

Uma Breve Revisão sobre Simulações Digitais em Tempo Real Considerando Geração Eólica Aplicadas em Problemas de Qualidade da Energia Elétrica: o Estado da Arte

William Brasileiro do Carmo Borges*, Mário Oleskovicz*
Benvindo Rodrigues Pereira Júnior*

*Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP, Brasil,
e-mail: brasileiro@usp.br, olesk@sc.usp.br, brpjunior@usp.br

Abstract: This work presents a review of the research on electrical energy quality focused on wind generation systems, with the application of real-time digital simulation and hardware-in-the-loop techniques to solve the problems. In this bibliographic survey, the main norms are raised, are detailed the types of possible tests and the main publications of the genre. This work can be used as a reference for the proposal of new developments in this area.

Resumo: Este trabalho apresenta uma revisão da pesquisa sobre qualidade de energia elétrica focada em sistemas de geração eólica, com a aplicação de simulação digital em tempo real e técnicas de *hardware-in-the-loop* para solucionar os problemas. Neste levantamento bibliográfico, são levantadas as principais normas, detalhados os tipos de testes possíveis e as principais publicações do gênero. Este trabalho pode ser usado como um referencial para a proposta de novos desenvolvimentos nesta área.

Keywords: Wind Energy; Hardware-In-the-Loop; Power Quality; Review; Real Time Simulation.

Palavras-chaves: Geração Eólica; Hardware-in-the-Loop; Qualidade da Energia Elétrica; Revisão; Simulação em Tempo Real.

1. INTRODUÇÃO

As fontes renováveis de energia têm gerado grandes transformações nas matrizes energéticas mundiais. Dentre essas fontes, a geração eólica tem tido grande destaque, acumulando um crescimento de aproximadamente 150% em 10 anos (Lima, 2021). Segundo dados do GWEC (*Global Wind Energy Council*), a geração eólica foi considerada a fonte de energia limpa com melhor custo competitivo do mundo, além de apresentar projeção de crescimento de 71 GW por ano até 2024 (Gwec, 2019).

Com o crescimento da geração através de fontes renováveis têm-se discutido muito a necessidade de imposição de normas para garantir a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e evitar riscos ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e satisfação dos consumidores. Com relação à QEE, um balizador para estudos de acesso para novos empreendimentos no Brasil é a Nota Técnica (NT) do ONS (Operador Nacional do Sistema) 009/2016 (ONS, 2016a) a qual trata de instruções para a realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à rede básica para parques eólicos, solares e consumidores livres. A NT estabelece critérios para os estudos de medições, composição harmônica aceitável e para o cálculo do número máximo de aerogeradores/inversores mantidos em operação caso a entrada em operação do parque total viole os limites harmônicos previstos (ONS, 2016a).

Nos Procedimentos de Rede do ONS também estão presentes requisitos de QEE para parques eólicos. O submódulo 2.8 (ONS, 2016b) da Rede Básica define os indicadores de desempenho, valores limites de referência, e o gerenciamento desses indicadores, como a apuração, acompanhamento do desempenho, divulgação de resultados, tratamento de violações e a análise de novos acessos na rede básica. Outro submódulo é o 3.6 (ONS, 2016c) que trata dos requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão, definindo itens como a variação de tensão em regime permanente, por exemplo.

Além de normas nacionais, a IEC 61.400-21 (Iec, 2008) é uma norma internacional, que trata de medidas e da avaliação das características das turbinas eólicas conectadas às redes elétricas, descrevendo os procedimentos de medição e avaliação para quantificar a QEE (Iec, 2008). Ela é citada como referência nos submódulos do ONS.

Para sistemas que tenham interação com o sistema de distribuição, também se faz necessário atender o módulo 8 do PRODIST que estabelece "os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto, do serviço prestado e do tratamento de reclamações" (Aneel, 2021).

O crescimento das pesquisas relacionadas a QEE acompanhou o crescimento da geração eólica, uma vez que mecanismos para avaliar os impactos causados por este tipo de geração são necessários para validar o atendimento de

diversas normas impostas pelas agências reguladoras. Até o ano de 2010, baseando-se no banco de dados do IEEExplore [https://ieeexplore.ieee.org], encontra-se 18.088 publicações. De 2011 até 2021, o número é de 46.808 publicações, um aumento de aproximadamente 260%.

Dentre essas publicações, os temas associados às Simulações Digitais em Tempo Real (SDTR) e *Hardware-In-the-Loop* (HIL) tem ocupado um papel de destaque, e, portanto, serão abordadas como enfoque principal deste artigo. Assim, a principal contribuição deste artigo é compilar uma breve revisão bibliográfica no que tange as SDTRs e HIL no contexto de QEE envolvendo a inserção de geração eólica nos sistemas elétricos de potência.

2. HIL E SDTR

Segundo a definição de Cravotta (2005) HIL é uma técnica que combina e conecta componentes reais e virtuais em uma configuração operacional para simular e testar o comportamento dinâmico de sistemas complexos.

