



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

Problema da Síntese da Velocidade no Estabilizador de Sistemas de Potência

LUCAS MANSO DA SILVA; RAFAEL B. DE PAIVA; NELSON ZENI JR.; HENRIQUE A. MENARIN REIVAX;

RESUMO

A estrutura dominante de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) em sistemas de excitação é a PSS2C, conhecida como “estabilizador da integral da potência acelerante”. As duas variáveis utilizadas pelo PSS2C são a potência elétrica e a velocidade do rotor. Entretanto, diferentemente da potência elétrica, a velocidade do rotor não é uma variável medida, mas sim emulada. A síntese da velocidade apresenta resultados satisfatórios para as máquinas de polos salientes, porém, para as de polos lisos, o comportamento observado não é tão satisfatório. O artigo trata do impacto deste problema no ESP e o seu reflexo nos estudos de transitórios.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilizador de Sistemas de Potência; Síntese da Velocidade; Transitórios Eletromecânicos; PSS2B; PSS2C

1.0 - INTRODUÇÃO

O Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP) é uma funcionalidade normalmente associada ao Regulador de Tensão (RT) de Máquinas Síncronas (MS). Sua importância é reconhecida há décadas. De fato, quando corretamente projetado e ajustado, sua atuação contribui de forma significativa para o amortecimento das oscilações eletromecânicas presentes em um Sistema de Potência.

Diversas topologias têm sido empregadas para a realização do ESP. O PSS2C¹ é um modelo padronizado na norma IEEE 421.5 [1], que tem como variáveis de entrada os sinais da potência ativa e a velocidade do rotor. Para as oscilações eletromecânicas de baixa frequência, o uso da velocidade tem predominância para o amortecimento destas oscilações; nas frequências mais altas, a variável da potência ativa conduz a melhores resultados. Assim, combinando o que de melhor resulta com o uso de cada uma destas variáveis na estrutura de potência acelerante, pode-se obter um bom amortecimento em uma gama maior de frequência das oscilações eletromecânicas.

A síntese da velocidade, utilizada pela maioria dos fabricantes, baseia-se na soma da variável da frequência terminal, obtida da leitura da tensão terminal do gerador, com o cálculo da derivada do ângulo de carga interno da MS. A dinâmica dessa aproximação para as MS de polos salientes é aceitável, todavia, para as MS de polos lisos, a síntese da velocidade apresenta erros consideráveis, tanto em fase como em magnitude, que também são afetados pelo ponto de operação da MS.

Quando um ESP é projetado, uma característica importante é que a variável de entrada dos compensadores de fase seja equivalente em magnitude e em fase ao sinal real da velocidade do rotor da MS, além da atenuação de magnitude e avanço de fase provocada pelos filtros de *wash-out*. É com essa premissa que o ajuste do ESP é projetado. Grande parte dos programas de estudos de transitórios eletromecânicos representa o ESP com a variável equivalente à velocidade do rotor, e não pela síntese da velocidade como os sistemas de excitação o fazem.

¹ PSS2A, PSS2B e PSS2C são todas versões do modelo do estabilizador baseado na potência acelerante. Os sufixos apenas representam atualizações ao modelo anterior, incluindo funcionalidades que os fabricantes foram adicionando ao longo dos anos. Com relação à síntese do sinal de velocidade do rotor, todas estas versões são equivalentes. Essas três versões foram publicadas nas edições da norma dos anos 1992, 2005 e 2016, respectivamente.

No caso das MS de polos lisos, essa discrepância entre a velocidade sintetizada e a velocidade real é uma das principais causas da dificuldade de implantação em campo dos ajustes idealizados nos estudos de simulações do ESP. A proposta deste artigo é detalhar esse tipo de problema e os seus impactos através de resultados de campo e de simulações. É um artigo relevante para o conhecimento dos profissionais envolvidos com estudos de estabilidade e amortecimento de oscilações eletromecânicas e, também, para os profissionais envolvidos no comissionamento de sistemas de excitação, principalmente os de MS de polos lisos.

2.0 - SÍNTESE DA VELOCIDADE DO ROTOR

A síntese da velocidade do rotor da MS, variável utilizada pelo ESP, é calculada a partir das grandezas elétricas medidas da MS conforme as equações (1) e (2).

$$\delta_i = tg^{-1} \left(\frac{P * x_q}{V_t^2 + Q * x_d} \right) \quad (1)$$

$$\Delta\tilde{\omega} = \Delta f + \frac{1}{\omega_o} * \frac{d\delta_i}{dt} \quad (2)$$

Onde:

- Δf = desvio de frequência elétrica medido medida nos terminais do gerador [pu];
- P = potência ativa medida [pu];
- Q = potência reativa medida [pu];
- V_t = tensão terminal medida [pu];
- x_q = reatância de eixo em quadratura da MS [pu];
- ω_o = frequência nominal [rad/s];
- δ_i = ângulo interno da MS [rad];
- $\Delta\tilde{\omega}$ = síntese da velocidade do rotor [pu].

A equação (1) é utilizada para calcular o ângulo interno da MS. Ela apresenta um resultado aceitável para máquinas de polos salientes, porém conduz a erros consideráveis para máquinas de polos lisos. Essa discrepância no resultado esperado da estimação da velocidade do rotor afeta o desempenho do ESP. Esse impacto é analisado no ESP do tipo PSS2C [1] a seguir.

3.0 - TOPOLOGIA DO ESP

A estrutura do PSS2C da IEEE 421.5 [1] é apresentada na Figura 1.

