

Experimental and Educational Platform for Operation Tests and Parameterization of Power System Regulators and Stabilizers

D. Magnus, L. Carbonera, *Member, IEEE*, L. Pfitscher, D. Bernardon, *Senior Member, IEEE*, A. Tavares, and C. Scharlau

Abstract—This paper presents the development and application of an experimental and educational platform for operation testing of synchronous machines and power system regulators. This platform is composed by an asynchronous motor, which simulates the primary machine, that is coupled to a synchronous generator shaft. The platform also includes a supervisory and control system, which acts on the parameterization of the regulators and drives the primary machine and generator's excitation field. It is possible to carry out operation tests with the generator stator running in open circuit, stand-alone or connected to the grid, and to simulate disturbances in the system to observe the power system behavior and control performance in such cases. The main contribution of this research is a real platform for experimental validation of digital models of automatic voltage regulators, power system stabilizers and governors, consequently optimizing control design and parameterization. Regarding to the teaching in power system control, the differential of this platform is the unified approach of theory understanding with the comprehension of techniques for implementation of control and instrumentation in real systems, thus contributing to the improvement of student learning, professional formation and motivation for practical activities.

Index Terms—Digital Control, Educational Platform, Power System Stabilizer, Synchronous Machine, Voltage Control.

I. INTRODUÇÃO

OS estudos de estabilidade em sistemas elétricos de potência (SEP) podem ser segregados em duas vertentes: estabilidade a pequenas perturbações, ligadas a modos de oscilação eletromecânicos e interarea [1]; e estabilidade a grandes perturbações, de maior magnitude, provenientes de aberturas de linhas, curtos-circuitos, e perdas de unidades geradoras [2].

Em termos de pequenas perturbações, a instabilidade pode ocasionar o crescimento insustentável do ângulo do rotor de geradores síncronos devido à carência de força sincronizante ou oscilações do rotor devido à perda de forças amortecedoras.

D. M. Magnus is with the Federal University of Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, Brazil (e-mail: douglas.magnus@posgrad.ufsc.br).

L. F. B. Carbonera is with the SATC Faculty, Criciúma, Santa Catarina, Brazil (e-mail: luis.carbonera@satc.edu.br).

L. L. Pfitscher is with the Federal University of Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, Brazil (e-mail: luciano.pfitscher@ufsc.br).

D. P. Bernardon is with the Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil (e-mail: dpbernardon@ufsm.br).

A. A. Tavares is with the SATC Faculty, Criciúma, Santa Catarina, Brazil (e-mail: andre.tavares@satc.edu.br).

C. C. Scharlau is with the Federal University of Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, Brazil (e-mail: cesar.scharlau@ufsc.br).

A estabilidade a pequenas perturbações consiste em um problema de amortecimento insuficiente das oscilações [3].

Logo, a operação adequada de sistemas elétricos de potência demanda a ação conjunta de diversos controladores, dentre eles o Regulador Automático de Tensão (AVR, do inglês *Automatic Voltage Regulator*) e os Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSS, do inglês *Power System Stabilizer*). Tais dispositivos objetivam manter o estado normal de operação de um sistema e aumentar a sua margem de segurança dinâmica. Desta forma, o sistema de potência com reguladores devidamente ajustados se torna menos susceptível a instabilidades do tipo angular, de tensão e de frequência, quando submetido a diferentes contingências ou a mudanças bruscas de carga [4].

Sendo assim, o projeto e a parametrização dos controladores digitais devem ser criteriosos, em função da complexidade operacional de um sistema elétrico de potência frente a perturbações de diversas naturezas [5]. Contudo, a validação desses reguladores na prática é pouco acessível devido à ausência de sistemas reais voltados a essa atividade. Esse fator impacta negativamente no projeto dos controladores em vista que, dessa forma, os testes de funcionalidade e parametrização dos reguladores digitais devem ser realizados na planta real.

Além disso, por apresentar caráter multidisciplinar, o ensino acerca de controle aplicado a SEPs se mostra uma tarefa complexa, sendo que a compreensão do tema pelo corpo docente não é trivial [6]. A utilização de plataformas didáticas que permitam a interação prática e dinâmica dos alunos com conceitos aplicados é de suma importância ao aprendizado em engenharia. Ademais, o desenvolvimento destas plataformas em laboratórios de instituições de ensino superior é algo cada vez mais frequente, em função da flexibilidade tecnológica para a realização de melhorias e do custo reduzido quando comparado à aquisição de produtos comerciais que, na maioria das vezes, não apresentam a mesma gama de aplicações.

Na bibliografia, encontram-se diversos trabalhos já publicados com exemplos de plataformas educacionais voltadas a SEPs. O trabalho relatado em [7] aborda uma bancada didática para aplicação em atividades de sistemas de automação industrial, enquanto que em [8] é exposta uma bancada para realização de práticas didáticas em disciplinas de eletrônica. A pesquisa descrita em [9] apresenta o uso de uma planta térmica em escala reduzida como plataforma para realização de práticas educacionais voltadas à parametrização de controladores PID. Em relação ao controle em sistemas

implementadas.

A partir da tela principal do sistema supervisorio, são realizados os comandos de partida e parada da máquina motriz e de acionamento e desacionamento da excitação do campo do gerador síncrono. Também são exibidos na tela os valores das medições de tensão terminal, corrente e tensão de campo, potência ativa e reativa do gerador síncrono e velocidade de rotação da máquina motriz. A inserção de distúrbios na malha de controle do regulador de tensão também é realizada no sistema de supervisão e controle.

