

## GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

### MODELAGEM MATEMÁTICA DE USINAS FOTOVOLTAICAS E VALIDAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS EM CAMPO

**LUCAS LOBO; LUCAS EDUARDO DE SOUZA; RODRIGO PEREIRA GOSMANN;  
CRISTIANO BÜHLER; ARTUR HEERDT; LUIZ FELIPE PFLEGER (1)  
REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE (1)**

#### RESUMO

A participação mais relevante de grandes parques solares ao Sistema Interligado Nacional (SIN) traz consigo o aumento da complexidade dos estudos de transitórios eletromecânicos. Dado o aumento desta influência, é correto assumir que para que se obtenham resultados satisfatórios nos estudos de análise do SIN, é necessário considerar a presença destes empreendimentos no caso simulado. Por esta essa razão, faz-se cada vez mais necessária a correta representação matemática dos controladores destas usinas para que as simulações apresentem resultados confiáveis. Este trabalho apresenta a modelagem e validação com ensaios de campo do *Power Plant Controller* (PPC) de usinas solares conectadas ao SIN.

#### PALAVRAS-CHAVE

Fotovoltaicas; *Power Plant Controller*; Modelagem; Validação.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Este Informe Técnico apresenta detalhes dos serviços de modelagem matemática e validação de novas usinas solares com o *Power Plant Controller* (PPC) da REIVAX. O trabalho tem como objetivo principal a modelagem no software CEPEL ANATEM, focando nos aspectos dinâmicos das grandezas eletromecânicas do sistema.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: O capítulo 2 apresenta dados sobre a geração solar no Brasil. O capítulo 3 discorre sobre os componentes de uma usina fotovoltaica centralizada, com ênfase no PPC. O capítulo 4 apresenta detalhes da modelagem matemática de uma planta solar. O capítulo 5 apresenta resultados da modelagem com validação utilizando ensaios de campo. O capítulo 6 apresenta a relevância da correta representação do modelo. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões.

#### 2.0 GERAÇÃO SOLAR NO BRASIL

A tradicional e poluente geração termelétrica, baseada na queima de carvão, combustíveis fósseis ou gás, está sendo gradualmente substituída por energias alternativas. Da mesma forma, a geração nuclear também está sendo substituída por outras fontes de geração de energia elétrica. Em diversos países, a geração eólica e a geração solar fotovoltaica são as alternativas mais aplicadas atualmente [1].

No Brasil, tendo em vista a Matriz de Energia Elétrica por fonte, em 2023, de um total de 206,3GW de base instalada, o total de geração solar centralizada é de 9GW, o que corresponde a 4,4% do total. Projeções indicam que a geração solar centralizada continue apresentando crescimento acentuado, atingindo 17,4GW em 2027, o que representará 7,6% da base instalada naquele ano [2]. Vide Figura 1.

#### 3.0 COMPONENTES DE UMA USINA FOTOVOLTAICA CENTRALIZADA

As usinas fotovoltaicas centralizadas contam com a presença de diversos componentes elétricos e de controle e automação. A energia é gerada pelos painéis fotovoltaicos, convertida de corrente contínua para alternada pelos inversores, tem a tensão elevada por transformador e é transmitida pela rede de média tensão até o transformador elevador da subestação, onde se encontra o medidor de faturamento e o ponto de controle do PPC.

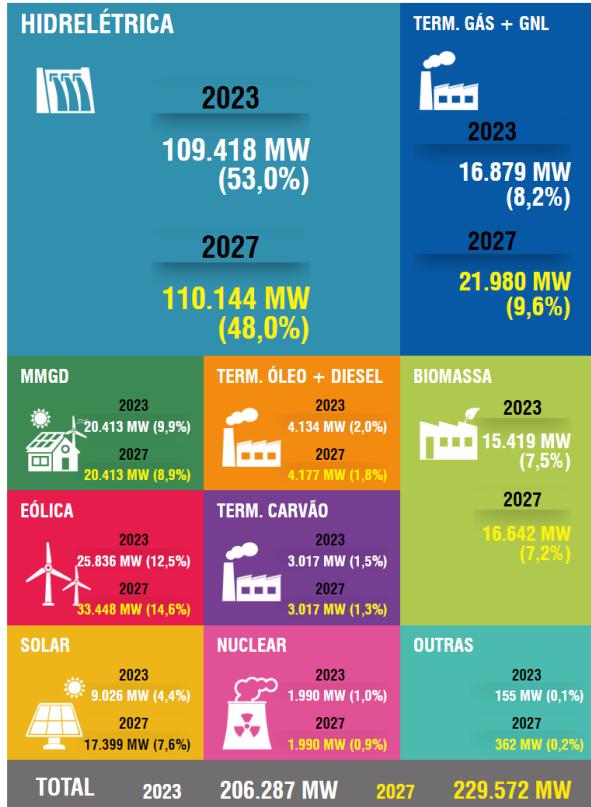


Figura 1: Evolução da capacidade instalada do SIN – Junho 2023/ Dezembro 2027. Fonte: [2]

As usinas normalmente são agrupadas por parques solares, que são um subconjunto dos inversores que podem possuir seus próprios medidores de faturamento e fazerem parte de uma segunda malha de controle do PPC.

