)$$

$$G_{i_{Ld}}(s) = \frac{\Delta i_L(s)}{\Delta d(s)} \quad (5.4)$$

$$= \frac{V_B}{R(1-D)^3} \frac{RCs + 2(1-k)}{1 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)s + \left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)s^2}$$

$$\omega_0 = \frac{(1-D)}{\sqrt{LC}} \quad (5.5)$$

$$\xi = \frac{(1-k)}{2R(1-D)} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.6)$$

Em que  $i_{BUS}$  é a corrente do barramento e a variável  $d$  representa a razão cíclica que é o valor médio da variável  $u$ . Adicionalmente  $V_B, V_C, I_L$  e  $D$  representam os valores no ponto de operação e  $\Delta v_B, \Delta v_C, \Delta i_L$  e  $\Delta d$  representam as pequenas perturbações (CA) de  $v_B, v_C, i_L$  e  $d$  respectivamente, bem como  $\Delta i_{BUS}, \xi$  e  $\omega_0$  representam, respectivamente, a variação de pequenos sinais da corrente do barramento, o fator de amortecimento e a frequência natural não-amortecida do sistema.

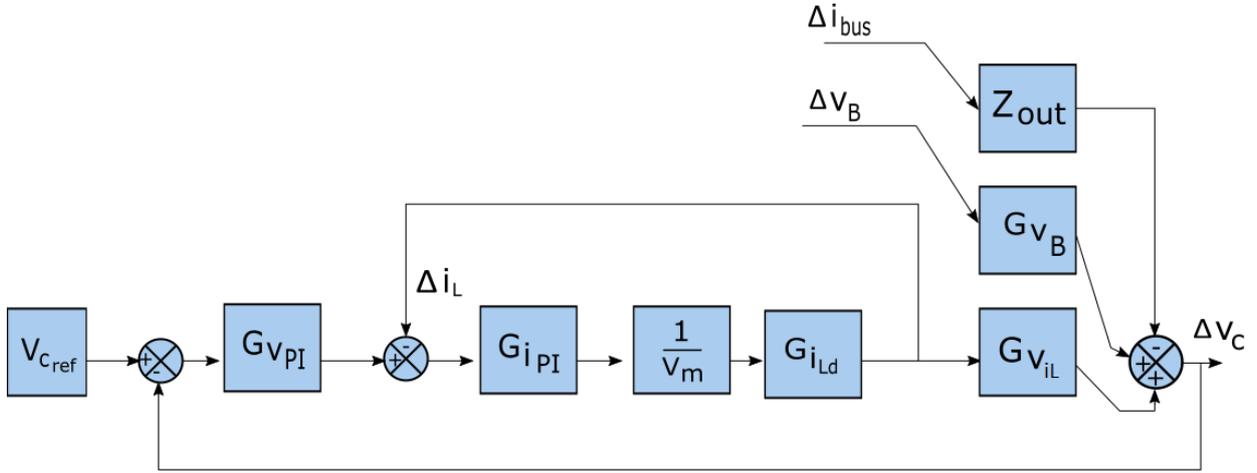
Uma vez que as perturbações são pequenas, considera-se que os valores no ponto de operação são muito maiores do que os valores das perturbações (Erickson & Maksimovic, 2004).

### 3. CONTROLE DA NANORREDE

#### 3.1 Obtenção do diagrama de controle

Essas FTs são necessárias uma vez que o objetivo central do presente trabalho é o controle da tensão do barramento  $v_C$ . Assim, é preciso saber quais variáveis podem provocar variações em  $v_C$ . Para o sistema em estudo, essas variáveis são  $v_B, d, i_L$  e  $i_{BUS}$  (através da variação de  $P$  por intermédio de  $k$ ).

O controle atuará através de variações na razão cíclica  $\Delta d$  em torno do ponto de operação para compensar as variações



provocadas em  $v_C$ . Faz necessária, assim, a obtenção das funções de transferência de  $v_C$  em relação as variáveis  $v_B$  e  $d$ , bem

como a FT que representa a impedância de saída do sistema ( $Z_{out}$ ).

