

Análise de um Controle de Parâmetros Adaptativos para um Gerador Síncrono Virtual

¹Daniel Carletti, Dayane C. Broedel, Patrick T. Rodrigues, Sabrina de A. Souza, Jussara F. Fardin, Lucas F. Encarnação

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico

¹danielc.ufes@gmail.com

Resumo — Com o crescimento da presença de conversores de potência realizando a interface entre fontes de energia renováveis e o sistema elétrico de potência, cada vez mais se faz necessário estudar estratégias de controle para tais conversores que sejam capazes de fazer com que os mesmos contribuam com a estabilização do sistema. Com isso, surgiram propostas de controle capazes de fazer com que estes conversores tivessem um comportamento semelhante ao de uma máquina síncrona e, através da inércia virtual inserida nestes controles, contribuísse para a estabilidade do sistema no qual estava inserido. Algumas pesquisas propõem um controle que vai além de uma simples implementação de máquina nestes conversores. Este artigo tem como objetivo abordar uma das estratégias de controle de parâmetros adaptativos para geradores síncronos virtuais (VSG) e realizar uma avaliação comparativa entre o VSG convencional e o adaptativo.

Palavras-chaves — máquina síncrona virtual, inércia virtual, geração distribuída, controle adaptativo.

I. INTRODUÇÃO

Buscando lidar com as questões relacionadas ao meio ambiente e a busca pela utilização de energias limpas, cada vez mais fontes de energia renováveis, carros elétricos, sistemas de armazenamento de energia e outros agentes são conectados ao sistema. A parcela da geração de energia elétrica presente no sistema correspondente a fontes renováveis vem crescendo de forma exponencial em diversos países. Relatórios apontam que países como a China e os Estados Unidos, por exemplo, tiveram um crescimento no investimento em energias renováveis nos últimos anos. De 2014 para 2015, por exemplo, ambos países aumentaram os investimentos na ordem de 17% e 19% respectivamente [1]. Dentro deste contexto, deve-se salientar que parte destas fontes renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica, são inseridas no sistema através de unidades geradoras distribuídas, ou seja, unidades geradoras de pequeno ou médio porte que são conectadas ao longo do sistema, próximas às unidades consumidoras.

Devido às características destas fontes renováveis, a maioria demanda que sua conexão com a rede seja feita através de inversores e conversores eletrônicos de potência, sendo a estratégia de controle mais adotada atualmente para tais conversores a maximização da potência ativa gerada com sua posterior injeção no sistema como fontes de corrente [2]. Quando em pequenas quantidades, isso não chega a constituir um problema para a estabilidade do sistema elétrico de potência, pois os grandes geradores convencionais

(usualmente hídricos e térmicos) são capazes de prover essa estabilidade através da inércia rotacional e amortecimento mecânico, características básicas de funcionamento de todo gerador síncrono. No entanto, unidades de geração conectadas através de conversores de potência não possuem a característica de inércia rotacional e amortecimento de máquinas tradicionais e, portanto, quando uma grande parcela da matriz energética é composta destas unidades de geração, o sistema passa a se tornar instável e vulnerável a falhas e distúrbios. Alguns destes distúrbios, como a variação da tensão e da frequência no sistema, são regulados através do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição elaborados pela ANEEL [3] que estabelece limites para tais problemas de qualidade de energia elétrica. Para evitar que se chegue a esse ponto é importante que este problema seja estudado e que soluções sejam propostas para adequar essas novas fontes de geração às normas e conceitos já consolidados dos sistemas elétricos atuais.

De forma a solucionar este problema, uma das propostas surgidas na literatura científica aborda a questão no sentido de transformar o controle de tais conversores de potência de forma que o mesmo possua em sua característica de funcionamento a capacidade de contribuir com a inércia equivalente do sistema. A estratégia de controle proposta por alguns pesquisadores visa fazer com que estes conversores imitem o comportamento de máquinas síncronas convencionais quando conectados à rede. Essa estratégia de controle ficou popularmente conhecida como máquina síncrona virtual, ou gerador síncrono virtual (VSG) [4]-[7]. Fisicamente eles ainda são conversores tradicionais, mas através da aplicação de uma modelagem de máquina em seus controles, os mesmos passam a ter uma dinâmica de funcionamento equivalente à de uma máquina., apresentando uma “inércia virtual”.