Para o desenvolvimento de uma solução de engenharia, a simulação por computador é parte importante e muitas vezes obrigatória do processo de desenvolvimento. A simulação é realizada por modelos matemáticos, o que exige um grande esforço computacional, para a resolver as equações que modelam cada equipamento (Moccelini, 2018).

Através da SDTR, as grandezas do sistema em estudo se comportam de maneira síncrona com as medidas do sistema real modelado. Com a utilização de conversores analógicos/digitais e amplificadores é possível realizar a conexão de equipamentos reais junto à simulação, tendo assim uma configuração HIL (Moccelini, 2018).

2.1 Aplicações de HIL

Um exemplo de uma configuração HIL é a conexão de um medidor de QEE físico (ex. medição de harmônicos) através de amplificadores e conversores analógicos/digitais conectados à um sistema simulado, e a partir dessa simulação, obtêm-se o seu comportamento real.

A vantagem do uso de técnicas como HIL se dá por não ser necessário uma conexão real de um equipamento em desenvolvimento ao sistema, o que poderia colocar o sistema ou o equipamento em risco, sejam pelas grandezas envolvidas, como altos níveis de tensão, como pelo comportamento anormal do equipamento, podendo gerar danos ou desligamentos ao sistema conectado.

Os testes de HIL podem ser classificados em duas subclasses. A primeira delas conhecida como *Power-Hardware-In-the-Loop* (PHIL), na qual a parte de controle e comunicação de um sistema em testes é simulada e a parte de potência do sistema conectada de maneira real, e a segunda subclasse a *Control-Hardware-In-the-Loop* (CHIL), onde a parte de controle e comunicação de um sistema em testes é conectada de maneira real e a parte de potência é simulada.

A arquitetura geral de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser dividida em três camadas, sendo a primeira camada constituída pelos equipamentos de potência, como o sistema elétrico, o sistema de proteção, os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), etc. Dentre os REDs, destacam-se os geradores síncronos, os PVs (*Solar Photovoltaics* – energia solar) e os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs). A segunda camada é constituída pela infraestrutura de comunicação e seus protocolos, configurando as redes LAN (*Local Area Network* – Rede local) e WAN (*Wide Area Network* – Rede de longa distância). E a terceira camada é constituída pelos controladores supervisórios como o SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition* – Controle, supervisão e aquisição de dados) e o EMS (*Energy Management System* – Sistema de Gerenciamento de Energia) (Otto et al. 2019).

A Fig. 1 ilustra essa divisão da arquitetura.

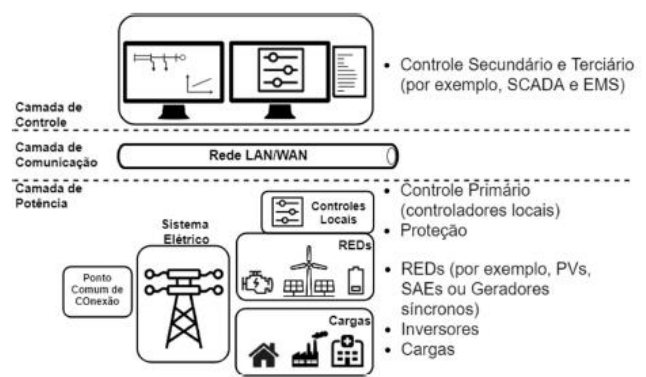


Fig. 1 Arquitetura geral de um SEP (Otto et al. 2019).

Por meio da Fig. 2 é possível observar as possíveis abordagens de testes de uma solução de engenharia da seguinte maneira:

- Aplicação da técnica SDTR;
- Aplicação da técnica CHIL;
- Aplicação da técnica PHIL e
- Teste em um sistema puramente físico.

2.2 HIL e SDTR em QEE

A aplicação de HIL e SDTR para solução de problemas de engenharia em QEE tem crescido nos últimos anos. Com base no banco de dados do IEEExplore, a Fig. 3 indica a quantidade de publicações por ano que tratam deste tema. Já a Fig. 4 ilustra a quantidade de publicações de HIL e SDTR em QEE por tipo de aplicações. Apesar da energia eólica não ser o item com maior número de publicações, essa área está em franca expansão, o que certamente influenciará em trabalhos futuros sobre o tema.

