

# Modelagem e Controle de um Sistema de Excitação Estático de Gerador Síncrono Utilizando Conversor Buck

Raul E. Pivetta\* Igor Dal Forno\* Lucas G. Scherer\*  
Robinson F. de Camargo\* Felipe B. Grigoletto\*\*

\* *Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC, Universidade  
Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, (e-mail:  
raul-pivetta@hotmail.com).*

\*\* *Universidade Federal do Pampa, Alegrete - RS*

---

**Abstract:** This work presents a Wound Field Synchronous Generators (WFSG) terminal voltage control system modeling and design. The approach proposes a simple and robust static excitation system using a Buck converter powered from an external source. The calculation of the RMS value of the terminal voltages for control system feedback is replaced by obtaining the  $v_d$  component of the three-phase voltages. Experimental results prove the maintenance of terminal voltages within the established limits.

**Resumo:** Este trabalho apresenta a modelagem e o projeto do sistema de controle da tensão terminal de um Gerador Síncrono de Campo Bobinado (GS). A abordagem propõe um sistema de excitação estático simples e robusto utilizando conversor Buck alimentado a partir de fonte externa. O cálculo do valor RMS das tensões terminais para realimentação do sistema de controle é substituído pela obtenção da componente  $v_d$  das tensões trifásicas, diminuindo o atraso do sistema de controle. Resultados experimentais comprovam a manutenção das tensões terminais dentro dos limites estabelecidos.

**Keywords:** Synchronous generator; excitation system; control system; Buck converter; microgrids.

**Palavras-chaves:** Gerador síncrono; sistema de excitação; sistema de controle; conversor Buck; micro-redes.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo de micro-redes e fontes alternativas de geração de energia elétrica tem papel importante na diversificação da matriz energética (Hirsch et al., 2018; Steeves and Ouriques, 2016). Uma micro-rede é definida como um grupo de cargas e recursos de geração de energia interconectados de forma totalmente controlada, podendo operar conectados à rede ou de forma isolada (Ton and Smith, 2012). A associação de diferentes tecnologias de geração traz maior confiabilidade e robustez ao sistema de geração, ao passo que as deficiências inerentes da fonte primária ou da tecnologia utilizada podem ser supridas pelas demais fontes associadas (Salehi et al., 2022).

Geradores Síncronos de Campo Bobinado (WFSG, do inglês "Wound Field Synchronous Generators", ou apenas GS) são largamente utilizados em sistemas elétricos de potência de médio e grande porte (Fitzgerald et al., 2003; Boldea, 2015) principalmente em virtude do controle do fluxo de potência reativa através da excitação do rotor (Nøland et al., 2019). Esse tipo de máquina também desempenha um papel importante neste cenário de inovação dos sistemas de geração e micro-redes, sendo apreciado em sistemas de geração isolados de pequeno porte (Kamiev et al., 2016; Knudsen et al., 2018), podendo atuar como formador de rede em sistemas isolados ou como compensador

de reativos em sistemas conectados a rede (IEEE, 2016). Dessa forma, atuando em paralelo com outros geradores ou diferentes fontes de geração em um sistema de geração isolado, o GS tem a capacidade de compensar potência reativa e consequentemente controlar o nível de tensão na micro-rede.

A variação da tensão/potência reativa gerada pelo GS se dá pelo controle da tensão do enrolamento de campo através do sistema de excitação. Existem diferentes tipos de sistema de excitação (Nøland et al., 2019), dentre os principais os sistemas CC, CA e estáticos. Os sistemas CC e CA utilizam pequenos geradores, chamados excitatrizes, para entregar energia ao enrolamento de campo. Estes sistemas apresentam resposta dinâmica mais lenta e possuem maiores perdas associadas (Boldea, 2015; Briescu et al., 2011). Sistemas estáticos são baseados em conversores estáticos, dispensando o uso de uma máquina rotativa adicional, podendo ter seu barramento primário alimentado pelos enrolamentos principais da máquina (Choo et al., 2018) ou ainda por uma fonte externa, como um sistema fotovoltaico e/ou banco de baterias associado, eliminando a necessidade de *field flashing* (Tsegaye and Fante, 2018; Irmak et al., 2016) e interconectando uma diferente fonte primária ao sistema de geração.

Dessa maneira, entende-se que o GS é uma tecnologia importante para sistemas isolados e micro-redes ao se mostrar capaz de gerar uma tensão controlada e ainda compensar a potência reativa da micro-rede como um todo. O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de geração isolado baseado em GS, controlando a tensão terminal através de um sistema de excitação estático, de forma que esta se mantenha regulada frente a quaisquer variações de carga. Deste modo, quando associado a diferentes fontes de geração, atuará como um formador de rede, compensado a potência reativa. O projeto do sistema de excitação estático é baseado na ideia de que um barramento constante fornece energia ao conversor. Esse barramento pode ser alimentado por uma planta de geração fotovoltaica com sistema de armazenamento de energia associado (Natarajan et al., 2017; Irmak et al., 2016) ou diferente fonte de energia em CC. A Fig. 1 apresenta o diagrama da estrutura proposta. O GS pode ser acionado por fonte hídrica, biomassa ou mesmo fonte térmica. Em laboratório, um motor CC com velocidade controlada emula a máquina primária.

