

# LabREI: Ambiente Experimental para Pesquisas Interdisciplinares e Formação de Recursos Humanos em Redes Inteligentes de Energia Elétrica

João Inácio Yutaka Ota\*<sup>1</sup> e José Antenor Pomilio\*<sup>2</sup>

\* Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC  
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, Brasil

<sup>1</sup>(email: yutaka@fee.unicamp.br)

<sup>2</sup>(email: antenor@fee.unicamp.br)

**Abstract:** This paper presents the project "Interdisciplinary Research in Smart Grids," which aims to conduct advanced research in the area of smart electricity grids, with focus on distribution networks. This is an up-to-date theme with strong economic, social, technological and environmental importance, and intrinsically interdisciplinary feature. The effective implementation of an electricity smart grid depends on the robust interaction between researchers in the areas of power systems, alternative energy sources, power electronics, networked control systems, optimization, communication, and information networks. In addition, the paper presents a laboratory environment, consisting in LabREI Microgrid and ancillary equipment. The facility can perform essential experimental checks succeed theoretical and computational and before the field applications. Lastly, initial research carried out in LabREI is described, focusing on training specialized human resources.

**Resumo:** Este artigo apresenta o Projeto "Pesquisas Interdisciplinares em Redes Elétrica Inteligentes", o qual visa a realização de pesquisas avançadas na área de redes inteligentes de eletricidade, com foco em redes de distribuição. Trata-se de tema de grande atualidade e importâncias econômica, tecnológica, ambiental e social, com intrínseca característica interdisciplinar. A efetiva realização de uma rede inteligente de energia elétrica depende da forte interação entre pesquisas na área de sistemas de potência, fontes alternativas de energia, eletrônica de potência, sistemas de controle em rede, otimização, redes de comunicação e informação. Descreve-se o ambiente laboratorial, formado pela Microrrede LabREI e demais equipamentos, os quais permitem realizar verificações experimentais que sucedem estudos teóricos e computacionais e antecedem aplicações de campo. Ao fim, apresentam-se algumas das atividades iniciais do projeto, focadas na capacitação de recursos humanos especializados.

**Keywords:** Education, Microgrids, Power Quality, Power Testbed, Smartgrids.

**Palavras-chaves:** Educação, Laboratórios de Potência, Microrredes, Qualidade de Energia Elétrica, Redes Elétricas Inteligentes.

## 1. INTRODUÇÃO

O interesse no tema das redes inteligentes ou *smartgrids* (CANIELETTO *et al.*, 2011; YU *et al.*, 2011) baseia-se na expansão das fontes renováveis de energia (SIMÕES *et al.*, 2011; WEI *et al.*, 2009), no crescimento da geração distribuída (DRIESEN *et al.*, 2006; CHIRADEJA, 2005) e no uso de tecnologias de informação e comunicação (MONTI *et al.*, 2010; DE LA ROSA *et al.*, 2010) nos sistemas elétricos (CORRAL *et al.*, 2012; ISLAM *et al.*, 2012). No Brasil (MCTI, 2014) esta expansão ganhou impulso com as resoluções 482/2012 e 687/2015 da ANEEL (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015) que regulamentam os sistemas de micro e minigeração distribuídas baseados em fontes alternativas, conectados às redes de distribuição de baixa ou média tensão. Inúmeras concessionárias de energia elétrica (CEMIG, 2009; COELCE, 2014; ELEKTRO, 2015) estão executando ou

preparando-se para executar projetos de inserção de geração distribuída e implantação de redes inteligentes.

A integração de geradores distribuídos (GD) ao sistema elétrico impõe desafios normativos (IEEE, 2008; IEEE, 2007) não somente na conversão da energia elétrica, mas também no controle e no gerenciamento da energia gerada, na proteção dos sistemas elétricos e dos usuários, na monitoração e controle da qualidade da energia (GOMEZ *et al.*, 2013; MCBEE *et al.*, 2012) e nas estratégias de comunicação (GÜNGÖR *et al.*, 2013; GÜNGÖR *et al.*, 2011). Ainda no âmbito nacional, o tema tem sido intensamente discutido técnica e academicamente (CIGRÉ-BRASIL, 2015), indicando a importância de ações para a viabilização de redes elétricas inteligentes no Brasil.