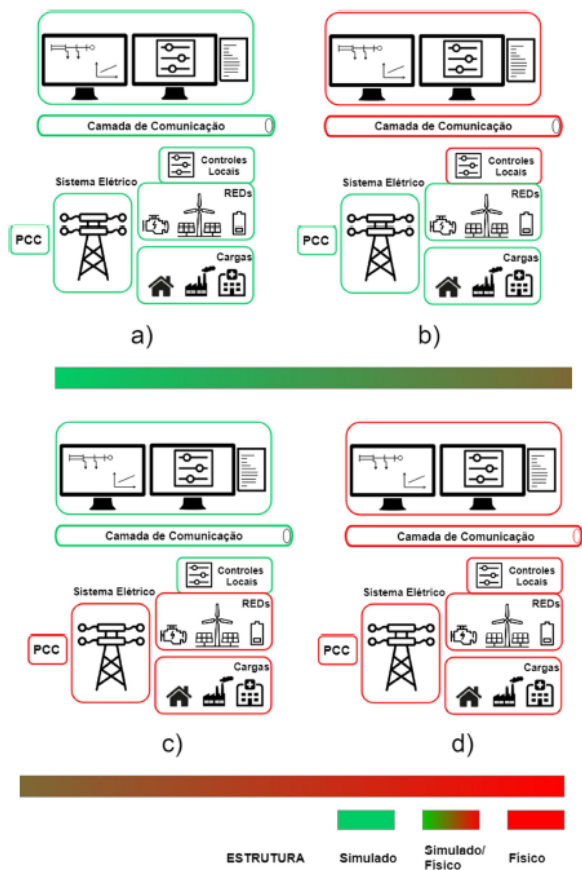


Fig. 2 Abordagens de testes de um SEP: a) SDTR; b) CHIL; c) PHIL, e d) Sistema puramente físico (Otto et al. 2019).



Fig. 3 Publicações de HIL e SDTR em QEE por ano.

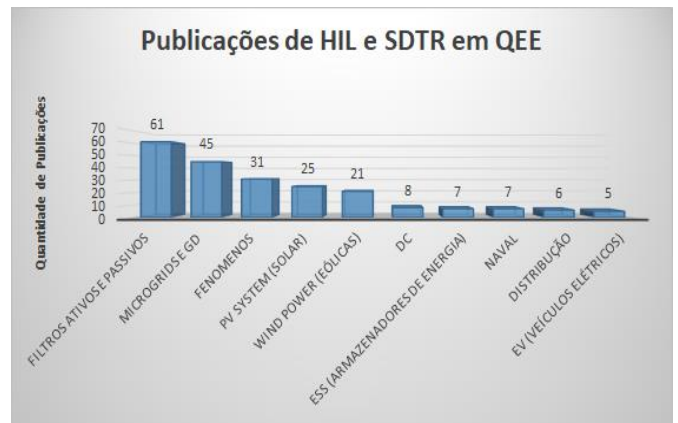


Fig. 4 Publicações de HIL e SDTR em QEE por tipo de aplicação.

3. PUBLICAÇÕES

A partir dos dados apresentados na Fig. 4, foram encontradas 21 publicações sobre o tema considerando a aplicação de HIL/SDTR nos estudos referentes à QEE considerando geração eólica.

Nas referências (Zhao et al. 2016; Bubshait et al. 2017; Zhao et al. 2017; Kim, Lee e Park, 2017; Singh e Jain, 2018; Rakhshani et al. 2019) são realizadas análises sobre o uso da inércia dos geradores eólicos para amortecer oscilações do sistema elétrico.

Na publicação Zhao et al. (2016) é apresentada a aplicação em conjunto de geração de energia das marés e geração eólica combinados, com a utilização de um controlador para suavizar flutuações de energia no sistema. A proposta é testada via SDTR. Vale comentar que dentre as publicações sobre o tema, a de Zhao et al. (2016) é a que possui maior número de citações (32 citações), e por este motivo este trabalho será analisado com mais detalhes em seções a seguir.

Já em (Bubshait et al. 2017) é proposto um algoritmo para controle de uma turbina eólica e seu uso para a compensação de distúrbios do sistema elétrico. A metodologia do controle proposto baseia-se no uso da decomposição da potência conservativa, o que a difere de outras publicações do gênero. O algoritmo é implementado em um microcontrolador DSP TMSF28335 e testado via HIL considerando o equipamento OPAL-RT (Opal-rt, 2022). Para validação do algoritmo proposto são efetuados testes com o sistema injetando potência ativa e reativa e efetuando compensação de componentes harmônicos e desequilíbrio de corrente. O algoritmo proposto respondeu de forma adequada para todos os casos, demonstrando redução da Distorção Harmônica Total (DHT) para todos os casos testados.

Zhao et al. (2017) propõem um controle da inércia de geradores eólicos para controle das flutuações de potência. O controle proposto é implementado adicionando-se dois termos ao controle do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*). São realizados testes para validação do controle proposto, obtendo resultados satisfatórios.

Em Kim, Lee e Park (2017) também é proposto um método de controle da inércia de geradores síncronos de ímã permanente (PMSG - *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Este método é distinto por usar apenas a medição do link de tensão CC do conversor e seus derivados.

Em Singh e Jain (2018) os autores avaliam o comportamento de um gerador eólico frente aos efeitos de distúrbios em uma microrrede. É implementado um gerador eólico no sistema IEEE de 9 barras com um controle de potência direta, e verifica-se o comportamento do sistema frente à distúrbios. São realizadas simulações com o sistema em equilíbrio e sobre faltas, validando a efetividade do controlador proposto.

