



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

DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO AEROGERADOR FULL CONVERTER E DO POWER PLANT CONTROLLER (PPC) E VALIDAÇÃO COM OS ENSAIOS DE CAMPO

**VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA(1); SAULO JOSE DA SILVA FILHO(1); VINÍCIUS RIBEIRO NIEDZWIECKI(2); DAVID RODRIGUES PARRINI(2)
JORDÃO ENERGIA(1); Vestas Wind Systems(2)**

RESUMO

A crescente penetração da fonte eólica na matriz brasileira tem grande influência nos valores de intercâmbio entre as regiões do Sistema Interligado Nacional, principalmente na exportação a partir da região Nordeste. Além disso, esta geração contribui para o desempenho dinâmico do sistema, o que torna essencial que haja uma representação fiel dos aerogeradores e seus controles na base de dados do SIN. Este artigo apresenta em detalhes o desenvolvimento do modelo do aerogerador tipo Full-Converter e do controle centralizado de parque (Power Plant Controller), bem como os resultados de validação contra os ensaios de campo para comissionamento do sistema de controle.

PALAVRAS-CHAVE

Validação de Modelos, Ensaios de Comissionamento, Gerador Eólico.

1.0 INTRODUÇÃO

No Sistema Interligado Nacional (SIN) a geração eólica já é a terceira maior fonte de energia com capacidade instalada de 19 GW, representando mais de 10% da potência instalada total no país, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esta grande quantidade de parque e aerogeradores tem grande influência nos valores de intercâmbio entre as regiões do SIN, principalmente na exportação da região Nordeste. Além disso, esta geração contribui para o desempenho dinâmico do sistema podendo aumentar ou diminuir os amortecimentos dos modos de oscilação entre os subsistemas do SIN dependendo dos valores de intercâmbio e dos ajustes implementados em campo para os dispositivos de controle. Sendo assim, a representação mais fiel das lógicas de controle dos aerogeradores e do controle de parque (Power Plant Controller – PPC) é fundamental para identificar possíveis oscilações entre os sistemas e garantir uma melhor representação desta geração.

Também é fundamental que os modelos estejam validados com os ensaios de campo e sejam utilizados de forma adequada nas simulações de transitórios eletromecânicos para uma representação mais próxima possível do desempenho dos controles em campo. Além disso, a sua utilização deve ser fácil, independente a potência gerada e sem a necessidade de interação com o usuário.

Desse modo, este trabalho irá apresentar a modelagem e a validação com ensaios de campo de um gerador eólico. Cabe destacar que o modelo do aerogerador foi desenvolvido de acordo com a norma IEC 61400-27-1, que define as malhas de controle e os principais componentes de um aerogerador conectado à rede elétrica através de um conversor (Full Converter), sendo este classificado na norma como do Tipo 4A.

Sendo assim, neste artigo será apresentada a modelagem dos seguintes controles: *Controle de potência ativa; Controle de potência reativa; Limitação de corrente; Limitação de potência reativa; Proteção da rede; Sistema do gerador e Referências e rotação de sistema de referência*. Além das malhas de controle definidas pela IEC, foram adicionadas as malhas de "Over Boost and Production Controller", que são malhas específicas do fabricante que tendem a reproduzir de forma mais fiel as características e desempenho da máquina real frente as variações de frequência, que é um dos requisitos para a contribuição dos aerogeradores no controle de frequência do sistema.

Com relação aos modos de controle de potência reativa, que importante para o controle de tensão do sistema, foram representados o *Controle de tensão terminal; Controle de potência reativa; Controle de potência reativa em malha aberta; Controle de fator de potência e Controle de fator de potência em malha aberta*. Sendo que os modos de controle de malha aberta estão ligados ao PPC, ou seja, recebem os valores de referência do PPC.

O modelo do PPC também foi desenvolvido de acordo com a mesma norma IEC e nele estão representados as seguintes malhas de controle: *Controle de potência ativa; Controle de tensão terminal; Controle de potência reativa; e Controle de fator de potência*. Assim como no modelo do aerogerador foi adicionado uma malha de Controle de frequência e over boost para representar melhor as funções dos parques para estar de acordo com os equipamentos de campo.

Portanto, este artigo tem por objetivo apresentar em detalhes o desenvolvimento do modelo do aerogerador e do controle de parque (PPC) e também apresentar os resultados da validação com os ensaios de campo.