O controle dos barramentos de baixa tensão é realizado pelos próprios inversores, que normalmente operam nos modos de controle de potência reativa e potência ativa. Já o controle da subestação e, por consequência, da usina fotovoltaica, é realizado pelo PPC. Vide Figura 2.

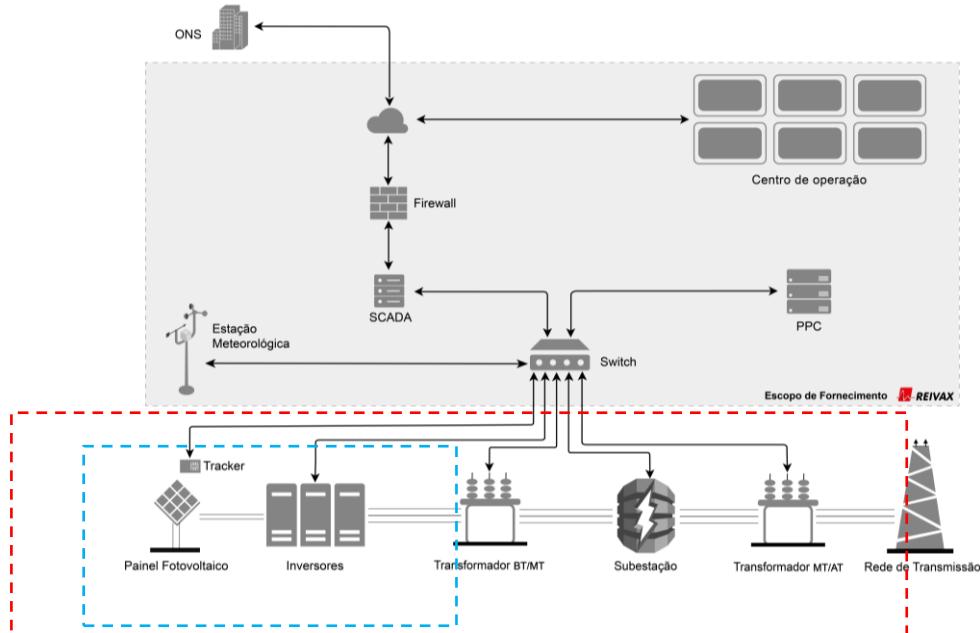


Figura 2: Componentes de uma planta solar. Controle primário (azul) e secundário (vermelho). Fonte: [3]

### POWER PLANT CONTROLLER (PPC)

O PPC é responsável por garantir o atendimento aos critérios de conexão da usina à rede elétrica [4], com presença obrigatória em usinas fotovoltaicas do tipo centralizada [3]. Ilustrado na Figura 3, no contexto dinâmico da usina fotovoltaica, o PPC tem como objetivo controlar as variáveis elétricas na barra coletora da usina fotovoltaica. Isso é realizado ao comandar as referências dos inversores, e, quando aplicável, dos compensadores de reativo e do *tap* do transformador elevador [3], [5].

O PPC deve possuir os modos de controle de tensão terminal com estatismo, potência reativa e fator de potência no ponto de conexão das instalações [4]. Os PPCs também realizam o controle do despacho das usinas fotovoltaicas [5]. Um exemplo de painel contendo o *hardware* do PPC é ilustrado na Figura 4.