D. Bancada de Cargas Externas

A bancada de cargas é composta por lâmpadas fluorescentes, resistências e motores, e recebe energia da plataforma experimental. O supervisorio possibilita a interação da bancada com a plataforma, permitindo a realização de experiências do gerador com carga e a monitoração das grandezas elétricas.

E. Sistema de Sincronização à Rede

O sistema de sincronização à rede elétrica consiste de contator trifásico com bobina para 220 V CA, dois botões de pulso e seis LEDs para tensão de entrada de 220 V CA. O acionamento para conexão do gerador em paralelo à rede é manual, a partir da identificação do sincronismo por meio dos LEDs. A Fig. 2 apresenta o sistema de sincronização.

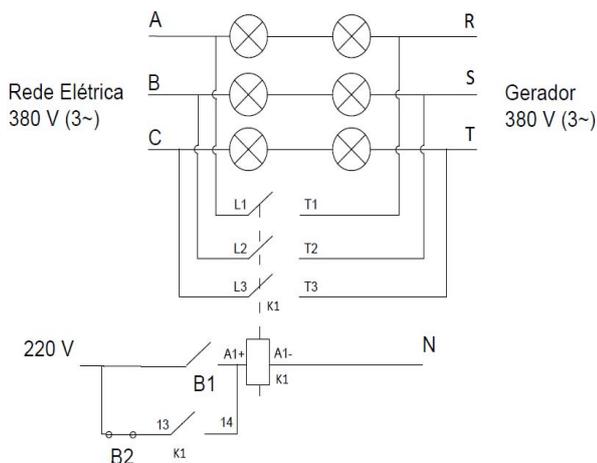


Fig. 2. Sistema de sincronização à rede elétrica.

O contator opera em normalmente aberto com o estator do gerador conectado à rede elétrica por meio de dois LEDs em série por fase. Em vista que as frequências da rede elétrica e das fases do estator do gerador não são idênticas, a defasagem entre as tensões do gerador e da rede elétrica variam no decorrer do tempo. Caso o módulo dessas tensões seja similar, quando essas tensões estiverem sincronizadas, a diferença de potencial entre a rede elétrica e o gerador será de aproximadamente zero e os LEDs irão se apagar. Nesse momento, é acionado o botão de pulso B1 para energização da bobina K1 do contator, que adiciona um curto-circuito em paralelo aos LEDs, retirando-os do circuito e conectando o gerador em paralelo à rede elétrica. A retirada do gerador do paralelismo é realizada por meio do botão de pulso B2.

Os subsistemas da plataforma experimental podem ser observados na Fig. 3.

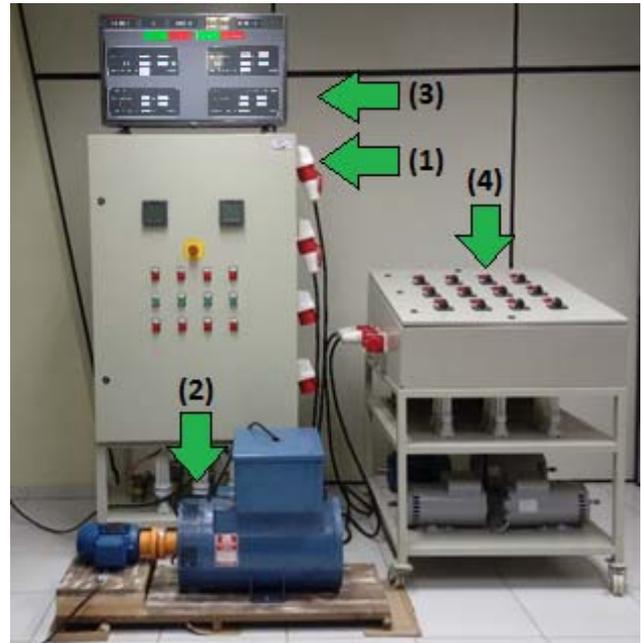


Fig. 3. Plataforma experimental desenvolvida: 1 – Sistema de excitação, 2 – Gerador Síncrono e Máquina Motriz, 3 – Sistema de Supervisão e Controle e 4 – Bancada de Cargas Externas.

A Tabela I apresenta um comparativo de custos da plataforma desenvolvida em relação a plataformas didáticas comerciais de máquinas elétricas.

TABELA I
COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE PLATAFORMAS DIDÁTICAS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS.

Plataforma Didática	Custo
Desenvolvida	R\$ 17.000,00
Cotação 1	R\$ 98.960,00
Cotação 2	R\$ 192.371,00

Observa-se que o custo da plataforma desenvolvida é consideravelmente menor quando comparada às bancadas comerciais. Ademais, ressalta-se o viés tecnológico resultante do desenvolvimento da plataforma, que além de abranger o escopo completo das máquinas e reguladores utilizados, abre campo para aperfeiçoamento e adaptação dos sistemas para outros tipos de aplicações não previstas.

III. MODELAGEM DOS REGULADORES

Nesta seção, será demonstrada a modelagem matemática do AVR, do PSS e do regulador de velocidade (RV) que serviu como base para discretização e programação digital dos reguladores da plataforma experimental.

A. Regulador Automático de Tensão

Os controladores aplicados na regulação da tensão terminal de geradores síncronos, denominados AVRs,

compreendem malhas de controle que agem na excitação do campo do gerador [16].

Com base em [17]–[20], definiu-se o modelo contínuo do AVR a ser implementado, conforme apresentado na Fig. 4.

As entradas do regulador de tensão são a referência da tensão terminal (V_{ref}) e o sinal de saída do PSS (V_{stab}). Aplica-se nesse somador uma realimentação negativa da tensão terminal (V_t) do gerador por um ramo composto por um filtro passa-baixa. O regulador implementado é do tipo PI com limitador dos valores de excitação mínima e máxima do sistema [20].