As redes inteligentes de energia englobam diferentes conceitos (GARCIA, *et al.*, 2012), técnicas e componentes que delineiam o paradigma da geração e do consumo de eletricidade nas próximas décadas, com aumento de demanda e maior complexidade para a gestão de estruturas mais complexas.

O que caracteriza uma rede elétrica como “inteligente” é a capacidade de medir, comunicar, analisar, integrar e coordenar as ações de todos agentes, sejam geradores, consumidores ou os chamados “prosumers” (do inglês, “producer and consumer”), ou seja, agentes que ora se comportam como geradores de energia, ora como carga. Dentre os objetivos de uma *smartgrid* busca-se a produção, o transporte, a distribuição e o uso final de energia elétrica de modo eficiente, ambientalmente sustentável, viável economicamente e de forma confiável e segura.

A partir da arquitetura definida pelo *European Committee for Electrotechnical Standardization* - CENELEC (CENELEC, 2012), reproduzida na Figura 1, assim como das definições do *National Institute of Standards and Technology* (NIST, 2014) é possível verificar a grande abrangência e interdisciplinaridade do contexto das redes inteligentes. Operar em todos esses aspectos é um desafio, uma vez que estão envolvidos princípios e conceitos tradicionalmente desvinculados ou, pelo menos, pouco articulados.

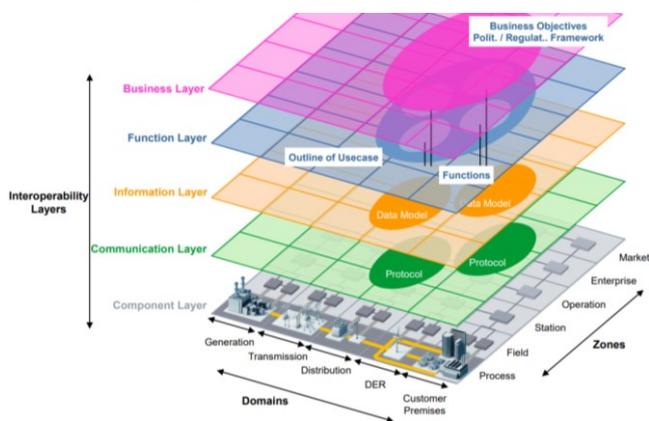


Fig. 1. SGAM – *Smart Grid Architecture Model*, segundo a CENELEC (CENELEC, 2012).

Em um contexto tão amplo, são também muito distintos os enfoques das entidades que atuam no setor, sejam acadêmicas (U. DURHAM, 2019; U. BIRMINGHAM, 2019; U. OTTAWA, 2019), centros de pesquisa (ARGONNE, 2019; NREL, 2019; INESC TEC, 2019) ou empresas (U. NORTH CAROLINA, 2019), estas em geral associadas a universidades (RYERSON U., 2019). No Brasil, a estruturação de facilidades deste tipo se dá em moldes semelhantes, a partir da evolução de grupos acadêmicos de pesquisas em áreas correlatas (USP, 2019) e de centros de pesquisa (LACTEC, 2020; CPqD, 2019). Ocorre que, na maioria dos casos, trabalha-se em uma perspectiva restrita a um ou outro aspecto relacionado a estas redes, o que limita a abrangência e a possibilidade de generalização dos resultados conseguidos.

O Projeto "Pesquisas Interdisciplinares em Redes Elétricas Inteligentes" insere-se nesse contexto com objetivo de estabelecer um ambiente com caráter interdisciplinar, multiusuário e interinstitucional, necessário ao desenvolvimento na área de redes inteligentes de energia. Este projeto se apoia em dois aspectos principais: 1) pesquisa conjunta, integrada e coordenada em função de problemas de Redes Inteligentes de Energia Elétrica; e 2) estrutura laboratorial. A Faculdade de Engenharia Elétrica e de

Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), associada aos grupos de pesquisa do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) e do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CESC) da Universidade Federal do ABC (UFABC), tem longo histórico de pesquisas interdisciplinares, cujos resultados, muitas vezes, também são de interesse de empresas, especialmente as que atuam no setor de eletricidade, com as quais, há muito são mantidas intensas atividades de P,D&I.