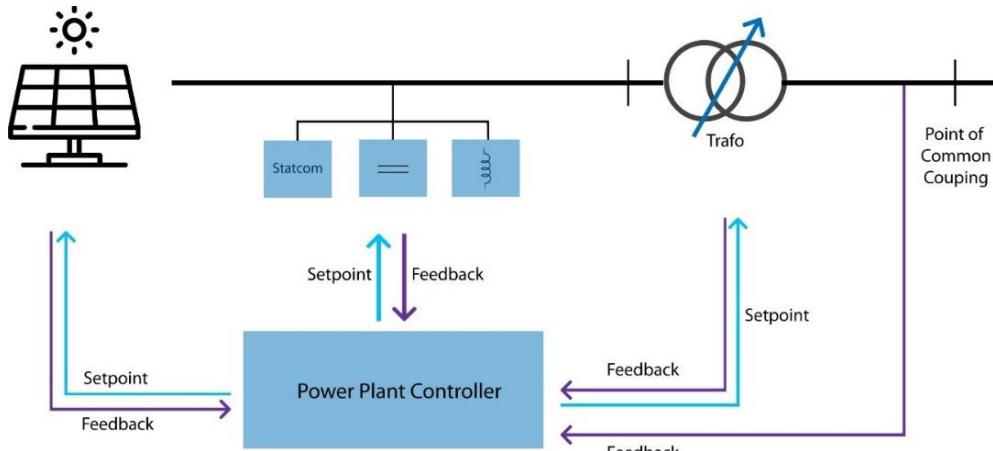


Figura 3: Funcionamento do PCC. Fonte: [3]



Figura 4: Painel de um PPC solar. Fonte: [3]

#### 4.0 MODELAGEM DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA E VALIDAÇÃO COM ENSAIOS EM CAMPO

Com o surgimento de novas fontes de geração de energia de grande porte, as quais impactam a operação dos sistemas elétricos de potência, faz-se necessária a correta modelagem matemática dos sistemas de geração e de seus controladores, seguindo o processo já realizado em usinas hidrelétricas e termelétricas em que a importância da validação foi abordada em trabalhos anteriores [6], [7].

Os principais componentes de uma usina fotovoltaica que contribuem à resposta dinâmica são os inversores, PPC e o medidor de faturamento. Na filosofia padrão de controle implementada, os inversores operam em controle de reativo e o PPC em controle de tensão, portanto, a resposta a eventos sistêmicos será majoritariamente proveniente do PPC, tornando a modelagem desse componente essencial para

representar de forma adequada o comportamento de usinas fotovoltaicas em estudos de simulações eletromecânicas.

Na representação matemática em ferramentas de estudos de estabilidade eletromecânica como o CEPEL ANATEM, os modelos matemáticos não podem ser extremamente simplificados, omitindo comportamentos relevantes. Dessa forma, ensaios em campo são cruciais para revelarem detalhes que normalmente não são considerados nos estudos preliminares, antes da planta entrar em operação.

Os modelos dos inversores e dos PPCs são fornecidos pelos fabricantes, todavia, integrá-los é desafiador, pois é crucial identificar os atrasos de comunicação entre esses componentes com o medidor de faturamento, quando utilizado. Foi observado que os medidores de faturamento possuem um *sample and hold* que varia entre 8ms até 1000ms de período, sendo o segundo o mais frequente, o que altera substancialmente a resposta do PPC, já que, como ilustrado na Figura 5, ainda que a leitura desse seja em intervalos menores, o valor será o mesmo conforme disponível pelo medidor.

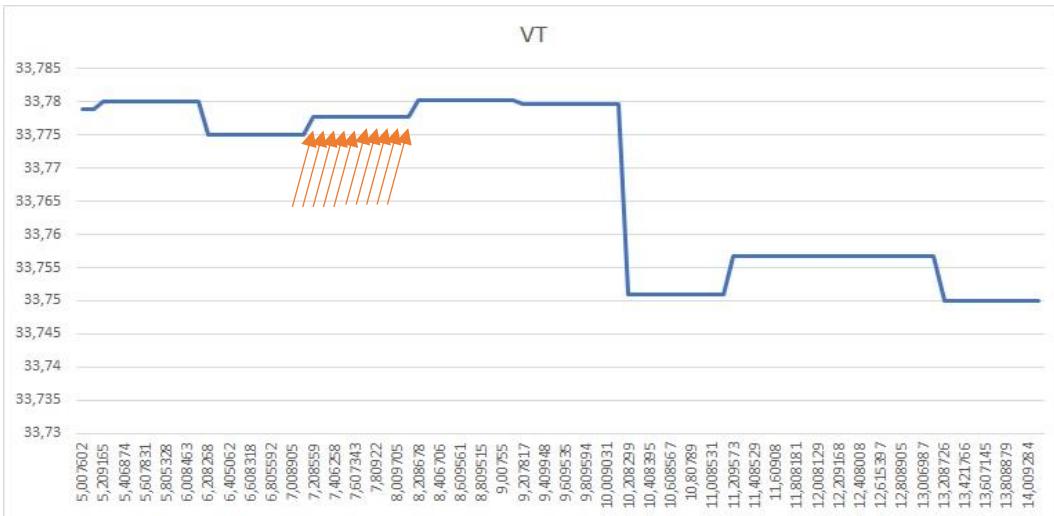


Figura 5: O sinal em azul representa a medição de tensão terminal em kV proveniente do medidor de faturamento e as setas laranja as requisições de leitura do PPC. Fonte: Autor

Além disso, foi observado que os inversores possuem uma restrição da periodicidade de escrita em suas referências, variando de 500ms a 2000ms e, assim, impondo um tempo de reação substancial no sistema, o que limita consideravelmente os ganhos que podem ser utilizados nas malhas de controle do PPC.