Fig. 4: Diagrama de Blocos do Controle

Conforme mencionado anteriormente, o principal responsável pelo controle de uma nanorede que opera em modo ilhado está no SAE. Contudo, o problema de controlar a tensão  $v_C$  do barramento também requer o controle da corrente  $i_L$  das baterias. Isso pode ser observado considerando-se que para a regulação da tensão  $v_C$  o controlador deve extrair/injetar corrente no sistema de armazenamento de energia.

Como é possível observar, no diagrama de controle da Fig. 4 há a uma malha interna para o controle da corrente e uma malha externa para o controle da tensão (conforme comentado anteriormente).

Através do projeto dos controladores  $G_{iPI}$  e  $G_{vPI}$ , é possível escolher ganhos de tal forma que a dinâmica da malha interna de controle da corrente seja mais rápida que a dinâmica da malha de controle da tensão, melhorando assim a resposta do sistema de controle da NR. As funções  $G_{iPI}$  e  $G_{vPI}$  correspondem respectivamente aos controladores PI utilizados para o controle da corrente  $i_L$  e da tensão  $v_C$ , e são dados por:

$$G_{iPI}(s) = k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \quad (6.1)$$

$$G_{vPI}(s) = k_{vp} + \frac{k_{vi}}{s} \quad (6.2)$$

Vale ressaltar que esses controladores exercem papel fundamental uma vez que o sistema não tem capacidade de se autorregular para variações de carga. Assim, através da variação da razão cíclica ( $\Delta$ ) o sistema de controle regula a tensão no barramento quando em momentos de variações de carga e distúrbios externos que possa causar variações ao sistema.

Adicionalmente, sem esses controladores o sistema pode apresentar comportamento instável. Essa instabilidade é causada pela presença das cargas de potência constante (Tahim, 2015). Graças ao sistema de controle, portanto, é garantida a estabilidade do sistema para determinadas faixas da potência  $P$  (através dos valores de  $k$ ). No diagrama da Fig. 4,  $V_m$  representa o valor de pico da onda portadora do PWM (*Pulse Width*

*Modulation*). Baseado nesse diagrama, é feita a análise para obtenção da função de transferência de malha fechada do sistema  $T_{MF}(s)$ . Para tal, entretanto, é preciso antes simplificar o sistema através da função de transferência de malha fechada de corrente dada por:

$$T_{iMF}(s) = \frac{G_{iPI}G_{iLd}}{V_m + G_{iPI}G_{iLd}} \quad (7)$$

Analisando a estabilidade de  $T_{iMF}(s)$  através do critério de Routh-Hurwitz tem-se que a FT do controle de corrente é estável, considerando  $k=0$ , para:

$$k_{ip} > 0 \quad (8.1)$$

$$k_{ii} > 0 \quad (8.2)$$

Para obtenção dos valores de  $k_{vi}$  e  $k_{vp}$ , é necessária antes a obtenção das FTs da malha de tensão. Sendo  $T(s)$  e  $T_{MF}(s)$ , respectivamente, as FTs de malha aberta e malha fechada para o controle da tensão, tem-se:

$$T(s) = G_{vPI} T_{iMF} G_{vIL} \quad (9.1)$$

$$T_{MF}(s) = \frac{T(s)}{1 + T(s)} \quad (9.2)$$

Para obter as FTs  $T(s)$  e  $T_{MF}(s)$  considera-se que, uma vez projetados os ganhos  $k_{ii}$  e  $k_{ip}$  da malha de corrente, o controle se torna estável e, assim, é possível substituir  $T_{iMF}(s) = 1$  em (9). Essa consideração pode ser feita devido ao fato de a dinâmica da malha de controle da corrente ser mais rápida do que a da malha de controle da tensão, quando os controladores são projetados para tal. Desenvolvendo as FTs descritas em (9.1) e (9.2) e aplicando o critério de Routh-Hurwitz a  $T_{MF}(s)$  tem-se que a FT do controle da tensão  $v_C$  do barramento  $T_{MF}(s)$  é estável para:

