

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

MODELAGEM GENÉRICA PARA REPRESENTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA

LÍGIA ROLIM DA SILVA(1); TIAGO CAMPOS RIZZOTTO(2); FABRICIO LUCAS LIRIO(1); THAÍS PACHECO TEIXEIRA(2); NÍCOLAS ABREU ROCHA LEITE NETTO(1)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE(2)

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo genérico de sequência positiva para representação de usinas fotovoltaicas em estudos de estabilidade eletromecânica, no formato do programa Anatem. Esse modelo é inspirado no modelo genérico de gerador solar concentrado, proposto originalmente pelo *Western Electricity Coordinating Council* (WECC), e conta com refinamentos que visam atender aos requisitos mínimos exigidos para a conexão de usinas fotovoltaicas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), preconizados nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema, possibilitando uma modelagem conservadora e simplificada dessa geração nas análises dinâmicas de transitórios eletromecânicos.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Fotovoltaica, Transitório Eletromecânico, Simulação Dinâmica, Anatem

1.0 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) tem experimentado forte aumento na inserção de usinas fotovoltaicas em seu parque gerador (de 369 MW em Nov/17 para 3995 MW em Dez/21) [1], o que tem sido observado no ambiente de contração regulado e, mais recentemente, também, no ambiente de contração livre. A projeção de expansão futura dessa fonte (8179 MW em 2025) [2] sinaliza maior complexidade tanto para a manutenção de bases de dados de estabilidade, quanto para a execução de estudos elétricos, principalmente em simulações dinâmicas, em virtude do elevado número de equipamentos modelados de forma detalhada. A base de dados dinâmicos disponibilizada pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) no formato do programa Anatem tem sofrido um aumento crescente tanto na sua complexidade quanto em dimensão, em função dos novos empreendimentos previstos no SIN, requerendo elevado esforço computacional nas simulações dinâmicas.

O desafio mais evidente, no âmbito do planejamento da transmissão, é o desconhecimento quanto às características técnicas detalhadas de usinas futuras (geração prospectiva), o que dificulta a associação de modelos elaborados com a estrutura de Controladores Definidos pelo Usuário (CDU), os quais, apesar de permitirem a representação detalhada do comportamento dinâmico das fontes existentes, enfrentam incertezas no que diz respeito à representação fidedigna de usinas futuras. Outro desafio está relacionado à modelagem adequada das usinas existentes para estudos de estabilidade eletromecânica, visto que, dentre os modelos disponíveis atualmente, nem todos são de fácil inicialização e computacionalmente eficientes, podendo apresentar problemas de convergência devido à falta de robustez do modelo e devido a malhas com constantes de tempo características do transitório eletromagnético e, portanto, não significativas na análise de transitórios eletromecânicos.

Com o objetivo de aprimorar os estudos de planejamento, foi desenvolvido um modelo genérico de sequência positiva para representação de usinas fotovoltaicas (UFV) em estudos de estabilidade eletromecânica, no formato do programa Anatem [3]. Esse modelo é inspirado no modelo genérico de gerador solar concentrado para análise de UFVs de grande porte, proposto originalmente pelo *Western Electricity Coordinating Council* (WECC) [4], e conta com refinamentos que visam a atender aos requisitos mínimos exigidos para a conexão de usinas fotovoltaicas ao SIN, preconizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) nos Procedimentos de Rede [5], possibilitando uma modelagem conservadora e simplificada dessa geração nas simulações dinâmicas.

Adicionalmente, serão destacados os principais recursos disponíveis no modelo genérico de UFV na simulação dinâmica de casos de pequeno e grande porte; sobretudo, serão apresentados os principais recursos disponíveis no modelo, bem como os ganhos proporcionados por essa modelagem aos estudos de planejamento e aos usuários do programa Anatem, em geral.

2.0 CONEXÃO DE CENTRAIS GERADORAS FOTOVOLTAICAS AO SIN

Os requisitos mínimos para a conexão de usinas fotovoltaicas (UFV) ao SIN são descritos nos Procedimentos de Rede do ONS no Submódulo 2.10 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão [4]. Os agentes de geração devem atender os requisitos mínimos em função da sua capacidade instalada, da modalidade de operação da UFV e do ponto de conexão à rede elétrica. Especialmente no caso de centrais geradoras fotovoltaicas com capacidade instalada total superior a 30 MW; ou grupos de centrais geradoras fotovoltaicas, em uma mesma área geoeletrica, com capacidade instalada total superior a 50 MW, é preconizado o atendimento aos requisitos gerais do Submódulo 2.10.

Os requisitos técnicos gerais incluem definições de faixas de operação da central geradora fotovoltaica em regime de frequência não nominal (ver Figura 1) ; definições de faixas de operação em regime permanente com fator de potência indutivo ou capacitivo; requisitos relacionados à capacidade de geração/absorção de potência reativa (ver Figura 2-a); definições de modos de controle (controle de tensão, controle de potência reativa e controle de fator de potência); fator de potência em regime de tensão não nominal; faixas de operação em regime de tensão não nominal (ver Figura 2-b); requisitos para atendimento do fator de potência em regime de tensão não nominal.

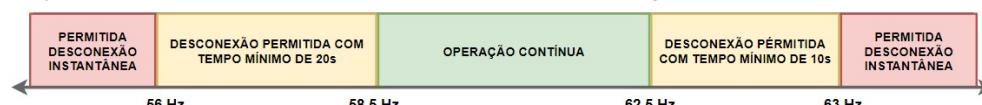


Figura 1 - Faixas de operação da central geradora em regime de frequência não nominal