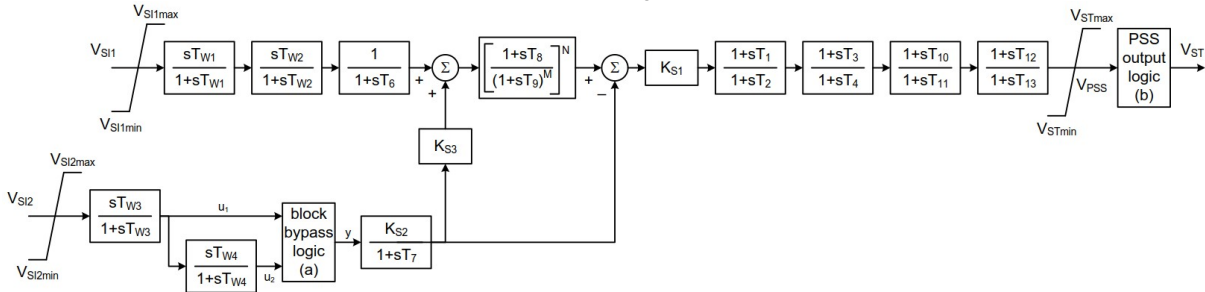


Figura 1 - Estrutura do PSS2C [1]

São dois canais de entradas dados pelas variáveis V_{S11} e V_{S12} , seguidos de blocos do tipo: de *wash-out*, de filtros de primeira ordem, de ganho e de uma série de compensadores de fase seguidos por um limitador.

Entretanto, focando na praticidade como o ESP é projetado e ajustado, e para fins de entendimento do problema, o ESP será analisado através de uma estrutura equivalente mais simples, conforme apresentado na Figura 2. As variáveis genéricas foram substituídas pela potência ativa e velocidade estimada do rotor. O número de parâmetros foi simplificado, assim como alguns blocos eliminados.

A variável **A** é equivalente a $\Delta\tilde{\omega}$ após a etapa de filtragem por dois blocos de *wash-out* em série. A variável **B** é equivalente a **P** após a etapa de filtragem pelos mesmos blocos de *wash-out* seguida por um integrador com ganho inverso ao da inércia da máquina. Assim, a variável **B** integra a variação da potência ativa, e por isso se diz que essa estrutura do estabilizador é baseada na integral da potência acelerante. A integral da variação de potência, conforme pode-se ver no modelo da turbina [2], seria equivalente ao inverso da variação da velocidade do rotor. Portanto, esta integral leva ao cálculo de uma variável que reflete a velocidade do rotor, como explicado anteriormente.

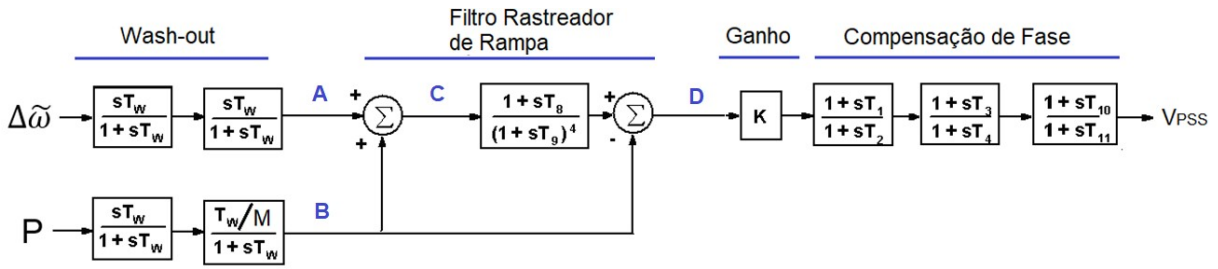


Figura 2 - PSS2C equivalente

Idealmente, tanto a variável **A** como a **B**, do ponto de vista apenas das oscilações eletromecânicas, excluindo qualquer outro tipo de perturbação, são equivalentes em fase e em magnitude, mas com sinais trocados. Sendo assim, a variável **C** é nula do ponto de vista das oscilações eletromecânicas.

A variável **C** é entrada do Filtro Rastreador de Rampa (FRR) que, por sua vez, tem como objetivo evitar ações do ESP em distúrbios de baixa frequência causados por variações de carga da MS que aparecem em **P**. É o caso das tomadas de carga ou ações da regulação primária do gerador. Em outras palavras, o FRR é um filtro passa-baixa sintonizado com uma frequência de corte tal que, nas frequências inferiores ao corte, a variável **D** se aproxima à variável **A** e, nas frequências acima, a variável **D** se aproxima à variável **-B**. Como as variáveis **A** e **-B** são próximas a velocidade do rotor, processada pelos filtros de entrada, é prática comum, principalmente em estudos e projetos de ESP, analisar apenas o PSS2C do ponto de vista do modelo equivalente dado pela Figura 3. Programas como o PacDyn [4] utilizam essa premissa na análise modal para a representação do PSS2C e as topologias variantes.

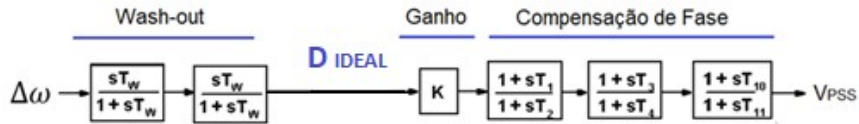


Figura 3 - Modelo do ESP Equivalente para Projeto e Estudos

Onde:

- $\Delta\omega$ = velocidade do rotor [pu].

Quando o ESP é ajustado, uma característica importante é que a variável de entrada dos compensadores de fase (variável **D**) seja próxima em magnitude e em fase ao sinal real da velocidade do rotor da MS (levando em conta a atenuação e avanço de fase provocados pelos filtros de *wash-out*).

4.0 - IMPACTO DA SÍNTESE DA VELOCIDADE NO ESP

Como ilustra a Figura 4, idealmente, tem-se que a variável **C** da entrada do FRR seja nula para um evento só de oscilação eletromecânica. Sendo assim, a variável **D** se aproxima da variável **A**, ou a variável **-B**, dado que **A = -B**.