B. Power System Stabilizer

O PSS se refere a uma malha de controle que atua comumente no regulador de tensão e que tem por objetivo aumentar o nível de amortecimento dos modos de oscilação do sistema elétrico de potência [21].

Com base nos requisitos estipulados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico [22], que exige que máquinas síncronas com potência maior que 30 MW sejam equipadas com sistema de excitação estático e estabilizador IEEE PSS2B, definiu-se esse modelo de PSS para atuação na malha de controle do AVR. A modelagem do PSS2B no domínio da frequência pode ser verificada na Fig. 5.

As entradas do PSS2B se referem à potência ativa (P) e à velocidade angular (w) das tensões do estator. Estas

variáveis passam por ramos compostos por filtros passa-alta e passa-baixa [23].

Os filtros passa-alta (bloco pa) têm a finalidade de isolar a componente contínua e manter apenas as oscilações para a atuação do PSS. Os filtros passa-baixa (bloco pb), por sua vez, representam os blocos de integração para análise da integral da potência acelerante [24].

Na sequência, os sinais filtrados e integrados passam por um estágio rastreador de rampa, que pode ser interpretado como um filtro passa-baixa de ordem parametrizável [17]. Este filtro atenua as componentes de baixa frequência e defasa o sinal de oscilação em 180° [25].

Por fim, o sinal proveniente do rastreador de rampa, referente à integral da potência acelerante, passa por um ramo de compensação de fase, composto por blocos de avanço-atraso (bloco aa). Este estágio do PSS tem por finalidade compensar as defasagens geradas pelo AVR e pelo campo do gerador, de forma a inserir um torque elétrico em fase com as oscilações de velocidade do rotor [26], [27].

Os trabalhos apresentados em [28], [29] abordam metodologias aplicadas à parametrização do PSS2B com caráter empírico, a partir da comparação entre a variação da potência ativa e o sinal de saída do PSS2B. Essa metodologia é detalhada no capítulo IV deste trabalho.

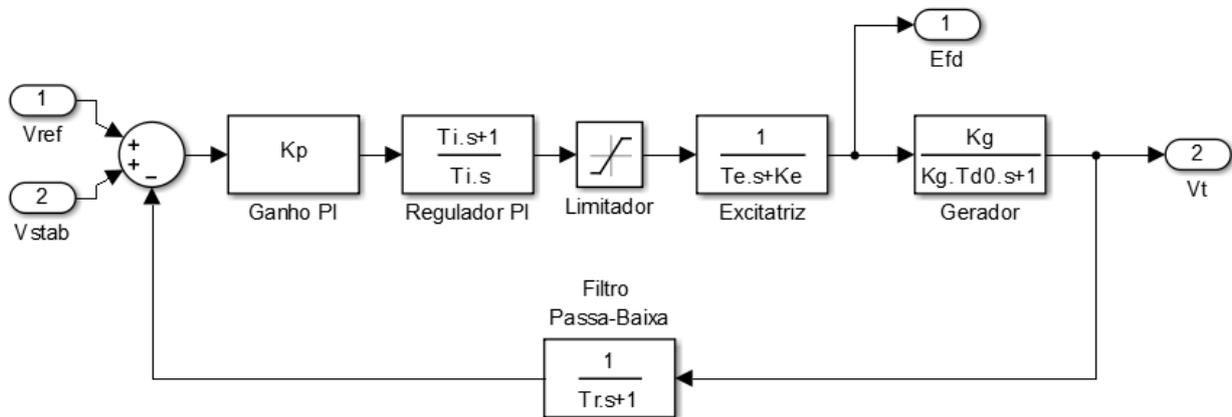


Fig. 4. Diagrama de blocos do regulador automático de tensão (adaptado de [20]).

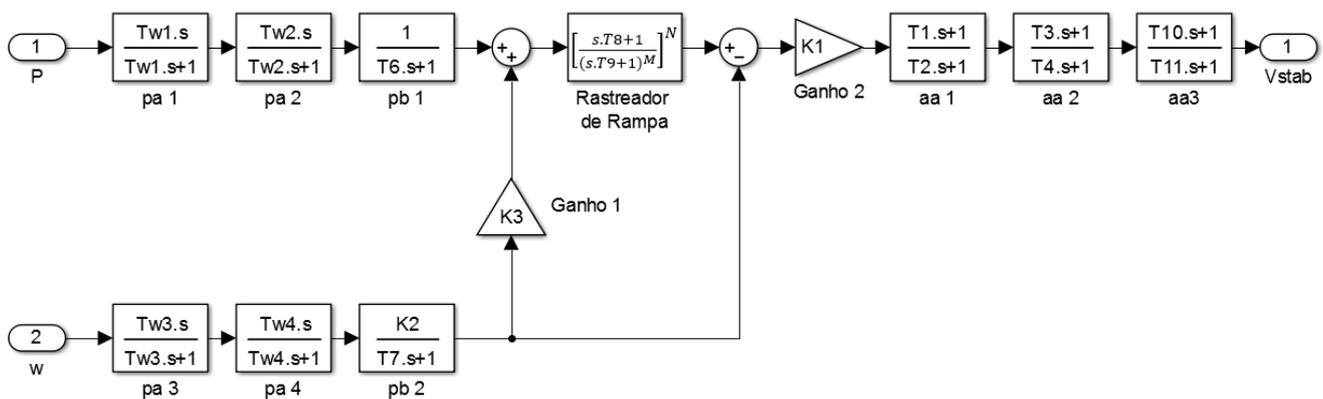


Fig. 5. Diagrama de blocos do PSS2B (adaptado de [30]).