Após o comissionamento da planta, a partir da realização de ensaios específicos, é possível comparar a resposta do modelo (simulação) com os registros obtidos em campo. Verificada a aderência entre os sinais, tendo em vista diferentes variáveis (potência ativa, potência reativa, tensão no ponto de controle, frequência, dentre outras) o modelo pode ser considerado validado. Essa comparação é essencial para validar as limitações de comunicação supracitadas e o comportamento das malhas de controle do PPC e do Inversor.

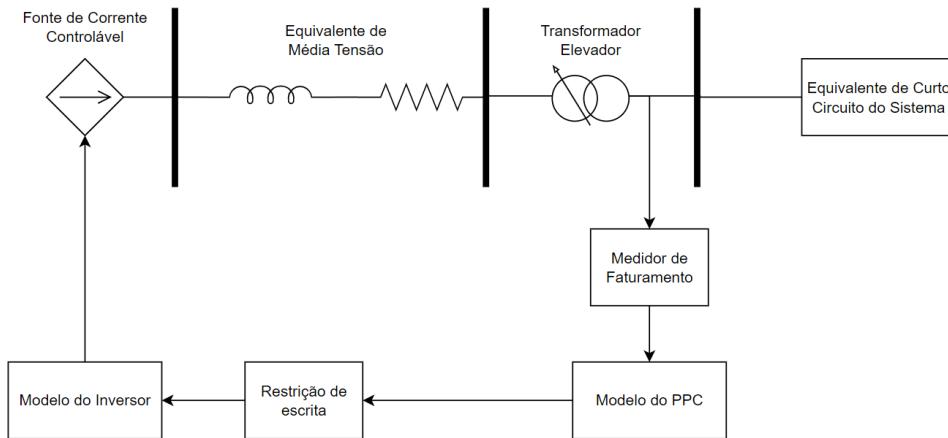


Figura 6: Diagrama do modelo matemático de uma usina fotovoltaica. Fonte: Autor.

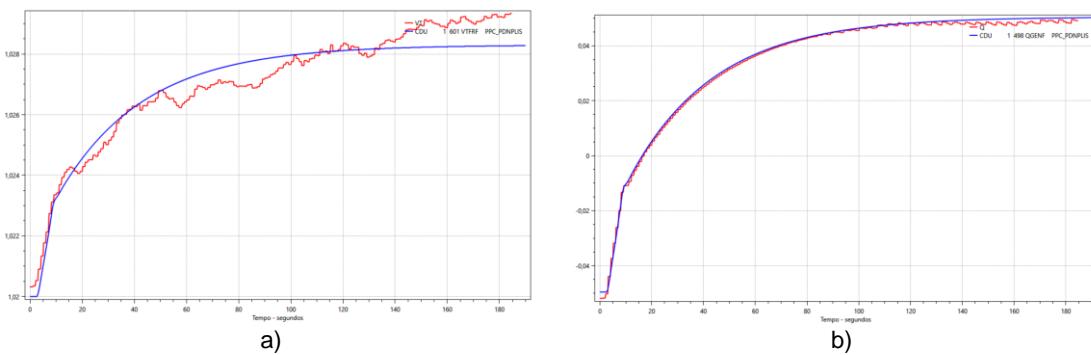
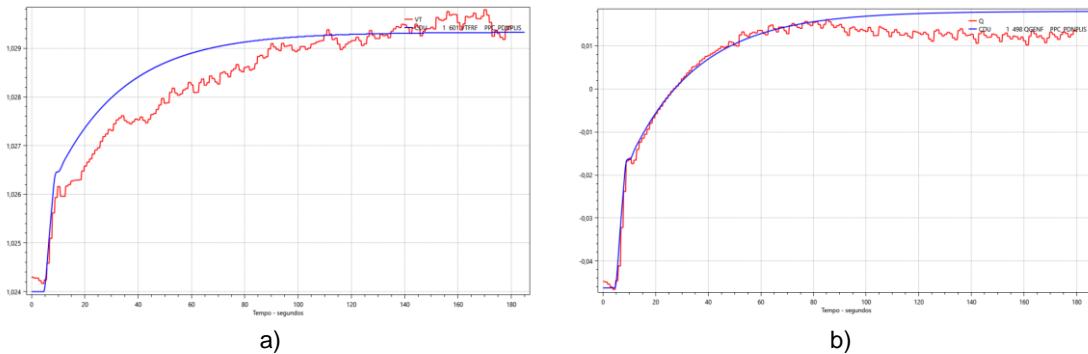
A modelagem utilizada nesse trabalho foi realizada conforme a Figura 6 no software CEPEL ANATEM. Consideram-se todos os inversores como um único inversor equivalente e realiza-se a equivalência de rede de média tensão, de forma análoga para sistemas eólicos e solares, conforme a referência [8]. O equivalente de curto é realizado para a barra de conexão da usina à rede de acordo com os critérios descritos em [9], sendo utilizado para simplificar o sistema durante a reprodução dos ensaios de validação. Os modelos CDU do inversor e PPC foram fornecidos pelos respectivos fabricantes.