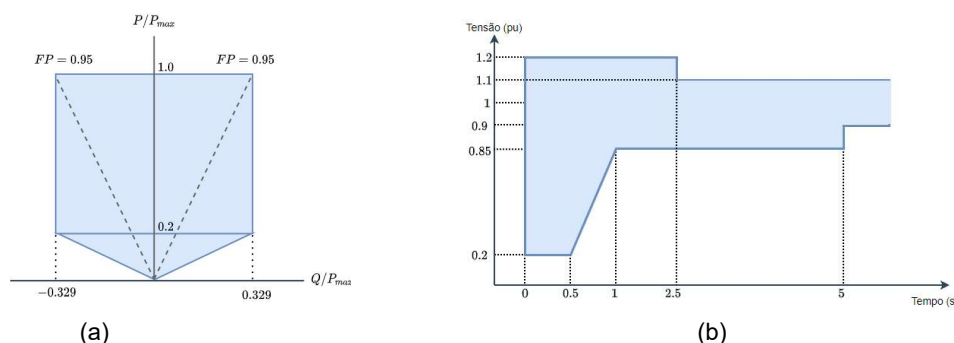


Figura 2 – (a) Faixa de geração/absorção de potência reativa no ponto de conexão da central geradora; (b) Suportabilidade a sub tensões e sobretensões dinâmicas

Adicionalmente, no submódulo 2.10 também são definidos critérios operativos para efeitos de resposta em regime permanente e dinâmico, considerando: variação de tensão em regime permanente; instabilidade de tensão; sistema de proteção para centrais geradoras eólicas e fotovoltaicas; sistema de registro de perturbações para centrais geradoras eólicas e fotovoltaicas; suportabilidade a sub tensões e sobretensões dinâmicas (*fault ride-through*); injeção de corrente reativa sob defeito; e tomada de carga.

Neste trabalho, foi dada atenção especial ao critério de **suportabilidade a sub tensões e sobretensões dinâmicas** para a construção do modelo genérico de sequência positiva para representação de UFVs em simulações dinâmicas no programa Anatem. O modelo proposto foi desenvolvido utilizando a estrutura de CDU do Anatem e deverá assegurar que a UFV continue operando (sem desconexão) se a tensão terminal permanecer dentro da região indicada na Figura 2-b, ou seja, a central geradora deve ser capaz de operar, mediante qualquer tipo de distúrbio:

- entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal por período ilimitado;
- entre 0,85 e 0,90 p.u. da tensão nominal por período mínimo de 5 segundos; e
- entre 1,10 e 1,20 p.u. por período mínimo de 2,5 segundos.

O modelo genérico de UFV proposto neste trabalho é inspirado no modelo genérico de sequência positiva proposto pelo WECC em [4] para a representação de UFVs de grande porte.

3.0 MODELO GENÉRICO PARA ANÁLISE DINÂMICA DE UFV DE GRANDE PORTE

Os modelos dinâmicos existentes na Base de Dados Dinâmicos (BD) disponibilizada pela EPE [6], elaborados via CDU, para a representação de geração fotovoltaica, manifestam elevado nível de complexidade, com grande detalhamento de estratégias de controle e lógicas de funcionamento específicas de cada fabricante. Diversos desses modelos têm apresentado desafios tanto no processo de inicialização quanto para convergência após a aplicação de eventos na simulação dinâmica. Nos estudos de planejamento da expansão, a representação da geração fotovoltaica utilizando o modelo de geração que varia em função da tensão (modelo ZIP), via código **DGER** do programa Anatem, tem sido adotada como alternativa à representação detalhada da geração fotovoltaica, visando a

robustez e o desempenho das simulações dinâmicas, principalmente nos casos em que os modelos CDUs apresentam erros de convergência. A modelagem via DGER também tem sido empregada para a representação das UFVs em fase de planejamento e sem modelo definido no banco de dados, conforme ilustra a Figura 3.

```

=====
( ASSOCIAÇÃO DE MODELAGEM DGER - GERACAO FOTOVOLTAICA SEM MODELO OFICIAL
=====
DGER BASE
(tp) ( no) C (tp) ( no) C (tp) ( no) C (tp) ( no) (A) (B) (C) (D) (VbP) (VdP) (VbQ) (VdQ)
BARR 58162 0 0 100 0 85.0 85.0 85.0 85.0
BARR 58163 0 0 100 0 85.0 85.0 85.0 85.0
BARR 58164 0 0 100 0 85.0 85.0 85.0 85.0
BARR 58165 0 0 100 0 85.0 85.0 85.0 85.0

```

Figura 3 – Representação de geração fotovoltaica pelo modelo ZIP via DGER

No entanto, a modelagem funcional, via DGER, realiza o **bloqueio instantâneo** da injeção de potência ativa e reativa para níveis de tensão abaixo do valor especificado, respectivamente, em VbP e VbQ, definidos como tensão mínima para a operação normal da UFV. Pela inexistência de parâmetros de temporização associados ao modelo DGER e pela consequente impossibilidade de reprodução do comportamento dinâmico indicado na Figura 2-b, a partir dessa modelagem, os resultados de simulações envolvendo aplicação de eventos que provoquem variação de tensão no ponto de conexão dos parques fotovoltaicos podem ser demasiadamente conservadores, já que não são considerados os requisitos operativos mínimos de suportabilidade a subtensões e sobretensões dinâmicas, estabelecidos no submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede.

3.1 Modelo genérico WECC para representação de geração fotovoltaica

A WECC desenvolveu dois modelos genéricos para análise dinâmica de usinas fotovoltaicas: um modelo simplificado destinado à análise de usinas fotovoltaicas agregadas conectadas ao sistema de distribuição (PVD1) e um modelo concentrado para o estudo de UFVs de grande porte (WECC-UFV), o qual é objeto de estudo deste artigo.

O modelo genérico WECC-UFV foi projetado para estudos de planejamento de sistemas de grande porte com o objetivo de avaliar o desempenho dinâmico do sistema, particularmente após distúrbios na rede elétrica no nível de transmissão. Neste contexto, o modelo WECC-UFV adota a representação de sequência positiva, compatível com os modelos dinâmicos detalhados de UFVs representados no Anatem. Esta abordagem despreza a representação detalhada de controles rápidos, característicos de transitórios eletromagnéticos. Basicamente, o modelo WECC-UFV é constituído de três módulos principais, ilustrados na Figura 4.