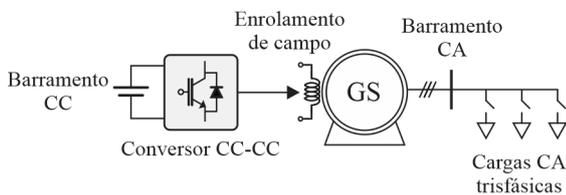


Figura 1. Sistema de excitação

Os primeiros sistemas de excitação estáticos desenvolvidos são baseados em conversores à tiristor (Schaefer, 1998). Essas topologias apresentam problemas de distorção de corrente e oscilações na tensão de saída relacionadas a variação no barramento primário (Chen et al., 2015), além de necessitarem de sincronização com a tensão da rede (Nøland et al., 2019). Em Rhew et al. (1996) é proposto um sistema baseado em conversor Buck-boost alimentado por ponte retificadora. Essa topologia resolve os problemas de oscilação de corrente e tensão de saída, além de não necessitar de sincronização com a tensão da rede. Em (Mishra and Gurrula, 2018) é apresentado um sistema de excitação baseado em conversor Buck substituindo as estruturas clássicas baseadas em conversor Buck-boost. O sistema de excitação é alimentado pelos terminais principais do GS, necessitando de sistema de *field flashing* na partida.

Assim, é proposta a utilização do conversor rebaixador Buck operando em modo de condução contínua alimentado através de um barramento CC constante e independente da tensão alternada gerada pelo GS. Este é um conversor estático de baixa complexidade, com característica de controle linear e rápida resposta transitória (Erickson and Maksimovic, 2001). O modelo do conversor é desenvolvido na Seção 2 para projeto do sistema de controle. Por fim, o sistema de excitação é avaliado frente à uma série de diferentes variações de carga nos terminais do GS.

## 2. MODELAGEM DO SISTEMA

Esta seção apresenta a modelagem do gerador e conversor.

### 2.1 Modelagem do GS

O GS é modelado como uma Função de Transferência (FT) que relaciona a componente  $v_d$  das tensões terminais trifásicas com a tensão de campo  $v_{fd}$  (Pivetta et al., 2021), dada por (1), onde  $T'_{d0}$  é a constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto (também chamada de constante de tempo do circuito de campo, por estar relacionada com os parâmetros deste enrolamento) e  $K_G$  é um ganho que depende da tensão de campo necessária para gerar tensão terminal nominal à vazio. A componente  $v_d$  é obtida através de uma transformação  $dq0$  invariante em amplitude. Ao utilizar essa transformação de variáveis, a componente  $v_d$  sempre vai ser igual ao valor de pico das tensões de linha. Além disso, essa transformação elimina a necessidade da obtenção do valor RMS das tensões terminais, o que causa um atraso no sistema de controle (Choo and Won, 2020). Os parâmetros da FT dados em (1) são obtidos através de procedimento experimental. A Fig. 2 apresenta a validação do modelo, comparando a tensão de linha  $v_{ab}$  com a componente  $v_d$  e com a resposta do modelo dado por (1) frente à variações em  $v_{fd}$ . O resultado mostra a adequada representação do comportamento da máquina através do modelo.

$$G(s) = \frac{v_d(s)}{v_{fd}(s)} = \frac{K_G}{T'_{d0}s + 1} = \frac{19,54121}{0,47619s + 1}, \quad (1)$$

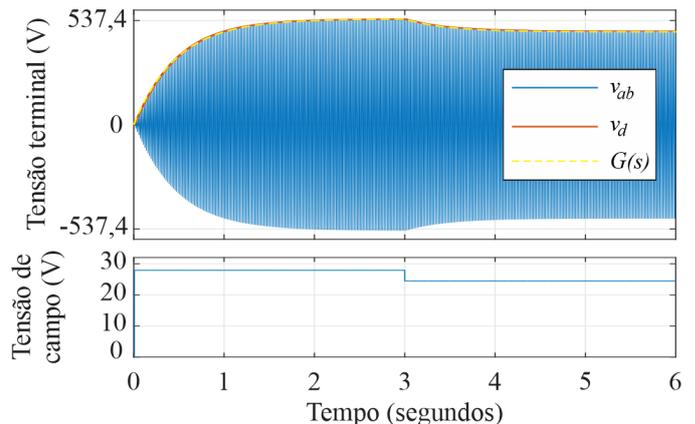


Figura 2. Validação do modelo do gerador.

É importante pontuar que esse é um modelo simplificado obtido experimentalmente e que representa o comportamento da excitação do gerador síncrono para um ponto de operação, não englobando os efeitos de saturação. O sistema de excitação é usualmente projetado considerando o gerador à vazio (Gibbard et al., 2015).

### 2.2 Modelagem do conversor Buck

A topologia do conversor Buck considerando não-idealidades no indutor e capacitor de filtro é mostrada na Fig. 3, onde  $v_s(t)$  é a fonte de alimentação,  $i_L(t)$  é a corrente no indutor de filtro,  $v_L(t)$  é a tensão sobre o indutor de filtro,  $v_C(t)$  é a tensão sobre o capacitor de filtro,  $i_C(t)$  é a corrente no indutor de filtro,  $v_{fd}(t)$  e  $i_{fd}(t)$  são a tensão e corrente de campo, respectivamente. Nessa topologia, a carga do conversor é o circuito de campo do GS, formado por uma

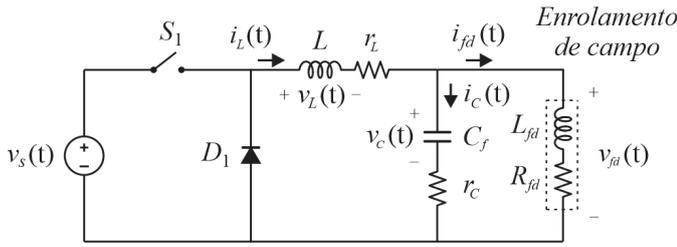


Figura 3. Topologia do conversor Buck não-ideal.

resistência e um indutor em série ( $R_{fd}$  e  $L_{fd}$ ) e a tensão de saída do conversor é a tensão de campo  $v_{fd}$ .