2.0 MODELO

2.1 Modelo do Gerador

O modelo do gerador segue implementação similar ao do IEC [1]. A Figura contém uma representação simplificada dos principais módulos. Alguns dos módulos destacados foram aprimorados em relação ao de [1] para melhor modelar a turbina e atender aos requisitos dos procedimentos de rede [2] e isto será melhor descrito nas seções a seguir.

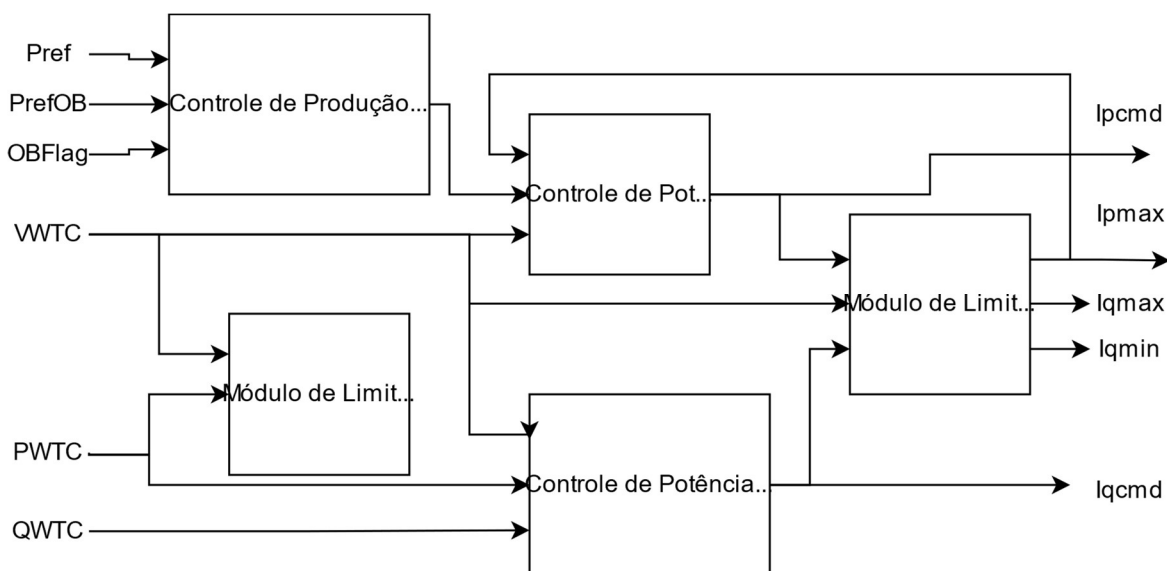


Figura 1. Módulos do modelo do gerador.

2.1.1 Controle de Produção de Potência Ativa

O controle de produção de potência ativa é responsável por calcular o sinal de referência para o controle de potência ativa da turbina. Diferentemente do controle de potência ativa do modelo IEC, nesse modelo a taxa da rampa da referência de potência ativa é selecionada com base no ajuste de diferentes tipos de rampas e modo de operação, como o *fast run back*.

2.2 Modelo do PPC

2.2.1 Controle de Potência Ativa e Controle de Frequência do PPC

A malha de controle de potência ativa e controle de frequência do PPC segue o modelo do IEC com mudanças sobretudo no controle de frequência. Uma primeira diferença é a modelagem da potência disponível devido a condições de vento (P_{avail}) e o ajuste de *curtailment* (P_{curta}) no modo de controle de frequência. A Figura 2 contém uma representação da relação desse ajuste e da potência disponível com a potência de saída do parque. Se o parque estiver operando com *curtailment* e houver potência disponível, ele poderá atuar aumentando a geração durante subfrequência.

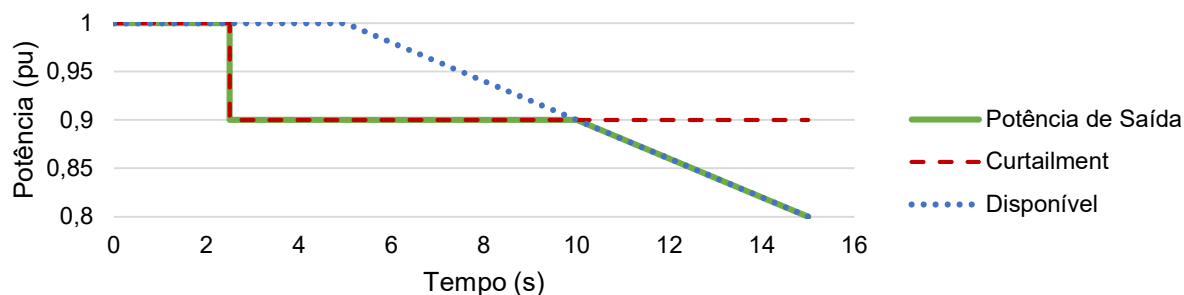


Figura 2. Relação da potência de saída com ajuste de *curtailment* e potência disponível.