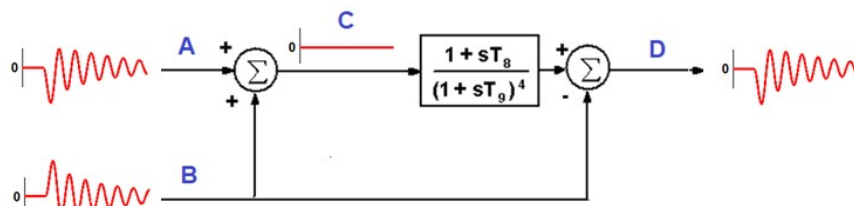


Figura 4 - Compensação Ideal das Oscilações Eletromecânicas: $A = -B$

Entretanto, como a variável de entrada do ESP não é a velocidade do rotor ($\Delta\omega$) e sim a velocidade estimada ($\Delta\tilde{\omega}$), o que acontece no ESP é a situação ilustrada na Figura 5. Nesse caso, a variável **D** é diferente das variáveis **A** e **-B** e vai depender da frequência de corte do FRR. E isso ocorre devido a estimação da velocidade do rotor.

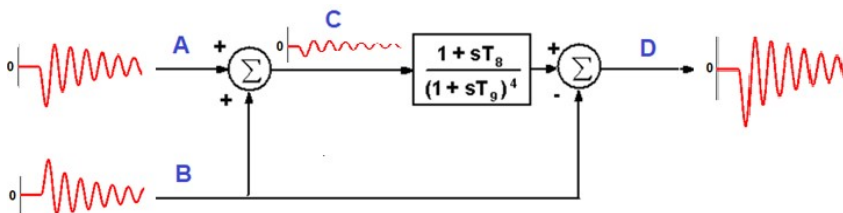


Figura 5 - Compensação Real das Oscilações Eletromecânicas: A ≠ -B

Para ilustrar melhor o impacto da estimação da velocidade do rotor e, na sequência, o impacto no ESP, é apresentada a simulação de uma MS com valores obtidos da base de dados do ONS [3]. A Figura 6 apresenta dois ensaios de resposta a um degrau de tensão do RT em uma máquina de polos lisos. Cada ensaio foi feito em um ponto de operação diferente (teste 1 e teste 2). É apresentada uma comparação da resposta em malha fechada obtida com o ESP baseado na velocidade estimada ($\Delta\tilde{\omega}$) e a resposta obtida com o ESP ideal da Figura 3, que é o desvio de velocidade do rotor real do modelo simulado ($\Delta\omega$). Nota-se que, em ambos os ensaios, a velocidade estimada tem amplitude maior que a velocidade real. Observa-se também que a mudança de amplitude e da fase entre o sinal estimado e o real variam com o ponto de operação da MS, ou seja, não é um ganho e fase que podem ser compensados de forma simples.

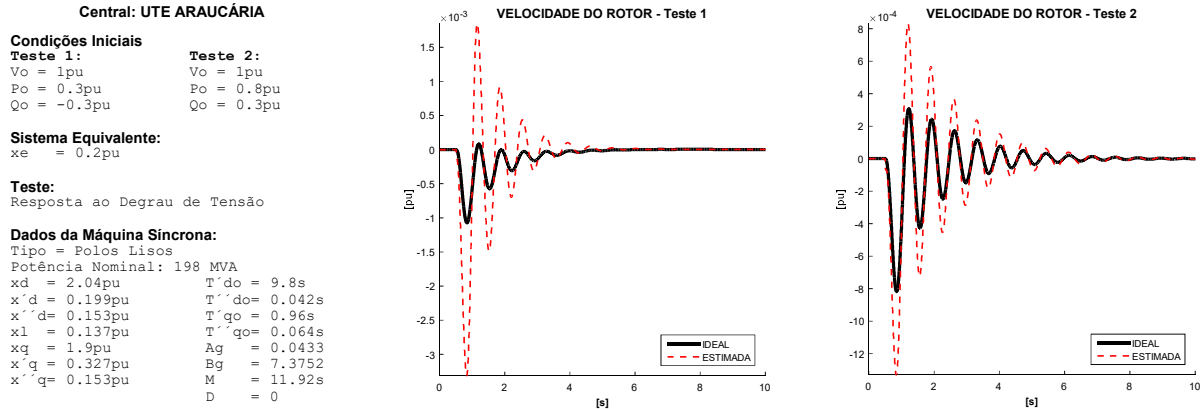


Figura 6 - Comparação Metodologia Tradicional x Velocidade do Rotor – MS Polos Lisos

Essa simulação apresentou o erro na estimação da velocidade do rotor conforme a metodologia tradicional, dada pela equação (2). A Figura 7 apresenta o efeito indesejado que aparece no ESP devido a essa estimação errônea da velocidade do rotor. Nos dois testes o erro da estimação da velocidade do rotor leva ao não cancelamento do sinal de entrada do FRR.