## 2. DESAFIOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS

O foco das pesquisas são redes inteligentes de distribuição de energia, incluindo os lados de média e de baixa tensão, as quais, por pressuposto, são dotadas de uma variedade de recursos energéticos, como painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, células a combustível, baterias, etc. Diferentes perfis de consumidores fazem uso de tais fontes distribuídas, cujos conversores eletrônicos de potência, responsáveis pelo condicionamento da energia elétrica, devem ser capazes de garantir a operação segura, estável, com continuidade e qualidade do fornecimento de eletricidade. A parte laboratorial-experimental se restringe à rede de baixa tensão.

Nesse cenário, cada fonte se conecta com a rede por meio de um conversor eletrônico de potência (CEP), que pode operar como um gerenciador local de energia. A operação da rede pode ser otimizada (sob diversos aspectos) por um controle sinérgico de tais fontes e conversores distribuídos.

A estrutura de controle em rede, cujas fontes e cargas tipicamente apresentam características estocásticas, se apoia em redes de comunicação (de diferentes tecnologias) e informação. Tal contexto exige a cooperação de diferentes áreas de conhecimento, as quais são apresentadas a seguir nos aspectos de maior relevância para a realização deste Projeto.

### A) Pesquisas em Eletrônica de Potência e Condicionamento de Energia Elétrica:

- Uso multifuncional e compartilhado de inversores: circuitos e controle;
- Identificação de fontes e cargas;
- Fontes fotovoltaicas e acumuladores de energia;
- Aspectos de Normas e indicadores de QEE;
- Teorias de Potência Elétrica.

### B) Pesquisas em Sistemas de Distribuição:

- Procedimentos de Operação;
- Gerenciamento da Distribuição;
- Estudos de Estabilidade de Rede Inteligente de Distribuição de Energia.

### C) Pesquisas em Controle Distribuído e Otimização:

- Otimização de Redes em Ambiente *smartgrid*;
- Redução de Perdas Técnicas em Redes de Energia Elétrica;
- Melhoria da Confiabilidade de Redes de Energia Elétrica.

### D) Pesquisas em Plataformas de Comunicação e Informação (C&I) para Redes Inteligentes:

- Modelo e tecnologias de comunicação;
- Plataforma de Inteligência.

Posto que este Projeto baseia-se na interdisciplinaridade das pesquisas no complexo tema das redes inteligentes de

eletricidade, é imprescindível que se vá além da modelagem e simulação computacionais, chegando à experimentação