Já Rakhshani et al. (2019) propõem a implementação de um controlador do tipo FAPI (*Fast Active Power Injection - Injeção Rápida de Potência Ativa*) para controle de turbinas eólicas e uso para melhora dos problemas de oscilações de frequência do sistema. São implementados dois controladores FAPI e via SDTR são analisados os efeitos das respectivas implementações no sistema. Ambos os controladores obtiveram resultados satisfatórios na redução dos efeitos de oscilação de frequência em sistemas de geração intermitente, como solar e eólica.

Nas publicações (Liu et al. 2010; Park et al. 2011; Sattar et al. 2016; Pindoriya, Rajpurohit, e Monti, 2019) são realizadas análises do comportamento de sistemas eólicos frente situações de faltas (curtos-circuitos) e transitórios no sistema.

Em Liu et al. (2010) são aplicadas faltas no sistema e verificado o comportamento de um gerador do tipo DSEG (*Doubly Salient Electro-magnetic Generator - Gerador Eletromagnético Duplamente Saliente*). Os resultados são satisfatórios e demonstraram os efeitos das faltas no sistema.

Já em Park et al. (2011), os autores avaliam um controlador de um gerador do tipo PMSG frente aos transitórios causados por faltas no sistema. Posteriormente, neste trabalho, será dado destaque à esta publicação, que possui um número maior de citações (7 citações) dentre as consultadas.

Sattar et al. (2016) implementam um gerador do tipo PMSG via o RTDS (*Real Time Digital Simulator*) para a avaliação do comportamento do gerador frente às condições normais e anormais de uma rede. O uso de HIL para testes deste tipo permite uma melhor avaliação dos efeitos não considerados do sistema em simulações convencionais (Sattar et al. 2016).

Em Pindoriya, Rajpurohit e Monti (2019) é apresentado o controle de um gerador eólico do tipo PMSG. É implementada uma rede com o gerador no RTDS e são realizados testes, como a aplicação de curtos-circuitos monofásicos. Após as simulações, é verificado que algumas das faltas afetam o comportamento do PMSG.

Nas pesquisas de (Jung et al. 2009; Cha et al. 2012; Mascarella et al. 2015; Gao, Tang, e Kong, 2017) são realizadas análises do uso de armazenadores de energia para melhora da QEE em sistemas de geração eólica.

Em Jung et al. (2009) é proposto a aplicação de SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage -*

Armazenadores supercondutores de energia magnética) para suavização de oscilações no sistema de geração.

A publicação de Cha et al. (2012) apresenta a simulação e a avaliação em tempo real dos efeitos de um sistema de armazenamento de energia (ESS - *Energy Storage System*) junto a um sistema de geração eólica. Através dos dados de uma ilha da Dinamarca são realizados testes via o RTDS e verificados os benefícios na QEE que a aplicação de um ESS em um sistema de geração intermitente pode gerar.

A pesquisa de Mascarella et al. (2015) propõe um controlador com comunicação baseado na norma IEC 61850. Posteriormente, neste trabalho, será dado destaque à esta última publicação por apresentar testes com esta norma que possui diversas aplicações em engenharia elétrica.

Já em Gao, Tang e Kong (2017) é proposto o uso de um controle adaptativo fuzzy. Em ambos os trabalhos são realizados ensaios SDTR, obtendo resultados satisfatórios para a melhora na QEE.

Ainda neste documento, serão comentadas outras publicações que também abordam o contexto delineado.

3.1 Geradores eólicos aplicados para a redução dos problemas de QEE na geração por marés

A pesquisa de Zhao et al. (2016) trata sobre a introdução de geradores eólicos para redução dos problemas de QEE na geração por marés e o uso de um controlador de compensação integral para otimizar a resposta.

A geração por marés tem uma enorme flutuação de energia em um período típico de 5 a 12 segundos, no qual oscila de zero a megawatts (Polinder e Scuotto, 2005; De Antonio, 2010). Com essa geração integrada à rede, essa oscilação gera diversos problemas de QEE como flutuações de tensão (flickers), variações de frequência, distorções harmônicas, dentre outros (Blavette et al. 2014; Armstrong, Sanchez e Kovaltchouk, 2015).

Há diversas aplicações que podem suavizar os efeitos citados. A conexão de diversos geradores, por si só, gera uma pequena suavização (Armstrong, Sanchez e Kovaltchouk, 2015). Algumas formas de suavização são obtidas com equipamentos acumuladores de energia, como baterias ou super capacitores. Contudo, apesar de suavizarem os efeitos, causam diversos outros problemas como redução da vida útil, no caso das baterias, grande espaço de armazenamento, e no caso dos super capacitores, necessidade de conversores e demanda por manutenções, o que encarecem o projeto e o dificultam (Zhao et al. 2016).

