

Co- Simulation using RTDS and Simulink for Renewable Energy Impact Investigation in Distribution System

Lilian V. Pinheiro*, João Antônio G. Archetti
Mateus L. Lima, Janaína G. de Oliveira, Robson F. S. Dias**

**Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG, Brasil*

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE), Laboratório de Simulações Multiplataformas.

lilian.venturip@gmail.com, joaoarchetti@gmail.com, mateus.lopes@engenharia.ufjf.br, janaina.oliveira@ufjf.edu.br

***Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, dias@dee.ufjf.br*

Abstract: This paper present the simulation modeling and development of an inverter for photovoltaic system applications in a distribution system. The system used the European Cigré 18 bars. The system was modeled in RSCAD software and simulated using Real Time Digital Power System Simulator (RTDS). The photovoltaic inverter was implemented with MicroAutoBox II dSPACE current control loop, which can link the simulation model in MATLAB/SIMULINK environment. The simulation was performed with a DC source that acts as a photovoltaic generator to supply power to the inverter. The simulation model was incorporated into dSPACE that communicates with RTDS running a Hardware In the Loop (HIL) simulation. The results showed the effectiveness of the proposed controller. The high penetration results at the inverter coupling point demonstrated overvoltage above the norm (Prodist).

Resumo: Este artigo apresenta a modelagem de simulação e o desenvolvimento de um inversor para aplicações fotovoltaicas em um sistema de distribuição. O sistema utilizado foi o europeu Cigré 18 barras. O sistema foi modelado no software RSCAD e simulado usando o Real Time Digital Power System Simulator (RTDS). O inversor fotovoltaico foi modelado e simulado com o circuito de controle de corrente na MicroAutoBox II dSPACE, que pode vincular o modelo de simulação no ambiente MATLAB / SIMULINK. A simulação foi realizada com uma fonte de alimentação CC que atua como um gerador fotovoltaico para fornecer energia ao inversor. O modelo de simulação foi incorporado ao dSPACE, que se comunica com o RTDS executando uma simulação Hardware In the Loop (HIL). Os resultados mostraram a eficácia do controlador proposto e as altas penetrações no ponto de acoplamento do inversor demonstraram sobretensão acima da norma (Prodist).

Keywords: PV inverters, dSPACE, Distributed Generation, RTDS, Hardware-in-the-loop.

Palavras-chaves: Inversor Fotovoltaico, dSPACE, Geração Distribuída, RTDS, Hardware-in-the-loop.

1. INTRODUÇÃO

Um aumento na procura por novas fontes de energia, principalmente entre as que se consolidam por serem consideradas energia limpa e renovável está ocorrendo atualmente (Oliveira, 2017). A reestruturação do setor elétrico veio acompanhada da inserção de fontes alternativas de energia, visando à oferta deste insumo com sustentabilidade ambiental e eficiência operativa. Entre essas opções, as conversões da energia cinética dos ventos e da energia solar fotovoltaica em elétrica vêm ganhando força (Junior, 2011).

A instalação de painéis fotovoltaicos está sendo feita no Brasil, em sua maioria, por consumidores residenciais na rede de baixa tensão (BT). Essa “nova” forma de geração de energia é denominada Geração Distribuída (GD) (Baran, 2012) e tem sido impulsionada por várias vantagens, dentre elas a proximidade da geração de energia elétrica com relação às unidades consumidoras, reduzindo assim perdas e congestionamento em linhas de transmissão (Santos, 2012), (Filho, 2013).

O autoconsumo remoto criou condições para que grandes empresários pudessem estabelecer suas usinas em locais de melhor condição de produção de energia e conforme a REN687/2015 isso é possível em uma mesma área de concessão. Com isso, grandes usinas podem ser instaladas em locais com condições de proteção menor, longe de grandes centros urbanos, como sítios, fazendas e cidades pequenas (Aneel, 2020).

Painéis fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, ou seja, há a necessidade de utilizar eletrônica de potência para condicionar essa energia em corrente alternada para serem utilizadas pelos consumidores finais (Musse, 2017).