A malha de controle de potência ativa do modelo IEC contém uma tabela de pontos para a definição da relação da variação de potência com a frequência, provendo um controle de frequência simplificado [1]. Nos procedimentos de rede do ONS, entretanto, é exigido que as turbinas atuem em condições de subfrequência fornecendo potência ativa

adicional de pelo menos 10% da sua capacidade por um período mínimo de 5 s [2]. Este recurso é denominado *Overboost* (OB) e uma malha adicional foi então acrescentada, substituindo os recursos de controle de frequência da malha IEC.

O controle de frequência e *Overboost* implementado é representado na Figura 3. O sinal “PrfFrq” é a potência de referência calculada pelo controle de frequência, e segue lógica similar ao do modelo IEC, considerando tabela que relaciona variação de potência com a frequência e a potência disponível. O sinal “dP” é, então, a variação final de potência devido ao controle de frequência. Adicionalmente dois sinais são calculados e transmitidos para as turbinas: “PrefOB” e “OBFlag”. “PrefOB” é a capacidade adicional e “OBFlag” determina se a turbina deve ou não responder a esse sinal.

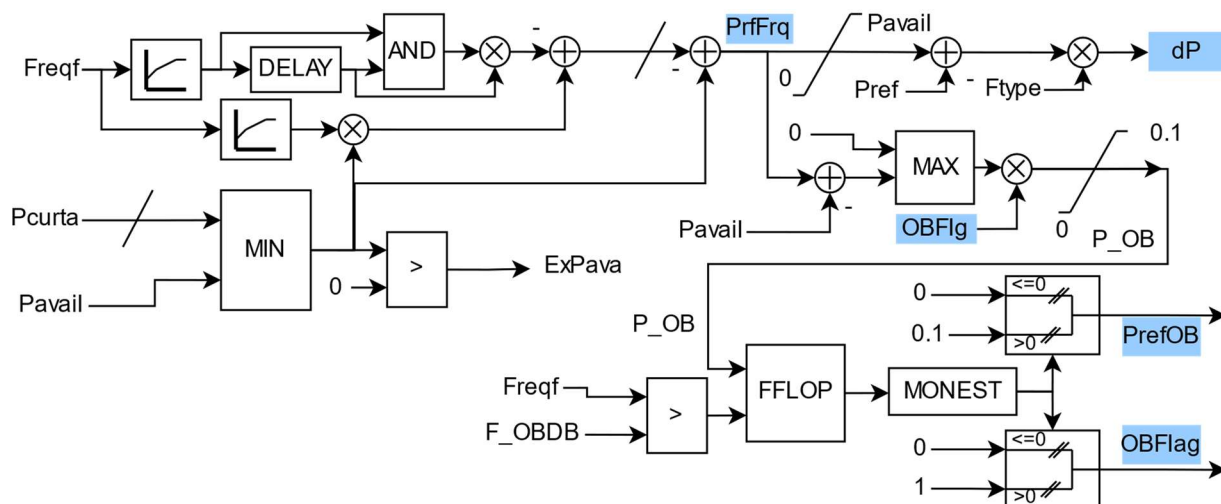


Figura 3. Controle de frequência e *Overboost* do PPC.

A capacidade adicional de OB é utilizada em determinadas condições, considerando a malha adicional da Figura 4: (i) A potência requerida para o controle de frequência (PrfFrq) deve exceder a potência disponível (Pavail); (ii) A turbina precisa ter capacidade disponível para OB (WPPOBC); (iii) O desvio de frequência deve ser superior a uma banda morta (UFOBdb). Finalmente, se a frequência medida (Freqf) voltar a ser superior a um limite (F_OBDB), a malha é desativada (Figura 3).