O ganho do conversor considerando as não-idealidades do indutor e capacitor é dado por (2), sendo obtido através da análise de regime permanente realizando o balanço de energia no capacitor (Erickson and Maksimovic, 2001):

$$M = \frac{V_{fd}}{V_s} = \frac{R_{fd}D}{R_{fd} + r_L}, \quad (2)$$

onde  $D$  é o valor médio da razão cíclica ( $d$ ) da chave  $S_1$ . Considerando o sistema de excitação estático, é desejado controlar a tensão de saída do conversor através da razão cíclica, portanto, é necessário obter a FT que relaciona  $v_{fd}$  com  $d$  para projeto do sistema de controle.

O modelo do conversor é obtido através de uma abordagem em espaço de estados clássica dada por Erickson and Maksimovic (2001). A forma de representação de um sistema em espaço de estados é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{E}u(t), \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $\mathbf{x}(t)$  é o vetor de estados do sistema,  $\mathbf{u}(t)$  é o vetor de entradas e  $\mathbf{y}(t)$  é o vetor de saídas. As matrizes  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{E}$  são obtidas através das equações dinâmicas do circuito (Erickson and Maksimovic, 2001). Considerando o circuito da Fig. 3, a tensão sobre o capacitor, a corrente no indutor de filtro  $L$  e a corrente de campo  $i_{fd}$  são definidos como os estados do sistema. O vetor  $\mathbf{u}(t)$  é formado pela tensão de entrada  $v_s(t)$  e a saída  $\mathbf{y}(t)$  é a tensão  $v_{fd}(t)$ , sendo assim:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ i_{fd}(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = [v_s(t)], \quad \mathbf{y}(t) = [v_{fd}(t)]. \quad (4)$$

Para obtenção do modelo em espaço de estados de conversores estáticos operando em CCM, o conversor é analisado separadamente durante as duas etapas de operação, sendo a Etapa 1 com a chave fechada e a Etapa 2 com a chave aberta (Erickson and Maksimovic, 2001).

**Etapa 1** Durante a primeira etapa de operação, a chave  $S_1$  se encontra fechada e o circuito equivalente do conversor é mostrado na Fig. 4. As equações dinâmicas que representam o comportamento dos estados do sistema durante a primeira etapa de operação são dadas por (5).

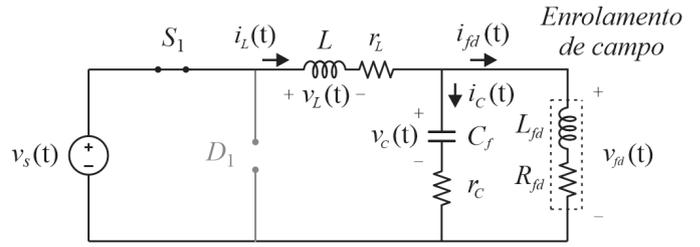


Figura 4. Circuito equivalente do conversor durante a primeira etapa de operação.

$$\begin{aligned} \frac{di_L(t)}{dt} &= -\left(\frac{r_L}{L} + \frac{r_C}{L}\right)i_L(t) + \frac{r_C}{L}i_{fd}(t) - \frac{v_C(t)}{L} + \frac{1}{L}V_{in}, \\ \frac{di_{fd}(t)}{dt} &= \frac{r_C}{L_{fd}}i_L(t) - \left(\frac{r_C}{L_{fd}} + \frac{R}{L_{fd}}\right)i_{fd}(t) + \frac{v_C(t)}{L_{fd}}, \\ \frac{dv_C(t)}{dt} &= \frac{i_L(t)}{C_f} - \frac{i_{fd}(t)}{C_f}. \end{aligned} \quad (5)$$

A tensão de saída pode ser escrita como:

$$v_{fd}(t) = r_C i_L(t) - r_C i_{L_{fd}}(t) + v_C(t), \quad (6)$$

colocando na forma de (3), resulta nas matrizes:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} -\left(\frac{r_L + r_C}{L}\right) & \frac{r_C}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{r_C}{L_{fd}} & -\left(\frac{r_C + R}{L_{fd}}\right) & \frac{1}{L_{fd}} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = [r_C \quad -r_C \quad 1], \\ \mathbf{E}_1 &= [0]. \end{aligned} \quad (7)$$

**Etapa 2** Na segunda etapa de operação, a chave  $S_1$  está aberta e o circuito equivalente é mostrado na Fig. 5.

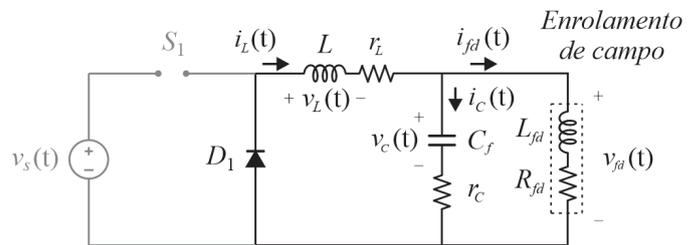


Figura 5. Circuito equivalente do conversor durante a segunda etapa de operação.

Durante essa etapa, a equação da saída permanece a mesma da etapa 1. As equações dinâmicas que representam o comportamento dos estados do sistema durante a segunda etapa de operação são dadas por:

$$\begin{aligned}\frac{di_L(t)}{dt} &= -\left(\frac{r_L}{L} + \frac{r_C}{L}\right)i_L(t) + \frac{r_C}{L}i_{fd}(t) - \frac{v_C(t)}{L}, \\ \frac{di_{fd}(t)}{dt} &= \frac{r_C}{L_{fd}}i_L(t) - \left(\frac{r_C}{L_{fd}} + \frac{R}{L_{fd}}\right)i_{fd}(t) + \frac{v_C(t)}{L_{fd}}, \\ \frac{dv_C(t)}{dt} &= \frac{i_L(t)}{C_f} - \frac{i_{fd}(t)}{C_f}.\end{aligned}\quad (8)$$

Resultando nas matrizes:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_2 &= \mathbf{A}_1, \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_2 &= \mathbf{C}_1, \\ \mathbf{E}_2 &= \mathbf{E}_1.\end{aligned}\quad (9)$$