$$0 < k_{vp} < \frac{RC(1-D)}{L(1-k)} \quad (10.1)$$

$$0 < k_{v1} < \frac{2(1-D)}{L} + \frac{k_{vp}R(1-D)^2}{L(1-k)} \quad (10.2)$$

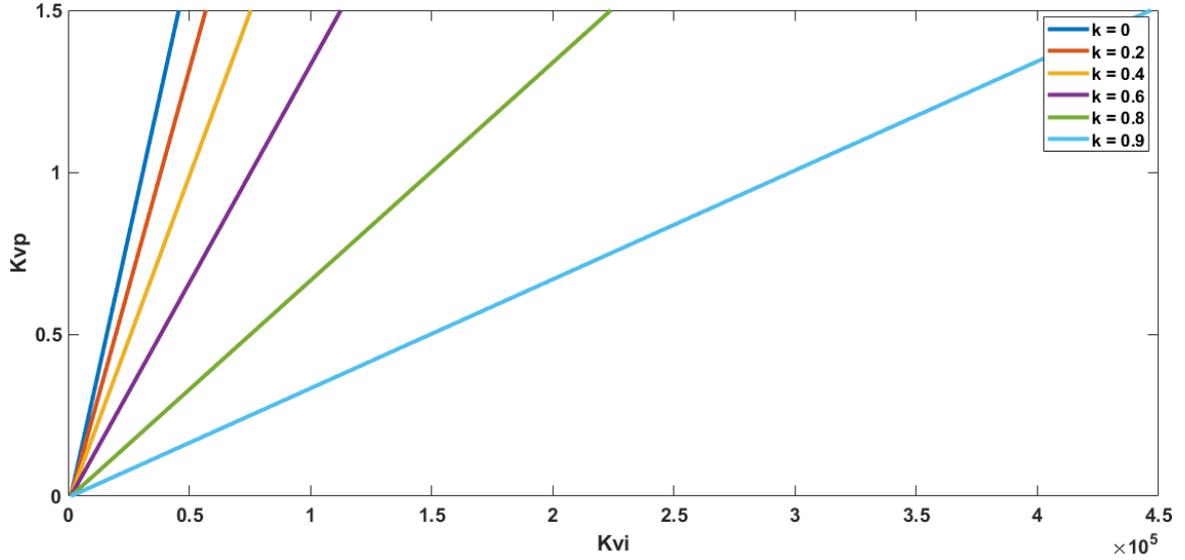


Fig. 5 Variação de  $k_{vp}$  em função de  $k_{v1}$  para diferentes valores de  $k$

A escolha dos valores dos ganhos dos controladores exerce influência sob as variações de carga da NR, principalmente das CPL. A Fig. 5 ilustra a variação dos valores de  $k_{vp}$ , em função de  $k_{v1}$ , para os diferentes valores de  $k$ .

considerando os níveis de tensão de bancos de bateria, bem como níveis de tensão padronizados para barramentos CC (Tahim, 2015) (Santos, 2018):

### 3.2 Limites de variações de carga da NR

Todo sistema de controle tem uma região de operação. Fora dessa região, o controle não é garantido e o sistema pode atingir uma instabilidade. Para nanorredes CC em modo ilhado, essa região depende dos valores de  $k$ , para determinados ganhos  $k_{vp}$  e  $k_{v1}$ .

Uma vez que o sistema de controle tenha sido projetado adequadamente, os valores de  $k$  que mantem a NR na região de estabilidade são descritos conforme (11):

$$1 - \frac{RC(1-D)}{Lk_{vp}} < k < 1 + \frac{k_{vp}R(1-D)^2}{2(1-D) - Lk_{v1}} \quad (11)$$

Através de (11), é possível perceber a influência dos ganhos dos controladores de tensão para os limites superior e inferior das variações de  $k$ . Fora dessa região, o sistema de controle não é capaz de assegurar a estabilidade da NR.

## 4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para os resultados das simulações obtidos a seguir, foram utilizados os seguintes parâmetros para a nanorrede,

Tabela 1. Configuração da Nanorrede para Q1 fechado e Q2 aberto.

Parâmetro	Valor
$V_B$	160 V
$V_C$	400 V
$L$	700 $\mu$ H
$C$	100 $\mu$ F
$R$	130 $\Omega$
$f_{ch}$	100 kHz
$V_m$	1V

Em que  $f_{ch}$  representa a frequência de comutação dos dispositivos Q1 e Q2 (Fig. 1),  $V_m$  representa o valor de pico da onda do PWM. Vale ressaltar que, para que o MMPS obtido possa ser utilizado, a influência dos harmônicos produzidos pela ação dos comutadores Q1 e Q2 precisa ser desprezível, o que é obtido utilizando-se valores de  $f_{ch} > 5\omega_0/\pi$  (Erickson & Maksimovic, 2004). As simulações se iniciam com  $k = 0$  ( $P = 0$ ). As variações de  $k$  são feitas em instantes de tempo diferentes, simulando as variações que podem ocorrer na NR.