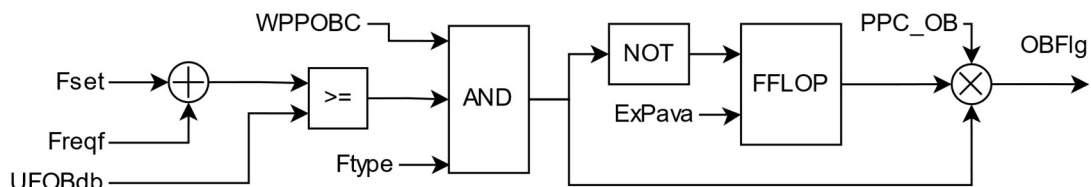
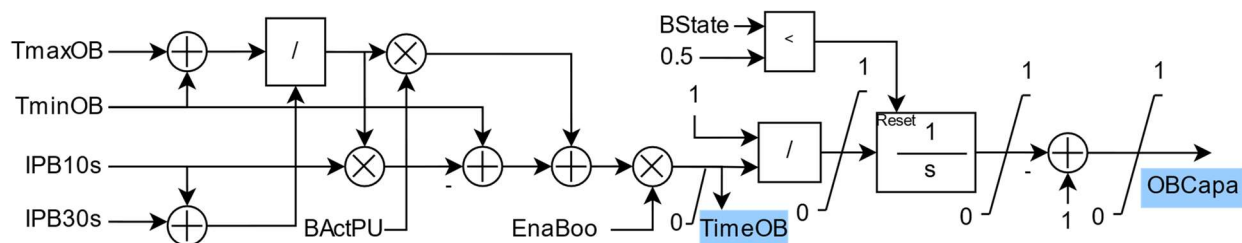


Figura 4. Malha de ativação do *Overboost* no PPC.

Conforme o diagrama da Figura 1, o modelo da turbina contém a outra parte da malha do *Overboost*, sendo essa a responsável por determinar a capacidade disponível e a duração máxima da ação. A Figura 5 contém uma representação dela.



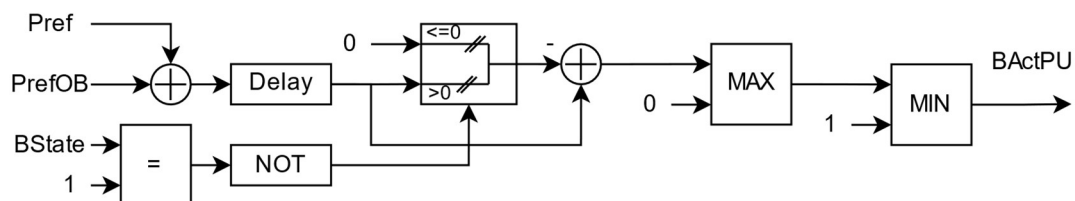


Figura 5. Cálculo da capacidade disponível e duração do *overboost* no modelo da turbina.

2.2.2 Controle de Potência Reativa do PPC

O controle de potência reativa implementado segue o modelo IEC, incluindo os quatro modos de controle: referência de potência reativa, fator de potência, tensão e modo *UQ static*, em que uma dependência da saída de potência reativa com o erro de tensão é configurada. A central deve ser capaz de operar nos modos de controle de tensão, potência reativa e fator de potência [2]. O modo de controle de tensão normalmente requerido, entretanto, é melhor modelado pelo modo *UQ static* em que um estatismo pode ser ajustado.

3.0 RESULTADOS

O modelo desenvolvido foi validado com ensaios de comissionamento realizados no equipamento real. A Figura 6 apresenta o resultado do caso de variação na referência de potência ativa. No caso de sobrefrequência, a frequência medida é alterada de acordo com Figura 7 e a geração de potência ativa é mostrada na Figura 8. A Figura 9 apresenta o caso de variação da referência de potência reativa da máquina. Em todas as figuras as curvas do comissionamento estão na cor vermelha e as curvas do modelo desenvolvido estão na cor azul.