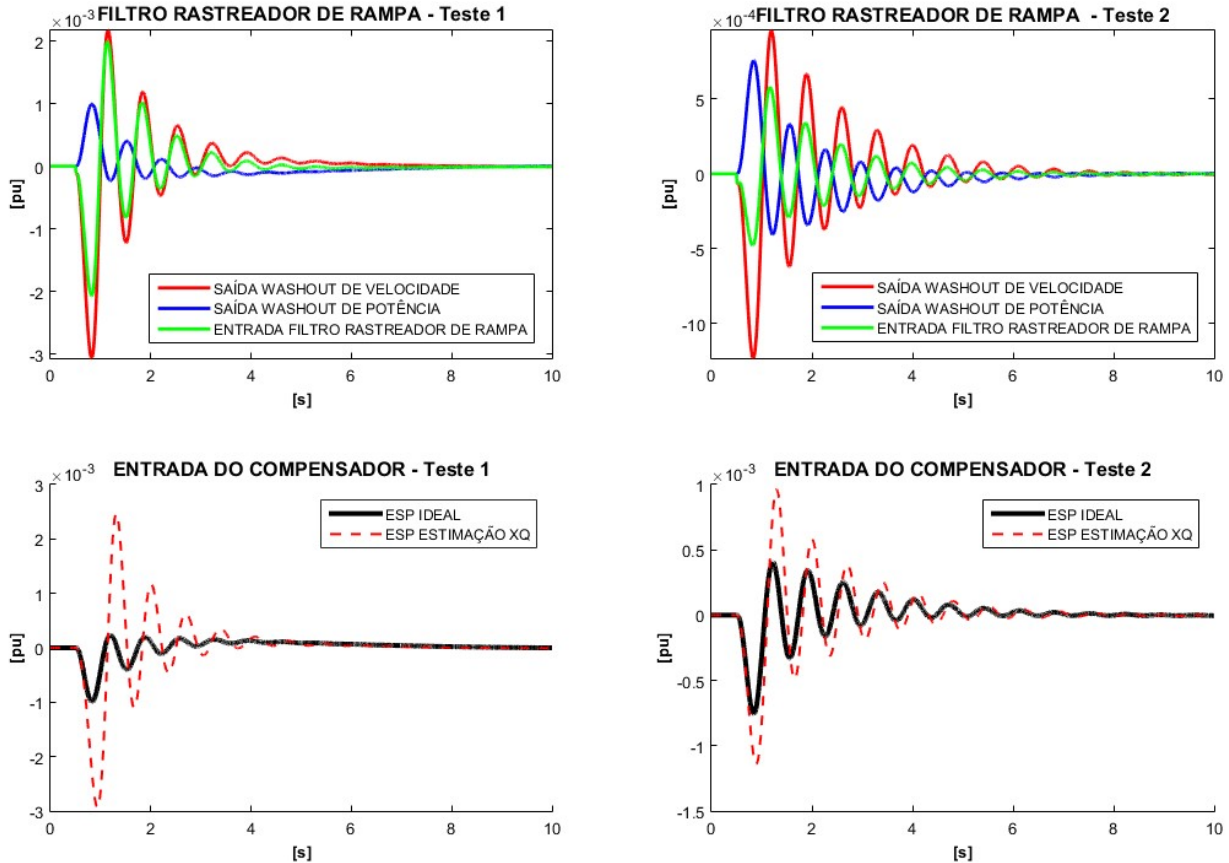


Figura 7 - Impacto da Estimação da Velocidade no ESP.

Nota-se que o sinal da entrada do Compensador do ESP (variável D) é diferente do esperado, que deveria ser equivalente ao desvio da velocidade do rotor compensado apenas pelos *wash-out*. O sinal resultante da síntese da velocidade do rotor e da potência acelerante possui uma diferença de magnitude e de fase considerável. É justamente por causa disso que, muitas vezes, os ganhos praticados no ESP das MS de polos lisos são inferiores àqueles idealizados em simulação. Percebe-se a razão disso nessa simulação, pois o sinal de entrada na compensação de fase do ESP é maior do que o dobro do esperado pelo software de estudo de estabilidade.

Quando aplicada a estimação da velocidade do rotor em uma MS de polos salientes através do método tradicional, dado pela equação (2), a estimação é bastante fiel ao desvio real da velocidade do rotor. A Figura 7 apresenta os mesmos tipos de simulações realizados anteriormente, mas agora considerando uma MS de Polos Salientes.

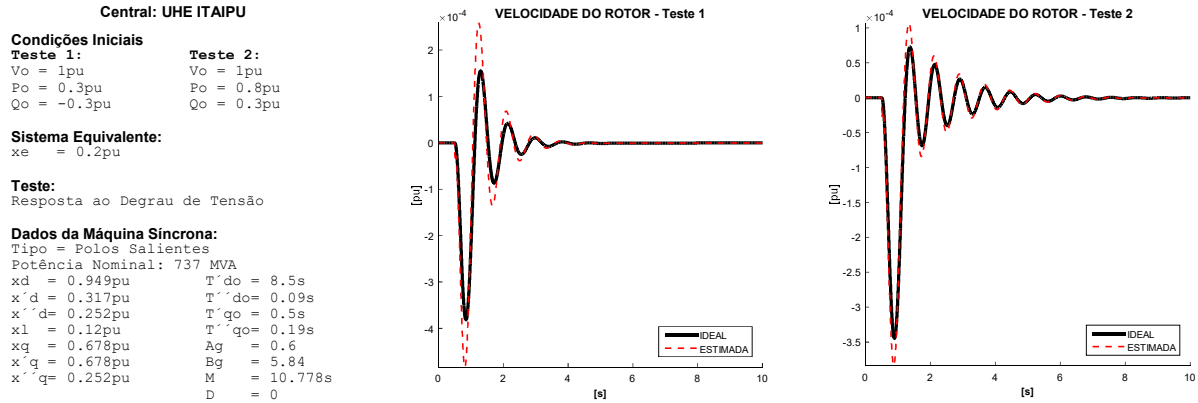
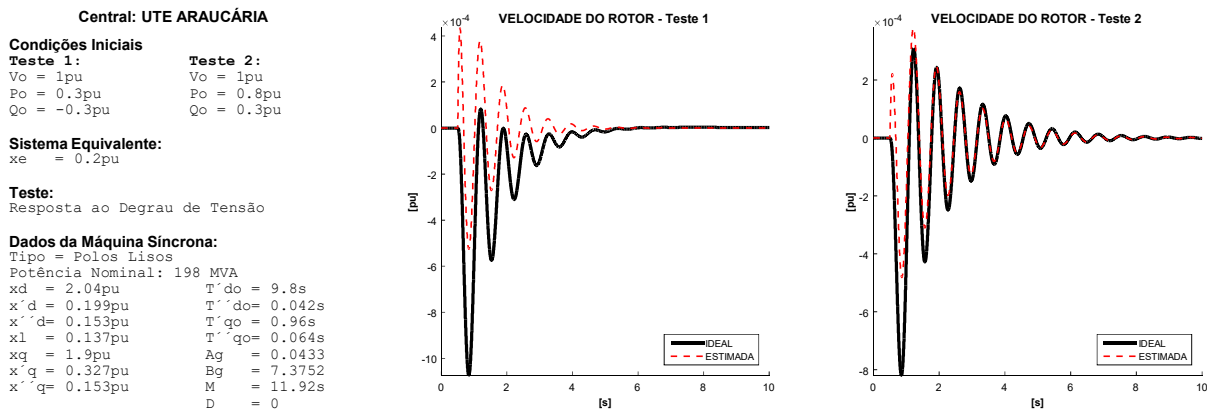