Através da análise das FTs  $T(s)$  e  $T_{MF}(s)$  (com auxílio do MATLAB), bem como da relação entre  $k_{vP}$  e  $k_{vI}$  e a influência destes para os limites de  $k$  foram projetados os controladores (para a regulação da tensão do barramento) dados por:

$$G_{vPI}(s) = 0,110 + \frac{100}{s} \quad (12.1)$$

$$G_{iPI}(s) = 30 + \frac{50}{s} \quad (12.2)$$

#### 4.1 Influência das CPL para a Estabilidade

Com as informações acima descritas e com auxílio de uma rotina criada e implementada no software MATLAB®, é possível analisar a influência da variação dos valores de  $k$  para resposta ao degrau da FT de malha fechada  $T_{MF}$ , conforme ilustra a Fig. 6.

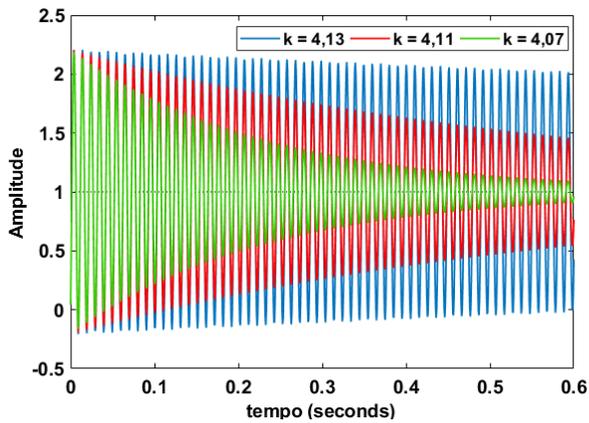


Fig. 6 Resposta ao degrau de  $T_{MF}$  para variações de  $k$

Para os controladores projetados conforme (12.1) e (12.2), os limites dos valores de  $k$ , calculado através de (11), é  $-66,5325 < k < 4,14$ . Isso significa que o controle projetado não consegue mais estabilizar a NR quando  $k \geq 4,14$  ou  $k \leq -66,5325$ . Esse limite superior pode ser verificado através das Figs. 6 e 7, em que a constante de tempo do sistema aumenta significativamente à medida que  $k$  se aproxima de 4,13 (limite de estabilidade), ou seja, o tempo para a resposta ao degrau atingir o valor unitário se torna maior.

Como é possível observar na Fig. 6, para valores de  $k > 4$ , próximos do limite superior de estabilidade de 4,13, pequenas variações de  $k$  provocam grandes variações na resposta ao degrau de  $T_{MF}$ . A resposta ao degrau de  $T_{MF}$  atinge a instabilidade para  $k = 4,14$ , conforme a Fig. 7.

