

# APLICAÇÃO DE INÉRCIA VIRTUAL EM CONVERSORES CC-CC PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

**Adriano Fazolo Nardoto** (IFES) - anardoto@ifes.edu.br

**Arthur Eduardo Alves Amorim** (IFES) - arthur.amorim@ifes.edu.br

**Rodrigo Fiorotti** (Ifes) - rodrigo.fiorotti@ifes.edu.br

**Nelson Henrique Bertollo Santana** (IFES) - nelson.santana@ifes.edu.br

**Walbermark Marques dos Santos** (UFES) - walbermark@gmail.com

**Ana Luiza dos Santos Merlin** (Ifes) - analuizasmerlin@outlook.com

**Letícia Correia Barbosa** (IFES) - lelecb12@gmail.com

**Lua Teixeira** (Instituição - a informar) - luatexeirazanelato@hotmail.com

## **Resumo:**

*Em um novo cenário do sistema elétrico de potência, com maior participação de fontes alternativas e com a presença de geração distribuída, tem-se observado um novo conceito, denominado microrredes. Nessas microrredes tem-se estudado a possibilidades de sistemas em corrente contínua e novos desafios associados a essa mudança. Nesse trabalho foi estudado um controle de tensão do barramento por meio de uma inércia virtual. Foram analisados por meio de simulação computacional e bancada experimental o comportamento do afundamento de tensão no barramento, oscilação da tensão e compartilhamento de carga em uma microrrede com 2 conversores conectados a um barramento infinito. Foi verificado que a variação da inércia afeta o comportamento da tensão, sobretudo o tempo de oscilação durante transitórios, porém não influencia no comportamento da corrente dos conversores.*

**Palavras-chave:** *Microrrede CC, Inércia Virtual, Controle de Tensão*

**Área temática:** *Conversão Fotovoltaica*

**Subárea temática:** *Tecnologias e ensaios de inversores e outros equipamentos de eletrônica de potência*

# APLICAÇÃO DE INÉRCIA VIRTUAL EM CONVERSORES CC-CC PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Adriano Fazolo Nardoto – [anardoto@ifes.edu.br](mailto:anardoto@ifes.edu.br)

Arthur Eduardo Alves Amorim – [arthur.amorim@ifes.edu.br](mailto:arthur.amorim@ifes.edu.br)

Rodrigo Fiorotti – [rodrigo.fiorotti@ifes.edu.br](mailto:rodrigo.fiorotti@ifes.edu.br)

Nelson Henrique B. Santana – [nelson.santana@ifes.edu.br](mailto:nelson.santana@ifes.edu.br)

Ana Luiza dos Santos – [analuizasmerlin@outlook.com](mailto:analuizasmerlin@outlook.com)

Letícia Correia – [lelecb12@gmail.com](mailto:lelecb12@gmail.com)

Lua Teixeira – [luateixeirazanelato@hotmail.com](mailto:luateixeirazanelato@hotmail.com)

Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Eletrotécnica

Walbermark Marques dos Santos – [walbermark.santos@ufes.br](mailto:walbermark.santos@ufes.br)

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** Em um novo cenário do sistema elétrico de potência, com maior participação de fontes alternativas e com a presença de geração distribuída, tem-se observado um novo conceito, denominado microrredes. Nessas microrredes tem-se estudado a possibilidade de sistemas em corrente contínua e novos desafios associados a essa mudança. Nesse trabalho foi estudado um controle de tensão do barramento por meio de uma inércia virtual. Foram analisados por meio de simulação computacional e bancada experimental o comportamento do afundamento de tensão no barramento, oscilação da tensão e compartilhamento de carga em uma microrrede com 2 conversores conectados a um barramento infinito. Foi verificado que a variação da inércia afeta o comportamento da tensão, sobretudo o tempo de oscilação durante transitórios, porém não influencia no comportamento da corrente dos conversores.

**Palavras-chave:** Microrrede CC, Inércia Virtual, Controle de Tensão

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica constitui um dos pilares da infra-estrutura necessários para o desenvolvimento de qualquer região. Além do aumento orgânico devido ao próprio crescimento da atividade econômica, o aumento da quantidade de equipamentos movidos por energia elétrica tem provocado um crescimento da demanda maior do que o próprio crescimento da economia (OCDE, 2011).

Para o Brasil, por exemplo, a Empresa de Pesquisa Energética prevê um crescimento da demanda de energia elétrica 0,7 pontos percentuais maior que o crescimento da economia para o decênio 2018-2027. Essa previsão implica em um aumento anual do consumo de 3,7%, que totalizado ao longo dos 10 anos resulta em um aumento de demanda superior a 40%. Em valores absolutos, o planejamento é sair de uma demanda média de 65.585GW do fim de 2017 para 93.214GW em 2027 (EPE, 2018).

Esse largo incremento no consumo de energia elétrica traz como consequência a necessidade de aumento do parque gerador. Porém, com uma dependência fóssil ainda considerável em sua matriz energética, a preocupação ambiental, principalmente devido ao efeito nocivo dos gases estufa produzidos pela queima de combustíveis fósseis, impõe uma limitação a essa expansão.

Diante desse impasse, as fontes renováveis de geração de energia elétrica, sobretudo a fotovoltaica, têm ganhado espaço como candidata a protagonista no processo de expansão e diversificação da matriz de geração de energia elétrica. A energia fotovoltaica contribui com 1,3% (2,3 GW) da potência elétrica instalada no Brasil e foram contratados 3,9 GW em leilões de energia que deverão entrar em operação até 2023. Essa fonte está presente sobretudo nas instalações de pequeno porte, onde correspondem a 99,7% das conexões de micro e minigeração (ABSolar, 2019).