*Modelo de pequenos sinais* O equacionamento para obtenção do modelo de pequenos sinais é descrito em Erickson and Maksimovic (2001). As matrizes  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{E}$  são obtidas fazendo:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= D\mathbf{A}_1 + D'\mathbf{A}_2, \\ \mathbf{B} &= D\mathbf{B}_1 + D'\mathbf{B}_2, \\ \mathbf{C} &= D\mathbf{C}_1 + D'\mathbf{C}_2, \\ \mathbf{E} &= D\mathbf{E}_1 + D'\mathbf{E}_2,\end{aligned}\quad (10)$$

onde  $D' = 1 - D$ . O sistema em espaço de estados da forma padrão, obtido através das matrizes que representam o comportamento do conversor durante as duas etapas de operação, é dado por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{E}\mathbf{U},\end{aligned}\quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_p(t) = \begin{bmatrix} \hat{u}(t) \\ \hat{d}(t) \end{bmatrix},$$

Variáveis denotadas por  $\hat{\cdot}$  representam uma pequena variação em torno de um ponto de operação. No vetor  $\hat{\mathbf{u}}_p(t)$ , a razão cíclica  $\hat{d}(t)$  é incorporada como uma entrada do modelo. Dessa forma, as matrizes que compõe o modelo dinâmico médio de pequenos sinais que representa o comportamento dinâmico do conversor são dadas por (12).

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} \frac{-(r_C + r_L)}{L} & \frac{r_C}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{r_C}{L_{fd}} & \frac{-(R_o + r_C)}{L_{fd}} & \frac{1}{L_{fd}} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}\quad (12)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_p &= \begin{bmatrix} \frac{nD}{L} & \frac{nV_s}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_p &= [r_C \quad -r_C \quad 1] \\ \mathbf{E}_p &= [0 \quad 0]\end{aligned}$$

*Função de transferência* A FT que relaciona a tensão de saída do conversor com as entradas de  $\hat{\mathbf{u}}_p(t)$  é obtida através da Transformada de Laplace do sistema em espaço de estados. O processo matemático é descrito em Erickson and Maksimovic (2001). A FT que relaciona a tensão de saída média  $V_{fd}$  com a razão cíclica  $D$  é dada por (13).

*Validação do modelo* A Tabela 1 apresenta os parâmetros do conversor projetado, bem como os parâmetros da máquina síncrona obtidos experimentalmente. É considerado que o conversor é alimentado por um barramento de 150 V. O valor elevado de  $L_{fd}$  se dá em razão do elevado tempo de resposta (valor de  $T'_{d0}$ ) da corrente de campo frente à variações na tensão de campo.

A Fig. 6 apresenta a comparação entre a resposta da FT dada por (13) e o circuito completo do conversor Buck não-ideal simulado frente à variações na razão cíclica  $d$ . Ao comparar a resposta do modelo com o circuito simulado do conversor, pode-se concluir que o modelo de pequenos sinais desenvolvido representa adequadamente o comportamento médio do conversor para pequenas e grandes perturbações na razão cíclica, desconsiderando as ondulações em alta frequência.

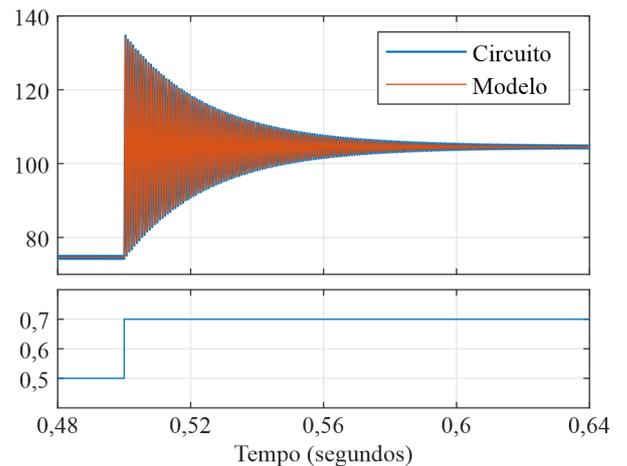


Figura 6. Validação do modelo do conversor.

$$G_{vd}(s) = \frac{V_{fd}(s)}{D(s)} = \frac{CL_{fd}V_{in}r_Cs^2 + V_{in}(CR_{fd}r_C + L_{fd})s + R_{fd}V_{in}}{CLL_{fd}s^3 + C(LR_{fd} + Lr_C + L_{fd}r_C + L_{fd}r_L)s^2 + (L + L_{fd} + CR_{fd}r_C + CR_{fd}r_L + Cr_Cr_L)s + (R_{fd} + r_L)}\quad (13)$$

Tabela 1. Parâmetros do conversor Buck não-ideal

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	150 V
Frequência de chaveamento ( $f_s$ )	20 kHz
Indutor de filtro ( $L$ )	4,55 mH
Capacitor de filtro ( $C_f$ )	3,3 $\mu$ F
Resistência de campo ( $R_{fd}$ )	31,94 $\Omega$
Indutância de campo ( $L_{fd}$ )	16 H
Resistência parasita do capacitor ( $r_C$ )	0,2 $\Omega$
Resistência parasita do indutor ( $r_L$ )	0,263 $\Omega$
Módulo IGBT ( $S_1$ )	SKM50GB123D
Diodo ( $D_1$ )	SKKD42F10

### 3. SISTEMA DE CONTROLE

O diagrama do sistema de controle é mostrado na Fig. 7, onde  $e(s)$  é o erro da tensão terminal,  $C_v(s)$  é o controlador a ser projetado e  $u_v(s)$  é o sinal de controle da malha e também a própria razão cíclica do conversor. Uma única malha de tensão controla a tensão terminal do GS através da variação da razão cíclica do conversor Buck.