A implementação básica de um controle desta natureza segue o esquema ilustrado na Fig. 1. As tensões e correntes no ponto de acoplamento entre o conversor e o sistema são medidas e alimentadas em um modelo matemático de máquina síncrona que, então, calcula as tensões de referência para o chaveamento do conversor através de uma modulação por largura de pulsos PWM, permitindo ao conversor mimetizar o funcionamento de uma máquina.

Em comum a todas as topologias de controle propostas para emulação de uma máquina síncrona está a reprodução das características eletromecânicas da mesma, utilizando para isto a equação de oscilação mecânica em (1) e (2), parte importante da modelagem da máquina.

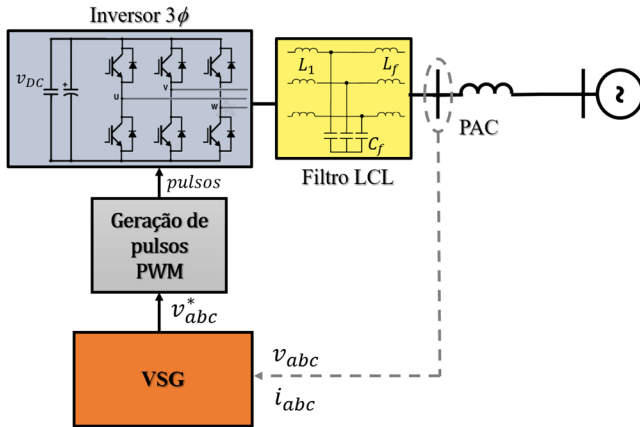


Fig. 1. Topologia para implementação de uma máquina síncrona virtual.

$$T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D \cdot \Delta\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

Aonde T_m é o torque mecânico de eixo, T_e é o torque elétrico, P_m e P_e são as potências mecânica e elétrica, ω é a velocidade no eixo da máquina, θ é a referência angular da máquina, D é o coeficiente de amortecimento e J é o momento de inércia rotacional da máquina.

A partir deste ponto, cada proposta existente na literatura adota uma estratégia diferente para o controle do VSG. Algumas estratégias existentes propõem uma malha de controle extra para controle de amplitude de tensão baseada em um controle *droop*, enquanto outras estratégias propõem a utilização da modelagem elétrica da máquina em conjunto com a equação de oscilação mecânica. A ordem e a complexidade da modelagem elétrica utilizada vão depender das necessidades e da escolha pessoal do projeto.

Um benefício importante do VSG é o fato de o mesmo não estar limitado a parâmetros construtivos como as máquinas reais. Os parâmetros a serem utilizados, como reatâncias, resistência de armadura, o coeficiente de amortecimento mecânico e, especialmente o momento de inércia rotacional da máquina, não são determinados por parâmetros construtivos, podendo ser ajustados da maneira que o projetista desejar.

Tais parâmetros podem, inclusive, serem ajustados em tempo real, a medida em que a máquina virtual segue conectada ao sistema elétrico. Esse ajuste pode ser feito temporariamente diante de um transiente qualquer de forma a melhorar o desempenho imediato da máquina virtual frente ao mesmo, por exemplo, ou também ser feito a longo prazo a medida em que um sistema supervisor visualiza a necessidade para tal adequação.

Os artigos publicados com essa proposta atualmente propõem que um controle adaptativo de momento de inércia virtual e coeficiente de amortecimento apresentam bons resultados quando na regulação de frequência no ponto de acoplamento em situações de transientes na rede [8]-[10]. Alguns artigos propõem um controle adaptativo apenas para o momento de inércia enquanto outros apresentam um controle

adaptativo conjunto entre momento de inércia e amortecimento mecânico como a solução.

Este artigo apresenta uma análise comparativa entre uma proposta de controle de parâmetros adaptativos existente na literatura e o controle VSG convencional frente a alguns transientes aplicados em um sistema dinâmico simulado. Os resultados serão discutidos e a vantagem ou não do controle adaptativo será ponderada do ponto de vista de melhor estabilidade de tensão e frequência do sistema.

II. DESENVOLVIMENTO DO VSG ADOTADO

Como dito anteriormente, a implementação básica de um VSG realiza a emulação básica das dinâmicas eletromecânicas de uma máquina síncrona, feita através do equacionamento mostrado em (1) e (2). O VSG adotado neste artigo fará, também, a representação elétrica dos enrolamentos da máquina através de uma modelagem comumente utilizada em estudos de análise de transientes. Um modelo elétrico completo da máquina envolve a utilização de equações diferenciais que representem o fluxo concatenado nos enrolamentos de estator, amortecedores e de campo, adicionando mais 5 equações diferenciais além das duas mecânicas [11]. No entanto, a menos que se queira representar fielmente a máquina em toda a sua complexidade, o modelo completo não é necessário.