Figura 8 - Comparação Metodologia Tradicional x Velocidade do Rotor – MS Polos Salientes.

Alguns fabricantes de sistemas de excitação utilizam como alternativa para a estimação da velocidade do rotor o uso da reatância subtransitória x''_q ao invés da reatância x_q no cálculo apresentado na equação (2). A figura 8 apresenta os mesmos tipos de simulações realizados anteriormente para a máquina de polos lisos, mas agora utilizando o a reatância x''_q na estimação da velocidade do rotor.

Figura 9 - Comparação Metodologia Alternativa (x''_q) x Velocidade do Rotor – MS Polos Lisos.

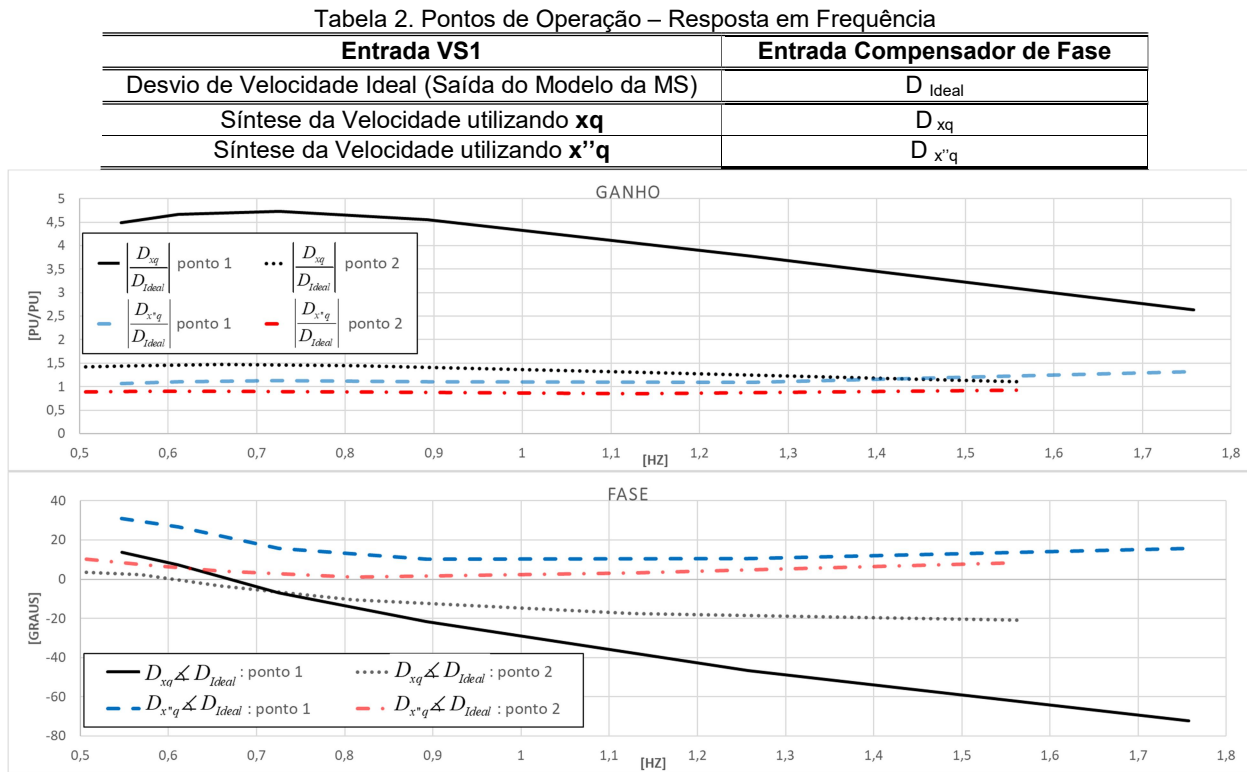
Foi realizada uma reposta em frequência no espectro de oscilações eletromecânicas com o objetivo de comparar o desempenho da metodologia tradicional da síntese do desvio de velocidade usando as reatâncias x_q e x''_q . A comparação foi realizada em dois pontos de operação distintos dados pela Tabela 1. Nesta análise o ESP estava desabilitado.