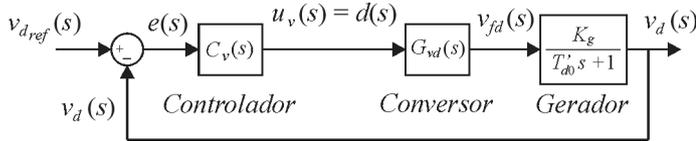


Figura 7. Diagrama do sistema de controle.

A FT de malha direta é dada por (14). A Fig. 8 apresenta o diagrama de Bode de malha aberta não compensada da planta.

$$T_{ma} = G_{vd}(s)G(s) \quad (14)$$

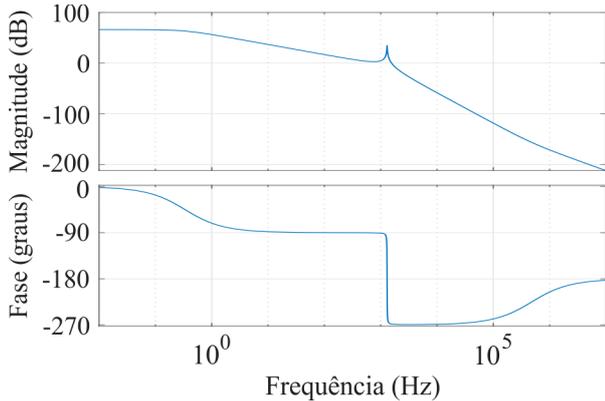


Figura 8. Diagrama de bode da planta não compensada.

De acordo com a norma IEEE 421.2 (IEEE, 2014), o projeto de controle do sistema de excitação precisa obedecer a certos critérios. Segundo a norma, a Margem de Ganho (MG) deve ser maior que 6 dB, a Margem de Fase (MF) deve estar entre 20 e 80° e a banda passante deve estar entre 0,3 e 5 Hz. Além disso, o *overshoot* deve ser menor que 40%. Considerando as limitações da planta e as diretrizes de projeto dadas pela norma, através do ambiente do *Sisotool* do MATLAB, é projetado um controlador do

tipo PI com ganho  $K_P = 0,00130$  e ganho  $K_I = 0,00652$ , dado por (15), resultando em uma MG de 20 dB e MF de 74°, como mostrado no diagrama de bode de malha aberta compensada da Fig. 9. A frequência de cruzamento resultante é de 1,42 Hz.

$$C_v = 0,0013015 + \frac{0,0065296}{s} \quad (15)$$

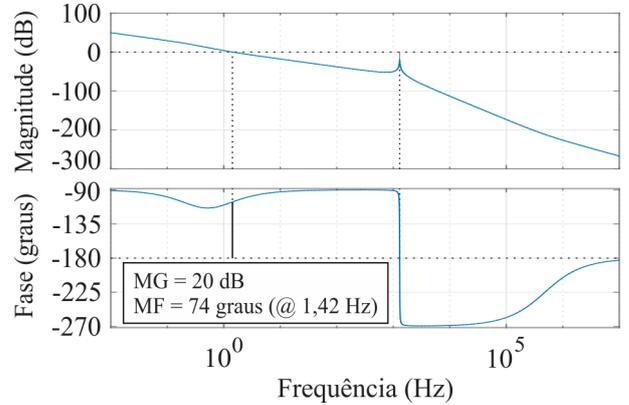


Figura 9. Diagrama de bode da planta compensada em malha aberta.

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema de excitação projetado é implementado em uma bancada de testes de sistemas de geração. A bancada faz uso do DSP TMS320F28335 para aquisição das medidas e controle do sistema. É utilizado um GS de 5 kVA, 380 V e 4 pares de polos salientes, com velocidade nominal de 900 RPM, conectado a três fios (sem condutor de neutro disponível). A máquina primária é um motor CC de 6 kW com excitação independente. A velocidade da máquina CC é controlada a partir da estimação da frequência da tensão terminal gerada pelo GS através de um filtro de Kalman (Cardoso et al., 2006). O objetivo do sistema de controle é manter a tensão regulada dentro de  $\pm 5\%$  do valor nominal, de acordo com ANEEL (2022).

A Fig. 10 apresenta a tensão  $v_{ab}$  (canal 1), tensão  $v_{fd}$  (canal 3) e corrente  $i_a$  (canal 4) frente à algumas variações de carga no sistema. Os eventos apresentados na figura são os que seguem:

- 1,5 segundos - O sistema parte em malha aberta, com uma razão cíclica fixa no conversor e partida da máquina CC em rampa;
- 16,5 segundos - Início do controle de frequência;
- 21,5 segundos - Início do controle de tensão;
- 25,5 segundos - Início da conexão das cargas;
- 34,5 segundos - Desconexão de carga;
- 37,5 segundos - Desligamento.

O teste mostra a resposta do sistema de controle frente às variações na carga aplicada ao gerador, aumentando o nível de excitação para manutenção do nível de tensão nominal. A seguir, no resultado da Fig. 11, o sistema de excitação do GS foi avaliado frente a uma nova série de variações de carga. A figura apresenta dados obtidos a partir do osciloscópio como a tensão  $v_{ab}$ , corrente  $i_a$  e tensão de campo  $v_{fd}$  e também dados obtidos a partir do

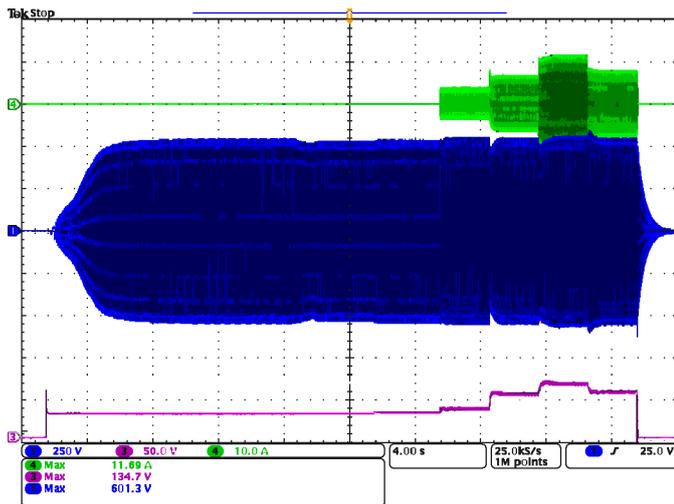


Figura 10. Resultado experimental: resposta do sistema frente à variações de carga.