Existem várias topologias de dispositivos eletrônicos para se conectar energia PV à rede elétrica, sendo essa conexão feita por meio da utilização de conversores (Casaro, 2010). Dentre as topologias, duas se destacam, a topologia com dois estágios, onde existe um conversor CC/CC para estabilizar a tensão do barramento CC proveniente dos painéis fotovoltaicos e a topologia de um único estágio, que utiliza apenas um conversor CC/CA para o condicionamento da energia gerada,

a diferença entre essas topologias é o número de componentes utilizados e a estratégia de controle abordada em cada um (Casaro, 2010).

Em Selvaraj e Rahim (2009) foi desenvolvido um inversor PV baseado em DSP TMS320F2812 que utiliza algoritmos de controle PI. No entanto, esse inversor exige que os usuários desenvolvam software de programação para o algoritmo de controle, que pode ser uma tarefa demorada. Além disso, um modelo de simulação também deve ser desenvolvido antes da realização do hardware. Uma abordagem diferente para inversores fotovoltaicos utiliza o dSPACE que permite ao usuário empregar ferramentas como MATLAB/SIMULINK para o desenvolvimento do algoritmo de controle e simulação do próprio inversor, bem como a implementação de hardware. A plataforma de controle MicroAutoBox II dSPACE simplifica a tarefa de programação do algoritmo de controle usando sua biblioteca com seu conjunto de blocos. Além disso, os dados e códigos do modelo simulado podem ser vinculados e carregados diretamente para a operação de hardware em tempo real como o RTDS.

O presente artigo tem como proposta analisar o impacto no perfil de tensão pela utilização de inversores em sistemas de distribuição. Para isso, utilizou-se o sistema europeu Cigré 18 barras apresentando uma metodologia de simulação em tempo real utilizando simulação Hardware In the Loop (HIL). Além disso, esse artigo traz a modelagem e o controle do inversor de um único estágio, desenvolvidos no dSPACE e simulados em tempo real com o auxílio do simulador RTDS, realizando uma simulação Hardware-in-the-loop (HIL).

Este trabalho está dividido em 5 seções, a seção 2 apresenta a descrição de todo o sistema e equipamentos utilizados, a seção 3 aborda a metodologia adotada para a realização do trabalho, deduzindo a modelagem e o controle do inversor e o circuito de sincronismo com a rede, a seção 4 apresenta os resultados encontrados nas simulações e aborda algumas discussões ao trabalho e a seção 5 comenta de forma conclusiva os resultados obtidos, além de mostrar algumas perspectivas de trabalhos futuros.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema implementado no RSCAD e utilizado para obtenção dos resultados apresentados neste artigo pode ser visualizado na Fig. 1, destacando para a utilização do inversor externo (dSPACE) ao sistema de distribuição (RSCAD). O sistema completo consiste em uma rede elétrica europeia de distribuição (Sistema Cigré 18 Barras), com 0,4kV nominal e 50 Hz. Para o presente trabalho, foram realizadas algumas adaptações no sistema original, de forma que possibilite as simulações com as análises pretendidas, incluindo a inserção de modelos de cargas variáveis no tempo.

Cada um dos componentes envolvidos no sistema apresentado será descrito com maior detalhamento nas subseções a seguir.