C. Regulador de Velocidade

O regulador de velocidade (RV) implementado foi adaptado de [31] e compreende um controlador PI com realimentação negativa da frequência. A Fig. 6 apresenta o diagrama de blocos do RV.

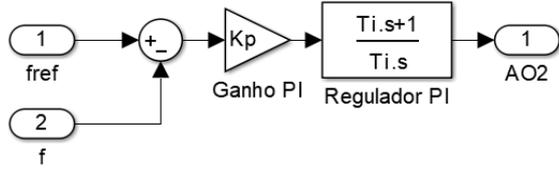


Fig. 6. Diagrama de blocos do RV.

O RV regula a frequência das tensões nos terminais do gerador (f) com base em uma frequência de referência (f_{ref}), logo atuando no controle do inversor que alimenta a máquina motriz. Como o trabalho se ateve ao controle da excitação do gerador síncrono, o RV apresenta parâmetros fixos de K_p igual a 3, T_i igual a 0,3 s e f_{ref} igual a 60 Hz. Contudo, ressalta-se que em futuros estudos acerca do controle da máquina motriz o RV pode ser parametrizado.

IV. IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES

A implementação dos reguladores digitais pressupõe a transformação das modelagens contínuas adotadas para o AVR, PSS2B, e RV, apresentadas nas Fig. 4, Fig. 5, e Fig. 6, em modelos no domínio discreto. Além disso, expõe-se a metodologia utilizada para sintonização dos parâmetros do PSS2B.

A. Método Backward Euler

Os procedimentos para discretização dos blocos contínuos se embasa no método *Backward Euler* [32]. A formulação matemática que representa esse método é demonstrada na Fig. 7, na qual T_s é o período de amostragem (em segundos).

$$\frac{d}{dt} \xrightarrow{\text{Laplace}} s \xrightarrow{\text{Discretização}} \frac{z-1}{z \cdot T_s}$$

Fig. 7. Método *Backward Euler* para discretização.

O modelo discreto é obtido a partir da aproximação da derivada pela equação de diferenças, e se mostra adequado à discretização de funções de transferência de primeira ordem [32]. A aplicação desse método corresponde à substituição das derivadas em relação ao tempo pelo bloco discreto da Fig. 7.

B. Modelagem no Domínio Discreto

A programação dos reguladores digitais demanda modelos discretos do compensador avanço-atraso, do controlador PI e dos filtros passa-alta e passa-baixa.

A Eq. (1) apresenta a função de transferência discreta do compensador avanço-atraso.

$$G_{aa}(z) = \frac{(T_s + T_1) - z^{-1} \cdot T_1}{(T_s + T_2) - z^{-1} \cdot T_2} \quad (1)$$

O modelo discreto do controlador PI é exposto na Eq. (2).

$$G_{pi}(z) = \frac{K_p \cdot [(T_s + T_i) - z^{-1} \cdot T_i]}{T_i \cdot (1 - z^{-1})} \quad (2)$$

A Eq. (3) representa a função de transferência discreta referente ao filtro passa-alta.

$$G_{pa}(z) = \frac{T_w \cdot (1 - z^{-1})}{(T_s + T_w) - z^{-1} \cdot T_w} \quad (3)$$

Por fim, a função de transferência associada ao filtro passa-baixa discreto está disposta na Eq. (4).

$$G_{pb}(z) = \frac{T_r}{(T_s + T_r) - z^{-1} \cdot T_r} \quad (4)$$

T_1 e T_2 são as constantes de avanço-atraso (s);
 K_p é o ganho proporcional do regulador;
 T_i é a constante de integração do regulador (s);
 T_r é a constante de tempo do filtro passa-baixa (s); e
 T_w é a constante de tempo do filtro passa-alta (s).

O filtro rastreador de rampa, exposto na Fig. 5, foi programado como um arranjo de compensadores de avanço-atraso discretos em série, comutados a partir da parametrização das variáveis M e N para definição da ordem do filtro.

Com base em simulações realizadas no MatlabTM, as funções de transferência discretas obtidas pelo método *Backward Euler* apresentaram uma resposta satisfatória para um período de amostragem de 10 ms,

Os reguladores discretos foram programados em *Function Block Diagram* (FBD) e implementados no CLP, que possui um multimetro de grandezas elétricas classe 0,5 integrado. As rotinas do CLP apresentam um período de amostragem de 10 ms.

C. Sintonização do PSS2B

O método aplicado para definição das constantes do PSS2B implementado possui caráter empírico, embasado no estudo apresentado em [28]. Esse procedimento tem como princípio a sintonização do sinal do PSS defasado em 180° do sinal de oscilação da potência elétrica.

A metodologia de sintonização do PSS2B empregada pode ser descrita conforme abaixo:

- Gerar pequenos distúrbios no sistema, com o AVR sem a inserção do PSS;
- Analisar a oscilação da potência ativa com a atuação do PSS;
- Modificar os parâmetros do estágio de compensação de fase;
- Manter o ensaio de pequenos distúrbios e modificar as constantes de avanço-atraso até que o PSS esteja 180° defasado da oscilação da potência ativa;
- Inserir o PSS na malha do AVR e ajustar o ganho KI .

No processo de comissionamento, realiza-se o ajuste do estágio de avanço-atraso, com o PSS desconectado da malha do AVR, até que ambos os sinais se encontrem em contra fase. Esta metodologia apresenta uma abordagem bastante didática, em função da interação entre o responsável pelo comissionamento e a resposta do sistema a partir dos ajustes do estabilizador.