Tabela 1. Pontos de Operação – Resposta em Frequência

Pontos de Operação	Tensão Terminal (pu)	Potência Ativa (pu)	Potência Reativa (pu)
1	1,00	0,3	-0,3
2	1,00	0,8	0,3

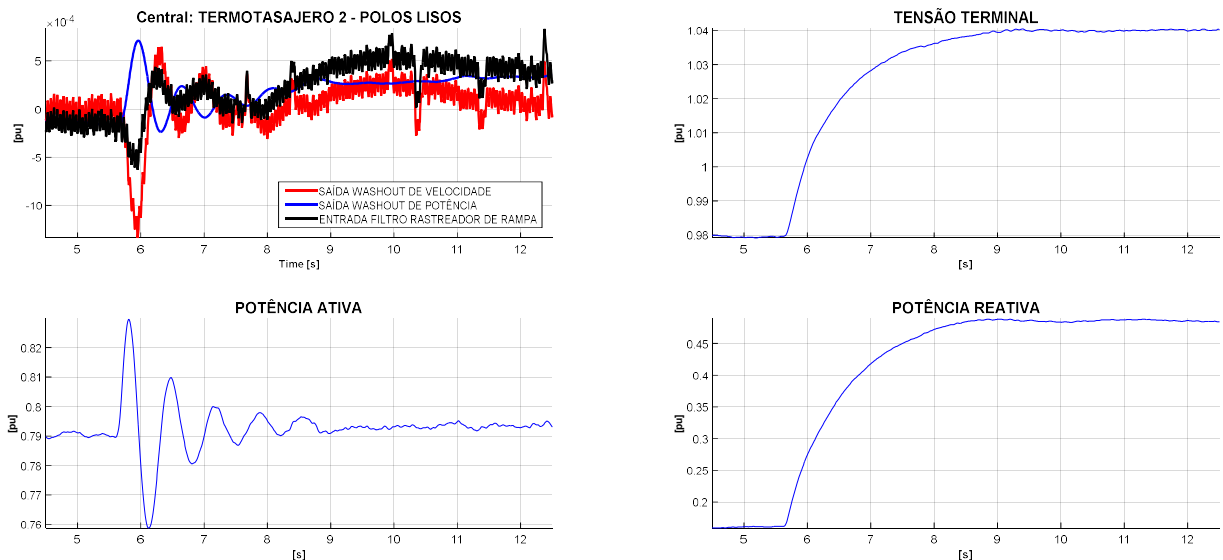
Para construir o diagrama de ganho e fase foi realizada uma comparação dos possíveis sinais de entrada do compensador do ESP que se diferenciam entre si a partir do sinal utilizado na entrada VS1 do ESP e são definidos

conforme a Tabela 2. O diagrama de bode é então construído com a diferença de ganho e fase entres os sinais D_{xq} em relação ao sinal D_{Ideal} e $D_{x'q}$ em relação D_{Ideal} .



Essa análise apenas ressalta a discrepância de fase e da magnitude da variável que realmente entra no ESP em relação a mesma variável que é idealizada na simulação quando utilizada a velocidade do rotor. Além disso, reforça também a questão de como esse é um problema não trivial, pois essas discrepâncias variam de acordo com o ponto de operação da MS.

Por fim, a Figura 11 apresenta um registro de campo de uma MS de polos lisos. Nestes registros, foi aplicado degrau na referência de tensão do RT e observam-se as variáveis internas do ESP. Este caso corrobora a análise feita a partir de simulações.



5.0 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE EM ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS

Neste capítulo, será destacada a necessidade da correta modelagem da estimação da velocidade do rotor na representação do ESP em programas de simulação de transitórios eletromecânicos e de simulações de pequenos sinais. No Brasil são utilizados os Softwares Anatem [4] e Pacdyn para a análise de transitórios eletromecânicos e de pequenos sinais.

A base de dados do Anatem [4] permite que os controladores sejam representados de maneira customizável, através do Controle Definido pelo Usuário (CDU). Além disso, atualmente ambos os programas podem compartilhar a mesma base de dados. Através desta facilidade, é possível implementar os controladores da forma com que eles realmente são implementados. É comum encontrar na base de dados do Anatem e do PacDyn estruturas de PSS utilizando o sinal **WMAQ**. Segundo o manual do Anatem, a variável **WMAQ** é o sinal da velocidade do rotor ($\Delta\omega$) gerado pelo modelo da MS. Logo, ao utilizar o sinal **WMAQ** como entrada do ESP, considera-se uma simulação ideal.

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, ao se utilizar a velocidade do rotor ($\Delta\omega$) como entrada do ESP, a entrada do FRR será cancelada, conseqüentemente, o sinal da entrada do compensador de fase do PSS será equivalente ao desvio de velocidade do rotor acrescido da dinâmica dos atrasos provocados pelos *wash-out*. Ou seja, é uma simulação que, para as MS de polos lisos, não reproduzirá da forma mais adequada o resultado real de campo.

São apresentas a seguir simulações no ANATEM de degraus na referência de tensão do RT para demonstrar esta questão. Primeiramente, na Figura 12, foi utilizado o sinal **WMAQ** na entrada de velocidade do ESP. Note que neste caso o sinal na entrada do FRR foi cancelado.

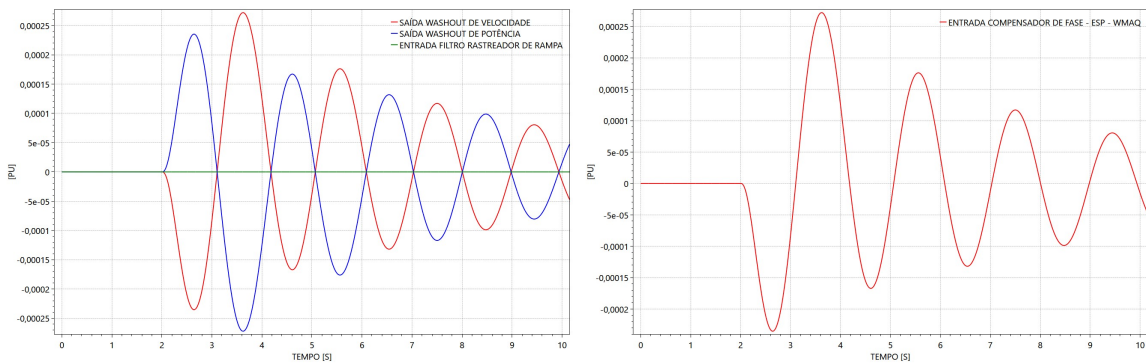


Figura 12 - MS Polos Lisos – Método Tradicional – PSS Utilizando **WMAQ** (Anatem).