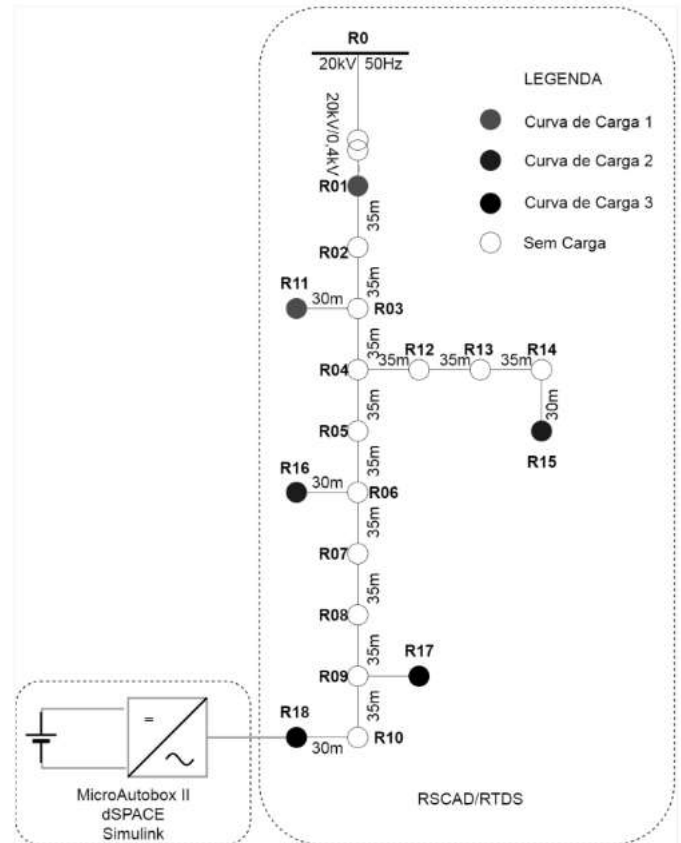


Fig. 1: Layout da distribuição das curvas de carga e o ponto de acoplamento do inversor.

A. Sistema Cigré 18 Barras (Modelo Europeu)

O sistema Cigré 18 barras, consiste em uma rede elétrica de distribuição, possui uma demanda de 404 kVA, com fator de potência indutivo de 0,95 e todo o sistema é trifásico (Archetti, 2019), (Cigré, 2014). Na Fig. 1 são exibidos os tamanhos dos alimentadores que variam de 30m a 35m. Além disso, a saída da subestação contém um transformador de 20 kV / 0,4 kV.

Devido a falta de informações de sistemas de distribuição, que fornecem o fluxo de potência para sua validação, fez com que o sistema Cigré, mesmo em 50 Hz, ser uma alternativa viável para testes em baixa tensão, fornecendo todas as informações para sua correta construção e validação, além de ser um sistema radial, com um carregamento distribuído e com similaridade para realizar testes com GD.

A legenda das cargas apresentadas na Fig. 1 estão associadas aos modelos de carga residenciais por cor, detalhadas na Fig. 2. Além disso, a Fig. 2, apresenta a curva de irradiação solar utilizada no trabalho em dimensões normalizadas.

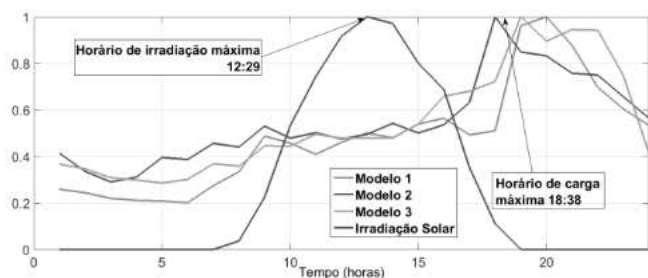


Fig. 2: Modelos de cargas e Irradiação Solar.

Com base nos valores originais das cargas, o presente artigo associa o seu comportamento conforme as curvas de carga da Fig. 2, ou seja, os valores de carga original são proporcionais ao longo do tempo aos modelos das curvas de carga residenciais, as quais são reais e foram cedidas por uma concessionária de energia (Energisa) (Musse, 2017), (Francisquini, 2006).

A curva de irradiação solar apresentada pela Fig. 2, e utilizada neste trabalho é referente a uma curva de irradiação solar real, obtida pelo Laboratório Solar Fotovoltaico (LabSolar) da Universidade Federal de Juiz de Fora e cedida para estudo.