Com base nos referenciais teóricos [19], [20], [22], sugere-se como parametrização inicial das variáveis do PSS2B os valores expostos na Tabela II. As constantes dos filtros passa-alta são parametrizadas de acordo com as frequências dos modos de oscilação a serem atenuados. O rastreador de rampa, por sua vez, tem parâmetros sugeridos pelo ONS [22].

TABELA II
PARAMETRIZAÇÃO INICIAL DO PSS2B

T_{w1}	10,00	T_7	0,00
T_{w2}	10,00	T_8	0,40
T_{w3}	10,00	T_9	0,10
T_{w4}	0,00	T_1	0,15
K_1	1,00	T_2	0,03
K_2	1,00	T_3	0,15
K_3	1,00	T_4	0,03
T_6	0,00	T_{10}	0,00
M	1,00	T_{11}	0,00
N	4,00	-	-

A partir do sinal da integral da potência acelerante, avalia-se a necessidade de avanço ou atraso da fase do sinal do PSS2B e então são parametrizadas as constantes dos blocos de avanço-atraso. O estágio de compensação de fase é ajustado até que se obtenha um comportamento satisfatório do sistema frente aos pequenos distúrbios testados.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados de aplicação da plataforma experimental dizem respeito aos testes de operação do AVR e do PSS2B implementados. A Tabela III apresenta os parâmetros e valores base utilizados nos testes.

TABELA III
PARÂMETROS APLICADOS AOS TESTES DE OPERAÇÃO

Período de Amostragem (ms)	10,00
Tensão Base (V)	380,00
Potência Ativa Base (W)	150,00

A. Testes de Operação do AVR

Inicialmente, define-se a referência de tensão (V_{ref}) em 0,9 p.u., aciona-se a excitação do gerador e interliga-se os terminais do estator do gerador trifásico à bancada de cargas

externas com inserção de 48W de lâmpadas fluorescentes em cada fase do estator. Com o sistema em regime permanente, altera-se a referência de tensão para 1,0 p.u. com um degrau e verifica-se a resposta da tensão terminal.

As constantes parametrizadas no AVR foram K_p igual a 0,02, T_i igual a 2,5 s e T_r igual a 0,1 s. A Fig. 8 exhibe a resposta da tensão terminal a essa operação.

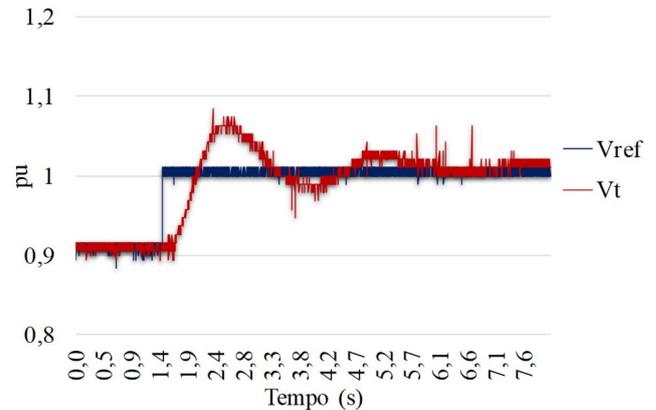


Fig. 8. Validação do AVR para uma variação da referência.

A Tabela IV lista os parâmetros verificados no sistema de supervisão e controle durante a operação do AVR.

TABELA IV
RESULTADOS DOS TESTES DE OPERAÇÃO DO AVR

Referência de Tensão (V)	342 (0.9 p.u.)	380 (1.0 p.u.)
Tensão Terminal (V)	342	380
Frequência (Hz)	60,03	60,01
Potência Ativa (W)	120,12	148,50
Potência Aparente (VA)	205,75	253,96
Sobressinal		6,31 %
Tempo de acomodação		1,75 s

O regulador de tensão atua de forma a aproximar a tensão terminal à referência estipulada. Observa-se no teste de operação que a resposta do regulador foi satisfatória, apresentando baixo sobressinal e um tempo de acomodação razoável. O aumento da potência elétrica é compensado pela atuação do RV, que aumenta o torque mecânico da máquina motriz de forma a manter a velocidade síncrona do gerador no valor de referência. A operação do RV é validada pela análise da frequência apresentada na Tabela IV, a qual se mantém constante mesmo após a perturbação.

B. Testes de operação do PSS2B

Para validação do funcionamento da plataforma experimental desenvolvida, um teste de sintonização do PSS2B foi realizado adotando-se como referência a metodologia exposta por [28] e abordada na seção IV deste trabalho. A Tabela V mostra as constantes parametrizadas para o PSS2B após a sintonização.

TABELA V
PARÂMETROS DO PSS2B APÓS A SINTONIZAÇÃO

T_{w1}	1,00	T_7	0,00
T_{w2}	1,00	T_8	0,00
T_{w3}	1,00	T_9	0,10
T_{w4}	1,00	T_1	0,15
K_1	1,23	T_2	0,27
K_2	1,00	T_3	0,15
K_3	1,00	T_4	0,27
T_6	0,00	T_{10}	1,00
M	1,00	T_{11}	1,00
N	4,00	-	-

O teste de operação do PSS2B foi realizado com o gerador conectado à bancada de cargas a fim de validar a operação com o gerador isolado. Na sequência, o gerador é sincronizado à frequência da rede elétrica e o estator é conectado em paralelo à rede. A funcionalidade do PSS2B é analisada nessas circunstâncias.