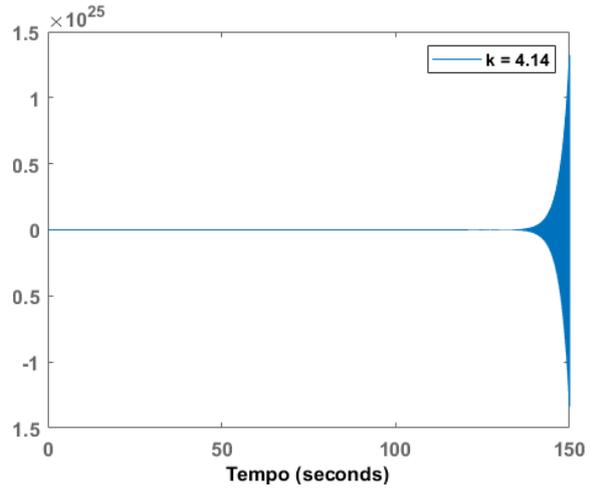


Fig. 7 Resposta ao degrau de  $T_{MF}$  para  $k = 4,14$

Os valores positivos de  $k$  ( $P_v > P_{CPL}$ ) são regulados, na prática, pelo controlador das fontes renováveis de energia. Quando a energia injetada por essas fontes na nanorrede excede a demanda interna das cargas, o SAE deve absorver, quando possível, a energia excedente através das baterias. Contudo, quando o SAE não é capaz de absorver esse excedente, como quando as baterias e supercapacitores estão carregadas, a tensão  $v_C$  começa a se elevar e, então, o controlador das fontes renováveis reduz a quantidade de energia injetada na nanorrede, estabilizando-se assim a tensão do barramento. Assim, como forma adicional de verificação do modelo obtido, são feitas simulações conforme mostrado a seguir, nas quais foram simuladas as seguintes situações: iniciando com  $k = 0$  e avançando para valores negativos de  $k$  com intuito de verificar o funcionamento do sistema de controle à medida que o nível de potência das CPL aumenta.

- Em  $t_0 = 0$  s,  $k = 0$  ( $P = 0$  W);
- Em  $t_1 = 0,25$  s,  $k = -0,33$  ( $P = -400$  W);
- Em  $t_2 = 0,50$  s,  $k = -0,73$  ( $P = -900$  W);
- Em  $t_3 = 0,75$  s,  $k = -1,30$  ( $P = -1600$  W);
- Em  $t_4 = 1,00$  s,  $k = -1,91$  ( $P = -2350$  W);
- Em  $t_5 = 1,25$  s,  $k = -2,56$  ( $P = -3150$  W);
- Em  $t_6 = 1,50$  s,  $k = -3,21$  ( $P = -3950$  W);
- Em  $t_7 = 1,75$  s,  $k = -3,86$  ( $P = -4750$  W);

As Figs. 8 a 10 a seguir ilustram os resultados obtidos para as simulações do SIMULINK para as variáveis  $i_L$ ,  $v_B$  e  $v_C$ . À medida que os valores de  $k$  diminuem, o sistema de controle aumenta a extração da corrente  $i_L$  das baterias, como ilustra a Fig. 8, para realizar o balanço de potências e, assim, conseguir estabilizar a tensão do barramento. Uma vez que as baterias estão fornecendo energia para o barramento, ocorre então uma queda na tensão  $v_B$  dos terminais das conforme a Fig. 9. Ainda assim, o sistema é capaz de manter a estabilidade da tensão do barramento e da NR.