Tamanho aumento da penetração das fontes alternativas no sistema elétrico acarreta em grandes benefícios ambientais e econômicos, porém também provoca mudanças significativas na estrutura do sistema de fornecimento de energia elétrica. O cenário do Sistema Interligado Nacional há alguns anos atrás era caracterizado como um sistema centralizado, com fluxo de energia unidirecional. Nesse sistema, as grandes fontes geradoras produziam a energia que era transportada em grandes blocos nas linhas de transmissão e distribuídos para os consumidores nos centros urbanos. Atualmente, a energia produzida pelas fontes alternativas tem crescido em participação e está localizada mais próxima aos centros de consumo, na assim chamada, geração distribuída.

Além da topologia do sistema elétrico, outro paradigma tem sido questionado recentemente. Durante o final do século XIX Thomas Edison e Nikola Tesla disputaram entre o sistema de distribuição de eletricidade em corrente contínua (CC) ou alternada (CA). Como se sabe, a tecnologia CA prevaleceu, devido, principalmente, ao uso de transformadores para produzir diferentes níveis de tensão. Contudo, atualmente o desenvolvimento tecnológico e a redução do custo dos semicondutores têm feito repensar a possibilidade de utilização de sistemas CC (Pharizi et. al, 2015).

Do ponto de vista das cargas, a utilização de dispositivos eletrônicos, lâmpadas e inversores de frequência demanda por conversores com um estágio CC. Estudos apontam que aproximadamente 30% da potência produzida em CA passe

por algum conversor eletrônico antes de ser utilizada (Reed, 2012). Se a energia para esses equipamentos fosse provida diretamente em CC haveria uma redução significativa nas perdas pela ausência dos circuitos retificadores. Além disso, tem-se observado um interesse crescente por veículos elétricos como uma maneira de reduzir as emissões de gases estufa, o que significaria uma presença ainda maior de cargas CC a serem alimentadas pelo sistema elétrico.

Sob a ótica da geração, as fontes renováveis como eólica, fotovoltaica e célula a combustível também passam por um estágio CC antes de se conectarem à rede elétrica. Prover sistemas em corrente contínua para distribuição e utilização da energia provida por essas fontes irá possibilitar um aumento da eficiência. Tem-se ainda nos sistemas CC a facilidade de inserção de elementos armazenadores de energia, que conforme posto anteriormente, contribuem com um melhor aproveitamento dessas fontes (Elsayed, 2014).

Alinhado com a evolução do sistema elétrico e com as tendências para o futuro, este trabalho propõe o estudo da conexão entre sistemas fotovoltaicos e uma rede CC. Nos sistemas fotovoltaicos, assim como em outras fontes de energias renováveis, um fator a ser analisado é a instabilidade que essas soluções geram ao acessar o barramento devido à grande intermitência dessas fontes. Uma vantagem nos geradores convencionais de energia é a inércia mecânica que possuem devido as suas características construtivas. Essa inércia não permite variações abruptas na rotação do gerador e consequentemente ajuda a manter a tensão na saída do gerador com menores variações. Uma filosofia que tem sido aplicada nos conversores de energia eletrônico é emular a inércia das máquinas síncronas (máquinas rotativas) nos controladores dos conversores para contribuir com a estabilidade transitória da rede (WANG et al., 2019; RASOOL et al., 2018; ZHENG, et al.; 2018).

Nesse estudo, é proposto um cenário com dois sistemas fotovoltaicos acessando um barramento infinito em corrente contínua onde foi implementado nos conversores um controle de tensão por meio da técnica de inércia virtual sendo analisado o comportamento da tensão e corrente nesse barramento quando há entrada/saída de carga.

## 2. MODELAGEM DO SISTEMA

### 2.1 Conversor CC-CC Buck

Os conversores CC/CC são circuitos de eletrônica de potência que convertem uma tensão CC em um nível de tensão CC diferente. O controle do conversor é feito através de um sinal PWM (Pulse Width Modulation), que é responsável por fazer chaveamento das chaves semicondutoras. O PWM é um sinal de tensão que possui a frequência constante e largura do pulso controlável ao longo do tempo. Dessa forma, define-se o ciclo de trabalho ( $D$  - Duty Cycle) como a relação entre o tempo que o sinal permanece ligado (chave ON) e o período do sinal PWM, conforme mostrado na Fig. 1.

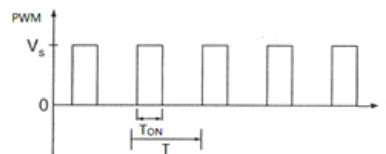


Fig. 1 - Sinal PWM e definição do Ciclo de Trabalho

No presente trabalho foi utilizado um conversor buck para fazer a ligação entre a fonte geradora ao barramento visto que a fonte geradora tem tensão próxima a 30V e o barramento CC opera com 12V. As características da relação entre entrada e saída desse conversor em função do ciclo de trabalho são resumidas na Tab. 1.