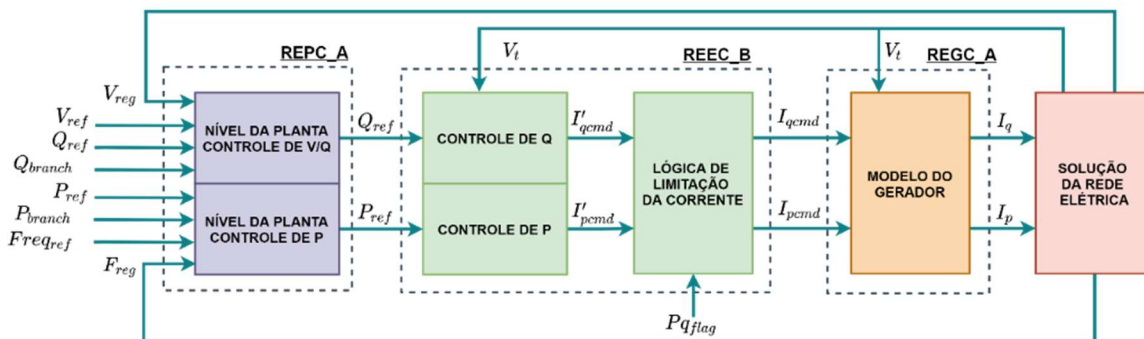


Figura 4 – Diagrama de blocos de comunicação entre os módulos do modelo genérico WECC

A estrutura do modelo WECC-UFV é detalhada a seguir:

- **REGC_A**: módulo utilizado para representar a interface gerador/conversor, o qual é responsável por gerar o comando de corrente ativa e reativa e as injeções de corrente real e imaginária do modelo para a solução da rede elétrica. De forma geral, a geração pode ser representada de forma explícita no caso de regime permanente e a interface com a rede pode ser representada dinamicamente como um inversor conectado a um gerador fotovoltaico;
- **REEC_B**: módulo de controle local que atua na referência de potência ativa e reativa do módulo REPC_A, com realimentação da tensão terminal e da potência de saída do gerador, e fornece comandos de corrente ativa e reativa para o módulo REGC_A;
- **REPC_A**: módulo usado para representar o controle de tensão no nível da planta (opcional) a partir da ordem de potência reativa e da tensão. Também pode realizar o controle de potência ativa a partir do sinal de frequência e da ordem de potência ativa. Este módulo fornece a ordem de potência ativa e reativa para o módulo REEC_B. Se estiver habilitado pelo parâmetro "Pqflag", o controle da planta processa medições do ponto de conexão local ou remotas e fornece a referência de potência ativa e o suporte de potência reativa no nível da planta.

Os inversores são caracterizados por baixa contribuição de corrente de curto-circuito, ausência de resposta inercial e controles de resposta rápida, portanto, nos estudos de transitórios eletromecânicos, tais dinâmicas podem ser

desprezadas. Os diagramas de blocos e a descrição detalhada do funcionamento de cada módulo da Figura 4 são apresentados em [4], bem como a definição de **parâmetros típicos** para os quais o modelo WECC-UFV foi validado. Estes módulos foram implementados no Anatem utilizando a estrutura de CDU, empregando-se os parâmetros típicos do modelo original. Destaca-se que na intenção de aproximar a resposta deste modelo genérico ao comportamento de uma usina específica, haverá necessidade de consultar o fabricante, ou avaliar o modelo CDU detalhado, para selecionar adequadamente os ganhos e parâmetros mais apropriados para cada UFV.

3.1 Proteções representadas no modelo WECC-UFV

Após o desenvolvimento do modelo WECC-UFV por meio da estrutura de CDU, foram adicionadas as lógicas de proteção, ilustradas na Figura 5, para desconexão da UFV, assegurando o atendimento aos requisitos mínimos do Submódulo 2.10 no que diz respeito ao seu comportamento dinâmico mediante variações de tensão e frequência.

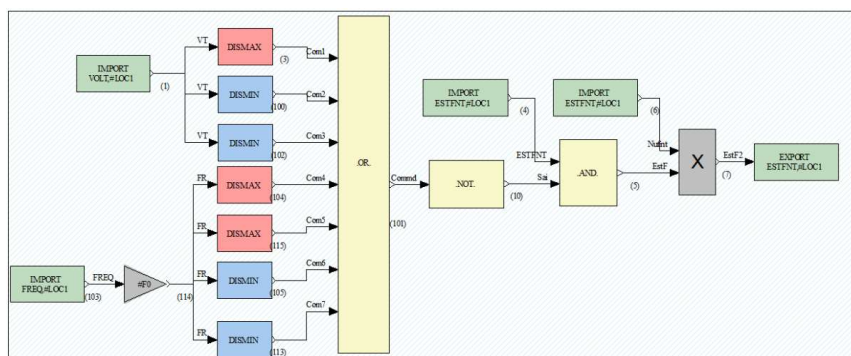


Figura 5 – Proteções de sub/sobretensão e sub/sobrefrequência adicionadas ao modelo WECC-UFV

No caso de violação de sub/sobrefrequência aplica-se a temporização indicada na Figura 1 e no caso de sub/sobretensão aplica-se a temporização indicada na Figura 2-b para a desconexão da UFV. Também foi adicionada uma lógica de limitação do módulo da corrente injetada pela UFV com o objetivo de assegurar a sua operação dentro dos valores nominais do equipamento.

4.0 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A avaliação da resposta dinâmica do modelo genérico de UFV proposto neste trabalho baseado no modelo WECC-UFV foi realizada por meio de simulações dinâmicas em um sistema de pequeno porte e no caso do SIN. Destaca-se que o modelo genérico de UFV elaborado via CDU inclui a malha de controle no nível da planta e as lógicas para desconexão da UFV de acordo com os critérios do submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede.

4.1 Sistema de pequeno porte

O sistema de pequeno porte, ilustrado na Figura 6, constituído por 5 barras, serve ao propósito de análise da aplicação do Modelo UFV Proposto, em estudo de conexão de um complexo de geração fotovoltaica (barra 1) a um sistema de grande porte (barra 4), modelado como barra infinita nas simulações dinâmicas.