B. Inversor

Conversores CC/CA também conhecidos na literatura como inversores, são pontes de chaves semicondutoras, que têm como principal objetivo transformar corrente contínua em alternada por meio da comutação dos dispositivos eletrônicos (Pomilio, 2013).

Neste trabalho foi utilizado um conversor VSC (*Voltage source converter*), de dois níveis, trifásico, conectado na barra R18. A simulação foi realizada com uma fonte de alimentação CC que atua como um gerador fotovoltaico para fornecer energia ao inversor. A modelagem do inversor e os parâmetros dos controladores serão discutidos na seção 3.

C. RTDS, dSPACE e Simulação HIL

O RTDS é um equipamento com padrão mundial para a simulação de sistemas de energia em tempo real. Esse simulador é usado pela maioria dos principais fabricantes de equipamentos de proteção e controle, bem como por importantes concessionárias de energia elétrica, instituições educacionais e de pesquisa. O RTDS admite que as saídas de corrente e tensão do sistema simulado tenham características muito próximas com o real, com isso, é possível estimar-se o tempo de execução de rotinas de controle e analisar equipamentos reais (Faruque, 2015).

O dSPACE é um equipamento capaz de processar e implementar algoritmos, em grande maioria, de sistemas de controle. Uma de suas grandes vantagens, segundo (Digital, 2017) é a possibilidade de prototipagem rápida de sistemas de controle que é uma maneira altamente eficiente de desenvolver, otimizar e testar rapidamente novas estratégias em um ambiente real.

A Fig. 3, demonstra de forma mais clara o processo HIL.

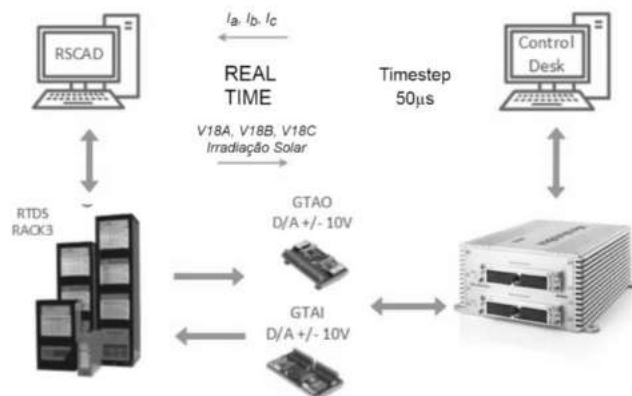


Fig. 3: Esquematização da Comunicação HIL.

Conforme apresentado na Fig. 3 e supracitado no artigo, o modelo do sistema Cigré 18 barras, foi modelado no RSCAD e está sendo simulado no RTDS. Já o inversor VSC foi desenvolvido no *Simulink* e está sendo acessado pelo dSPACE. Dessa forma, as tensões da barra 18, são enviadas para realizar o circuito de sincronismo PLL, bem como a curva de irradiação solar que foi utilizada como base de variação da corrente de referência para o inversor, sugerindo que o sistema opere no MPP (Ponto de Máxima Potência), essas são variáveis enviadas para a realização do controle de corrente ao dSPACE pelas placas de saída analógicas (GTAO) do RTDS; Após receber as informações do RTDS a lógica implementada no dSPACE trata as informações e retorna a ação de controle com o valor das correntes trifásicas que são direcionadas para a barra 18 do sistema Cigré, são recebidos pelas placas de entrada analógica (GTAI) do RTDS. A simulação HIL consiste da troca de informações entre *hardware* e *software* a uma taxa de 50µs, o que permite emular maior realidade em sistemas de simulação e proporcionar uma maior proximidade dos testes experimentais, uma vez que validado o controle em *hardware* em características HIL, torna-se mais factíveis testes experimentais com as mesmas estratégias de controle e equipamento.

3. METODOLOGIA

Para que o inversor injete potência na rede de maneira correta, fez-se necessário a modelagem e os cálculos dos controladores do circuito de sincronismo com a rede e da malha de corrente.