Neste artigo, um modelo de 3ª ordem da máquina síncrona será adotado. Além das duas equações diferenciais que representam a modelagem mecânica da máquina (1) e (2), uma terceira equação diferencial será utilizada para a modelagem elétrica da mesma (3). Outras equações algébricas são utilizadas para o cálculo de potência elétrica virtual (4) e também as tensões terminais virtuais da máquina nos eixos dq (5) e (6).

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = E_f - E'_q + (x_d - x'_d) i_d \quad (3)$$

$$P_e = [E'_q + (x'_d - x'_q) i_d] i_q + E'_d i_d \quad (4)$$

$$V_{tq} = \omega (E'_q + x'_d i_d) + i_q R_s \quad (5)$$

$$V_{td} = \omega (E'_d - x'_q i_q) + i_d R_s \quad (6)$$

Sendo T'_{d0} a constante de tempo transiente de circuito aberto no eixo direto, x_d e x_q as reatâncias síncronas nos eixos dq, x'_d e x'_q as reatâncias de transiente nos eixos dq, i_d e i_q as componentes da corrente nos eixos dq, E'_d e E'_q as componentes de eixos dq da tensão transiente, E_f a tensão de excitação da máquina e R_s a resistência de armadura da máquina.

Juntamente ao modelo utilizado serão utilizados controles que auxiliarão no ajuste de potência mecânica e tensão de excitação virtuais do VSG. Para o controle de tensão de excitação da máquina será utilizado um modelo padrão do IEEE de sistema de excitação DC para geradores, chamado DC1A [12]. Enquanto o controle de potência mecânica virtual será feito através de um regulador de velocidade simples,

implementado através de um controle *droop* para ajuste de frequência, como ilustrado pela equação (7).

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_{ref} + D_p f_n (1 - \omega)}{\omega} \quad (7)$$

Aonde P_{ref} é o set point de potência ativa de saída do VSG; D_p é o coeficiente de *droop* de frequência, e f_n é a frequência nominal do sistema. O esquemático completo de controle, em coordenadas dq, está ilustrado na Fig. 2. O sistema que será utilizado neste trabalho para a simulação e verificação do desempenho das duas propostas (VSG convencional e VSG com controle adaptativo) está ilustrado na Fig. 3.

O sistema é caracterizado por um gerador de grande porte usado para representar o equivalente externo dinâmico do sistema elétrico de potência, o qual está conectado a um conjunto de cargas de potência constante através de um transformador abaixador. Na barra de carga é conectado o VSG, com a configuração da Fig. 1 através de uma impedância de linha. Todos os parâmetros do sistema para simulação estão indicados na Tabela I.

Os resultados apresentados pelo sistema com o VSG convencional podem ser observados nos gráficos ilustrados nas Fig. 4 a 7. A simulação foi desenvolvida no PSCAD/EMTDC v4.6.

Para efeito de verificação de desempenho do controle VSG convencional adotado e também para posterior comparação com a resposta apresentada pelo controle de parâmetros adaptativos, o sistema foi submetido aos seguintes transitórios:

- No instante 1s da simulação o *setpoint* de potência mecânica virtual P_{ref} do regulador de velocidade foi ajustado de 0.2pu para 1.0pu, alterando a potência entregue pelo controle VSG de 10kW para 50kW;

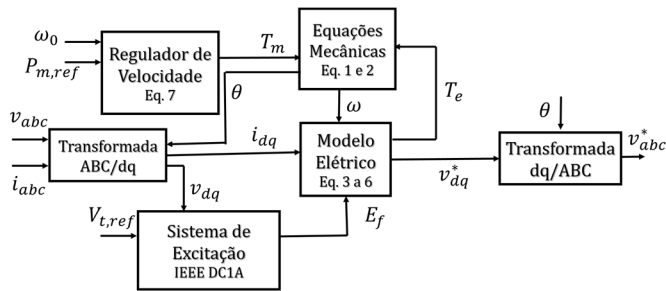


Fig. 2. Diagrama de controle em referencial dq de uma máquina síncrona virtual.