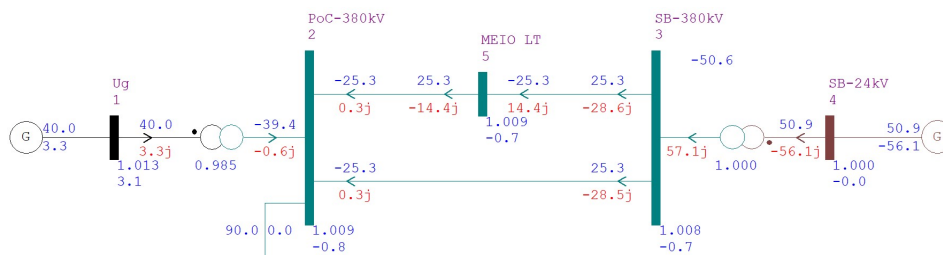


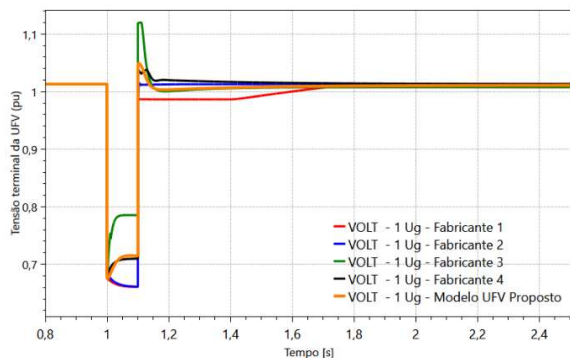
Figura 6 – Sistema teste de 5 barras

A resposta dinâmica da UFV, após a aplicação de contingências, será avaliada considerando: (i) o modelo genérico de **UFV proposto** neste trabalho; (ii) a representação ZIP via **DGER** e; (iii) modelos de CDUs oficiais de **4 fabricantes**, existentes na Base de Dados Dinâmicos da EPE (PDE 2021-2030).

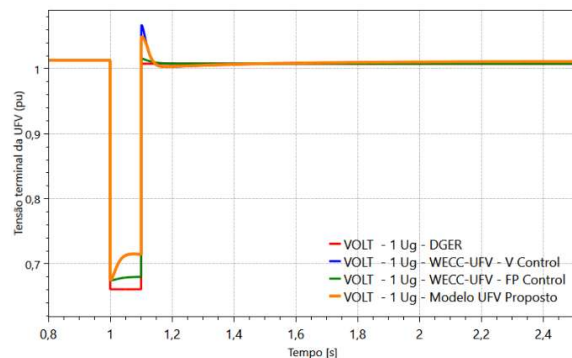
No caso da representação via DGER, a potência ativa injetada pela UFV foi modelada como potência constante e a potência reativa como impedância constante. Além disso, os parâmetros VbP e VbQ foram definidos como 0.85 pu, indicando que abaixo desse valor ocorre bloqueio instantâneo da potência ativa e reativa injetada pela UFV.

4.1.1 Contingência 1: curto-circuito monofásico seguido de abertura de linha de transmissão

Aplicou-se um curto-circuito monofásico no meio da LT 2-3 com duração de 100 ms, seguido da abertura da LT 2-3 para eliminação do curto. Nessas simulações, a malha de controle de tensão dos CDUs oficiais, fornecidos pelos fabricantes, foi habilitada, para comparação com a resposta dinâmica da tensão terminal (Figura 7-a), potência ativa (Figura 8-a) e potência reativa (Figura 9-a) obtidas pelo Modelo UFV Proposto, este com o módulo da planta habilitado, em modo de controle de tensão. A Figura 7-b, a Figura 8-b e a Figura 9-b apresentam a comparação do comportamento do modelo simplificado DGER, do Modelo UFV Proposto e do modelo WECC-UFV, também elaborado via CDU, em modo de controle de tensão e em modo de controle de fator de potência.

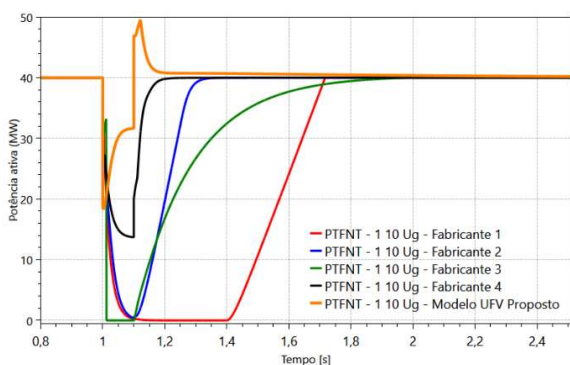


(a)

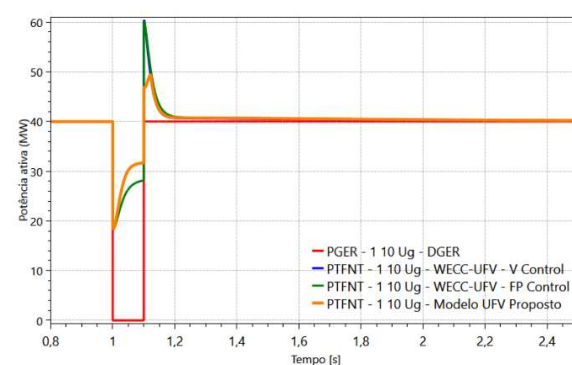


(b)

Figura 7 – Tensão terminal da UFV em pu

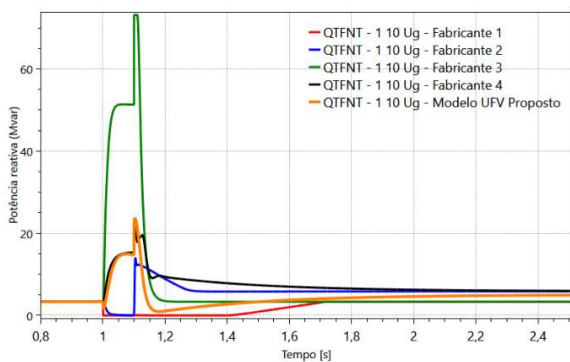


(a)