Embora o PPC possa controlar tanto o lado de alta como de baixa tensão do transformador elevador, todas as usinas apresentadas nesse trabalho são controladas pelo lado de alta. Dessa forma, o ponto de controle é representado somente dessa forma, conforme Figura 6.

## 5.0 RESULTADOS DA MODELAGEM E VALIDAÇÃO UTILIZANDO ENSAIOS DE CAMPO

Para validar os modelos matemáticos utilizados, foram realizados ensaios de todos os modos de controle em dois PPCs diferentes, instalados em duas usinas fotovoltaicas com mais de 100 MW cada uma. Para diferenciar cada PPC, eles serão nomeados como PPC da Usina A e B [10], [11]. Todas as figuras estão em pu na base da potência e tensão nominal da respectiva usina. As curvas em vermelho representam as curvas aquisitadas no comissionamento remoto das usinas, através da utilização de VPN, e as curvas em azul as respostas dos modelos à mesma perturbação.

Pelas figuras, mostra-se que é possível modelar de forma adequada o comportamento de todos os modos de controle dos PPCs instalados nas usinas, representando fielmente o comportamento das taxas, estatismo, atraso de comunicação e taxas presentes.



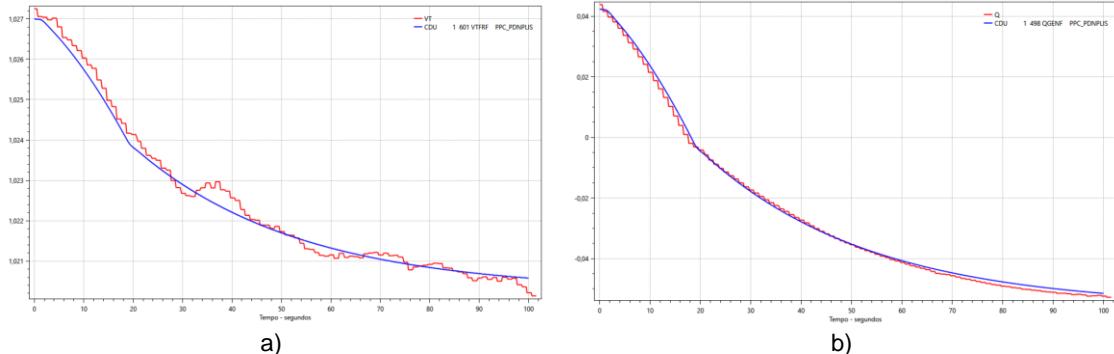


Figura 9: Degrau de referência de FP no PPC da Usina A. a) tensão terminal; b) potência reativa.  
Fonte: [10]

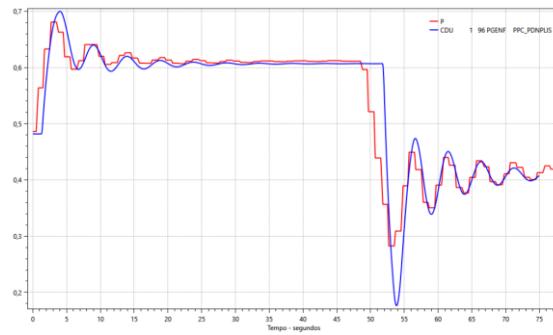


Figura 10: Degrau de referência de potência no PPC da Usina A. Fonte: [10]