A Figura 13 e a Figura 14 apresentam a mesma simulação, mas utilizando a síntese da velocidade do rotor usando xq e $x'q$ respectivamente.

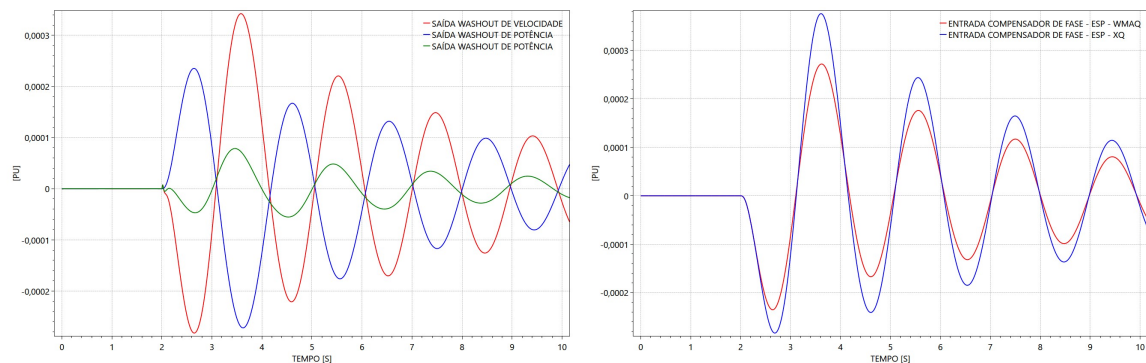


Figura 13 - MS Polos Lisos - Método Tradicional – xq .

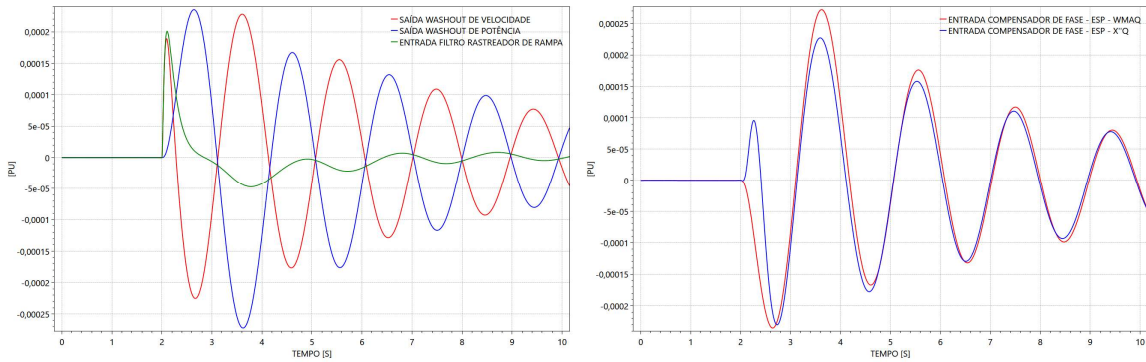


Figura 14 - MS Polos Lisos – Método Alternativo – $x''q$.

Observa-se que a aplicação da reatância xq na síntese da velocidade do rotor para a MS de polos lisos apresenta um resultado na variável da entrada do compensador de fase do ESP com uma amplitude maior do que aquela esperada no caso do ESP ideal utilizando a velocidade real do rotor, aqui representada pela variável WMAQ do Anatem. Um atraso de fase também pode ser observado nesse caso.

O ESP que utiliza a reatância $x''q$ para a síntese da velocidade do rotor apresenta um resultado bem peculiar. Logo após a perturbação, entre os instantes de tempo de 2 e 3 segundos da figura 14, percebe-se uma diferença considerável entre o sinal desejado e o sinal obtido no ESP na entrada dos compensadores de fase. A partir de 3 segundos ambos os sinais têm comportamentos mais semelhantes. Entretanto, a comparação do resultado entre xq e $x''q$ são análises relativas, pois dependem do ponto de operação na qual foi realizada a simulação. Para outros casos, os resultados seriam bem diferentes. Esse resultado reforça a necessidade da modelagem adequada da estimação da velocidade utilizada nos ESP evitando o uso da variável equivalente da velocidade do rotor da saída dos modelos de MS. Os autores sugerem que o ESP seja modelado conforme a proposta da figura 15 para estudos de transitórios eletromecânicos.

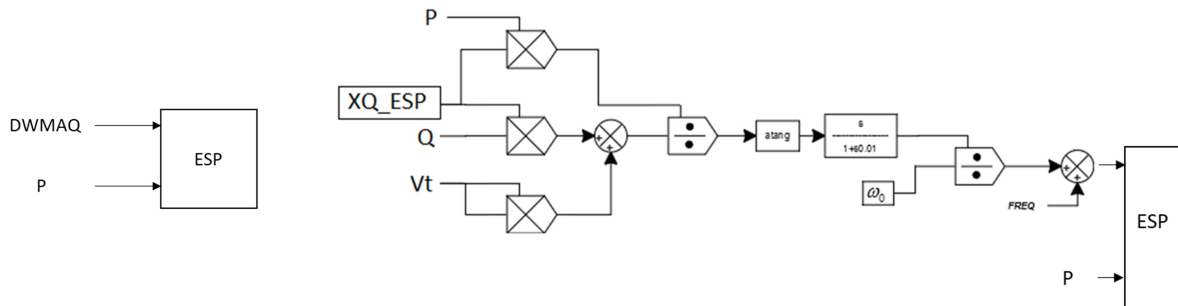


Figura 15 - Modelagem das Variáveis da Velocidade do Rotor do ESP: Típica (esquerda) vs. Proposta (direita).