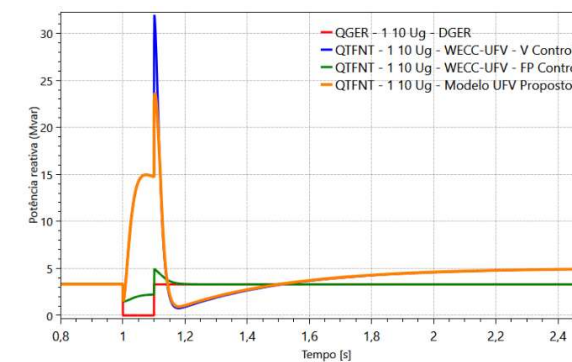


(b)

Figura 8 – Potência ativa injetada pela UFV em MW



(a)



(b)

Figura 9 – Potência reativa injetada pela UFV em Mvar

A partir do gráfico de tensão terminal da UFV (Figura 7-b), nota-se que o modelo simplificado DGER apresenta um comportamento conservador ao bloquear a injeção de potência ativa (Figura 8-b) e reativa (Figura 9-b) da UFV durante o curto-circuito e, portanto, não contribui para a recuperação de tensão transitoriamente. Semelhantemente, os modelos dos fabricantes 1 e 2 também não incrementam a potência reativa (Figura 9-a) injetada para controlar a tensão terminal (Figura 7-a) durante o curto, apesar de não apresentarem o bloqueio instantâneo da potência ativa (Figura 8-a) injetada pela UFV. Após a eliminação do curto, nota-se que os modelos dos fabricantes 1 e 2 apresentam dinâmica de recuperação mais lenta em comparação ao modelo DGER.

Verifica-se que os modelos dos fabricantes 3 e 4, assim como o Modelo UFV Proposto, injetam potência reativa (Figura 9-a) adicional durante o curto, logo, estes modelos são mais otimistas no comportamento transitório da tensão (Figura 7-a), sobretudo o modelo do fabricante 3, o qual apresenta a maior contribuição de potência reativa durante o curto.

Dentre os modelos avaliados, o Modelo UFV Proposto apresenta a menor redução de potência ativa (curva laranja da Figura 8-a) durante o curto-circuito, porém, no instante de remoção da falta nota-se um pico de injeção de potência ativa que se reflete na tensão terminal, causando sobretensão. Destaca-se que este efeito é ainda mais expressivo no modelo WECC-UFV (ver Figura 8-b), tendo sido atenuado no Modelo UFV Proposto por meio da adição de um limitador do módulo da corrente injetada pela UFV na rede elétrica. De forma geral, verifica-se que os modelos dos diferentes fabricantes apresentam características distintas no que diz respeito à dinâmica durante afundamentos de tensão e de recuperação após a eliminação da falta. No entanto, é possível verificar uma semelhança na tendência da resposta dinâmica do modelo genérico UFV proposto com os resultados obtidos pelos modelos dos fabricantes 3 e 4.

4.1.2 Contingência 2: afundamento de tensão

Com o intuito de avaliar a resposta dinâmica dos modelos de UFV após uma perturbação sistêmica, distante da usina, aplicou-se um afundamento de 0.85 pu no meio da LT 2-3 com duração de 200 ms. Nesta análise, a resposta do Modelo UFV Proposto foi comparada com os resultados dos modelos detalhados dos fabricantes e com o modelo simplificado DGER, adotando-se as mesmas premissas do caso anterior. A Figura 10 apresenta o comportamento da tensão terminal da UFV em regime permanente e no intervalo de tempo mais próximo à aplicação do distúrbio, a Figura 11-a apresenta a potência ativa e a Figura 11-b ilustra a potência reativa injetada pela UFV, antes, durante e imediatamente após a aplicação do evento.