Tab. 1 - Características dos Conversor CC/CC Buck

Tensão	Corrente	Impedância
$V_{OUT} = D \cdot V_{IN}$	$I_{OUT} = \frac{I_{IN}}{D}$	$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{Z_{OUT}}{D^2}$

O circuito do conversor Buck é mostrado na Fig. 2. Esse circuito funciona em duas etapas. Na primeira etapa a chave SW se encontra fechada e o diodo D está inversamente polarizado, enquanto o capacitor C está sendo carregado. A segunda etapa é iniciada a partir do momento em que a chave SW é aberta. Dessa forma, a fonte é excluída do circuito fazendo com que o diodo D fique diretamente polarizado e que a corrente do indutor, exclusiva da energia acumulada no mesmo, passe a fluir pela carga e os demais componentes.

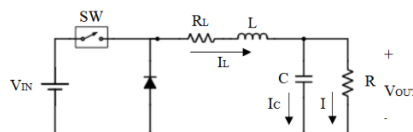


Fig. 2 – Circuito do Conversor CC/CC buck

O valor médio instantâneo é definido como o valor médio de uma grandeza em um período de comutação  $T_s$  (Batschauer, 2012). Essa proposta é útil quando as constantes de tempo do conversor são longas quando comparadas ao

tempo de chaveamento, prevendo o comportamento em baixa frequência do conversor e desprezando as harmônicas em alta frequência produzidas pelas comutações.

Para obtenção da função de transferência do conversor buck utilizou-se o modelo matemático equivalente à multiplicação da tensão  $V_{IN}$  com a razão cíclica do sistema, como mostrado no circuito da Fig. 3. No caso, a fonte de tensão e o diodo são simplificados em uma só fonte de tensão, que é o equivalente matemático à multiplicação da tensão da fonte do circuito  $V_{IN}$  com a razão cíclica do sistema,  $D$ .

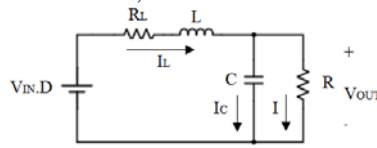


Fig. 3 – Modelo simplificado do Circuito Conversor CC/CC buck

Aplicando a lei de Kirchoff ao circuito da Fig. 6 tem-se:

$$V_{IN} \cdot D = V_{R_L} + V_L + V_{OUT} = R_L \cdot I_L + L \cdot \frac{d I_L}{dt} + V_{OUT} \quad (1)$$

No domínio da frequência tem-se:

$$I_L = (V_{IN} \cdot D - V_{OUT}) \cdot \frac{1}{(s \cdot L + R_L)} \quad (2)$$

Analisando a Fig. 6:

$$I_L = I_C + I = C \cdot \frac{d V_C}{dt} + \frac{V_{out}}{R} = C \cdot \frac{d V_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R} \quad (3)$$

No domínio da frequência:

$$I_L = C \cdot V_{out} \cdot s + \frac{V_{out}}{R} \quad (4)$$

Assim:

$$V_{out} = I_L \cdot \left[ \frac{R}{C \cdot R \cdot s + 1} \right] \quad (5)$$

Utilizando as equações 2 e 5 pode-se fazer o modelo dinâmico do conversor Buck, conforme mostrado na Fig. 4.

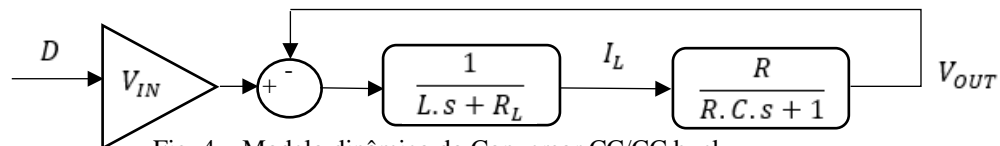


Fig. 4 – Modelo dinâmico do Conversor CC/CC buck

## 2.2 Técnicas de controle de conversores CC-CC

Em microrredes de corrente contínua um dos grandes desafios é a realização do controle da tensão do barramento. Para tal, diversas técnicas são apresentadas na literatura, tanto para o controle primário, isto é, o controle local realizado pelos conversores, quanto no controle secundário, realizado pelo supervisor da microrrede, de posse de diversas informações. Nesse trabalho, a discussão é feita com relação ao controle primário, utilizando-se apenas a informação da tensão e da corrente nos terminais do conversor analisado.

### 2.2.1 Controle Droop

O método mais comum de controle da tensão do barramento por meio de conversores é o controle droop. Esse controle é um método que programa uma impedância de saída no conversor, fazendo com que a saída de tensão decresça linearmente com o aumento da corrente demandada. Nesse método, há um desafio para realizar o compartilhamento de carga entre as fontes, uma vez que a escolha da constante de droop necessita considerar o balanço entre a regulação de tensão e o carregamento das fontes. Se uma constante de droop elevada for adotada, obtém-se um melhor compartilhamento, contudo, tem-se maiores quedas de tensão (N. Yang et al., 2015).

### 2.2.2 Inércia Virtual

Os sistemas fotovoltaicos por não contarem com a inércia, assim como os sistemas rotativos, podem apresentar oscilações diversas nas grandezas de saída e instabilizar os sistemas aos quais estão conectados. Em sistemas conectados à rede CA uma proposta apresentada em alguns trabalhos (GE et Al., 2018; KERDPHOL, 2019; SHI, 2018) é emular o

comportamento da inércia por meio do controle do conversor eletrônico. Assim como nos conversores CC-CA, os conversores CC-CC podem ter inserido em suas malhas de controle uma inercia virtual e emularem uma máquina de corrente contínua (GUO et al, 2018; WU et al., 2016; JIN, Zheming et al., 2017), o que pode vir a contribuir com a estabilidade transitória daquele estágio.