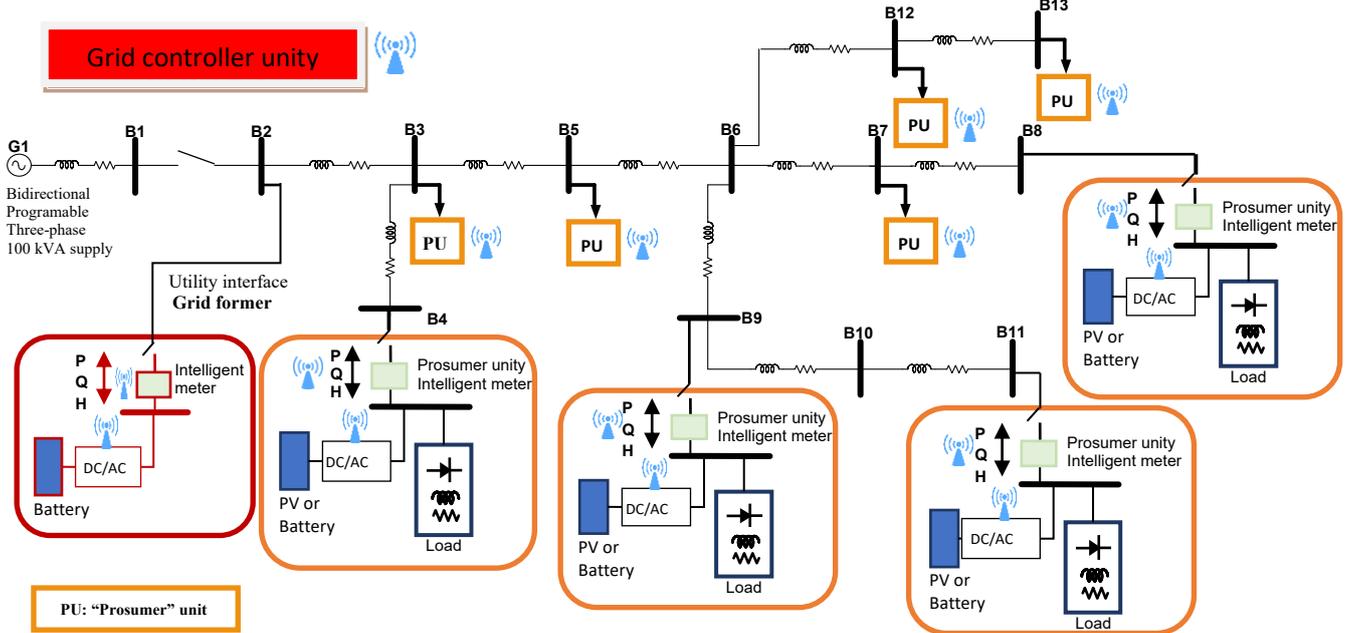


Fig. 2. Visão conceitual da rede experimental do LabREI

laboratorial e à implantação de redes reais, nessa sequência de procedimentos. É no ambiente de laboratório que, mais efetivamente, se observa a interação dos diferentes domínios (sistema elétrico, conversores de potência, estruturas do controle e redes de comunicação). A importância de ensaios em laboratório, que antecedam os experimentos de campo, reside na necessidade de criar condições reproduzíveis, de maneira a poder identificar o comportamento da rede e de seus agentes.

O escopo e a abrangência de laboratórios/instalações interdisciplinares e multiusuários (usualmente indicados pelo termo em inglês, *facilities*) para o estudo de redes elétricas inteligentes é muito diverso. Um levantamento da União Europeia, considerando laboratórios de empresas, acadêmicos, de instituições de pesquisa, analisa *facilities* que trabalham apenas com simulação e outros que possuem, em algum nível, instalações “reais” (ANDREADOU *et al.*, 2018).

### 2.1 Os objetivos estratégicos do Projeto:

- 1) Avanço científico e tecnológico na área de Redes Inteligentes de Energia Elétrica, com enfoque interdisciplinar e ênfase na verificação experimental;
- 2) Suprir a lacuna entre estudos baseados em simulações e os testes de campo, por meio de ensaios laboratoriais que reproduzam com fidelidade os ambientes de realização de redes elétricas inteligentes;
- 3) Formação de recursos humanos para atuação interdisciplinar em redes elétricas inteligentes;
- 4) Colaborar para a revisão e modernização das normas relativas às redes elétricas inteligentes e à qualidade da energia elétrica.

### 3. LABORATÓRIO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES – LabREI

Com a necessidade de um ambiente que permita explorar tão grande variedade de temas, de forma interdisciplinar, está em implantação na FEEC-UNICAMP um ambiente que visa cobrir a lacuna entre os estudos fracionados por escopo, e servir como contraponto às pesquisas que passam diretamente do ambiente de simulação para testes de campo, sem a devida verificação laboratorial.

Na figura 2 ilustra-se o conceito da instalação do LabREI. A topologia da rede é constituída por trechos de cabos que podem ser interconectados a partir de um painel. Fontes de diversas naturezas (reais ou programáveis), assim como cargas, podem ser conectadas em qualquer das 12 barras disponíveis, caracterizando até 12 unidades consumidoras. Os equipamentos, fontes e cargas, contam com interfaces de comunicação para permitir o comando e o eventual controle integrado e cooperativo dos diversos conversores. A rede elétrica experimental é formada pela fonte bidirecional, a qual permite a conexão com a rede real, e de forma programável (no lado do LabREI) e plenamente protegida (em ambos os lados).

Na Figura 2, a “Utility Interface” se refere ao conversor formador de rede (em caso de ilhamento) o qual, por seu posicionamento, também pode cumprir funções de compensação de distúrbios para a rede externa.