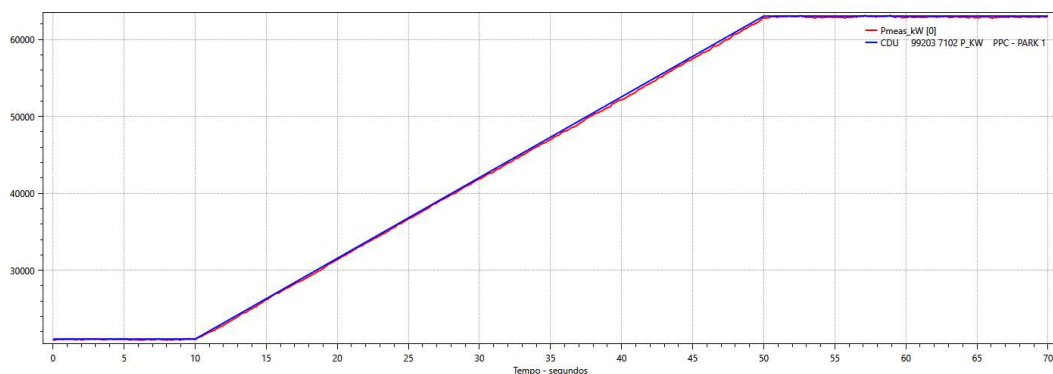


Figura 6. Controle de Potência Ativa – Potência Ativa

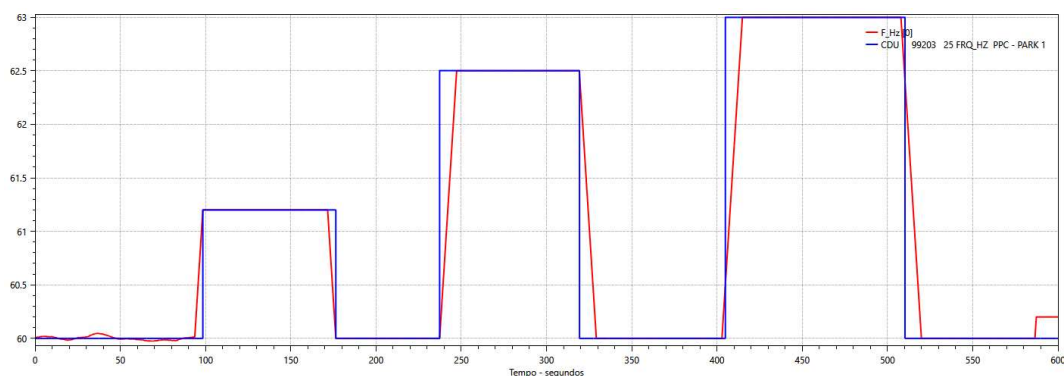


Figura 7. Controle de Frequência – Medição de Frequência

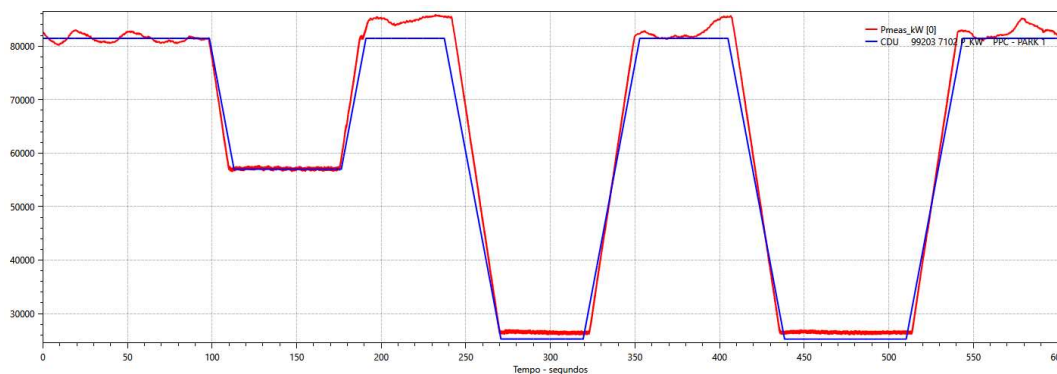


Figura 8. Controle de Frequência – Potência Ativa

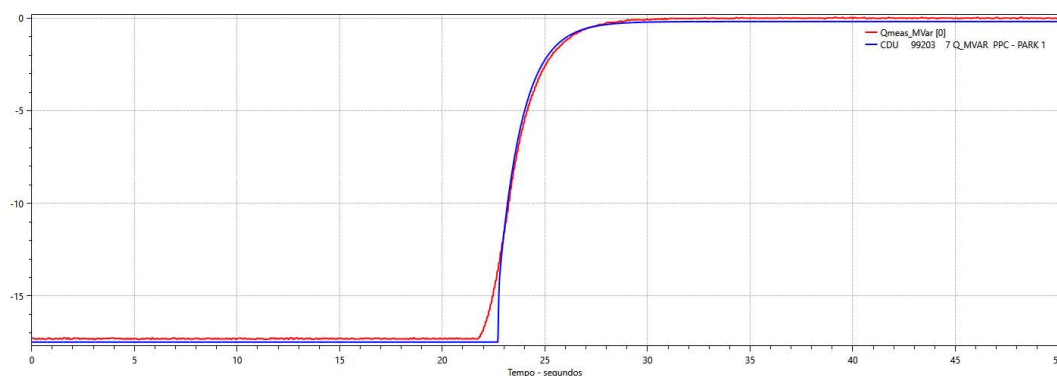


Figura 9. Controle de Potência Reativa – Potência Reativa

4.0 CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada a modelagem e a validação com ensaios de campo de um gerador eólico. Sendo que o modelo do aerogerador foi desenvolvido de acordo com a norma IEC 61400-27-1, para um conversor (Full Converter), sendo este classificado na norma como do Tipo 4A.

Foi apresentada a modelagem dos seguintes controles: *Controle de potência ativa; Controle de potência reativa; Limitação de corrente; Limitação de potência reativa; Proteção da rede; Sistema do gerador e Referências e rotação de sistema de referência*. Além destas malhas foram adicionadas as malhas de “Over Boost and Production Controller”, que são malhas específicas do fabricante que tendem a reproduzir de forma mais fiel as características e desempenho da máquina real frente as variações de frequência, que é um dos requisitos para a contribuição dos aerogeradores no controle de frequência do sistema.

Com relação aos modos de controle de potência reativa, foram representados o *Controle de tensão terminal; Controle de potência reativa; Controle de potência reativa em malha aberta; Controle de fator de potência e Controle de fator de potência em malha aberta*. Sendo que os modos de controle de malha aberta estão ligados ao PPC.

O modelo do PPC também foi desenvolvido de acordo com a mesma norma IEC e nele estão representadas as seguintes malhas de controle: *Controle de potência ativa; Controle de tensão terminal; Controle de potência reativa; e Controle de fator de potência*. Assim como no modelo do aerogerador foi adicionado uma malha de Controle de frequência e over boost para representar melhor as funções dos parques do fabricante para estar de acordo com os equipamentos de campo.