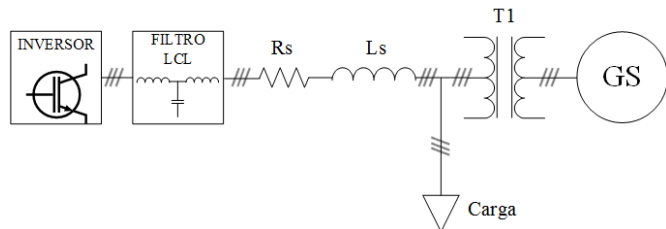


Fig. 3. Sistema elétrico utilizado para validação e comparação dos controles apresentados.

- No instante 2s de simulação uma entrada de carga é feita no sistema, alterando o valor de resistência de carga de 1Ω para 0.25Ω ;
- Finalmente em 3s um curto circuito trifásico para o neutro com impedância de 2Ω e duração de 200ms é aplicado.

TABELA I. PARÂMETROS DO SISTEMA PARA SIMULAÇÃO.

Dados do Sistema	
V_n (f-f) = 220V	f_n = 60Hz
R_s = 0.1 Ω	L_s = 0.6mH
Filtro LCL	
L_l = 0.6914mH	L_f = 0.1521mH
C_f = 137.0125 μ F	---
Parâmetros do VSG	
S_n = 50kVA	R_s = 0.008pu
X_d = 1.45pu	X_q = 0.28pu
X'_d = X'_q = 0.28pu	T'_d0 = 2.8s
J = 0.5	D = 20.0
V_{DC} = 500V	---
Regulador de Velocidade e Sistema de Excitação (VSG)	
D_p = 0.4	---
K_A = 100	T_A = 0.001
K_E = 1.0	T_E = 0.01
K_F = 0.001	T_F = 0.1
VR_{max} = 5.5pu	VR_{min} = -5.5pu
Gerador Síncrono de Rede	
S_n = 500kVA	U_n = 18kV
R_A = 0.004pu	x_l = 0.1pu
X_d = 1.8pu	X_q = 1.793pu
X'_d = 0.166pu	X'_q = 0.98pu
X''_d = 0.119pu	X''_q = 0.17pu
T'_d0 = 1.754s	T'_q0 = 0s
T''_d0 = 0.019s	T''_q0 = 0.164s
H = 3.06s	---
Transformador T1	
S_n = 1MVA	U_n = 18kV/220V
Z_{t1} = 5%	---

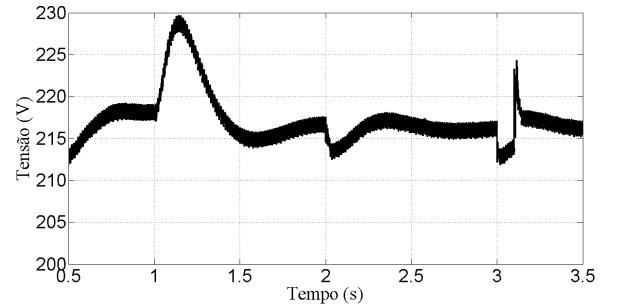


Fig. 4. Tensão de fase nos terminais do VSG com parâmetros fixos.

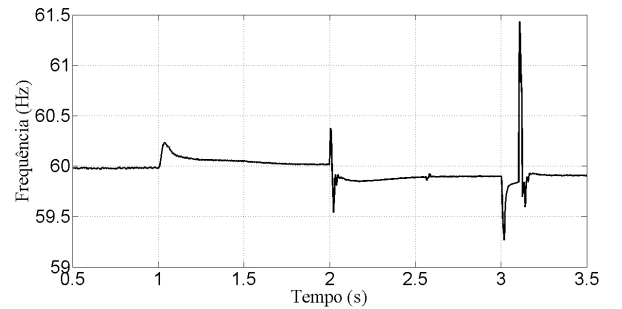


Fig. 5. Frequência nos terminais do VSG com parâmetros fixos.

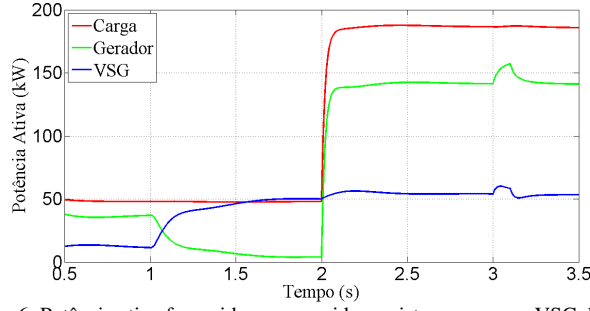


Fig. 6. Potência ativa fornecida e consumida no sistema com um VSG de parâmetros fixos.