A estrutura laboratorial é atualmente composta por:

- Painel elétrico (denominado Microrrede LabREI) contendo a estrutura da rede (barras e cabos), e permitindo a conexão da unidade consumidora à rede;
- Conversor bidirecional programável NHR 9410, com potência nominal de 100 kVA, o qual é conectado com a rede real com elevada capacidade de curto-circuito;

- Fontes CC programáveis Keysight N8937APV (3 x 15 kW) e RP7952A (10 kW) para emulação de painéis fotovoltaicos e de bancos de baterias e supercapacitores, respectivamente, além de supercapacitores e baterias reais;
- Cargas CA regenerativas programáveis NHR 9430 (48 kVA) em termos de potência ativa, reativa e harmônicos;
- Banco de cargas passivas de 15 kW, 15 kVA indutivo e capacitivo;
- Acesso à conexão CA de inversores trifásicos e monofásicos, alimentados por painéis fotovoltaicos com potência de pico total de 20 kW;
- Sistema de aquisição de dados cRIO da National Instruments e cabeamento Ethernet blindado para permitir funções de comando, comunicação, monitoramento e controle dos conversores e fontes, bem como a gestão operacional da rede local.

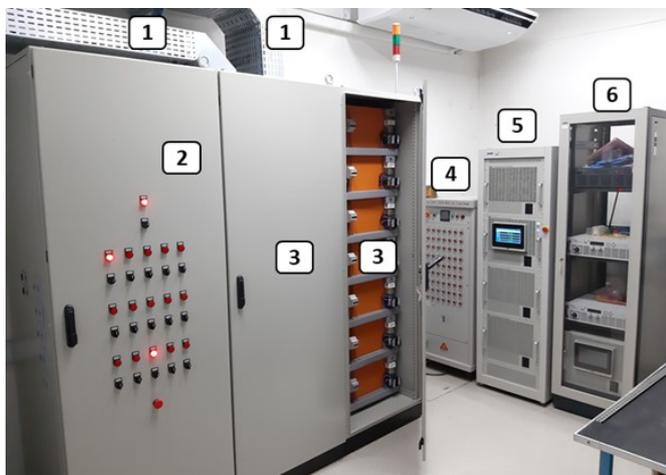


Fig. 3. Estrutura física do LabREI. Microrrede LabREI e equipamentos. Legenda: 1) Eletrocalha para os cabos; 2) Painel com módulos de monitoramento e controle; 3) Painéis com barramentos e acesso a medidores; 4) Banco de cargas passivas; 5) Conversor Bidirecional NHR9410; 6) Rack com Fontes CC e Carga CA programáveis.

Figura 3 apresenta a estrutura física do LabREI com os principais equipamentos e o painel que realiza a conexão da rede experimental apresentada na Figura 2.

#### 4. ATIVIDADES DE IMPLANTAÇÃO E CAPACITAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

Entre os objetivos estratégicos do Projeto encontra-se a formação de recursos humanos para atuação interdisciplinar em redes elétricas inteligentes. Objetiva-se a formação de recursos humanos capazes de disseminar tal conhecimento em diversos níveis na indústria e academia. Para além da situação habitual dos projetos de pesquisa, que é a formação de mestres e doutores, um dos objetivos estratégicos do LabREI é atrair também estudantes de graduação, dando-lhes a oportunidade de trabalhar em um ambiente sinérgico e multidisciplinar, como se configura as modernas condições de trabalho dos profissionais de engenharia. Nesta seção listam-se algumas dessas iniciativas, que estão envolvidas diretamente com a instalação e comissionamento da

microrrede LabREI e verificações experimentais preliminares.

##### 4.1 Caracterização em Frequência de Cabos da Microrrede

O primeiro passo após a montagem da microrrede foi sua caracterização de seus cabos. Métodos tradicionais de estimação de parâmetros de cabo em redes elétricas levam em conta sua distribuição no espaço ou valores pré-calculados em tabelas. Utilizaram-se, porém, métodos experimentais baseados na resposta ao degrau e na análise de frequência para a identificação de parâmetros elétricos da microrrede (VENDRÚSCULO, 2001). A modelagem em uma ampla faixa de frequência é importante pois nas microrredes atum diversos conversores chaveados, bem como pode-se fazer uso de comunicação de dados usando a rede física. Os cabos estão alojados em eletrocalhas e em justaposição, como em uma instalação subterrânea ou predial.