Portanto, este artigo apresentou em detalhes o desenvolvimento do modelo do aerogerador e do controle de parque (PPC) e também os resultados da validação com os ensaios de campo do gerador eólico.

5.0 REFERÊNCIAS

- [1] IEC, “Wind energy generation systems - Part 27-1: Electrical simulation models - Generic models (IEC 61400-27-1:2020),” 2020.
- [2] ONS, “Procedimentos de Rede Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão,” 2010.

DADOS BIOGRÁFICOS



Formado na UFF em 1992, Mestrado em Computação em 2009. Com grande experiência em estudos regime permanente, transitório eletromecânico, transitório eletromagnético, comissionamento, modelagem e ajuste de equipamento de controle, tais como: Reguladores de Tensão, Reguladores de Velocidade, PSS. Grande experiência na modelagem de SVC, HVDC, Usinas Solares e Eólica no ATP e ANATEM. Com participação nos estudos de HVDC no Brasil. Trabalhou em Furnas de 1993 à 2000 e no ONS de 2000 à 2008. Hoje é sócio da empresa Jordão Energia, empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de P&D.

(2) SAULO JOSE DA SILVA FILHO

Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal Fluminense em 2015 e atualmente trabalhando na Jordão energia, possui amplos conhecimentos em Anarede, Anafas, Anatem, PSCAD, RSCAD e ATP. Conhecimentos intermediários em programação em Fortran, C/C e C# e uso de metaheurísticas. Grande experiência na área de modelagem computacional de equipamentos elétricos para estudos de transitórios eletromecânicos utilizando ANATEM e transitórios eletromagnéticos utilizando o ATP.

(3) VINÍCIUS RIBEIRO NIEDZWIECKI

Engenheiro eletricista graduado pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2012, trabalhou com usinas eólicas, solares, hidrelétricas e sistemas de transmissão associados. Atualmente ocupa o cargo de Lead Electrical Engineer na Vestas e é responsável pela área de Conexão ao Sistema no Sul da América Latina.

(4) DAVID RODRIGUES PARRINI

Possui graduação (2016) e mestrado (2018) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é Engenheiro de Sistemas de Potência e desenvolvedor na Vestas na equipe de modelos elétricos.