DSP, como a potência gerada, a componente  $v_d$  calculada a partir das tensões trifásicas da máquina e a frequência das tensões geradas. No resultado da figura, o GS inicia com velocidade e tensão nominal, com os terminais à vazio. As cargas trifásicas equilibradas adicionadas ao longo do teste são:

- 3 segundos - Carga 1: 1,6 kW, FP = 1;
- 6 segundos - Carga 2: 1,5 kVA, FP = 0,64 atrasado;
- 9 segundos - Carga 3: 1,6 kW, FP = 1;

Aos 9 segundos o gerador atinge 96% da carga nominal. No instante de 12 segundos a Carga 1 é desconectada para avaliar a desexcitação do GS. O gráfico de  $v_d$  mostra a adequada regulação da tensão de alimentação. No instante da conexão da Carga 2, existe um afundamento de 12% da tensão nominal devido ao baixo FP da carga, configurando uma transgressão do nível de tensão. A tensão é recuperada para o valor nominal dentro de 0,32 segundos, mostrando o tempo de resposta rápido do sistema de excitação. Nas demais conexões de carga o nível de tensão foi mantido dentro de faixa adequada de 95 a 105% do valor nominal delimitado por ANEEL (2022).

A Fig. 12 mostra o comportamento de regime permanente do sistema alimentando uma carga não-linear de 1 kW através de um retificador não controlado em ponte completa, apresentando a tensão  $v_{ab}$ , corrente  $i_a$ ,  $v_d$  e tensão de campo. Uma vez que o sistema de excitação só pode atuar sobre a tensão de campo, este não possui capacidade de compensação de componentes harmônicas. Mesmo assim, o sistema foi capaz de manter o nível de tensão regulado mesmo frente à alta distorção da forma de onda das correntes das fases.

Por fim, foi avaliado o comportamento do gerador alimentando uma carga desbalanceada. É conectada uma carga trifásica com 550 W/fase nas fases  $a$  e  $b$  e 800 W na fase  $c$ . A Fig. 13 mostra o comportamento de regime permanente do gerador alimentando a carga desequilibrada, apresentando as tensões de linha trifásicas, correntes trifásicas,  $v_d$  e tensão de campo. Da mesma maneira, o sistema de excitação não tem capacidade de atuar sobre desbalanços

nas correntes de carga, mas é capaz de manter a tensão terminal regulada.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e implementação de um sistema de excitação estático baseado em conversor Buck. O modelo do conversor foi desenvolvido para projeto do sistema de controle. Esse sistema apresenta vantagens como a utilização da componente  $v_d$ , eliminando o atraso causado pelo cálculo do valor RMS da tensão terminal. Selecionado por critério de simplicidade e robustez, o conversor Buck foi capaz de atender ao sistema de controle e manter a tensão do GS regulada frente à variações de carga e também alimentando cargas desbalanceadas e não-lineares.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo é financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de financiamento 001. Os autores são gratos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCT-GD), CNPq processo n° 465640/2014-1, CAPES processo n° 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo n° 17/2551-0000517-1.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL (2022). *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST - Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica*.
- Biriescu, M., Proștean, G., Liuba, G., Nedelea, V.M., Augustinov, L., Madescu, G., and Moț, M. (2011). Experimental model of a hydrogenerator with static excitation. In *2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool*, 1–4.
- Boldea, I. (2015). *Synchronous Generators*. CRC Press.
- Cardoso, R., de Camargo, R.F., Pinheiro, H., and Gründling, H.A. (2006). Kalman filter based synchronization methods. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1–7.
- Chen, Z., Lu, J., Mao, C., Zhou, Y., and Wang, D. (2015). Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability. In *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1–10.
- Choo, K.M., Jung, W.S., Kim, J.C., Kim, W.J., and Won, C.Y. (2018). Study on auto-tuning pid controller of static excitation system for the generator with low time constant. In *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 755–759.
- Choo, K.M. and Won, C.Y. (2020). Analysis of model-based tuning method of pid controller for excitation systems considering measurement delay. *Energies*, 13(4).
- Erickson, R.W. and Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Springer, 2ed edition.
- Fitzgerald, A., Fitzgerald, A., Kingsley, C., and Umans, S. (2003). *Electric Machinery*. McGraw-Hill International Edition. McGraw-Hill.
- Gibbard, M., Pourbeik, P., and Vowles, D. (2015). *Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems*. The University of Adelaide Press.