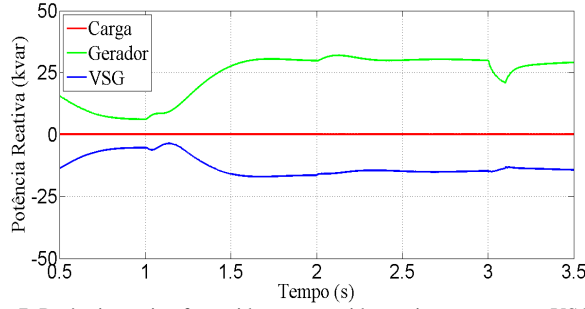


Fig. 7. Potência reativa fornecida e consumida no sistema com um VSG de parâmetros fixos.

O gráfico da Fig. 4 apresenta a tensão no ponto de conexão do VSG, a Fig. 5 apresenta o gráfico da frequência no mesmo local, as Fig. 6 e 7 apresentam as potências ativa e reativa respectivamente em cada agente presente no sistema. Uma análise dos resultados será feita na seção IV.

III. PROPOSTA DE CONTROLE DE PARÂMETROS ADAPTATIVOS

Dentre as propostas para controle adaptativo de parâmetros para máquinas síncronas virtuais que podem ser encontradas, as propostas em [6] e [9] apresentam controles em que não apenas o momento de inércia J da máquina virtual é modificado em operação, mas também o seu coeficiente de amortecimento mecânico D . Acima de tudo, a proposta [6] é de fácil implementação e baixo custo computacional comparado à proposta [9].

Em [6] é feita uma análise da contribuição de ambos os parâmetros em questão durante um transitório de velocidade na máquina virtual e uma estratégia para variação de ambos é sugerida. Primeiramente é necessário analisar a relação entre o momento de inércia e o coeficiente de amortecimento frente a variações de frequência. Se a equação (1) relativa a modelagem eletromecânica da máquina é rearranjada, temos uma relação entre a derivada da velocidade mecânica e a inércia rotacional, como em (8).

$$\frac{T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega}{J} = \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

A Equação (8) mostra que para $(T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega)$ constante, J é inversamente proporcional a $d\omega/dt$.

Rearranjando a equação novamente temos a relação entre o coeficiente de amortecimento D e $\Delta\omega$ em (9).

$$D \cdot \Delta\omega = T_m - T_e - J \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

A Equação (9) mostra que para $[T_m - T_e - J (d\omega/dt)]$ constante, D é inversamente proporcional a $\Delta\omega$. Para melhorar a estabilidade de frequência oferecida ao sistema pelo VSG, as curvas de transitório caracterizadas por $\Delta\omega$ e $d\omega/dt$ nas Fig. 8 e 9 deverão ser remodeladas através do controle cooperativo entre J e D .

As Fig. 8 e 9 ilustram um transitório amortecido de velocidade no instante de uma rejeição de carga em um gerador síncrono com parâmetros fixos. Para uma melhor análise, as curvas de variação de velocidade (Fig. 8) e da derivada da velocidade (Fig. 9) são analisadas em 4 intervalos.

No primeiro intervalo (t_0-t_1), para que o desvio de frequência seja reduzido é proposto um acréscimo no valor de J para que a derivada seja amenizada, relação que pode ser observada em (8). No entanto, aumentar o valor de D neste intervalo, apesar de diminuir o desvio de frequência, levaria a frequência ao seu ponto de oscilação negativa mais rapidamente. Portanto, neste intervalo, D permanece constante.

No segundo intervalo (t_1-t_2), um elevado valor de D é capaz de reduzir o desvio de velocidade mecânica como constatado em (9), enquanto um valor menor de J deve ser adotado para que a frequência retorne mais rapidamente ao valor nominal utilizando-se de um alto $d\omega/dt$ como mostrado em (8).