Para modelar uma máquina CC será considerado, no presente trabalho, as seguintes características:

- Gerador CC de excitação independente;
- A saturação magnética é desconsiderada, implicando que os valores de indutância são independentes das correntes;
- Não há indutância mútua entre o circuito de campo e o circuito de armadura e, conseqüentemente, não há efeito desmagnetizante por reação de armadura.

O circuito equivalente da máquina CC de excitação independente é mostrado na Fig. 5.

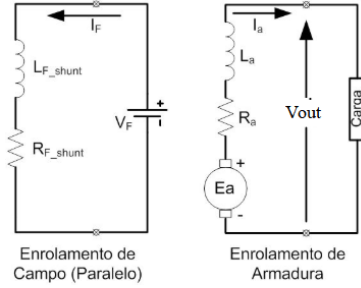


Fig. 5: Circuito equivalente de um gerador CC de excitação independente

A Eq. que descreve o enrolamento de armadura é mostrada a seguir:

$$E_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot I_a \cdot s + V_{out} \quad (6)$$

Assim:

$$E_a - V_{out} \cdot \left[ \frac{1}{R_a + L_a \cdot s} \right] = I_a \quad (7)$$

Considerando a carga do tipo RC como mostrado na Fig. 5 e 6, tem-se a seguintes equações:

$$I_a = I_c + I_R \quad (8)$$

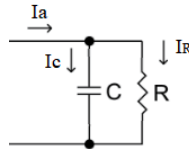


Fig. 6: Carga na saída do gerador CC

Ou seja:

$$I_a = C \cdot V_{out} \cdot s + \frac{V_{out}}{R} \quad (9)$$

Assim:

$$V_{out} = I_a \cdot \left[ \frac{R}{C \cdot R \cdot s + 1} \right] \quad (10)$$

As equações básicas de uma máquina CC são mostradas a seguir:

$$e_a = K_a \cdot \Phi \cdot \omega_m \quad (11)$$

$$T = K_a \cdot \Phi \cdot i_a \quad (12)$$

Considerando a linearidade magnética da máquina:

$$e_a = K_f \cdot i_f \cdot \omega_m = K_g \cdot \omega_m \quad (13)$$

$$T = K_f \cdot i_f \cdot i_a = K_g \cdot i_a \quad (14)$$

A Eq. dinâmica do sistema mecânico da máquina CC é apresentada a seguir:

$$T_L(s) = J \cdot \omega_m \cdot s + B \cdot \omega_m + T(s) \quad (15)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T_L(s) - T(s)}{s \cdot J + B} = (T_L(s) - T(s)) \cdot \frac{1}{s \cdot J + B} \quad (16)$$

Utilizando as equações 7, 10, 13, 14 e 16 pode-se fazer o modelo dinâmico do gerador CC, conforme mostrado na Fig. 7.

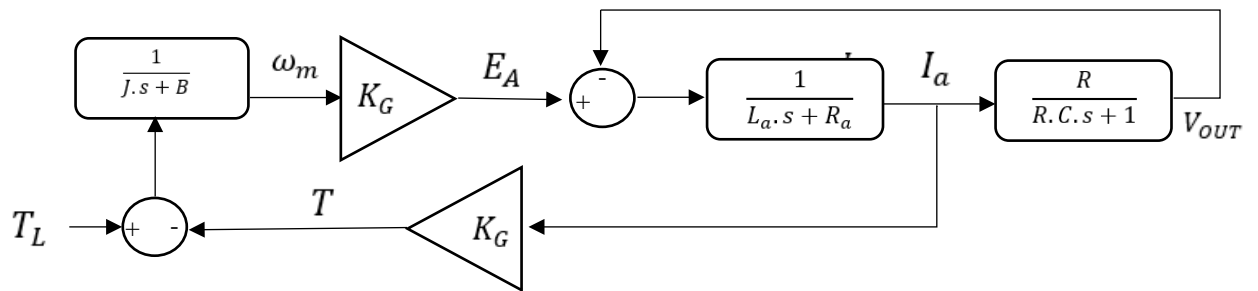


Fig. 7: Modelo dinâmico de um gerador CC

O modelo do conversor buck se assemelha ao gerador CC (ver Fig. 4), faltando apenas o elemento de inércia. Esse elemento de inércia será adicionado através do controlador, definindo assim a inércia virtual.

A proposta é adicionar o elemento de inércia utilizando a realimentação pela corrente, semelhante ao gerador CC, onde a corrente será ajustada pela realimentação da tensão em cascata, garantindo que a saída do conversor seja o valor desejado (12V), como pode ser visto pelo modelo dinâmico representado na Fig. 8.