Contudo, as turbinas eólicas possuem grande inércia, a qual pode ser utilizada para a regulação da frequência da rede em curto prazo. Diferentemente da geração por marés, a geração eólica não demanda uma suavização da potência na mesma escala de tempo (5 a 12 s), podendo essa inércia ser utilizada para suavizar a geração por marés, utilizando as duas fontes de forma combinada (Zhao et al. 2016).

Como solução para o problema de flutuação de energia, o artigo propõe um controle por compensação integral (ICC - *Integral Compensation Control*) para suavizar a flutuação de energia usando a inércia dos geradores eólicos com otimização da suavização da saída do sistema através do ICC.

A Fig. 5 ilustra o sistema proposto e simulado.

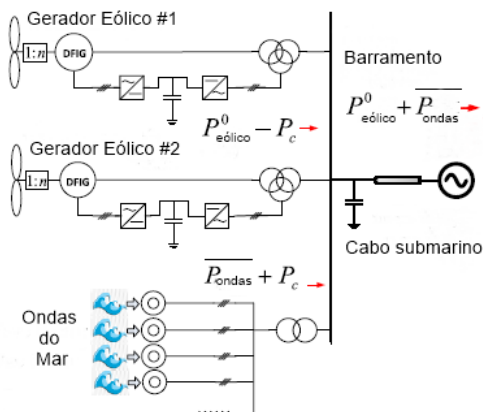


Fig. 5 Sistema elétrico proposto (Zhao et al. 2016).

O ICC proposto receberá as medições de potência gerada pelo sistema de marés e a velocidade do rotor da turbina do gerador eólico. A partir desses dados, o controlador encontrará o ponto ótimo de velocidade para a turbina eólica, para que ela compense as oscilações da geração de marés e para que a alteração na velocidade da turbina afete o mínimo a geração eólica.

Para validar o sistema proposto, com o ICC implementado, foram realizados 5 testes descritos abaixo:

- Teste 1: Simulações sob velocidade de vento constante usando o ICC;
- Teste 2: Desempenho dinâmico com o método ICC proposto;
- Teste 3: Comparação do desempenho de um sistema de compensação direta com o do ICC;
- Teste 4: Desempenho dinâmico sob velocidade variável do vento; e
- Teste 5: Demonstração da coordenação de múltiplas turbinas em um sistema de duas turbinas.

3.2 Avaliação da resposta de um controlador de um WPGS frente à transitórios de tensão durante faltas no sistema

O trabalho reportado por Park et al. (2011) propõe a aplicação da técnica CHIL para avaliação da resposta de um controlador de um WPGS (*Wind Power Generation System* - Sistema de Geração de Energia Eólica) frente à transitórios de tensão durante faltas no sistema.

O gerador escolhido foi um PMSG conectado a um sistema elétrico conforme a Fig. 6. Foram aplicadas faltas

monofásicas e trifásicas à terra na rede e verificado o comportamento do PMSG frente às oscilações.

Para a aplicação do CHIL e a realização dos testes, conforme a Fig. 7, foi utilizado o RTDS e um DSP (*Digital Signal Processor*). No RTDS foram modelados o sistema e as condições de falta. Os sinais de velocidade do rotor, correntes e tensões do WPGS são enviados ao DSP pelo RTDS via cartão A/D (Analogico/Digital). O DSP analisa os sinais recebidos e após, envia sinais modulados para a placa GTDI do RTDS, de modo a comandar os conversores do WPGS a fim de que o sistema fique estabilizado.

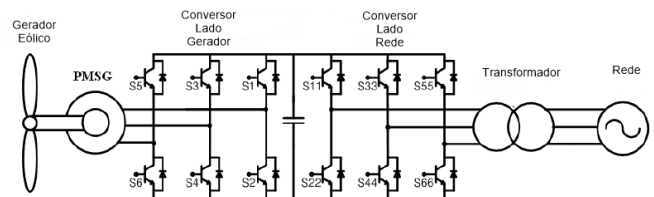


Fig. 6 Sistema elétrico modelado (PARK et al. 2011).

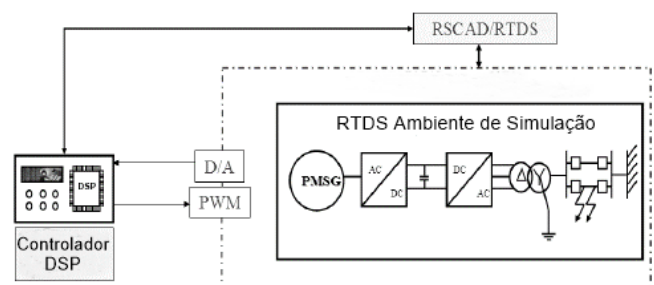


Fig. 7 Arquitetura teste (Park et al. 2011).

Para a validação dos testes foram verificados os afundamentos de tensão que ocorreram durante os curtos-circuitos e o comportamento do sistema perante eles. O sistema respondeu de maneira correta durante os transitórios. O CHIL proposto se mostrou eficiente para testes do tipo.