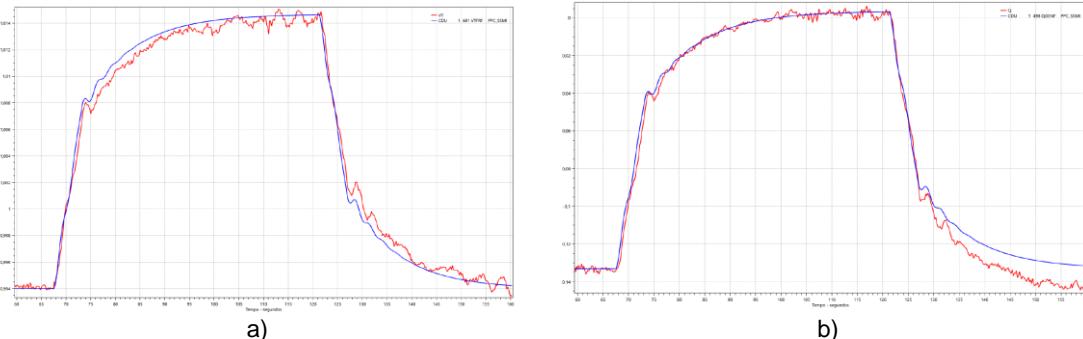


Figura 11: Degrau de referência de tensão no PPC da Usina B. a) tensão terminal; b) potência reativa.  
Fonte: [11]

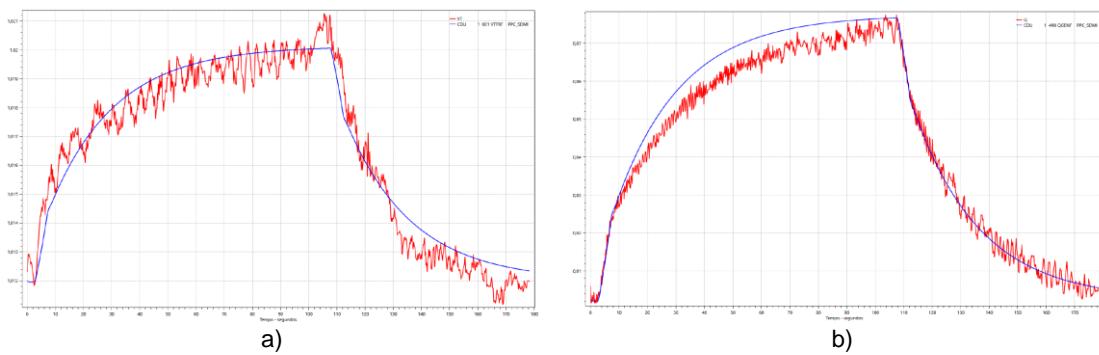


Figura 12: Degrau de referência de reativo no PPC da Usina B. a) tensão terminal; b) potência reativa.  
Fonte: [11]

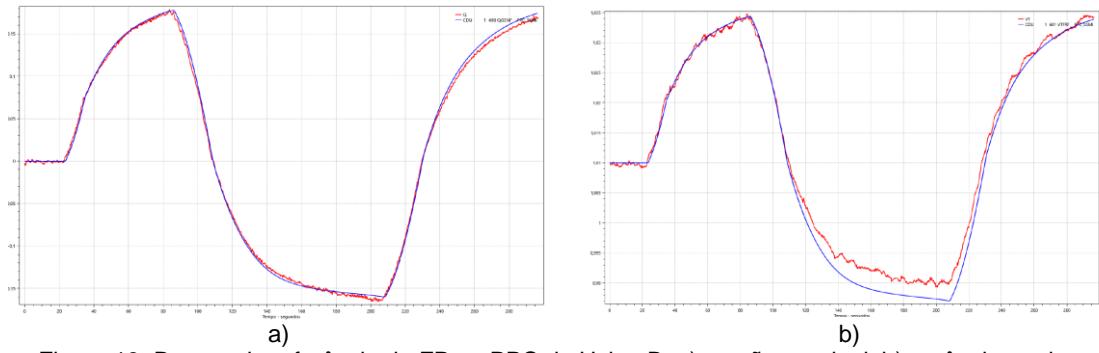


Figura 13: Degrau de referência de FP no PPC da Usina B. a) tensão terminal; b) potência reativa.  
Fonte: [11]

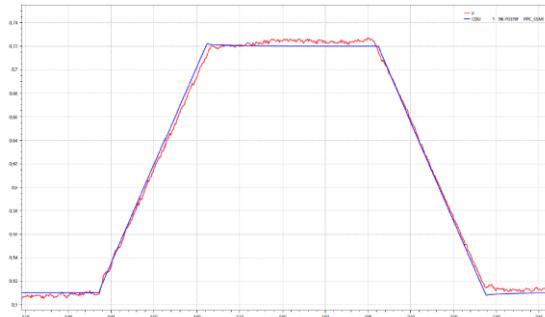


Figura 14: Degrau de referência de potência no PPC da Usina B. Fonte: [11]

## 6.0 IMPACTO DA REPRESENTAÇÃO INADEQUADA DOS MODELOS

De forma a ressaltar a relevância da correta representação, simulou-se um degrau de referência de tensão no modelo do PPC da Usina B com diferentes tempos de restrição de escrita da referência dos inversores. Vide Figura 15. Nota-se a relevância desse parâmetro na resposta de tensão terminal, principalmente na questão de estabilidade da resposta, apresentando oscilações mais sustentadas para restrições de escrita com tempo superiores.