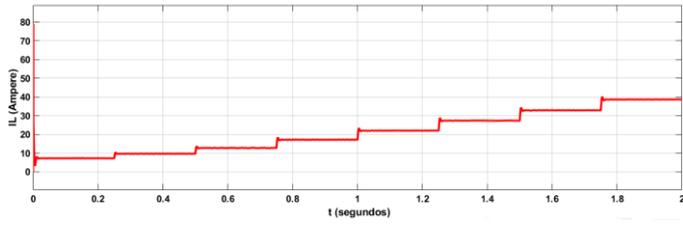


Fig. 8 Resultados para o SIMULINK  $i_L$  do barramento

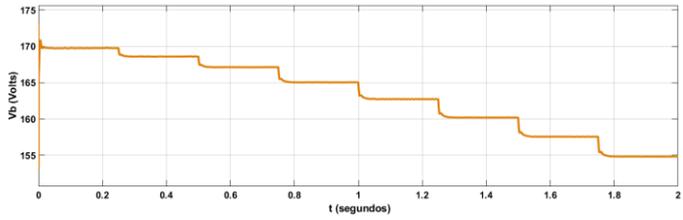


Fig. 9 Resultados para o SIMULINK para a tensão  $v_B$  das baterias

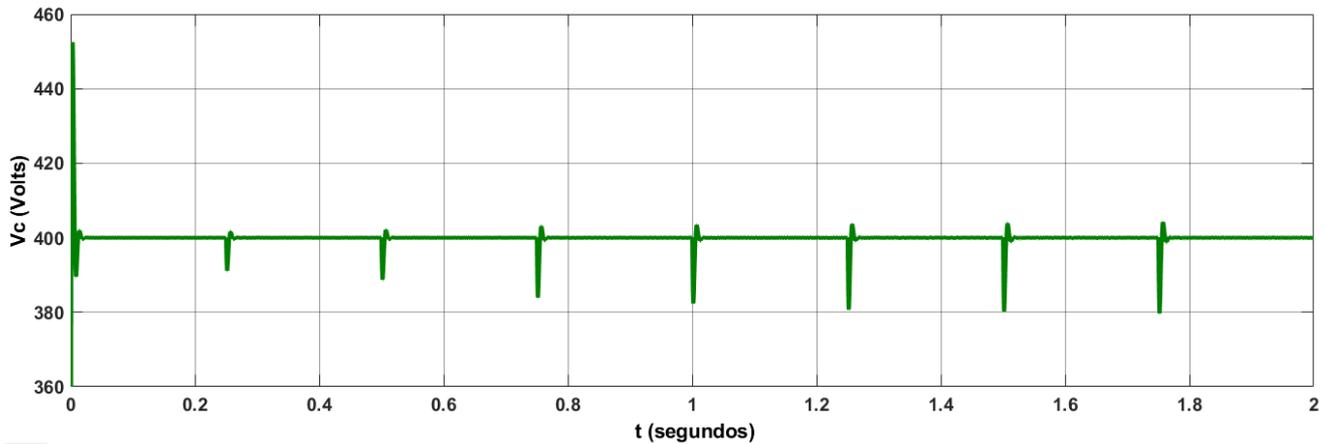


Fig. 10: Resultados para o SIMULINK para tensão  $v_c$  do barramento

Analisando a Fig. 10, é possível perceber que, à medida que os valores de  $k$  diminuem, as variações na tensão  $v_c$  aumentam, mas, ainda assim, o sistema de controle é capaz de realizar o balanço de potências e regular a tensão do barramento para o valor de referência de 400 V. As variações das cargas foram feitas utilizando-se uma fonte de corrente controlada por tensão, com intuito de simular o comportamento não linear das CPL.

## 5. CONCLUSÕES

O controle e estabilidade de uma nanorrede CC que opera em modo ilhado propostos foram avaliados e concluiu-se que a modelagem de uma nanorrede CC que opera em modo ilhado, representada através do MMPS fornece uma aproximação simples e adequada que pôde ser verificada através da simulação do sistema de controle projetado aplicado ao circuito da Fig. 1 (modelo comutado) no SIMULINK. Isso significa que os efeitos harmônicos causadores de não-linearidades (que são desprezados no MMPS) de fato não exercem grande influência sobre o sistema modelado para pequenas variações em torno do ponto de operação ( $I_L, V_C$ ) e para valores de  $f_{ch} > 5\omega_0 / \pi$ .

Adicionalmente, foi possível perceber que as CPL exercem influência sobre a estabilidade do sistema e que a correta regulação da tensão  $v_c$  do barramento pelo sistema de controle foi atingida com o sistema projetado para valores de potência dentro dos limites calculados para a nanorrede.

## REFERÊNCIAS

- Boroyevich, D. et al. (2012). A Testbed for Experimental Validation of a Low-voltage DC Nanogrid for Buildings. *IEEE Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. LS7c.5-1–LS7c.5-8, Novi Sad.
- Eghtedarpour, N. and Farjah, E. (2014). Distributed charge/discharge control of energy storages in a renewable-energy-based DC micro-grid. *IET Renew. Power Gener.*, vol. 8, no. 1, pp. 45–57
- Erickson, R. W. and Maksimovic, D. (2004). *Fundamentals of Power Electronics*. 2ª. ed, Nova York.

Grillo, S. et al. (2013). DC Islands in AC Smart Grids. *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp 89-98.

Sun, K. et al. (2011). A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems With Battery Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol 26, no 10, pp. 3032 -3045.

Santos, F. M. L. (2018). Controle de uma nanorrede de corrente contínua em modo ilhado. Dissertação de mestrado, Salvador.

Tahim, A. P. N. (2015). Controle de microrredes de distribuição de energia elétrica em corrente contínua. Tese de Doutorado, Florianópolis.

Tahim, A. P. N. et al. (2012). Controle nao-linear de um conversor bidirecional associado a baterias para regulacao de tensao em uma microrede cc. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, Campina Grande.

Zhao, Z.; Hu, J. and Chen, H. (2017). Bus Voltage Control Strategy for Low Voltage DC Microgrid Based on AC Power Grid and Battery. *IEEE International Conference on Energy Internet*, pp. 349-354, doi: 10.1109/ICEI.2017.68, Beijing.