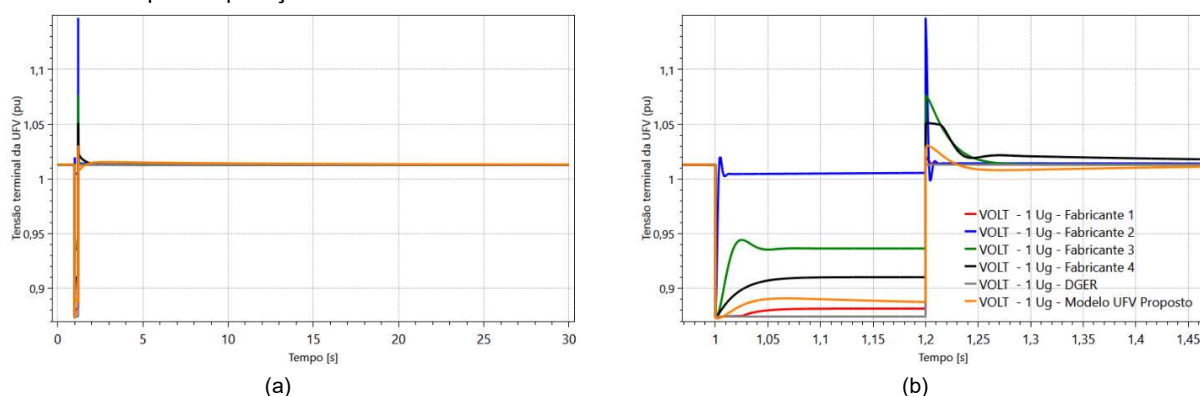


Figura 10 – Tensão terminal da UFV em pu

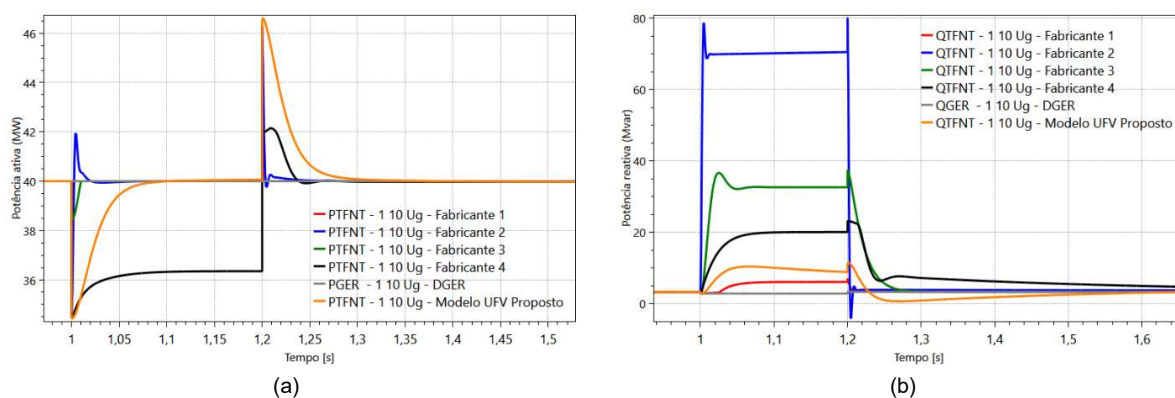


Figura 11 – Potência ativa e reativa injetada pela UFV

Imediatamente após a aplicação do distúrbio, nota-se uma tensão mínima de 0.87 pu nos terminais do gerador (ver Figura 10-a). A partir da Figura 11-b, observa-se um comportamento bastante otimista do modelo do fabricante 2 ao elevar expressivamente a contribuição de potência reativa durante o evento para controlar a tensão terminal da UFV (Figura 10-b), ao passo que o comportamento do Modelo UFV Proposto e dos modelos dos fabricantes 1, 3 e 4 apresentaram resposta dinâmica semelhante, no que se refere a tensão terminal e potência reativa injetada na rede. Apesar do modelo DGER não bloquear a injeção de potência ativa (Figura 11-a) da UFV, para este nível de afundamento de tensão, nota-se que ele reduz a sua contribuição de potência reativa durante o curto devido à característica de impedância constante adotada para a parcela reativa.

Verifica-se que o modelo genérico proposto apresenta um comportamento coerente com os modelos dos fabricantes, apesar da simplificação no detalhamento das malhas de controle e proteção. Destaca-se que a dinâmica lenta de estabilização do Modelo UFV Proposto pode ser atribuída ao fato de que os ganhos e os parâmetros adotados basearam-se nos valores típicos do modelo WECC original. Uma avaliação mais profunda para adequação destes ganhos e parâmetros, em trabalho futuro, poderá contribuir para tornar o modelo proposto mais rápido na estabilização da potência ativa terminal.

4.2 Caso do Sistema Interligado Nacional

Para avaliação do Modelo UFV Proposto no caso do SIN, utilizou-se o Caso de Referência do ano de 2026 no Patamar de Carga Média e Cenário Norte Úmido, disponibilizado pela EPE, em julho de 2021, junto à Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos do Plano Decenal de Expansão 2030. Após a aplicação de distúrbios sistêmicos, foram comparados os resultados do Modelo UFV Proposto, com a resposta dos modelos detalhados dos fabricantes existentes na base de dados da EPE e o modelo simplificado DGER. Com o intuito de facilitar as análises, as usinas eólicas e a geração fotovoltaica sem modelo oficial foram representadas pelo modelo simplificado DGER nas simulações dinâmicas.

4.2.1 Contingência 1: bloqueio de bipolo e corte de geração

Aplicou-se um curto-circuito monofásico na SE 230 kV Bom Jesus da Lapa com duração de 150ms, seguido da abertura da LT Bom Jesus da Lapa - Bom Jesus da Lapa 2 230 kV. A tensão terminal do ponto de acoplamento do complexo equivalente Bom Jesus da Lapa e do complexo equivalente Pirapora é apresentada, respectivamente, na Figura 12-a e na Figura 12-b. A potência ativa e reativa injetada pela UFV Bom Jesus da Lapa e pela UFV Pirapora são ilustradas, respectivamente, na Figura 13 e na Figura 14.

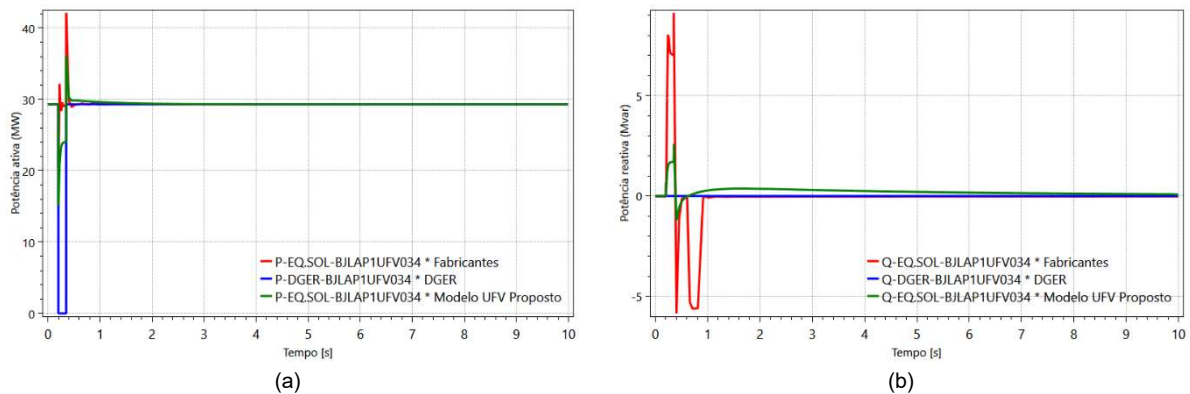
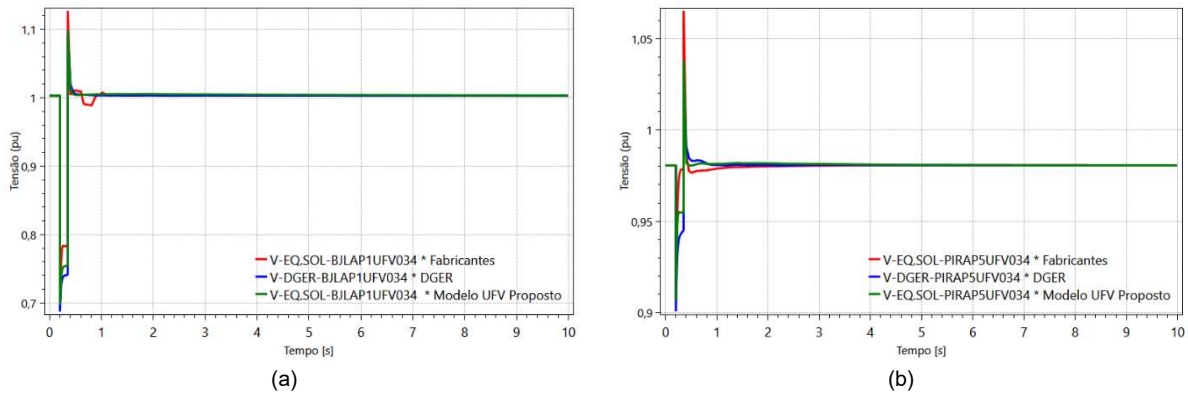