O parâmetro XQ_ESP representa a reatância ajustada no ESP para estimação da velocidade do rotor.

Ressalta-se que o problema da estimação da velocidade do rotor é um tema que ainda está em aberto. Além disso, esse tipo de problema afeta outras topologias, como a 4B, uma vez que a velocidade estimada do rotor também é usada como variável de entrada.

6.0 - CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou simulações baseadas em Matlab, Anatem e registros de campo que demonstraram o problema da síntese da velocidade do rotor da MS. O cálculo tradicional, utilizado no ESP por diferentes fabricantes, é baseado na equação de regime permanente do ângulo interno da MS, na qual é utilizada a reatância xq . Esta estimação leva a um bom resultado dinâmico em MS de polos salientes. Entretanto, para a MS de polos lisos o resultado já não é tão satisfatório, pois ocorrem erros consideráveis de ganho e de fase do sinal estimado quando comparado com o sinal real da velocidade do rotor. Essas diferenças também variam de acordo com o ponto de operação da MS. Para mitigar este problema nas MS de polos lisos, recomenda-se utilizar a síntese da velocidade do rotor de MS de polos lisos através da reatância $x''q$ ao invés da xq . Essa estratégia já é utilizada por muitos fabricantes de sistemas de excitação, pois melhora a aderência da síntese da velocidade do rotor com o sinal real diminuindo a diferença de ganho e de fase entre eles, mas não elimina por completo a diferença entre os dois sinais.

Para evitar problemas de estudos e análises, a proposta dos autores é que os programas de simulação de transitórios eletromecânicos e de pequenos sinais representem a síntese da velocidade do rotor na entrada do ESP ao invés da velocidade obtida do modelo da MS. A modelagem utilizando o sinal de velocidade originado pelo modelo da MS é otimista. A representação da real estrutura do ESP permitirá que os profissionais envolvidos em

estudos de estabilidade e amortecimento de oscilações eletromecânicas consigam ajustes que terão mais aderência com os resultados de campo, algo que não é factível com a modelagem idealizada do ESP das máquinas de polos lisos.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IEEE Std 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models For Power System Stability Studies, 2016.
2. P. Kundur, Power system stability and control. McGraw-Hill, Jan. 1994.
3. ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Base de Dados para Estudos de Estabilidade Eletromecânica. www.ons.org.br, Maio 2019. Brasil.
4. Eletrobras CEPEL, “ANATEM V11.04.00–Manual do Usuário”, CEPEL/DRE - Departamento de Redes Elétricas, Abril de 2018. Brasil.
5. Eletrobras CEPEL, “PacDyn 9.8.3 - User’s Manual”, CEPEL/DRE - Departamento de Redes Elétricas, 2017.
6. N. ZENI Jr., *et al.* Challenges in the Synthesis of the Instantaneous Rotor Speed for PSS Applications. IEEE – PES. 2017.
7. H. Su *et al.* Impacts of Variable Quadrature Reactance on Power System Stabilizer Performance. IEEE – 2013.
8. M. Baechle, V. Knazkins, M. Larsson and P. Korba, "Improved rotor angular speed measurement — A key for proper power grid stabilization," *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, National Harbor, MD, 2014, pp. 1-5.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Lucas Manso da Silva Engenheiro da REIVAX desde 2013, atuando nas áreas: comissionamentos de sistemas de controle de tensão e de velocidade; ensaios de campo e na validação de modelos matemáticos de sistemas de controle e parâmetros de máquinas síncronas; simulações de transitórios eletromecânicos. Graduado em Engenharia Elétrica em 2013 pela UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina.



Rafael Bertolini de Paiva Engenheiro eletricista da REIVAX desde 2010, atuando nas áreas: comissionamentos de sistemas de controle de tensão e de velocidade de máquinas síncronas; comissionamento de sistemas de proteção; ensaios de campo e validação de modelos matemáticos de controladores e parâmetros de máquinas síncronas; simulações de transitórios eletromecânicos e estudos de sistemas de proteção. Graduado em Engenharia Elétrica em 2009 pela UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Concluiu a pós-graduação em 2014 em Proteção de Sistemas Elétricos e o Mestrado em 2019 em Engenharia Elétrica, ambos pela UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá.



Nelson Zeni Jr. É graduado em Engenharia Elétrica pela UFRGS em 1977 e mestre em Sistemas de Controle pela UFSC em 1987. Trabalhou na CEEE em Estudos de Estabilidade e no Centro de Recursos de Eletrônica e Instrumentação, projetando melhorias para Controladores de Tensão e Velocidade. Trabalha na REIVAX desde 1998, onde exerceu as funções de Diretor Técnico, Diretor de P&D, Diretor Comercial e CEO. É membro da Academia Nacional de Engenharia.



Henrique A. Menarin é mestre em Engenharia de Automação e Sistemas em 2013 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil, pelo trabalho de aplicação de MPC em sistemas de excitação e regulação de velocidade em usinas hidroelétricas. É graduado em engenharia de controle e automação em 2010 na UFSC, Brasil. Trabalha na REIVAX Automação e Controle desde 2008 com pesquisa e desenvolvimento de sistemas de controle para geração de energia.