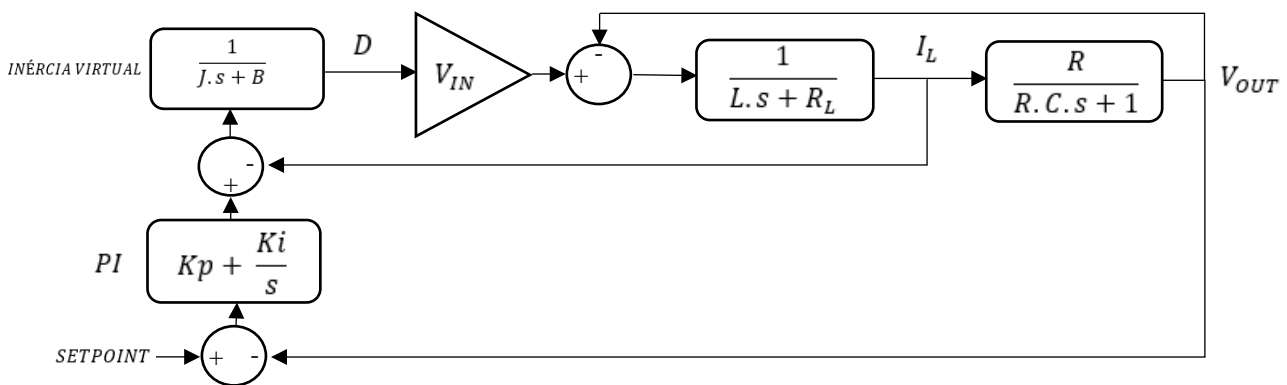


Fig. 8: Modelo Proposto de Inércia Virtual aplicado ao conversor Buck

O SETPOINT é o valor da tensão desejada que será comparada com a tensão de saída do sistema gerando um sinal de erro que entrará no integrador (Bloco PI). O sinal de saída do bloco PI será o valor de referência da corrente que será comparada com a corrente de saída do indutor. O sinal de erro gerado pela corrente de referência e corrente no indutor passará pelo sistema de inércia virtual (Bloco INÉRCIA VIRTUAL) que gerará o ciclo de trabalho (o sinal de controle) que atuará no conversor buck.

O parâmetro B do bloco INÉRCIA VIRTUAL representa valores de perdas mecânicas do motor (ventilação) enquanto o parâmetro J representa o fator de inércia que altera o tempo de resposta do sistema de controle de tensão.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Sistema Estudado

O cenário proposto prevê duas fontes de geração fotovoltaica ligados ao barramento CC que será perturbado pela entrada e saída de cargas. A Fig. 9 mostra o cenário proposto para testes.

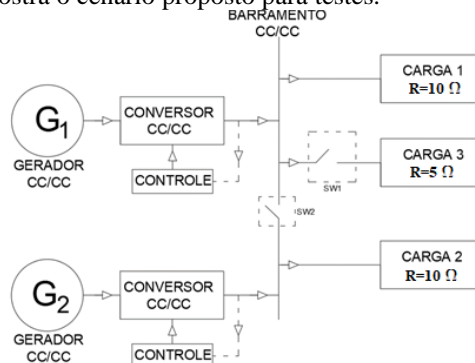


Fig. 9: Cenário proposto para testes com a microrrede

Inicialmente as chaves sw1 e sw2 estão abertas. Após a tensão de saída dos conversores serem ajustadas pelo controlador a chave sw2 é acionada interligando o gerador 2 ao barramento CC. Após o paralelismo entre os geradores, a chave sw1 é acionada gerando a perturbação no barramento (adição da carga 3) que será corrigida pelo sistema de controle. Após a estabilização da tensão faz-se outra perturbação no barramento desligando a chave SW1 retirando a carga 3 do sistema. O objetivo é analisar o comportamento do sistema ajustando os controladores com valores de inércias iguais e diferentes.

Os fenômenos analisados estão relacionados a estabilidade da tensão no barramento CC quando há perturbação externa (entrada e saída de carga). Os efeitos analisados são indicados a seguir:

- Carregamento dos conversores;
- Afundamento da tensão no barramento CC;
- Tempo para estabilizar o barramento após a perturbação.

A Fig. 10 mostra o sistema implementado para os testes experimentais.

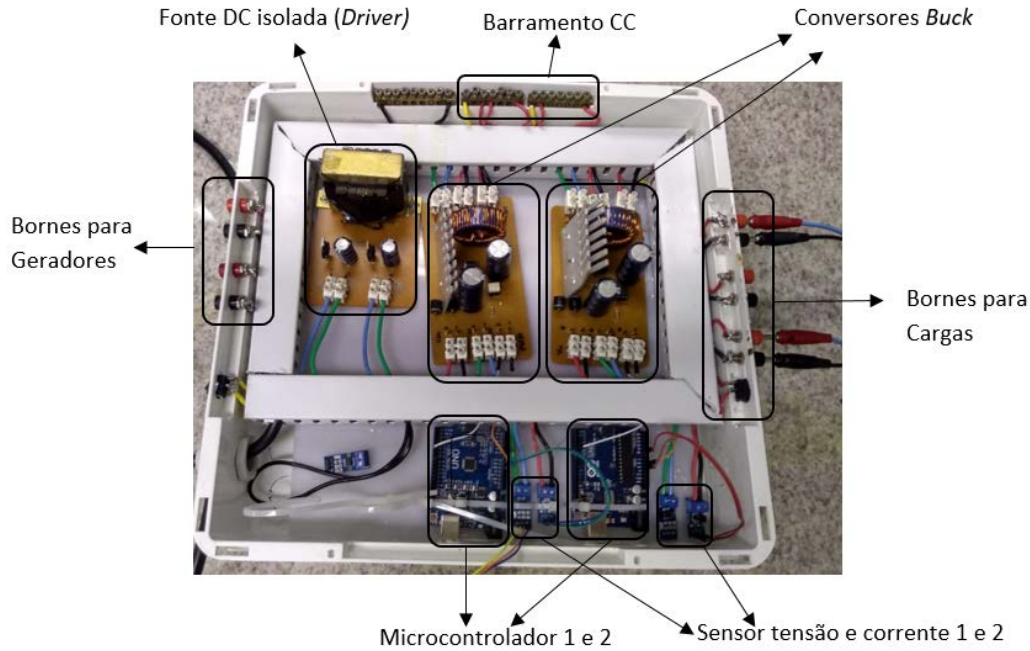


Fig. 10: Sistema implementado para testes experimentais

Os parâmetros do conversor buck são os parâmetros do circuito existente no laboratório, conforme mostrado na Tab. 2. As cargas utilizadas para o experimento são mostradas na Tab. 3.