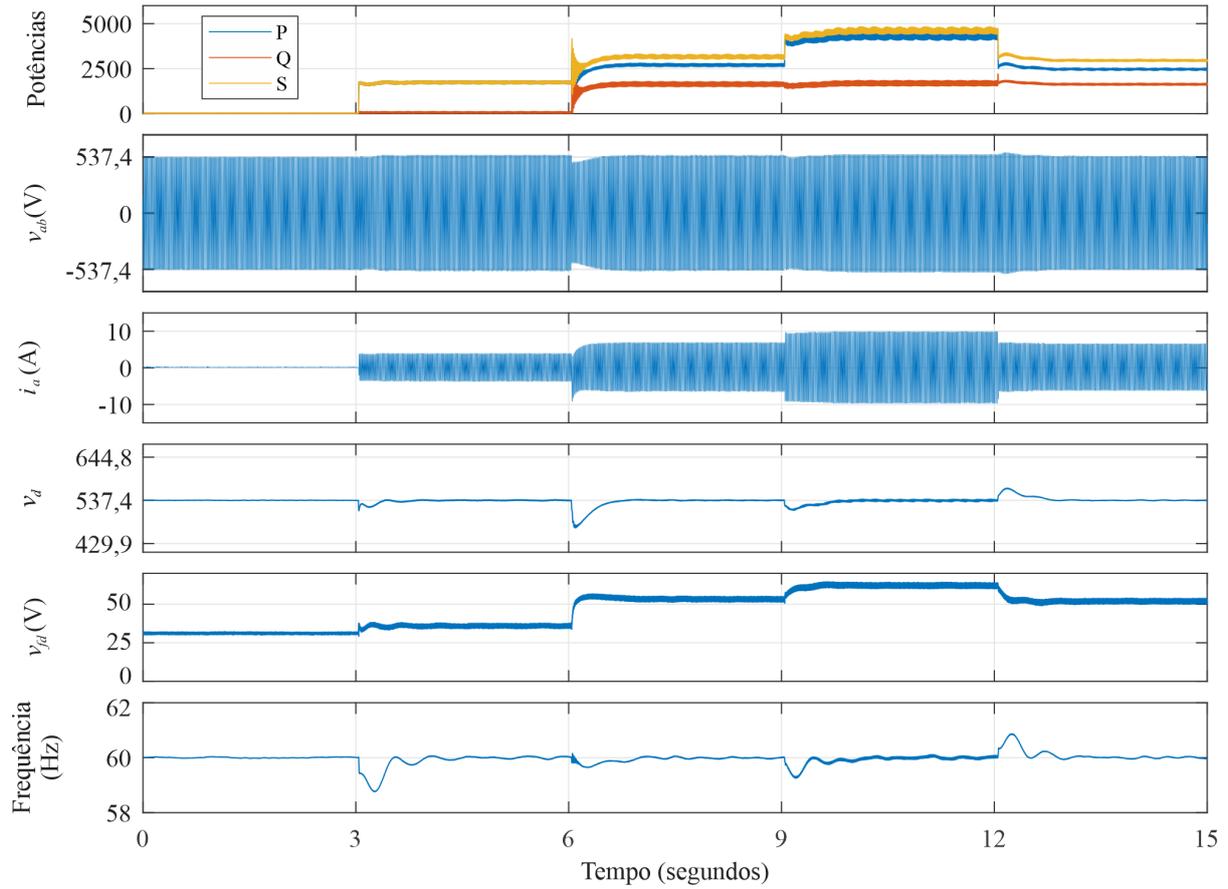


Figura 11. Resultado experimental: resposta do sistema frente à variações de carga.

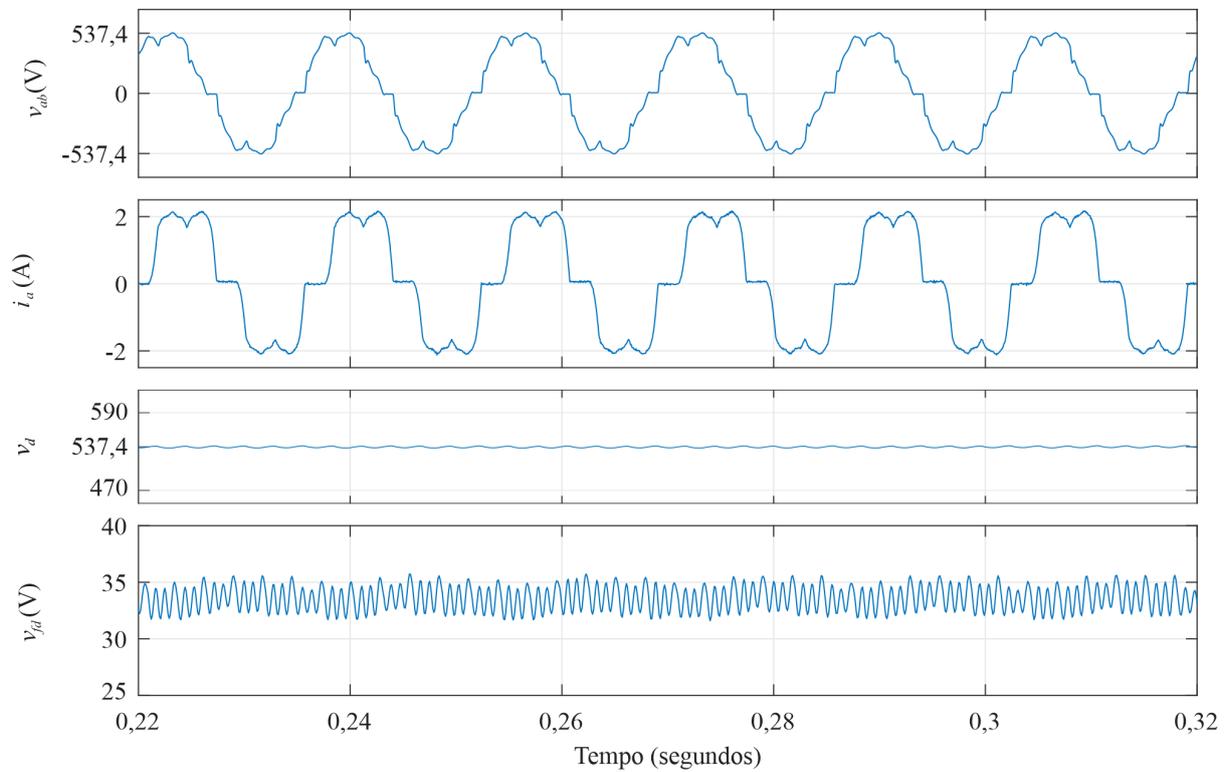


Figura 12. Resultado experimental: gerador alimentando carga não-linear.