A. Circuito de Sincronismo SRF-PLL

Foi utilizado neste trabalho o sistema de coordenadas síncronas *dq*, esse tipo de tratamento de sinal, facilita o cálculo dos controladores, pois suas grandezas são estacionárias e devido a isso pode-se projetar controladores do tipo PI para o sistema (Almeida, 2011), (Yazdani, 2010).

A operação de conversores de eletrônica de potência conectados à rede deve ser síncrona, de forma que no momento de conexão do inversor, a amplitude de tensão, frequência e ângulo de fase, devem estar sincronizadas com a da rede no PAC, para isso foi utilizado o circuito de sincronismos (SRF-PLL) (Yazdani, 2010).

De acordo com Yazdani (2010), os parâmetros do controlador SRF-PLL podem ser calculados conforme (1) e (2).

$$K_{p,PLL} = \frac{2 \times (2\pi\omega_n) \cdot \zeta}{\hat{V}_{pac}} \quad (1)$$

$$\tau_{PLL} = \frac{K_{p,PLL} \cdot \hat{V}_{pac}}{(2\pi\omega_n)^2} \quad (2)$$

Sendo ω_n a frequência de corte e ζ o fator de amortecimento. Os valores dos parâmetros dos controladores, se encontram na Tabela 1.

B. Controle Malha de Corrente

Na operação do inversor conectado à rede, existe a necessidade de se controlar a potência ativa e reativa que fluem pelo conversor VSC. A Fig. 4 apresenta o sistema proposto.

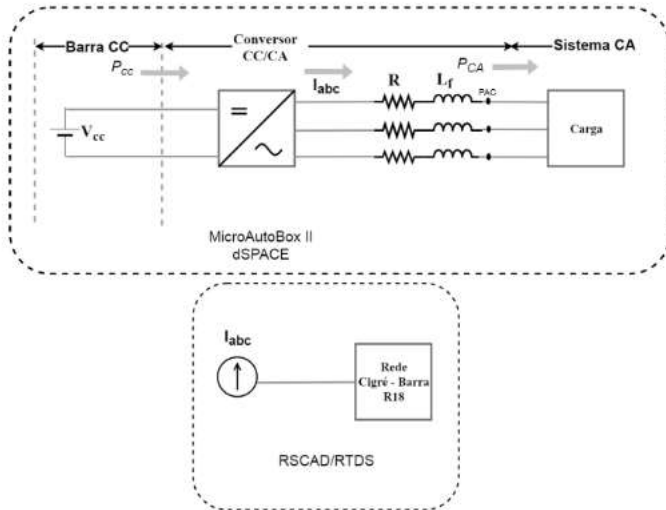


Fig. 4: Sistema Utilizado Para Acoplamento do Inversor à Rede.

A estratégia utilizada neste trabalho denomina-se controle no modo de corrente, e pode ser encontrada em (Almeida, 2011), (Yazdani, 2010).

As deduções utilizam a transformada de Park, que passam a dinâmica do lado CA do inversor, para coordenadas dq . Sabendo-se que a frequência de chaveamento (f_c) escolhida é de 10 kHz, a constante de tempo τ_i necessária para obter os controladores da malha de corrente, de acordo (Yazdani, 2010) e (Almeida, 2011), temos que $\tau_i = 0,5$ ms.

Sabendo pelas deduções de (Yazdani, 2010) que após o desacoplamento das malhas do eixo direto e em quadratura, obtém-se a mesma dinâmica para ambos, o mesmo controlador PI pode ser usado para o controle da malha de corrente. Em (3) e (4), demonstram como obter os parâmetros dos controladores da malha de corrente.

A dinâmica da malha de corrente é responsável por gerar as modulações que disparam as chaves semicondutoras do inversor, por PWM.

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (3)$$

$$K_{i,i} = \frac{R_f}{\tau_i} \quad (4)$$

Onde L_f é o indutor do lado CA do inversor PV e R_f é a resistência da linha mais a resistência intrínseca das chaves semicondutoras (Yazdani, 2010). Os valores dos parâmetros dos controladores, juntamente com os valores dos componentes utilizados, se encontram na Tabela 1.