Tab. 2: Parâmetros dos conversores CC/CC

<b>Dados Conversor buck</b>		
<b>Descrição</b>	<b>Componente</b>	<b>Valor</b>
Indutância do indutor	L	12mH
Resistência interna do Indutor	$R_L$	0.1 $\Omega$
Capacitância do Capacitor	C	2200 $\mu$ F
Tensão de saída do conversor	$V_{out}$	12V
Tensão de entrada do conversor	$V_{IN}$	30V

Tab. 3: Valores de cargas e impedâncias utilizadas no projeto

<b>Cargas</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Impedância fixa (Carga 1)	10 $\Omega$
Impedância fixa (Carga 2)	10 $\Omega$
Impedância para perturbação	5 $\Omega$
Tensão barramento infinito	12V
Impedância de ligação entre conversor CC e barramento infinito	0.5 $\Omega$



### 3.2 Ajuste do Controlador

Para ajuste do controlador PI, usado para produzir a referência de corrente para o bloco da inércia virtual (Fig. 8), um dos conversores foi ensaiado individualmente. Nesse ensaio, observou-se a resposta da corrente à entrada e saída de carga. A partir da constante de tempo da curva de corrente para essas perturbações no barramento, os parâmetros  $K_p$  e  $K_i$  foram ajustados de forma empírica. O objetivo desse ajuste é garantir que esse controlador apresente tempos de resposta inferior a resposta da planta. A Tab. 4 mostra os parâmetros ajustados para o PI.

Tab. 4: Parâmetros do controlador PI ajustados utilizados no conversor Buck

Controle	Parâmetro	Valor
PI	$K_p$	5
	$K_i$	10

A Fig. 11 mostra o tempo de resposta da referência de corrente gerada pelo bloco PI e o tempo de resposta da corrente de saída do conversor para a perturbação (entrada e saída de carga) no barramento CC verificada no protótipo.

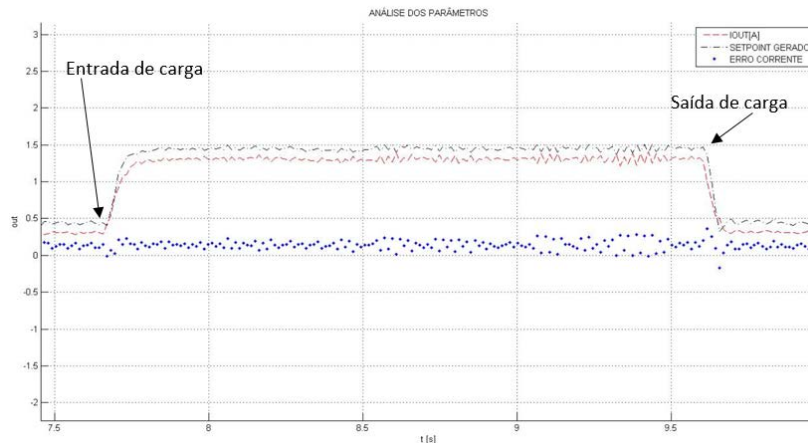


Fig. 11: Resposta da corrente e saída do bloco PI para perturbação na saída do conversor

### 3.3 Análise Computacional

Uma vez que o PI está ajustado (conforme Tab. 4), variou-se a inércia virtual com o objetivo de verificar o comportamento da tensão no barramento CC, por meio de simulação computacional. Para esses testes foram escolhidos valores distintos de inércia e observou-se o desempenho para fins de comparação. No Teste 1, foram escolhidas as inércias,  $J_1 = 0.1$  e  $J_2 = 0.1$ , para os conversores 1 e 2, respectivamente. No Teste 2, a inércia do conversor 2 foi alterada para  $J_2 = 0.2$ . As Figs. 12 e 13 mostram a comparação dos resultados para esses testes.

Na Fig. 12 observa-se, para o Teste 1, que ao introduzir a carga no sistema a tensão apresenta um afundamento de tensão de 1.4 V, com uma oscilação de 1.5 s. Ao remover a carga, a tensão apresenta uma sobretensão de 1.47 V, com uma oscilação de 0.5 s. Além disso, nota-se que ao inserir uma nova carga ao sistema, o conversor 1 apresenta um incremento de corrente superior ao conversor 2, isto é, assume uma parcela maior da nova carga inserida.



Fig. 12: MICROGRID - Comportamento com inércias virtuais iguais (teste 1).



Para o teste 2, apresentado na Fig. 13, observa-se que a variação da inércia não influencia no compartilhamento de carga entre os conversores, ou seja, o conversor 1 continua assumindo uma maior parcela da carga em relação ao conversor 2. Contudo, nota-se que com a mudança na inércia do Conversor 2 há uma modificação do comportamento da tensão do barramento, passando a apresentar um afundamento de 0.9 V na entrada de carga e sobretensão de 1.46 V na saída da carga. Além disso, as oscilações passam a ter duração de 1.6 s e 0.5 s na entrada e saída de carga, respectivamente.