Entretanto, pode-se observar que o mesmo ocorreria no quarto intervalo para J , levando a mais um valor elevado de $d\omega/dt$ que prejudicaria o retorno da frequência para o seu valor nominal de forma definitiva. Então, buscando a estabilidade do sistema, J permanecerá constante no segundo

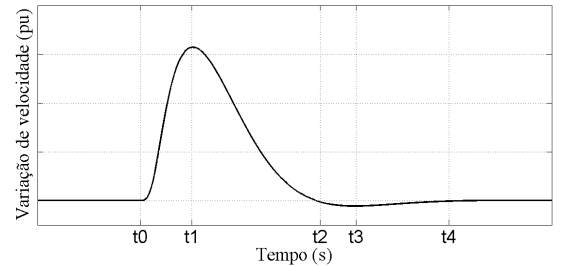


Fig. 8. Variação de velocidade $\Delta\omega$ em um gerador síncrono sobre transitório de rejeição de carga.

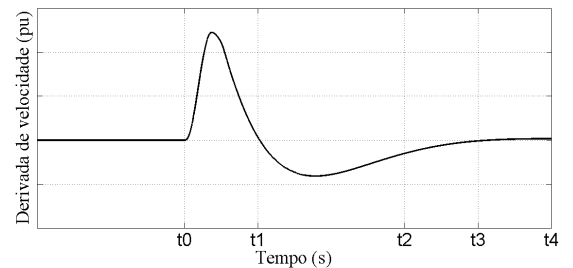


Fig. 9. Derivada da velocidade $d\omega/d$ em um gerador síncrono sobre transitório de rejeição de carga.

e quarto intervalo. O terceiro intervalo pode ser analisado de forma semelhante ao primeiro.

Resumindo as análises feitas, uma proposta de controle de J e D com base em $\Delta\omega$ e $d\omega/dt$ é mostrada na Fig. 10.

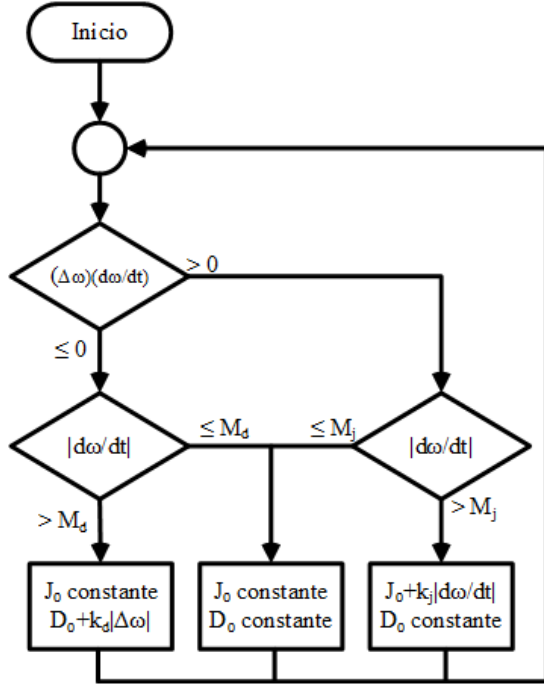


Fig. 10. Fluxograma do controle de parâmetros adaptativos para um VSG analisado.

Os valores de M_j e M_d são aplicados para evitar que o controle atue nas oscilações em regime permanente do sistema. Os parâmetros que serão utilizados para implementação do controle adaptativo proposto estão dispostos na Tabela II.

TABELA II. PARÂMETROS DO CONTROLE ADAPTATIVO.

Parâmetro	Descrição	Valor
J_0	Inércia inicial do controle	0.5
D_0	Amortecimento inicial	20
k_j	Coefficiente de ajuste de inércia	60
k_d	Coefficiente de ajuste de amortecimento	350
M_j	Limiar de atuação de k_d	0.01
M_d	Limiar de atuação de k_d	0.005

Os resultados apresentados pelo VSG com o controle de parâmetros adaptativo são mostrados nas Fig. 11 a 14.

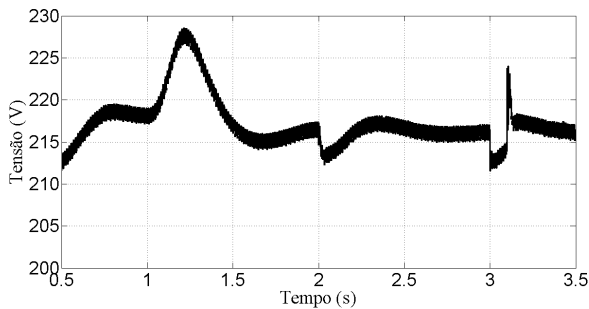


Fig. 11. Tensão de fase nos terminais do VSG com parâmetros variáveis.