Além disso, no controle de potência pode ou não existir a implementação de um *feedforward*, cujo efeito é ilustrado na Figura 16.

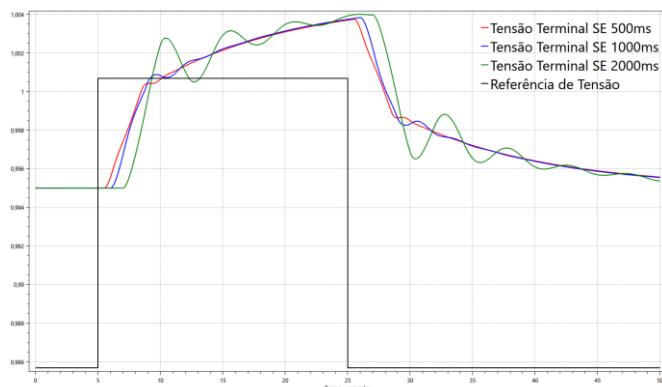


Figura 15: Degrau de referência de tensão no PPC da Usina B comparando diferentes tempos de restrição de escrita dos inversores. Fonte: Autor

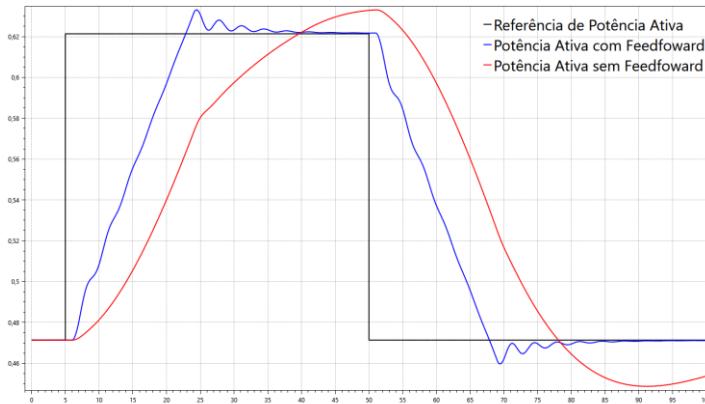


Figura 16: Degrau de referência de potência ativa no PPC da Usina B comparando de controle de potência ativa com e sem *feedforward* implementado na malha. Fonte: Autor

## 7.0 CONCLUSÕES

A participação cada vez mais relevante dos parques solares no SIN torna essencial a correta representação matemática de seus componentes e controladores para os estudos de transitórios eletromecânicos. A fim de que seja adequada, a modelagem matemática deve considerar a topologia de cada parque solar, bem como contar com uma representação fidedigna do PPC e inversores da planta.

A validação dos modelos com ensaios de campo é fundamental, pois somente dessa forma é possível validar todos os ajustes implementados e a correta representação da comunicação entre PPC e inversores, verificando se a representação da comunicação está coerente e se a resposta é adequada. Além disso, os PPCs podem contar com funções adicionais, como limitador de sobretensão e de fluxo magnético, que afetam o desempenho dinâmico e devem ser modeladas e validadas se existentes [3].

Por fim, além das usinas solares tema desse trabalho, os PPCs também são utilizados nas usinas eólicas e híbridas [12] [13], reforçando sua importância na modelagem matemática do SIN.