1) Operação com a Bancada de Cargas Externas

Um distúrbio senoidal de tensão com 0,05 p.u. de amplitude a uma frequência de 0,5 Hz é inserido no somador do AVR. A primeira validação do controle de estabilidade da plataforma experimental é realizada com o PSS2B desconectado da malha de controle do AVR. A segunda validação diz respeito à inserção, no tempo de 7 segundos, do sinal de controle do PSS2B no AVR.

A Fig. 9 apresenta o comportamento da variação da potência ativa (ΔP) em torno da referência (1,0 p.u.) e a resposta do PSS2B para esses dois cenários.

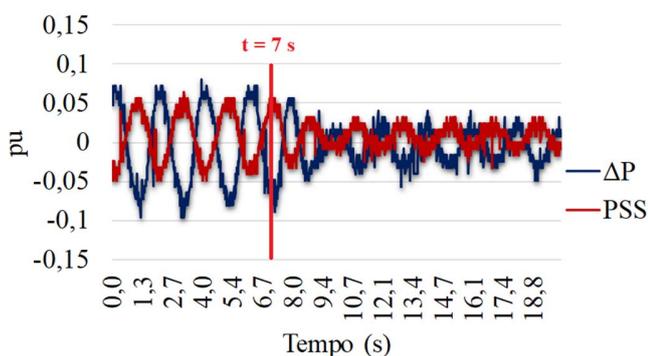


Fig. 9. Resposta do PSS2B para a operação isolada.

Conforme esperado, o sinal de saída do PSS2B sintonizado se encontra aproximadamente 180° defasado em relação ao sinal de oscilação da potência ativa. Ademais, a inserção do PSS2B atua de forma satisfatória na atenuação do distúrbio, reduzindo em 59% a amplitude das oscilações, validando assim os modelos digitais de AVR e PSS2B.

2) Operação em Paralelo à Rede Elétrica

No cenário de operação em paralelo, o gerador é conectado à rede elétrica. A mesma parametrização do AVR e do PSS2B é mantida, e um distúrbio senoidal de tensão com 0,05 p.u. de amplitude a uma frequência de 0,5 Hz é inserida ao somador do AVR, a fim de simular a oscilação da potência ativa. O PSS2B é conectado ao AVR como uma retroalimentação positiva.

A Fig. 10 demonstra a variação da potência ativa em torno da referência (1,0 p.u.) para os cenários de operação sem PSS e com PSS.

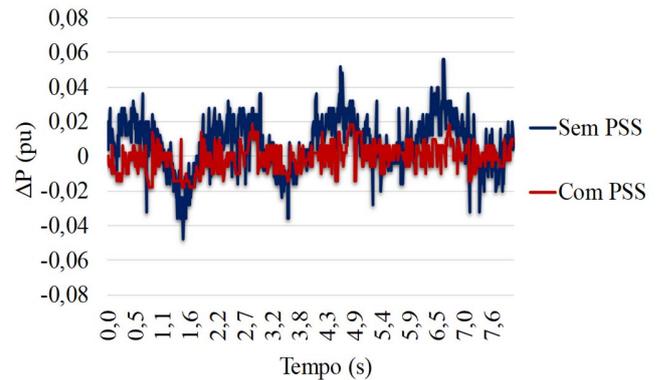


Fig. 10. Resposta do PSS2B para a operação em paralelo à rede elétrica.

A inserção do PSS2B no regulador de tensão atenua a amplitude da oscilação da potência ativa, em comparação ao cenário sem PSS. Logo, fica clara a funcionalidade dos reguladores da plataforma experimental tanto para a operação com o gerador isolado, quanto para a operação em paralelo à rede elétrica.

C. Experimentação Didática da Plataforma

Em função da proposta pedagógica da instituição de ensino dar enfoque a metodologias ativas de ensino [33], [34], a aplicação da plataforma foi idealizada em aulas experimentais com base no modelo de aprendizado por resolução de problemas. Nesse contexto, os estudantes de Engenharia Elétrica da Faculdade SATC desenvolveram durante as aulas desde os sistemas de instrumentação até a programação e parametrização dos controladores para culminar nos testes de operação dos reguladores.

Realizou-se uma pesquisa com 39 alunos dos semestres do final de 2017 e do início de 2018, que tiveram os primeiros contatos com a plataforma. As notas atribuídas aos itens foram de zero (pouco impacto) até dez (grande impacto). O *feedback* proporcionado pelos estudantes se encontra na Tabela VI.

Ressalta-se que o uso da plataforma foi bem aceito pelos estudantes. O principal impacto observado diz respeito à transposição da teoria à prática por meio da resolução de problemas reais de engenharia. Esse fator corrobora para uma melhoria das habilidades de projeto em sistemas de controle, o que contribui para a formação dos estudantes. Além disso, o aumento da motivação para realização das aulas práticas foi constatado pelos instrutores. O

engajamento dos estudantes com a criação de soluções para os problemas propostos e a implementação dos sistemas de instrumentação e controle em uma máquina real teve grande influência nesse quesito, em vista da visualização prática dos conceitos trabalhados nas disciplinas.

TABELA VI
PESQUISA COM OS ALUNOS DE 2017/2 E 2018/1 SOBRE OS
IMPACTOS DA PLATAFORMA DESENVOLVIDA

Impacto no aprendizado dos temas envolvidos	8,2
Compreensão da teoria em aplicações reais	9,0
Motivação para realização das aulas práticas	8,6
Facilidade para realização das práticas propostas	8,0

Relativo ao impacto da plataforma experimental no desempenho dos alunos em comparação ao semestre 2017/1 (sem uso da plataforma), a média final dos estudantes nas primeiras disciplinas envolvidas em 2017/2 e 2018/1 (Conversão Eletromecânica I e II, Instrumentação, Sistemas de Controle e Microprocessadores) passou de 6,8 para 7,4 (+8,8%), em uma escala de zero até dez. Entretanto, com base no *feedback* dos alunos, melhorias didáticas na praticidade e otimização do tempo das atividades seguem em aperfeiçoamento para aumentar o impacto da plataforma no aprendizado dos estudantes.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de uma plataforma experimental e didática voltada à reprodução, em escala reduzida, das condições de operação de uma máquina síncrona e de seus principais reguladores. A plataforma possibilita interagir com a máquina e seus controladores, inserir distúrbios no sistema, validar o desenvolvimento de controladores digitais, alterar parâmetros dos reguladores e verificar suas repercussões no sistema elétrico adjacente.