Realizaram-se medidas e estudos no contexto de um trabalho de fim de curso de graduação de Engenharia Elétrica, usando diferentes métodos para a estimativa de parâmetros a fim de compara-los. Foram obtidos os valores de capacitância e indutância por comprimento. Considerando a distância de aproximadamente 300 m entre os extremos da rede, obteve-se uma primeira ressonância em aproximadamente 150 kHz (rede em vazio). Esse é um comportamento potencialmente problemático dada a proximidade com a banda utilizada para comunicação por protocolo *Power Line Communication* (PLC). Adicionalmente, foi inserida uma carga típica (fonte de computador) no meio da rede. O comportamento capacitivo da fonte (dado por seu filtro de IEM) reduziu a ressonância (vista desde o final da rede) para 26 kHz, aproximando-se da frequência de comutação típica dos conversores eletrônicos. Nota-se que é preciso muita atenção ao comportamento da rede muito além da faixa normalmente analisada que se limita aos harmônicos.

##### 4.2 Comissionamento de Fontes Programáveis e demais equipamentos

A presença de diversas fontes programáveis permite verificações experimentais de diferentes cenários de operação e fenômenos relacionados à microrredes, tais como fenômenos de Qualidade de Energia Elétrica. A operação de tais fontes pode ser realizada localmente através de IHM do equipamento, ou através de terminais remotos com *softwares* fornecidos. Porém isso não impede que interfaces personalizadas sejam desenvolvidas, uma vez que as diretrizes de comunicação e programação de tais fontes também são fornecidas.

Atualmente, uma estudante de graduação juntamente com parte da equipe do LabREI trabalha no comissionamento das fontes programáveis e demais equipamentos. Em uma primeira etapa, objetiva-se a realização de comissionamento e de manuais de procedimento de uso. Em uma próxima etapa, uma interface customizada para integrar todos os equipamentos será desenvolvida. Trata-se uma oportunidade de formar recursos humanos familiarizados com equipamentos de ponta relacionados com aplicações de microrredes e redes inteligentes.

#### 4.3 Desenvolvimento de Interface para Visualização de Dados da Microrrede LabREI

Em uma rede inteligente os agentes (conversores eletrônicos de potência) possuem capacidade de monitoração de grandezas elétricas e de comunicação. Além desses, medidores inteligentes também produzem dados relacionados às condições de operação da microrrede. Todas essas informações precisam ser transmitidas a um controlador central e analisadas com vistas a garantir a operação correta da rede, bem como permitir definir o funcionamento otimizado da rede segundo algum critério de otimização. Deseja-se implementar a visualização, tanto local como remotamente, dos diversos dados disponibilizados pelos sistemas locais de aquisição de dados. Estruturas de base de dados temporais (*Time series database*) serão utilizadas em conjunto com plataformas de representação gráfica para a visualização de dados. Tais dados também serão disponibilizados para atender demandas de outras camadas de atuação da *smartgrid*, seguindo a arquitetura apresentada na Figura 2. Atualmente, um bolsista de iniciação científica juntamente com a equipe do LabREI trabalha no desenvolvimento de tais interfaces. Os estágios iniciais consistem na escolha da base de dados temporais e da plataforma de visualização.

#### 4.4 Reconhecimento de Padrão e Visualização de Fenômenos de Qualidade de Energia em Microrredes

Estudos recentes apresentam o uso de imagens facilmente reconhecíveis para identificação de fenômenos de Qualidade de Energia (MIRANDA, 2019). Essas imagens podem ser geradas através de algoritmos de *Deep Learning* e Redes Neurais. O ambiente de verificação experimental proporcionado pela Microrrede LabREI permite a realização de estudos similares e promove sinergia entre essas áreas de pesquisa distintas. O trabalho tem início dentro de um contexto de iniciação científica, com a possibilidade de extensão para um mestrado.