3.3 Teste em tempo real de um controle de potência via IEC 61850 e mensagens GOOSE

A conexão de geradores eólicos a alimentadores fracos pode gerar grandes problemas de QEE como flutuações de tensão (*flickers*). Geradores eólicos possuem rápida variação de tensão de saída, sendo a causa principal para os problemas citados. Uma das formas de suavizar essas oscilações de tensão é utilização de um sistema de armazenamento de energia (ESS). A Fig. 8 ilustra o sistema elétrico proposto no artigo.

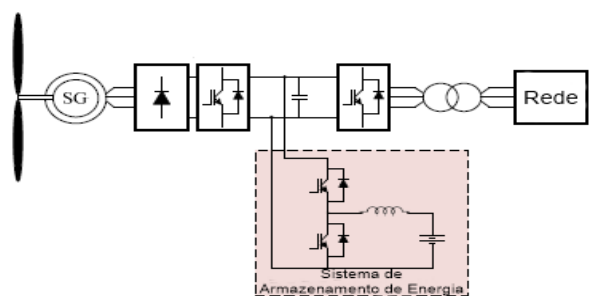


Fig. 8 Sistema elétrico proposto (Mascarella et al. 2015).

O artigo propõe um controlador, o qual recebe a tensão medida no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) e a potência ativa medida nos terminais dos geradores. A potência reativa despachada pelos reatores será responsável por conter as oscilações de tensão. A potência ativa do ESS será responsável por mitigar flutuações de tensão (*flickers*).

O teste é composto por 2 módulos simuladores da marca OPAL-RT com comunicação via norma IEC 61850, protocolo GOOSE, caracterizando um ensaio CHIL. Um OPAL-RT será responsável por simular o sistema elétrico modelado e o outro será responsável por simular o controlador do regulador de tensão e mitigação do *flicker*. A Fig. 9 ilustra a arquitetura.

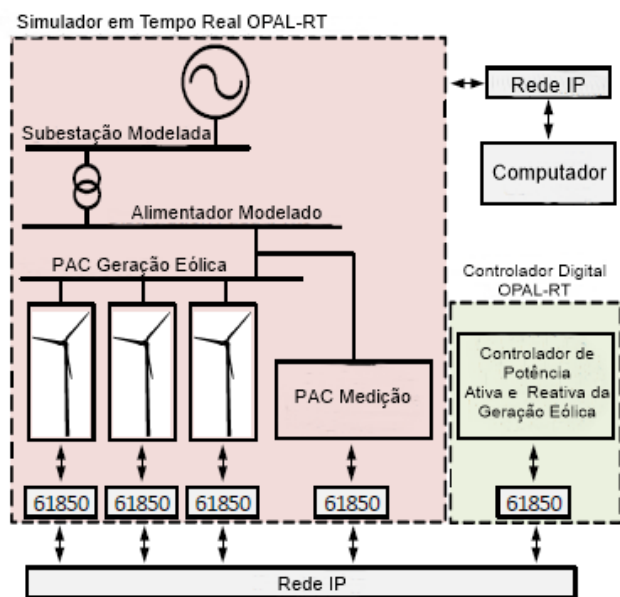


Fig. 9 Arquitetura do teste (Mascarella et al. 2015).

Com a aplicação do controlador junto ao ESS, a regulação da tensão e a mitigação da oscilação atuam como duas funções separadas e são desacopladas. Com a realização dos testes do sistema foi obtido uma redução de 83% no *flicker* do sistema.

3.4 Demais publicações

Além das publicações descritas acima, ainda merecem destaque neste reporte o trabalho de (Sattar, Al-Durra e Mueen, 2011) onde são realizadas análises da interação de

um compensador síncrono estático (STATCOM) com um parque eólico. São realizadas simulações *offline* e *online*. As simulações *offline* se mostraram precisas quanto aos valores de resposta, porém, com alto tempo de processamento, o que inviabiliza esse tipo de abordagem. As simulações *online* (SDTR) foram satisfatórias.

O trabalho de Ofoli e Altmanian (2017) propõe a aplicação do RTDS para testes em um sistema de geração eólica. São modelados 6 geradores eólicos juntos ao sistema IEEE de 14 barras e demonstrado a modelagem dos equipamentos do sistema. São apresentados alguns casos simulados para validar o sistema proposto e sua aplicabilidade para investigações do comportamento do sistema elétrico.

Em (Hoseinzadeh et al. 2018) é modelado um sistema eólico offshore e avaliado os efeitos causados quando do uso de longos cabos submarinos para conexão da geração ao sistema de transmissão. Através de SDTR são realizadas simulações, sendo demonstrados os efeitos indesejados, como a presença de uma composição harmônica.

A pesquisa realizada por Chae, Kang e Suh (2018) propõe um conversor do tipo *Buck* como um MSC (*Machine Side Converter*) de um sistema eólico. É realizado o detalhamento do conversor, e após, são realizados testes HIL para validação do conversor proposto. Os testes validaram o conversor, demonstrando que pode ser uma solução para MSC de geradores eólicos.