C. Estrutura das Simulações

Conforme demonstrado em Archetti (2018), as barras críticas do sistema, são os locais onde se acoplam o inversor, que por sua vez está acoplado na barra R18, e isso faz com que ela seja a barra crítica. As análises realizadas visam comparar a variação de tensão sofrida nas barras do sistema quando se insere o inversor e o seu controle de forma externa ao simulador em tempo real (RTDS) tendo como objetivo analisar se é capaz de manter as tensões do sistema dentro das normas reguladoras (PRODIST).

Outra informação importante é analisar as novas características da tensão das barras do sistema quando inserido penetração PV na rede de 30%, 60% e 100% da demanda total do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os valores adotados em projeto, e o controlador do circuito de sincronismo e o controlador da malha de corrente.

TABELA 1

PARÂMETROS DE PROJETO E VALORES DOS CONTROLADORES

Parâmetros de Projeto		Valores dos Controladores	
V_{cc}	1200V	$K_{p,PLL}$	1,35 rad/V s
R_f	0,66Ω	$K_{i,PLL}$	302 rad/V s ²
L_f	1,2 mH	$K_{p,i}$	2,4 H/s
f_c	10 kHz	$K_{i,i}$	1320 Ω/s

A tensão de entrada utilizada de 1200V, é uma analogia da tensão projetada pela associação de painéis fotovoltaicos em paralelo, portanto para uma potência injetada de 404 kVA necessita-se de uma corrente de mais ou menos 340A no ponto de máxima potência (MPP).

Com intuito de analisar o comportamento do sistema Cigré 18 barras, a Fig. 5 mostra a tensão nas barras sem a inserção do inversor com penetração fotovoltaica.

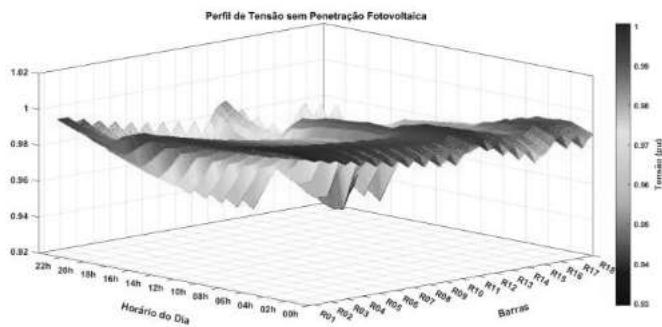


Fig. 5: Tensão Cigré 18 barras sem PV.

De acordo com a Fig. 5, os valores de tensão iniciam-se com valores próximos de 1 p.u e tem-se os níveis do sistema compreendidos entre 0,93 p.u e 0,98 p.u. A carga inicialmente reduzida eleva a tensão para valores maiores, que são diminuídos com aumento da curva de carga, com destaque para as barras mais à jusante do sistema (R15, R16, R17 e R18).

Por meio dos dados mencionados na Tabela 1, pode-se demonstrar o comportamento do sistema com penetração PV, com isso implementou-se o inversor e o seu controle externo ao simulador em tempo real (RTDS) escolhendo como ponto de acoplamento a barra R18 mais à jusante no sistema de distribuição.

Considera-se níveis de penetração PV de 30%, 60% e 100% da demanda total do sistema, onde equivale a 121 kVA, 242,4 kVA e 404 kVA, respectivamente.

A Fig. 6 mostra o comportamento das tensões com o inversor acoplado na barra 18, para 30% de penetração PV.

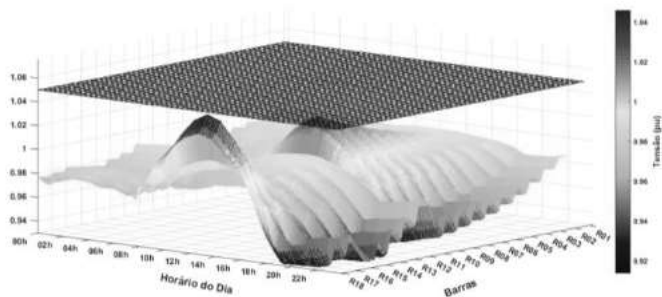


Fig. 6: Tensão no sistema Cigré 18 barras para 30% de PV.