Com relação ao desempenho da plataforma como ferramenta técnica, conforme os resultados apresentados, essa se mostra adequada à realização de testes operacionais de máquinas síncronas e de seus reguladores. Testes com a máquina síncrona operando isolada e conectada em paralelo à rede elétrica validaram o funcionamento dos reguladores AVR, PSS2B e RV implementados.

No âmbito educacional, a plataforma experimental desenvolvida possibilita um maior dinamismo e um meio didático de abordar a atuação dos controladores empregados em sistemas elétricos de potência. Verificou-se que a utilização de uma plataforma real para realização de práticas de controle de máquinas elétricas e estabilidade de sistemas de potência aliou o aprendizado dos temas abordados com a compreensão das técnicas de projeto e aplicação desses sistemas em problemas reais de engenharia. Consta-se que esses fatores foram preponderantes no impacto da plataforma tanto no maior engajamento dos estudantes com as atividades práticas, quanto no aumento do desempenho dos estudantes nas disciplinas envolvidas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o aporte técnico e financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

REFERÊNCIAS

- [1] H. Khalilinia and V. Venkatasubramanian, "Modal Analysis of Ambient PMU Measurements Using Orthogonal Wavelet Bases," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2954–2963, 2015.
- [2] F. B. Prioste, "Detecção e controle de oscilações eletromecânicas usando sistemas de medição fasorial sincronizada," Tese - Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2011.
- [3] Y. Liu, Q. H. Wu, H. Kang, and X. Zhou, "Switching power system stabilizer and its coordination for enhancement of multi-machine power system stability," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 98–106, 2016.
- [4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994, pp. 8-13.
- [5] K. Prasertwong, N. Mithulanathan, and D. Thakur, "Understanding Low-Frequency Oscillation in Power Systems," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 47, no. 3, pp. 248–262, Jul. 2010.
- [6] J. Sáenz, J. Chacón, L. De La Torre, A. Visioli, and S. Dormido, "Open and Low-Cost Virtual and Remote Labs on Control Engineering," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 805–814, 2015.
- [7] M. M. Pandini, A. D. Spacek, J. M. Neto, and O. H. Ando Junior, "Design of a Didactic Workbench of Industrial Automation Systems for Engineering Education," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 8, pp. 1384–1391, 2017.
- [8] M. A. J. Coelho, J. M. Neto, A. D. Spacek, and O. H. Ando Junior, "Learning Improvement in Electronics Disciplinary using a Didactic Workbench," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 1, pp. 83–88, 2016.
- [9] W. L. Torres, I. B. Q. Araujo, J. B. M. Filho, and A. G. C. Junior, "Mathematical Modeling and PID Controller Parameter Tuning in a Didactic Thermal Plant," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 7, pp. 1250–1256, 2017.
- [10] D. Surendra and K. N. Shubhanga, "Development of a power system laboratory supported by real-time systems," in *2011 International Conference on Power and Energy Systems*, Chennai, TN, India, 2011, pp. 1–6.
- [11] S. S. Martin, A. Chebak, and N. Barka, "Development of renewable energy laboratory based on integration of wind, solar and biodiesel energies through a virtual and physical environment," in *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Marrakesh, Marrocos, 2016, pp. 1–8.
- [12] D. C. C. Crisóstomo, A. A. F. Moura, E. P. Rocha, F. M. Cruz, and A. P. Moura, "Educational Software For Simulation Of Power and Voltage Control In Power Systems Connected With Wind Farms," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 6, pp. 1603–1609, 2018.
- [13] H. M. Ayres, I. Kopcak, M. S. Castro, F. Milano, and V. F. da Costa, "A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 18, no. 6, pp. 896–909, Jun. 2010.
- [14] S. Ekinci, A. Demiroren, and H. L. Zeynelgil, "PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 54, no. 4, pp. 283–298, Oct. 2017.
- [15] S. Ekinci, H. L. Zeynelgil, and A. Demiroren, "A didactic procedure for transient stability simulation of a multi-machine power system utilizing SIMULINK," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 53, no. 1, pp. 54–71, Jan. 2016.
- [16] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5-2016. IEEE, 2016.
- [17] L. F. B. Carbonera, "Comparação de funções objetivo para seleção de PSS pelo amortecimento de oscilações em sistemas multimáquinas," Dissertação - Mestrado em Engenharia Elétrica.