Já em Achado et al. (2018) é apresentado um método para localização de afundamentos de tensão baseando-se no fluxo de potência no PAC. É realizada a implementação do localizador no RTDS e avaliado o seu comportamento frente a um parque eólico.

A publicação (Han et al. 2020a) apresenta uma visão geral sobre as causas e a classificação de afundamentos de tensão em fontes de energia renovável. Após, são apresentadas as formas mais comuns de VSG (Voltage SAG Generator - Gerador de Afundamentos de Tensão), VSG baseado em gerador, VSG baseado em impedância *shunt*, VSG baseado em transformador, VSG baseado em conversão total, e são apresentadas as suas aplicações. Por fim, o trabalho apresenta a implementação de um sistema HIL para ensaios da curva de suportabilidade à afundamentos de tensão (LVRT – Low Voltage Ride Through). Já em (HAN et al. 2020b), os autores propõem a alteração do tempo de chaveamento do circuito *crowbar* para melhora do desempenho da curva LVRT de geradores do tipo DFIG. São realizadas comparações entre o desempenho do método tradicional e do método proposto para resposta à curva LVRT. São realizados testes via SDTR, sendo possível identificar o melhor desempenho do método proposto.

4. CONCLUSÕES

Como visto, o crescimento da geração eólica e de publicações de QEE em geração eólica tem sido exponencial. Dentre as publicações, o tema aplicação de SDTR e HIL vem se desenvolvendo.

A aplicação dessas técnicas viabiliza ensaios que não seriam possíveis na prática, tanto pelas grandezas envolvidas, como correntes e tensões de alta magnitude, quanto pela segurança do sistema elétrico, como risco de desligamentos sistêmicos e de danos à equipamentos.

Outra vantagem se dá pela facilidade de implementação de grandes sistemas elétricos de forma simulada e integrada à sistemas e/ou equipamentos reais.

Como desvantagem, têm-se o alto custo dos equipamentos necessários para a sua aplicação. Entretanto, como são equipamentos flexíveis, pode-se aplicar o mesmo equipamento em diversos projetos diferentes, ajudando a diluir seu custo.

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível notar que a aplicação dessas técnicas para testes de algoritmos para controle de turbinas eólicas com compensação de reativos vem tendo grande destaque.

Outro tema que vêm se desenvolvendo é a aplicação dessas técnicas para a avaliação do comportamento de geradores eólicos junto a compensadores ou ESS. Em um sistema simulado comum, esse tipo de implementação é extremamente complexa de se implementar.

Apesar do potencial eólico do Brasil, as pesquisas baseadas nas técnicas apresentadas são pouco encontradas na literatura nacional. Este trabalho listou uma gama de pesquisas pertinentes a esse tema e pode servir como referência para novos desenvolvimentos nacionais e internacionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e aos colaboradores da mesma, em especial aos professores Mário Oleskovicz e Benvindo Rodrigues Pereira Junior pelo apoio e direcionamento durante este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (2021). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica, 1-69.
- Armstrong, S. Sanchez, E. C., and Kovaltchouk, T. (2015). Assessing the impact of the grid-connected pacific marine energy center wave farm, *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, 3 (4), 1011-1020 .
- Blavette, A. O'Sullivan, D. L. Alcorn, R. Lewis, T. W. Egan, M. G. (2014). Impact of a medium-size wave farm on grids of different strength levels, *IEEE Trans. Power Syst.*, volume (29), no. 2, 917-923.
- Bubshait, A. S. Mortezaei, A. Simões, M. G. Busarello, T. D. C. (2017). Power Quality Enhancement for a Grid Connected Wind Turbine Energy System, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2495-2505.
- Cha, S. T. Zhao, H. Wu, Q. Østergaard, J. Nielsen, T. S. Madsen, H. (2012). Evaluation of energy storage system to support Danish Island of Bornholm power grid, *10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 242-247.
- Chae, B. Kang, T. Suh, Y. (2018). Current Source Type PMSG Wind Turbine System with Three-phase Three-switch Buck-type Rectifier for Machine-side Converter. *International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, 1977-1984.
- Cravotta, R. (2005). *Electronic design, strategy, news*. Edn, mixing the real with the virtual. Acesso em 17 de junho de 2021. Disponível em: <<http://www.edn.com/design/systemsdesign/4323163/Mixing-the-real-with-the-virtual>>.
- De Antonio, F. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, volume (14), no. 3, 899-918.
- Gao, C. Tang, X. Kong, L. (2017). Research on Coordinated Control Strategy for Improving the Frequency and Voltage Quality of Power System Based on Adaptive Fuzzy Control Using Wind Power and Energy Storage, *IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, 142-147.
- GWEC (2019). *Global Wind report 2019*. Bélgica. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2019/>>.
- Han, J. Jia, W. Wang, Y. Zhou, L. Hu, H. Ren, Y. (2020a). An Optimized Strategy of Switching Crowbar Improve LVRT of DFIG Based on RTDS, *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, 775-780.
- Han, Y. Feng, Y. Yang, P. Xu, L. Xu, Y. Blaabjerg, F. (2020b). Cause, Classification of Voltage Sag, and Voltage Sag Emulators and Applications: A Comprehensive Overview, *IEEE Access*, volume (8), 1922-1934.
- Hoseinzadeh, B. Amini, M. H. Boroojeni, K. G. Bak, C. L. (2018). RTDS Demonstration of Harmonic Amplification in Under Sea/Ground Cables of Offshore Wind Farms, *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 1-5.
- IEC - International Electrotechnical Commission (2008). *Wind Turbine Generators Systems – Part 21: Measurements and Assessment of Power Quality Characteristics of grid Connected Wind Turbines: IEC 61400-21*. Edition 2.0, 1-5.
- Jung, H. Park, D. Seo, H. Park, M. Yu, I. (2009). Power quality enhancement of grid-connected wind power