## REFERÊNCIAS

- [1] REN21 - RENEWABLES NOW. RENEWABLES 220 GLOBAL STATUS REPORT. [S.1.], 2020.
- [2] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *O Sistema em Números. Evolução da Capacidade Instalada do SIN – Junho2023/ Dezembro 2027.* Disponível pelo link: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>
- [3] REIVAX - Power Plant Controller - Solar. Disponível pelo link: <https://www.reivax.com/pt/solucoes/power-plant-controller-solar/>
- [4] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede – Submódulo 2.10. Disponível pelo link: [https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/S%C3%BAmodulo%202.10-RQ\\_2023.1.pdf](https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/S%C3%BAmodulo%202.10-RQ_2023.1.pdf)
- [5] REIVAX – PPC: Aspectos Técnicos e Econômicos em UFVs Centralizadas. Webinar transmitido em 2021. Disponível através do link: <https://www.reivax.com/pt/webinars/ppc-aspectos-tecnicos-e-economicos-em-ufvs-centralizadas/>
- [6] BÜHLER, C., PAIVA, R., SOARES, J.M.C., MANSO, L., PAIVA, P.M.P. Importância da Validação dos Modelos dos Sistemas de Excitação com Ensaios de Campo para Estudos de Transitórios Eletromecânicos. CIGRÉ SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu.
- [7] PAIVA, R., BÜHLER, C., SOARES, J.M.C., MANSO, L., PAIVA, P.M.P. Importância da Validação dos Modelos Através de Ensaios em Campo para Estudos de Regulação Primária e Repotencialização em Usinas Hidrelétricas. CIGRÉ SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu.
- [8] E. M. C. Butterfield, A. E. J. Mecham, J. H. R. Young, N. M. R. Delmerico e R. Z. J.C.Smith., "Equivalencing the Collector System of a Large Wind Power Plant," IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. Montreal, Quebec, 18–22 June 2006.
- [9] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3. Disponível pelo link: [https://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2023.3%2FSubm%C3%B3dulo%2023.3%2FSubm%C3%B3dulo%2023.3\\_Rev\\_1.1.pdf](https://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2023.3%2FSubm%C3%B3dulo%2023.3%2FSubm%C3%B3dulo%2023.3_Rev_1.1.pdf)
- [10] REIVAX – Relatório de Modelagem e Validação do projeto F22045. Florianópolis, 2022.
- [11] REIVAX – Relatório de Modelagem e Validação do projeto F22058. Florianópolis, 2022.
- [12] REIVAX - Power Plant Controller - Eólico. Disponível pelo link: <https://www.reivax.com/pt/solucoes/power-plant-controller-wind-power/>
- [13] REIVAX - Power Plant Controller - Híbrido. Disponível pelo link: <https://www.reivax.com/pt/solucoes/power-plant-controller-hybrid/>

## DADOS BIOGRÁFICOS

### (1) LUCAS LOBO

Cursou Engenharia Elétrica (UFSC, 2021). Atua na REIVAX desde 2020, no setor de Estudos Especiais, com modelagem e validação de modelos matemáticos de controladores, identificação de parâmetros de máquinas síncronas e consultoria de ajuste de controladores, realizou estudos de modelagem e ajuste de controladores no Brasil, Colômbia, Peru e Bolívia.

### (2) LUCAS EDUARDO DE SOUZA

Engenheiro eletricista da REIVAX desde 2020, no setor de Estudos Especiais, atuando na área de ensaios de campo, modelagem e validação de modelos matemáticos de controladores, identificação de parâmetros de máquinas síncronas e simulações de transitórios eletromecânicos. Graduado em Engenharia Elétrica em 2020 pela UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

### (3) RODRIGO PEREIRA GOSMANN

Rodrigo Pereira Gosmann é especialista em Ciência de Dados e Big Data pela PUC-MG em 2021 e graduado em Engenharia de Controle Automação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2008. Atualmente trabalha na REIVAX com desenvolvimento, especificação e comissionamento de Power Plant Controller para usinas solares e eólicas. Possui experiência de desenvolvimento, modelagem e comissionamento de reguladores de velocidade e sistema de excitação para hidroelétrica es turbina a vapor.

### (4) CRISTIANO BÜHLER

Cursou Engenharia Elétrica (UFSC, 2006), Mestrado em Sistemas de Potência (UFSC, 2015-incompleto), MBA em Gestão Empresarial (FGV, 2019) e Gestão da Tecnologia - Roadmap&Development (MIT Professional Education, 2023). Atua na REIVAX desde 2006 com teste e comissionamento de controladores, realizou estudos de modelagem de máquinas e controladores, projetou equipamentos e ministrou treinamentos para profissionais de mais de 20 países. Atualmente atua como Gestor dos Produtos REIVAX, coordena projetos de P&D&I, e colabora com a área de Energia Solar da empresa. É membro do IEEE e do CIGRÉ.

### (5) ARTUR HEERDT

Cursando Engenharia Elétrica (UFSC). Atua na REIVAX desde 2022 com modelagem e validação de controladores, realizou estudos de modelagem e ajuste de controladores no Brasil e na Colômbia. Atualmente atua no setor de Estudos Especiais na REIVAX.

### (6) LUIZ FELIPE PFLEGER

Cursando Engenharia Elétrica (UFSC). Atua na REIVAX desde 2022 com modelagem e validação de controladores, realizou estudos de modelagem e ajuste de controladores no Brasil e na Colômbia. Atualmente atua no setor de Estudos Especiais na REIVAX.