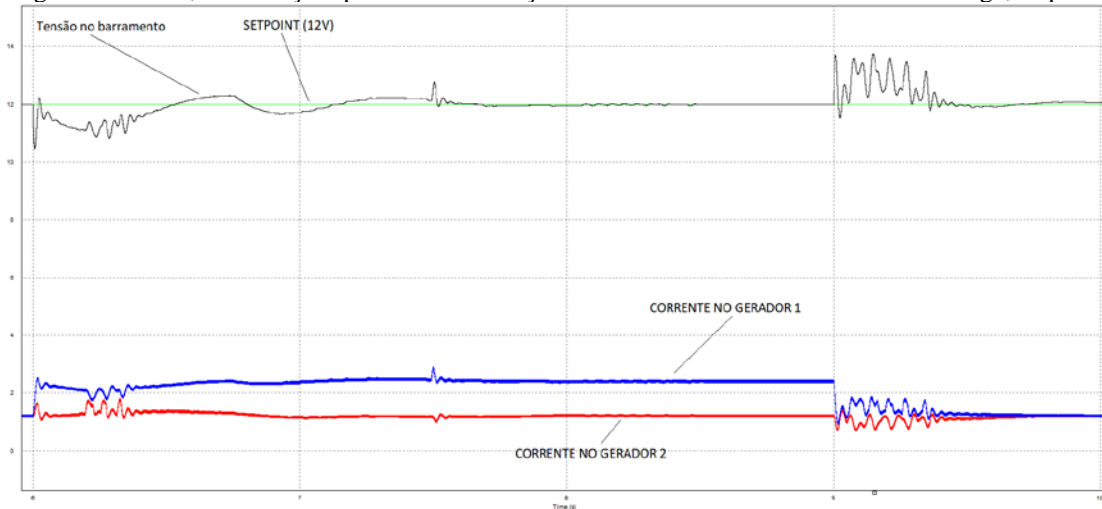


Fig. 13: MICROGRID - Comportamento com inércias virtuais diferentes (teste 2).

### 3.4 Resultados Experimentais

Os testes foram realizados utilizando sempre os mesmos parâmetros para o controlador PI ajustados conforme mencionado anteriormente, ou seja,  $K_{p1} = K_{p2} = 5$  e  $K_{i1} = K_{i2} = 10$ . Para os conversores foram considerados os coeficientes de atrito da máquina virtual como  $B=1$ .

Inicialmente considerou-se que os controladores fossem ajustados com mesmos valores de inércias virtuais. A Tab. 5 mostra os parâmetros dos controladores.

Tab. 5: Parâmetros dos controladores PI e inércia virtual utilizados nos conversores: mesma inércia

Controle	Parâmetro	Valor
Inércia Virtual	J1	1
	J2	1

A Fig. 14 mostra a tensão no barramento CC (saída dos conversores) e suas respectivas correntes para o ajuste do controlador com mesma inércia virtual (Tab. 5).



Fig. 14: MICROGRID - Comportamento com inércias virtuais iguais (teste 1).

A próxima análise tem o objetivo verificar o comportamento no barramento CC quando os controladores possuem inércias virtuais diferentes. A Tab. 6 mostra os parâmetros dos controladores.

Tab. 6: Parâmetros dos controladores PI e inércia virtual utilizados nos conversores: diferentes inércias

Controle	Parâmetro	Valor
Inércia Virtual	J1	2
	J2	1

A Fig. 15 mostra a tensão no barramento CC (saída dos conversores) e suas respectivas correntes para o ajuste do controlador com diferentes inércias virtuais (Tab. 6).

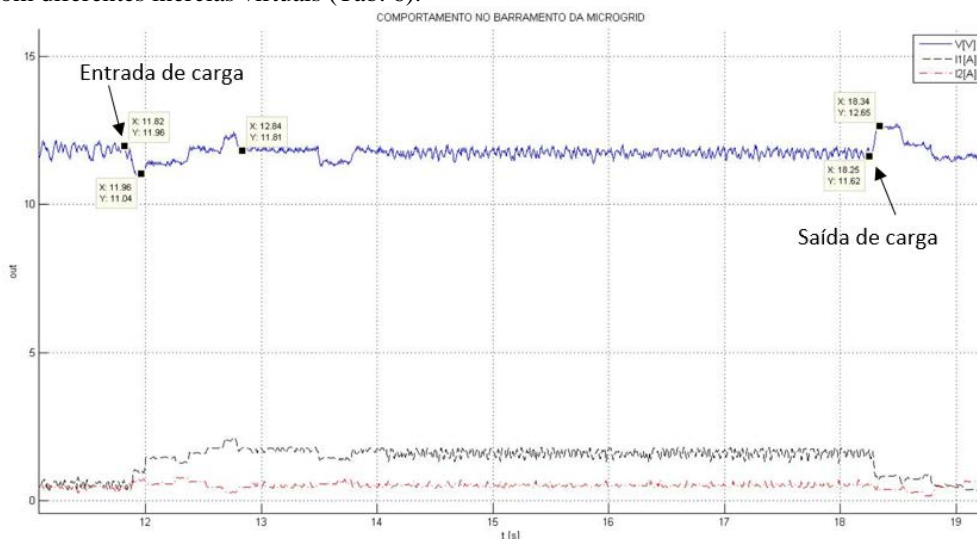


Fig. 15: MICROGRID: Comportamento com inércias virtuais diferentes (teste 2).