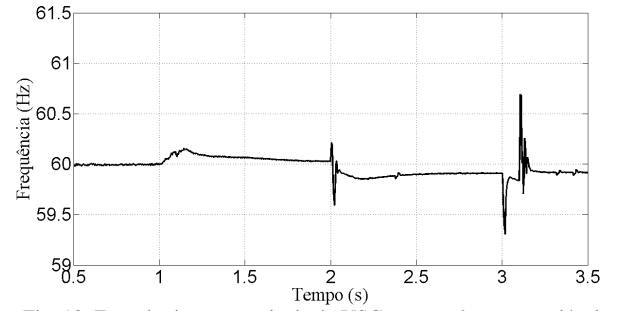


Fig. 12. Frequência nos terminais do VSG com parâmetros variáveis.

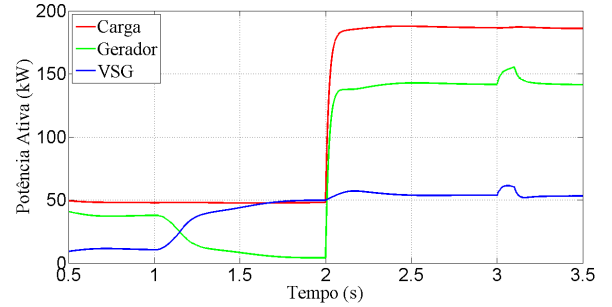


Fig. 13. Potência ativa fornecida e consumida no sistema com um VSG de parâmetros variáveis.

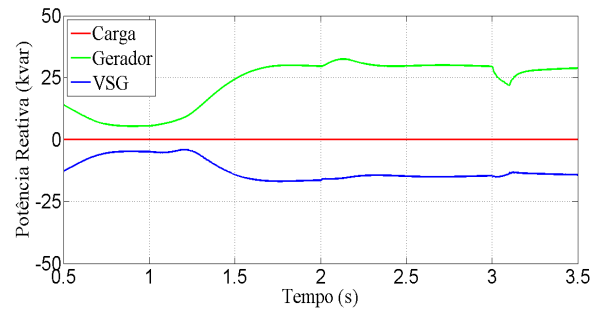


Fig. 14. Potência reativa fornecida e consumida no sistema com um VSG de parâmetros variáveis.

IV. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Pode-se observar através dos resultados apresentados que ambas as estratégias de controle tiveram um desempenho satisfatório ao confiar características de máquina aos conversores de potência e seu funcionamento foi validado perfeitamente. Quanto a uma comparação de desempenho na estabilização de frequência no ponto de acoplamento, para isso devemos analisar individualmente a resposta de cada controle a cada um dos transitórios de frequência. As Fig. 15 a 17 apresentam os resultados de ambas estratégias em sobreposição.

Os resultados nos mostram que o controle adaptativo foi eficaz em reduzir as variações de frequência no ponto de conexão do VSG, levando a uma redução percentual na variação de frequência Δf de até 51.7% no transiente de curto circuito, como ilustrado na Fig. 17. Neste caso, o controle adaptativo conseguiu reduzir a variação de frequência de 1.43Hz no caso original para 0.69Hz. Nos demais transientes também podemos observar com clareza uma suavização na frequência.

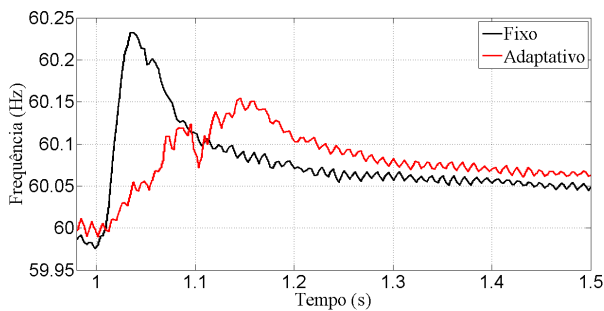


Fig. 15. Comparativo de frequência no transitório de mudança de *setpoint*.

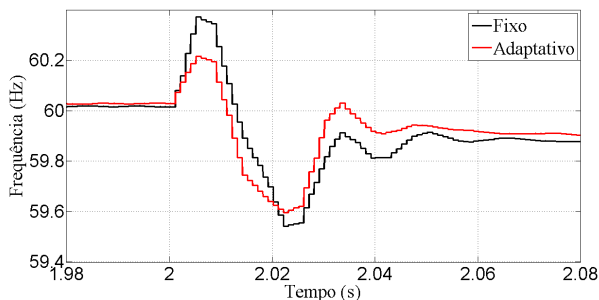


Fig. 16. Comparativo de frequência no transitório de entrada de carga.