Pode-se notar na Fig. 6 que com acoplamento do inversor para 30% de penetração PV, consegue-se manter suas tensões em níveis abaixo do limite da norma que gera uma sobretensão a partir de 1,05p.u.

A Fig. 7 mostra o perfil de tensão do sistema com 60% de penetração PV, onde se observa que as sobretensões aumentam nas barras R18, R10 e R09, estando além do limite de 1,05 p.u. As barras R09 e R10, não recebem a conexão do inesor, porém sua proximidade com a barra R18 eleva a tensão nessas barras.

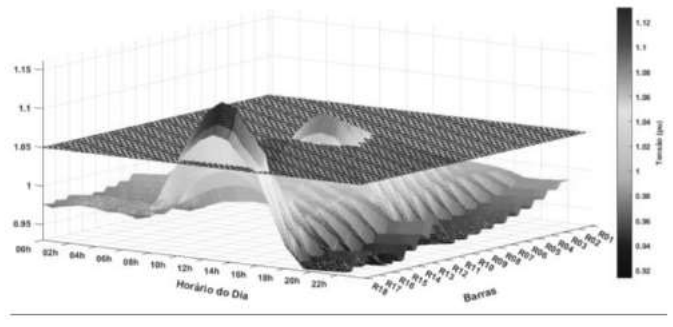


Fig. 7: Tensão no sistema Cigré 18 barras para 60% de PV.

Na Fig. 8, apresenta as tensões para 100% de penetração PV, onde a maioria das barras do sistema ultrapassam 1,05 p.u. Observa-se, que a barra R03 começa a apresentar sobretensão, que mostra que mesmo com a proximidade com a subestação, a tensão tem impacto pela alta geração PV.

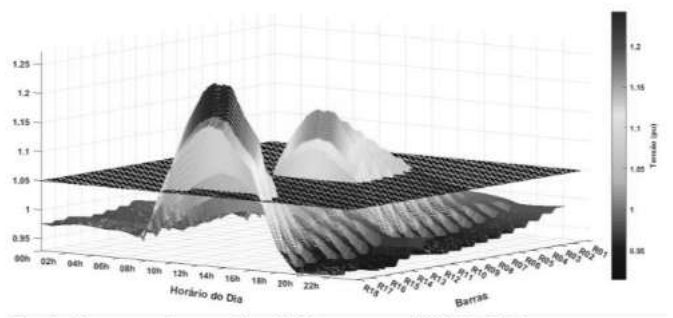


Fig. 8: Tensão no sistema Cigré 18 barras para 100% de PV.

A utilização de uma penetração de 100% da demanda total do sistema se justifica pela REN687/2015, onde o excedente de energia que não tenha sido compensado na própria unidade consumidora pode ser utilizado para compensar outras unidades consumidoras, observando uma geração compartilhada ou autoconsumo remoto.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou análises de simulações de um sistema de distribuição europeu com conexão de um inversor externo ao RTDS, incluindo análises obtidas de simulação HIL para aplicação em tempo real. Mostrando em caráter principal a análise do comportamento da tensão, em todas as barras do sistema dando destaque para as mais afastadas do centro de carga do sistema, e provando que a tensão na barra de acoplamento do inversor consegue manter os níveis estabelecidos por norma apenas com 30% de penetração PV.

Aplicado para diferentes níveis de penetração PV, mostrou-se a eficácia no controle do inversor. Para até 30% de penetração, picos de tensão não ultrapassaram os limites estabelecidos pela PRODIST, entretanto, já para valores acima de 60% de penetração PV a norma PRODIST foi desrespeitada, principalmente no PAC e barras próximas.