Analisando o comportamento da MG quando os conversores são controlados com diferentes inércias virtuais percebe-se um comportamento mais suave no barramento. Percebe-se um tempo menor para estabilização da tensão, menor afundamento de tensão (na entrada de carga) e menor sobre tensão na saída da carga. Os resultados podem ser analisados na Tab. 7.

Tab. 7: Análise dos resultados para o comportamento da MG

Variáveis analisadas	Mesma Inércia J1=J2=1	Erro* (%)	Diferentes Inércia J1=2 J2=1	Erro* (%)
Afundamento de tensão - Entrada de carga [V]	10.85	9.58%	11.04	8.00%
Sobre tensão - Saída de carga [V]	13.23	-10.25%	12.65	-5.42%
Tempo de estabilização - Entrada de carga [s]	0.87	-	0.88	-
Tempo de estabilização - Saída de carga [s]	1.71	-	1.21	-

\* Os erros foram calculados tomando a tensão desejada no barramento – 12V como referência

Percebe-se que em todas as variáveis analisadas o comportamento da MG tem melhor performance quando os controladores possuem diferentes inércias virtuais.

#### 4. CONCLUSÃO

Os objetivos do presente trabalho foram alcançados. Através do modelo dinâmico da máquina CC proposto foi possível emular uma máquina CC em um conversor tipo buck. Para que fosse possível emular a máquina CC utilizando o conversor buck foi necessário implementar um controlador que funcione como a inércia da máquina CC, ou seja, uma inércia virtual.

Os resultados experimentais levantados na análise de uma microrrede mostrou que sistemas com mesmo controlador (mesmas inércias) geram instabilidade maior no barramento CC quando há perturbação na carga (entrada/saída de carga) quando comparados a sistema com inércias diferentes. Observou-se ainda que a variação da inércia entre os conversores não afeta o compartilhamento de carga entre eles.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. Infográfico ABSolar: Outubro 2019. Associação Brasileira de Energia Solar, São Paulo, 2019.
- BATSCHAUER, A. L. Apostila da Disciplina de Controle de Conversores Estáticos. Joinville: 2012
- ELSAYED, Ahmed T.; MOHAMED, Ahmed A.; MOHAMMED, Osama A. DC microgrids and distribution systems: An overview. **Electric power systems research**, v. 119, p. 407-417, 2015.
- EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia: 2027. Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2018.
- GE, Sun; ZHIYU, Zhang; JIN, Lv. Study on control strategy of circulation suppression in parallel with multiple VSG. In: **2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**. IEEE, 2018. p. 1326-1331.
- GUO, Yu et al. A Virtual Inertia Control Strategy for Dual Active Bridge DC-DC Converter. In: **2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. IEEE, 2018. p. 1-5.
- JIN, Zheming et al. Admittance-type RC-mode droop control to introduce virtual inertia in DC microgrids. In: **2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. IEEE, 2017. p. 4107-4112.
- OECD. OECD Green Growth Studies: Energy. OECD Green Growth Studies series, International Energy Agency, 2011.
- PHARIZI, Sina et al. State of the Art in Research on Microgrids: A Review. **IEEE Access**, v. 3, p. 890 – 925, 2015.
- REED, Gregory F. et al. Advancements in medium voltage DC architecture development with applications for powering electric vehicle charging stations. In: **2012 IEEE Energytech**. IEEE, 2012. p. 1-8.
- KERDPHOL, Thongchart et al. Robust Virtual Inertia Control of a Low Inertia Microgrid Considering Frequency Measurement Effects. **IEEE Access**, v. 7, p. 57550-57560, 2019.
- RASOOL, Aazim et al. Correlation Between Multiple VSG Sources for Enhancing the Power Allocation in Microgrid. In: **2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**. IEEE, 2018. p. 1-6.
- SHI, Kai et al. Virtual inertia control strategy in microgrid based on virtual synchronous generator technology. **IEEE Access**, v. 6, p. 27949-27957, 2018.
- WANG, Yawei; LIU, Bangyin; DUAN, Shanxu. Transient Performance Comparison of Modified VSG Controlled Grid-Tied Converter. In: **2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. IEEE, 2019. p. 3300-3303.
- WU, Wenhua et al. A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 7, p. 6005-6016, 2016.
- YANG, Nanfang et al. Compensation of droop control using common load condition in DC microgrids to improve voltage regulation and load sharing. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 64, p. 752-760, 2015.
- ZHENG, Xuemei et al. Sliding Mode combined VSG Control to Microgrid Inverters. In: **IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2018. p. 2453-2456.

### IMPLEMENTATION OF VIRTUAL INERTIA TO DC-DC CONVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION

**Abstract.** *Electric power system is experiencing a new scene. This novel scenario has major participation of alternative sources and the presence of distributed generation, in a modern concept called microgrids. At these microgrids studies on DC currents systems and the challenges associated to this change are carried out. This paper study the bus voltage control by the implementation of a Virtual Inertia. By computational simulation and experimental bench, the behavior of the bus voltage dip, voltage oscillation and load share in a microgrid equipped with two DC-DC Converters connected to an infinite bus. The study observes that the inertia variation affects the voltage performance, mainly the oscillation time during transients. However, it has no influence over the converters currents.*

**Key words:** *DC-microgrid, Virtual Inertia, Voltage Control*