Figura 13 – Potência ativa e reativa injetada pela UFV Bom Jesus da Lapa

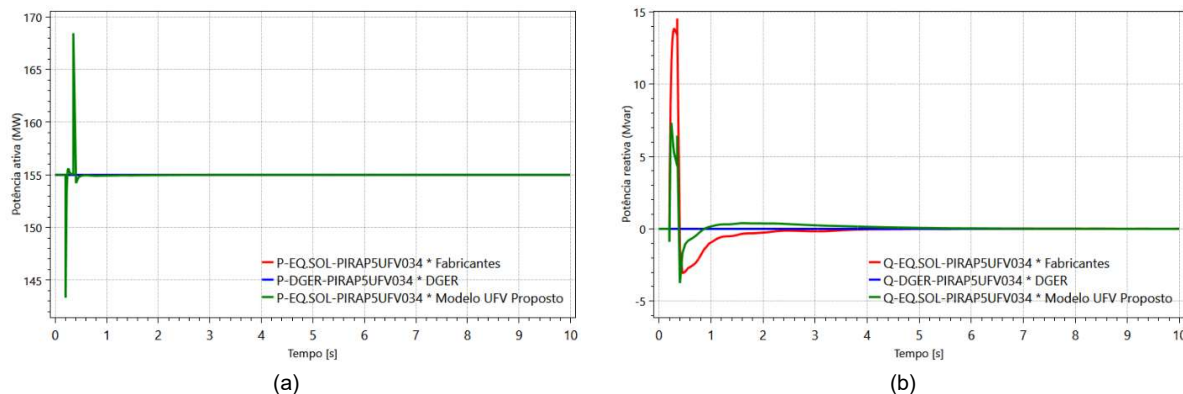


Figura 14 – Potência ativa e reativa injetada pela UFV Pirapora

A partir da Figura 13, nota-se que o modelo simplificado DGER realiza o bloqueio da injeção da potência ativa e reativa da UFV Bom Jesus da Lapa durante o curto-circuito e, portanto, não atende ao requisito de suportabilidade de subtensão transitória especificado no submódulo 2.10. Por outro lado, o modelo UFV Proposto permaneceu conectado e injetando potência reativa adicional, durante o curto, com o intuito de controlar a tensão terminal (Figura 12-a), ainda que de forma menos otimista do que o modelo do fabricante.

Também se observa, na Figura 12-b e na Figura 14, que o comportamento do Modelo UFV Proposto apresenta uma resposta intermediária entre o resultado obtido pelo modelo detalhado do fabricante da UFV Pirapora e o modelo simplificado DGER, constituindo uma boa alternativa para os estudos de UFVs em fase de planejamento ou sem modelo definido no banco de dados, em detrimento do uso do modelo simplificado DGER.

4.2.2 Contingência 2: bloqueio de bipolo e corte de geração

Nesta simulação, realizou-se o bloqueio do Bipolo Xingu -Terminal Rio e após 150 ms foi executado o corte de 3 unidades de máquinas da UHE Belo Monte. A tensão da SE Arinos 2 500 kV, situada na área de interligação NE-SE, é apresentada na Figura 15-a e a potência reativa injetada pela UFV Bom Jesus da Lapa é ilustrada na Figura 15-b.

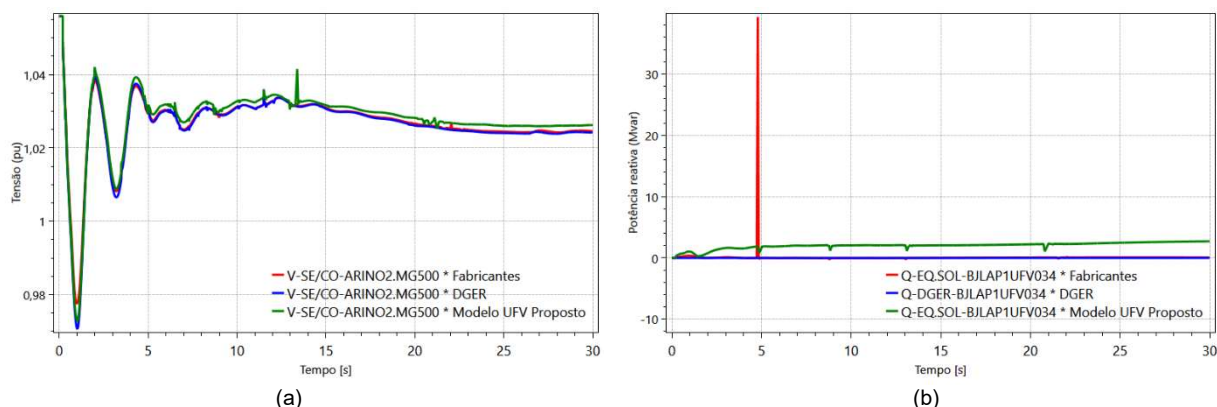


Figura 15 – (a) Tensão em pu na SE Arino 2 500 kV e (b) Potência reativa injetada pela UFV Bom Jesus da Lapa em Mvar

A tensão na SE Arinos 2 500kV (Figura 15-a) apresenta um comportamento similar nas três simulações avaliadas, porém o caso com o Modelo UFV Proposto apresentou um perfil de tensão mais elevado em regime permanente, devido ao efeito da malha de controle de tensão, que está habilitada no controle da planta, permitindo que o modelo de UFV aumente a potência reativa injetada (ver Figura 15-b) para controlar a tensão terminal da UFV. Essa característica de controle pode ser desabilitada no modelo genérico por meio da variável “Pqflag”, desligando-se o módulo de controle “REPC_A”.