O presente artigo ainda traz como contribuição o controle do inversor de forma detalhada, utilizando um controle em corrente, para garantir que a corrente de referência se estabilize com a ação de controle.

Como propostas de trabalhos futuros, faz-se necessário o estudo e implementação de novas **estratégias de controle, para manter o nível de tensão dentro de patamares aceitáveis**, bem como a implementação em hardware do painel fotovoltaico e o inversor conectado ao sistema de distribuição Cigré 18 barras, realizando uma simulação PHIL (Power Hardware in the loop) que envolve o ambiente de simulação em tempo real trocando energia com hardware físico real de energia renovável, veículos elétricos, baterias, motores e cargas. O simulador RTDS pode ser usado com sucesso para realizar experimentos de hardware de potência (PHIL) em uma ampla gama de aplicações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fapemig, CNPq, CAPES, Finep, Inerge e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica-PPEE por apoiar este projeto.

REFERÊNCIAS

- Aneel, (2020). PRODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição-ANEEL. Available at: Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-3>. Acesso em: 15 Jan. de 2020.
- Aneel, (2020). PRODIST– Módulo 8. Available at: Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2016728_2.pdf. Acesso em: 15 Jan. de 2020.
- Aneel, (2015). Resolução Normativa N°687, de 24 de novembro de 2015.
- Francisquini, A. A. (2006). Estimção de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição, Master Thesis, Universidade Estadual Paulista – UNESP.
- Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). Voltage-Sourced Converters in Power System: Modeling, Control and Applications, Wiley IEEE Press.
- Musse, B. F. (2017). Controller-hardware-in-the-loop simulation of a distribution system with PV penetration using RTDS and dSPACE, Brazilian Power electronics conference (COBEP).
- Cigré (2014). Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. Disponível em: <https://e-cigre.org/publication/575-benchmark-systems-for-network-integration-of-renewable-and-distributed-ene>: Acesso em: 6 Jan. 2020.
- Processing, D.S. and Engineering, C. (2017). Disponível em: <https://www.dspace.com/>. Acesso em: 6 Jan. 2020.
- Archetti, J. A. G. (2018). Simulations and Analysis of a Distribution System with Penetration PV Using RTDS, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- Archetti, J. A. G. (2019). Estudo e Regulação dos níveis de tensão em sistemas de distribuição com alta penetração de renováveis utilizando simulações em tempo real. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Pomilio, J. A., Paredes, H. K. M. and S. M. Deckmann (2013). Eletrônica de Potência Para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, UNICAMP.
- Junior, J. C. M. V. (2011). Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos: Uma Revisão Bibliográfica Sobre o Tema. Salvador, UNIFACS, Revista Eletrônica de Energia, V.1, n°1, p. 3-14.
- Selvaraj J. and Rahim N. A. (2009). Multilevel inverter for grid connected PV system employing digital PI controller, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 56, no. 1, pp. 149– 158.
- Oliveira, L. W. and Maria, T. C. J. (2017). Planning of Renewable Generation in Distribution System Considering Daily Operating Periods. IEEE Latin America Transactions, V.15, n° 5, p. 901-907.
- Faruque, M. D. O. (2015). Real-time Simulation Technologies for Power System Design, Tensting and Analysis. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, V. 2, n°. 2, p. 63-73.
- Baran, M. E. (2012). Accommodating high PV penetration on distribution feeders. IEEE Transactions on smart grids, V. 3, n°. 2, p. 1039 – 1046.
- Casaro, M. M. and Martins, D. C. (2010). Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica. Revista Controle & Automação, v. 21, n°. 2.
- Almeida, P. M. (2011). Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão Utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica-PPEE.
- Santos, S. P. and Rther, R. (2012). The potencial of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. Ebergy and Buildings, V.50, p. 290-297.
- Filho, W.P. B. and Azevedo, A. C. S. (2013). Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens, II Simpósio de estudos e pesquisas em ciências ambientais na Amazônia.