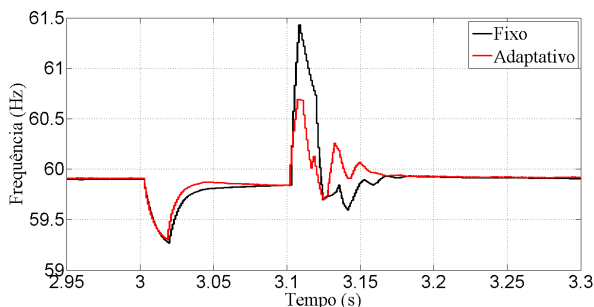


Fig. 17. Comparativo de frequência no transitório de curto-circuito.

Esses resultados mostram que o controle de parâmetros adaptativos é capaz de contribuir ainda mais com a estabilização do sistema, indo além do que o tradicional controle inercial era capaz de fazer.

A Tabela III apresenta a variação dos valores de J e D enquanto o sistema estava em operação e o controle adaptativo realizava o ajuste de ambos.

TABELA III. VARIAÇÃO MÁXIMA DE J E D DURANTE OS TRÊS TRANSITÓRIOS

Parâmetro	1º Transitório	2º Transitório	3º Transitório
J	95.57	9.32	7.352
D	23.64	21.16	21.59

Observando os gráficos de tensão (Fig. 4 e 11) e potência (Fig. 6, 7, 13 e 14) podemos também verificar que o controle adaptativo, apesar de contribuir ativamente na redução da variação de frequência, não leva o sistema a uma situação de desestabilização no controle do conversor, mesmo apresentando variações grandes de inércia e amortecimento virtuais.

Observa-se, também, que o controle adaptativo ainda contribui com uma suavização do transitório de tensão na

variação do *setpoint* de injeção de potência em 1s, visualizado através da comparação entre os gráficos das Fig. 4 e 11.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou uma análise comparativa entre duas estratégias de controle inerciais para conversores de potência. A topologia de controle tradicional de um gerador síncrono virtual foi mostrada e validada através de resultados de simulação. Na sequência, uma proposta de controle de parâmetros adaptativos, encontrada na literatura, foi analisada e implementada. Os resultados foram apresentados e uma análise comparativa foi realizada.

Com isso, conclui-se que o controle adaptativo utilizado foi capaz de reduzir as variações de frequência de forma considerável e sem causar alterações na tensão no ponto de acoplamento que levassem o sistema para um ponto de instabilidade, com isso contribuindo além do VSG básico para a estabilização do sistema. Estratégias de controle inercial adaptativas como esta podem ser a chave para tornar a máquina síncrona virtual uma ferramenta ainda mais interessante para a interface de unidades de geração distribuída com o sistema elétrico.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Institute for Energy Economics and Financial Analysis – IEEFA. *China's Global Renewable Energy Expansion*, 2017.
- [2] J. H. R. Enslin, M. S. Wolf, D. B. Snyman and W. Swiegers, *Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 6, p. 769-773, 1997.
- [3] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST, Módulo 8, Revisão 8, 2017, p. 1-90.
- [4] H. P. Beck and R. Hesse. Virtual synchronous machine, 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Barcelona, 2007, p. 1-6.
- [5] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner and H. P. Beck. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Malaga, 2011, p. 1-6.
- [6] Q. C. Zhong and G. Weiss. Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, p. 1259-1267, 2011.
- [7] D. Carletti, J. F. Fardin and L. F. Encarnação. Desenvolvimento de um Gerador Síncrono Virtual, IEEE/ IAS International Conference on Industry Applications, 2014.
- [8] J. Alipoor, Y. Miura and T. Ise. *Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 2, p. 451-458, 2015.
- [9] D. Li, Q. Zhu, S. Lin and X. Y. Bian. *A Self-Adaptive Inertia and Damping Combination Control of VSG to Support Frequency Stability*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 1, p. 397-398, 2017.
- [10] M. A. Torres L., L. A. C. Lopes, L. A. Morán T. and J. R. Espinoza C. *Self-Tuning Virtual Synchronous Machine: A Control Strategy for Energy Storage Systems to Support Dynamic Frequency Control*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no. 4, p. 833-840, 2014.
- [11] J. Machowski, J. Bialek and J. Bumby. *Power system dynamics: stability and control*, Ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std. 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), 2006.