- [18] Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Brasil, 2015.
- [19] S. Chatterjee and V. Mukherjee, "PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 418–429, 2016.
- [20] D. D. S. Mota and C. Goldemberg, "Comparison between voltage control structures of synchronous machines," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 8, no. 6, pp. 631–636, 2010.
- [21] A. A. Zea, "Power System Stabilizers for The Synchronous Generator: Tuning and Performance Evaluation," Master of Science Thesis. Chalmers University of Technology. Goteborg, Suécia, 2013.
- [22] Z. A. Obaid, L. M. Cipcigan, and M. T. Muhssin, "Power system oscillations and control: Classifications and PSSs' design methods: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. 1, pp. 839–849, 2017.
- [23] ONS, "Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica: Submódulo 3.6," Rio de Janeiro, 2008.
- [24] H. Shayeghi and Y. Hashemi, "Profit enhancement by a set of performance and robustness indices based design of dual-dimensional PODC and PSS2B in smart grids," *Energy Convers. Manag.*, vol. 83, pp. 99–109, 2014.
- [25] A. Chatterjee, S. P. Ghoshal, and V. Mukherjee, "Chaotic ant swarm optimization for fuzzy-based tuning of power system stabilizer," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, pp. 657–672, 2011.
- [26] H. Su, R. Mutukutti, and D. Apps, "Practical Considerations and Case Study for PSS Ramp Track Filter Design," in *2012 CIGRÉ Canada Conference*, Montreal, QC, Canadá, 2012, pp. 1–8.
- [27] I. Kamwa, R. Grondin, and G. Trudel, "IEEE PSS2B Versus PSS4B: The Limits of Performance of Modern Power System Stabilizers," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 903–915, May 2005.
- [28] N. Kulkarni, S. Kamalasadán, and S. Ghosh, "An Integrated Method for Optimal Placement and Tuning of a Power System Stabilizer Based on Full Controllability Index and Generator Participation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4201–4211, 2015.
- [29] G. Wenyán, P. Smulders, and K. Mushens, "Power System Stabilizer Tuning - Simulations and Commissioning," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000, Seattle, WA, Estados Unidos, vol. 2, pp. 925–930.
- [30] H. Verdejo, L. Vargas, and W. Kliemann, "Fine tuning of PSS control parameters under sustained random perturbations," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 9, no. 7, pp. 1051–1059, 2011.
- [31] J. L. Artsyshevsky, T. G. Klimova, B. K. Maximov, and O. O. Nikolaeva, "Techniques of control, analysis and visualization of automatic exciter controller functioning in synchronous machine," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 144, pp. 175–184, 2017.
- [32] J. G. Calderón, R. Castellanos, and M. Ramirez, "Stability enhancement of an industrial power system by AVR gain readjustment," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 4, pp. 663–668, 2017.
- [33] P. M. O. R. Soares, "Discretização de Controladores Contínuos," Dissertação (mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Universidade do Porto. Porto, 1996.
- [34] J. Castelan and R. D. Bard, "Promoting PBL Through an Active Learning Model and the Use of Rapid Prototyping Resources," *Int. J. Eng. Pedagog.*, vol. 8, no. 4, pp. 131–142, 2018.
- [35] A. H. M. and A. N. Rao, "Active Learning Techniques in Engineering Education," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 03, no. 11, pp. 462–465, Nov. 2014.



atmosféricas.

Douglas de Matos Magnus. Bacharel em Engenharia Elétrica (2017) pela Faculdade SATC. Mestrando em Energia e Sustentabilidade (2018) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Possui experiência em controle digital, eletromagnetismo, sistemas elétricos de potência e geração eólica. Tem interesse em pesquisas nas áreas de controle aplicado a sistemas de geração, estabilidade de frequência em SEPs, qualidade de energia e desempenho de redes frente a descargas



otimização aplicada a estabilizadores de SEPs.

Luis Felipe Bianchi Carbonera. Bacharel em Engenharia Elétrica pela UNIJUI. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente é professor em regime integral na Faculdade SATC. Atuou por quatro anos como engenheiro da Hidroenergia Engenharia e Automação LTDA na área de desenvolvimento de Reguladores Integrados de Velocidade e de Tensão para Geradores Síncronos. Tem interesse em pesquisas relacionadas a reguladores de SEPs e



pesquisa: Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica (NTEEL); Bacia Hidrográfica, zona costeira e potencial energético; e Automação e Robótica Móvel (LARM), UFSC. Áreas de interesse: Redes Elétricas Inteligentes, Qualidade de Energia, Eficiência Energética e Automação Industrial.

Luciano Lopes Pfitscher. Bacharel (1997), Mestre (2001) e Doutor (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Foi professor (2001-2010) e Coordenador Executivo (2005-2010) do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e professor (2010-2013) da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA. Atualmente, é professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Araranguá. Participa dos grupos de



graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2000). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: redes elétricas inteligentes (*smart grid*), modelagem e otimização de sistemas, planejamento, análise e operação de redes de distribuição. Também atuou dez anos no setor elétrico, trabalhando nas concessionárias de energia elétrica RGE e AES Sul.

Daniel Pinheiro Bernardon. Professor Adjunto 4 da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e bolsista de produtividade do CNPq em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora DT-2. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2007). Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2004), especialização em Planejamento de Sistemas de Distribuição pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (2001) e



Atualmente é coordenador do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade SATC. Tem interesse na área de expansão e operação da geração.

André Abelardo Tavares. Doutor e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Possui experiência como engenheiro eletricitista nas áreas de projetos elétricos, Linhas de Transmissão, Subestações, PCHs e UHEs. Atualmente é coordenador do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade SATC. Tem interesse na área de expansão e operação da geração.



Potencial Energético", "Automação e Robótica Móvel" e "Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica (NTEEL)". Tem experiência nas áreas de Automação e Controle, atuando nos seguintes temas: máquinas de indução, sistemas chaveados e desigualdades matriciais lineares.

Cesar Cataldo Scharlau. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2002), mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2005) e doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (2013). Atualmente é professor na UFSC Araranguá, participando dos seguintes grupos de pesquisa: "Bacia Hidrográfica, Zona Costeira e