É importante salientar que modelos dinâmicos para geração conectada por inversor tendem a produzir um pico de tensão de curta duração no início da aplicação da falta e imediatamente após a sua eliminação. Esses picos podem ser considerados espúrios na maioria dos casos, pois não representam o desempenho real do equipamento, sendo consequência do passo de integração e da forma como os modelos de injeção de corrente se relacionam com a solução estática de rede elétrica. Nesse sentido, cabe ressaltar que os ruídos nas curvas de tensão, potência ativa e potência reativa foram menores nos casos com modelagem genérica das UFVs, tanto a partir do modelo DGER

como a partir do Modelo UFV Proposto, o que indica o potencial da modelagem proposta para a solução de problemas de convergência numérica, tipicamente enfrentados nas análises de sistemas de grande porte.

5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo genérico de sequência positiva para representação de centrais geradoras fotovoltaicas de grande porte em estudos de estabilidade eletromecânica utilizando o programa Anatem. O modelo proposto é baseado no modelo concentrado de UFV de grande porte proposto pela WEEC, acrescentando-se malhas de proteção para atendimento aos requisitos mínimos do Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Por meio dos resultados das simulações em um sistema de pequeno porte e no caso do SIN, verificou-se que o Modelo UFV Proposto constitui uma boa alternativa para representação do comportamento dinâmico de UFVs de grande porte, por se tratar de CDU simplificado e com características de *fault ride-through* mais sofisticadas do que as do modelo DGER. O modelo proposto é recomendado principalmente para aplicação nos estudos de UFVs em fase de planejamento (usinas futuras) ou sem modelo definido no banco de dados, onde o desconhecimento quanto às características técnicas do empreendimento dificulta a associação de modelos detalhados.

Dentre os principais ganhos obtidos com este desenvolvimento, pode-se destacar: (i) a obtenção de diagnósticos sistêmicos mais confiáveis, a partir da modelagem conservadora de usinas fotovoltaicas existentes e futuras, baseada em requisitos mínimos preconizados em procedimentos de rede, menos suscetíveis a problemas de convergência; (ii) a facilidade de inicialização e de execução de simulações dinâmicas envolvendo geração fotovoltaica; (iii) maior agilidade na manutenção e usabilidade da base de dados de estabilidade eletromecânica para estudos de planejamento, devido à sua maior simplificação e consistência.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Evolução da Capacidade Instalada de Geração Eólica e Fotovoltaica” Acesso em: outubro de 2021. [Online]. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao_capacidade_instalada.aspx.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Evolução da Capacidade Instalada do SIN – Dez2021/Dez2025” Acesso em: outubro de 2021. [Online]. <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- [3] LIRIO, F. L., NETTO, N. A. R. L. e DA SILVA, L. R. “Manual do Usuário do Programa Anatem”, Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Fevereiro de 2021. Versão 12.0. Disponível em: <https://dre.cepel.br/manual/anatem/>.
- [4] WECC Renewable Energy Modeling Task Force, “WECC PV Power Plant Dynamic Modeling Guide”, Western Electricity Coordinating Council Modeling and Validation Work Group, Abril de 2014.
- [5] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Procedimentos de Rede. Submódulo 2.10 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.” Acesso em: outubro de 2021. [Online]. Disponível em: www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes.
- [6] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, “Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos”, acesso em: setembro de 2021, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/bases-de-dados-de-simulacao>.

DADOS BIOGRÁFICOS



Lígia Rolim da Silva possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (2015) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2020). Desde 2015, trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, como pesquisadora do Departamento de Redes Elétricas, onde integra a equipe de desenvolvimento do programa Anatem. Atua na modelagem computacional de equipamentos de sistemas elétricos de potência para análise dinâmica de transitórios eletromecânicos. Suas áreas de interesse incluem dinâmica e controle de sistemas de potência, ressonância subsíncrona e transmissão CCAT. É membra do Comitê de Estudos C2 do Cigré-Brasil.

(2) TIAGO CAMPOS RIZZOTTO

Tiago Campos Rizzotto, engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Uberlândia em 2007; mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2016. É Analista de Pesquisa Energética desde 2008 na Empresa de Pesquisa Energética – EPE onde desempenha atividades relacionadas ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia.

(3) FABRICIO LUCAS LIRIO

Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), respectivamente em 1998 e 2000. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2007. Desde 2000 trabalha no Cepel, onde atua no Departamento de Redes Elétricas (DRE). Trabalha no desenvolvimento do Programa Anatem desde 2013, atual responsável pelo projeto Anatem, participou dos estudos da alternativa CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira e Belo Monte. Seus campos de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado a Sistemas de Potência, Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Eletromecânicos e Harmônicos.

(4) THAÍS PACHECO TEIXEIRA

Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFRJ. Atuou na área de modelagem computacional de sistemas elétricos, entre 2012 e 2015, em empresa de consultoria e, ao longo de 2015, no ONS. Iniciou suas atividades na EPE em dezembro de 2015, como Analista de Pesquisa Energética, desempenhando atividades relacionadas ao planejamento da expansão do sistema de transmissão, dentre as quais: estudos elétricos de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade eletromecânica, bem como análise técnico-econômica de alternativas de expansão da transmissão. Atua desde 2020 como Consultora Técnica, na EPE, coordenando os grupos de Base de Dados e Interligações regionais.

(5) NÍCOLAS ABREU ROCHA LEITE NETTO

Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014) e M.Sc. em Engenharia Elétrica (2016) pela mesma instituição. Desde 2014, trabalha como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), onde tem atuado na área de métodos computacionais para dinâmica de sistemas de potência e análise de segurança de sistemas de potência, pertencendo à equipe de desenvolvimento do software Anatem. Suas áreas de atuação incluem computação de alto desempenho, dinâmica e confiabilidade de sistemas de potência.