- generation system by SMES, IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 1-6.
- Kim, J. Lee, S. H. Park, J. (2017). Inertia-free stand-alone microgrid, part II: Inertia control and stability with PMSG wind turbine system, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1-8.
- Lima, M. M. de. (2021). Sistemas de armazenamento em parques eólicos considerando PLD horário e situações de constrained off. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 1-95.
- Liu, H. Tang, G. Liu, Y. Zhou, B. Guo, H. Zuo, G. (2010). Transient analysis of a non-grid-connected wind driven DSEG using Hardware-in-the-Loop simulation based on RT-LAB, World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 1-5.
- Machado, S. D. Passos, F. O. De Carvalho Filho, J. M. Da Silveira, P. M. (2018). Influence of Wind Energy Integration on a Voltage Sag Source Locator Based on Power-Flow Information, 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 45-52.
- Mascarella, D. Chlela, M. Joos, G. Venne, P. (2015). Real-time testing of power control implemented with IEC 61850 GOOSE messaging in wind farms featuring energy storage, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 6710-6715.
- Mocellini, M. P. (2018). Real-time simulation of power electronics systems and hardware-in-the-loop applications. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, 1-156.
- Ofoli, A. R. Altimania, M. R. (2017). Real-time digital simulator testbed using eMEGASim® for wind power plants, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1-9.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico (2016a). ONS NT 009/2016 – Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à rede básica para parques eólicos, solares e consumidores livres. Rev. 1.0, 1-78.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (2016b). Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica. Rev. 2.0, 1-32.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico (2016c). Submódulo 3.6 – Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão, 1-37.
- OPAL-RT Technologies (2022). OP4520 FPGA Processor & I/O Expansion Unit, Datasheet, 1-2.
- Otto, R. B. Piardi, A. B. Sonoda, D. G. Dos Santos, F. C. Justino, G. L. Ramos, R. A. (2019). Aspectos da Implementação de um Laboratório Híbrido e Flexível de Análise de Microrredes no LASSE/FPTI-BR - XXV SNPTEE - Belo Horizonte – MG, 1-11.
- PARK, M. HWANG, C. KIM, G. SONG, B. LEE, K. Y. (2011). Voltage transient analysis of a PMSG wind power system using controller-hardware-in-the loops, ISGT, 1-6.
- Pindoriya, R. M. Rajpurohit, B. S. Monti, A. (2019). An Investigative Study of the PMSG Based Wind Turbine Using Real Time Simulation, 8th International Conference on Power Systems (ICPS), 1-6.
- Polinder, H. Scuotto, M. (2005). Wave energy converters and their impact on power systems, Proc. Int. Conf. Future Power Syst. (FPS), 1-9.
- Rakhshani, E. Veerakumar, N. Ahmad, Z. Torres, J. R. Van der Meijden, M. A. M. M. Palensky, P. (2019). Implementation and Performance Assessment of Fast Active Power Injection Method for Type 4 Wind Turbine based on Real-time Simulation, 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE), 1-5.
- Sattar, A. Al-Durra, A. Muyeen, S. M. (2011). Dynamic characteristics analysis of wind farm integrated with STATCOM using RTDS, 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 1-6.
- Sattar, A. Muyeen, S. M. Al-Durra, A. Caruana, C. Musleh, A. S. (2016). Experimental study and performance evaluation of the renewable energy conversion systems under realistic grid conditions using RTDS, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), 412-417.
- Singh, S. Jain, B. (2018). Grid Disturbance Analysis with Grid Connected Wind Energy System, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 1-4.
- Zhao, X. Yan, Z. Xue, Y. Zhang, X. (2017). Wind Power Smoothing by Controlling the Inertial Energy of Turbines with Optimized Energy Yield, IEEE Access, volume (5), 23374-23382.
- Zhao, X. Yan, Z. Zhang, X. (2016). A Wind-Wave Farm System with Self-Energy Storage and Smoothed Power Output, IEEE Access, volume (4), 8634-8642.