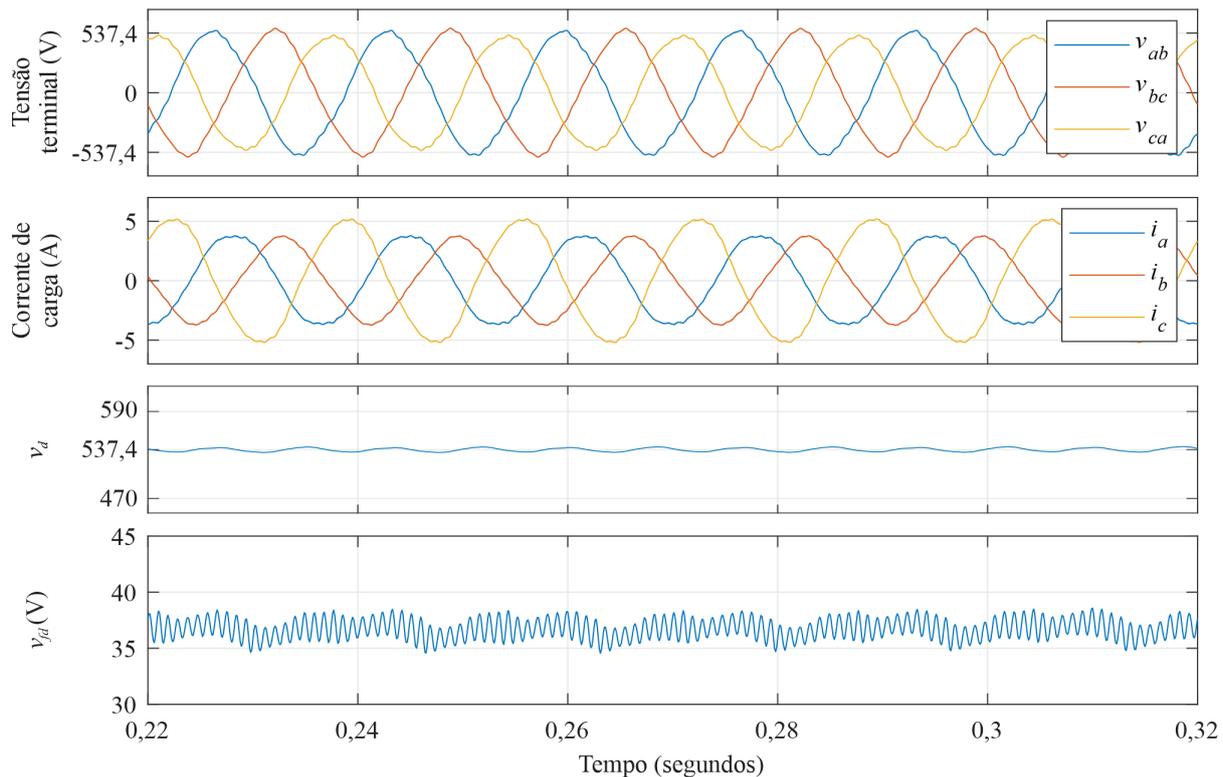


Figura 13. Resultado experimental: gerador alimentando carga desbalanceada.

- Hirsch, A., Parag, Y., and Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(C), 402–411.
- IEEE (2014). Ieee guide for identification, testing, and evaluation of the dynamic performance of excitation control systems. *IEEE Std 421.2-2014 (Revision of IEEE Std 421.2-1990)*, 1–63.
- IEEE (2016). Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, 1–207.
- Irmak, E., Güler, N., and Ersan, M. (2016). Pi controlled solar energy supported static excitation system desing and simulation for synchronous generators. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 1024–1028.
- Kamiev, K., Parviainen, A., and Pyrhönen, J. (2016). Hybrid excitation synchronous generators for small hydropower plants. In *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2529–2535.
- Knudsen, J., Bendtsen, J.D., Andersen, P., Madsen, K.K., and Sterregaard, C.H. (2018). Supervisory control implementation on diesel-driven generator sets. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(12), 9698–9705.
- Mishra, T. and Gurralla, G. (2018). Design and implementation of igbt based static excitation system with buck converter. In *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1–6.
- Natarajan, D.S., Jain, S., and Reddy, K. (2017). Solar pv fed stand-alone excitation system of a synchronous machine for reactive power generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, 052017.
- Nøland, J.K., Nuzzo, S., Tassarolo, A., and Alves, E.F. (2019). Excitation system technologies for wound-field synchronous machines: Survey of solutions and evolving trends. *IEEE Access*, 7, 109699–109718.
- Pivetta, R.E., da Silveira Vianna, P., Scherer, L.G., de Camargo, R.F., Rech, C., and Grigoletto, F.B. (2021). Synchronous generator static excitation control using two-switch forward converter. In *2021 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 1–8.
- Rhew, H.W., Sul, S.K., and Park, M.H. (1996). A new generator static excitation system using boost-buck chopper. In *Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, volume 2, 1023–1028 vol.2.
- Salehi, N., Martínez-García, H., Velasco-Quesada, G., and Guerrero, J.M. (2022). A comprehensive review of control strategies and optimization methods for individual and community microgrids. *IEEE Access*, 10, 15935–15955.
- Schaefer, R. (1998). Applying static excitation systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, 4(6), 41–49.
- Steeves, B. and Ouriques, H. (2016). Energy security: China and the united states and the divergence in renewable energy. *Contexto Internacional*, 38, 643–662.
- Ton, D. and Smith, M. (2012). The u.s. department of energy’s microgrid initiative. *The Electricity Journal*, 25, 84–94.
- Tsegaye, S. and Fante, K. (2018). Analysis of synchronous machine excitation systems: Comparative study. *Energy and Power Engineering*, 10, 1492 – 1496.