#### 4.5 Compatibilidade Eletromagnética em Inversores Fotovoltaicos e ruídos entre 3 e 150 kHz

Interferências eletromagnéticas (IEM) podem ser identificadas por serem conduzidas pela rede elétrica ou irradiadas. Considerando-se fenômenos de Qualidade de Energia Elétrica, foca-se nos aspectos de IEM conduzida. A expansão da geração fotovoltaica implica na instalação de um número cada vez maior de inversores em redes de distribuição de energia. Inversores fotovoltaicos são conversores eletrônicos de potência cuja frequência de operação localiza-se na faixa de dezenas de quilohertz. Estratégias de modulação podem produzir componentes que vão além de algumas centenas de quilohertz. Existem normas internacionais, em especial a IEC/CISPR, para o ruído admissível produzido por equipamentos na faixa de IEM (150 kHz a 30 MHz), mas não há regulamentação específica para os inversores. Nesse range de frequência ocorrem tanto os ruídos de comutação como a transmissão de sinais por *Power Line Communication* (PLC) (RÖNNBERG, 2017).

Estão em andamento testes experimentais para verificação de IEM conduzida produzida por inversores comerciais, tanto

isoladamente quanto conectados ao Painel LabREI. Além disso, serão realizados estudos e experimentos sobre a presença e ruídos entre 3 e 150 kHz no contexto de *smartgrids* e microrredes.

### 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A atuação sinérgica de pesquisadores em eletrônica de potência, sistemas de potência, controle, otimização, redes de comunicação e ciência de dados possibilita a criação de um ambiente no qual conhecimentos e tecnologias inovadoras relativos a redes inteligentes de energia elétrica sejam desenvolvidos e aprofundados.

A disponibilização do LabREI abre perspectivas de ampliar significativamente as pesquisas em *smartgrids* dada sua potencialidade reproduzir um ambiente de redes de distribuição em baixa tensão. As caracterizações em andamento permitirão melhores condições de simulação também utilizando recursos *Hardware-in-the-Loop* (HIL), mas com uma modelagem mais precisa tanto da rede quanto dos conversores.

A originalidade dos resultados que iniciam a ser obtidos permite antever a potencialidade de uma *facility* com essas características.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a participação e colaboração de João Bosco R. do Val, Ernesto Ruppert Filho, Christiano Lyra Filho, Walmir Freitas, Daniel Dotta, Luiz C. P. da Silva, Paulo A. V. Ferreira, Marcelo G. Villalva, Leonardo S. Mendes e Christian E. Rothenberg, docentes da FEEC-Unicamp, de Fernando P. Marafão, Flávio A. S. Gonçalves, Helmo K. M. Paredes e Eduardo P. Godoy, docentes do ICTS-UNESP, de Alfeu J. Sguarezi Filho, docente do CESC-UFABC, e de Hildo Guilliardi Júnior e Joel Filipe Guerreiro, membros do LabREI, neste Projeto e na confecção do artigo.

Este projeto é financiado pela FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, (processos 2016/08645-9, 2018/13993-1). Colaboram e apoiam este projeto as seguintes instituições e empresas:

- Università degli Studi di Padova, Itália - Power Electronics Group;
- Colorado School of Mines, EUA - Advanced Control of Energy Power Systems (ACEPS) Research Center;
- Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Noruega;
- Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT), Austrália;
- Instituto de Pesquisas Eldorado;
- CPFL Energia;
- PHB Solar;
- Keysight;
- Ohmini;
- Supplier;
- Semikron;
- ABB.

Os autores também agradecem o apoio do projeto “Campus Sustentável”, da UNICAMP em parceria com a CPFL Energia e a ANEEL.

## REFERÊNCIAS

- Andreadou, N., Jansen L. L., Marinopoulos A., Papaioannou I. (2018). Smart Grids Laboratories Inventory 2018, *JRC Science Hub*, ISBN 978-92-79-99673-3, ISSN 1831-9424, doi:10.2760/983805 Disponível em: <<http://ses.jrc.ec.europa.eu>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- ANEEL (2012). *Resolução Normativa N° 482*, “Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”, 2012.
- ANEEL (2015). *Resolução Normativa N° 687*, “Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST”, 24 de novembro de 2015.
- Argonne National Laboratory [2019]. *Energy Research and Development*. Disponível em: <<http://www.anl.gov/energy/smart-grid>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- BRASIL-MCTI (2014). Redes Elétricas Inteligentes, *Projeto Diálogos Setoriais União Europeia*.
- Carnieletto, R., Brandão, D. I., Suryanarayanan, S., Farret, F., Simões and M. G. (2011). Smart Grid Initiative, *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 5, pp. 27-35.
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais (2009). Pesquisa & Desenvolvimento: PeD 341.
- CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group (2012). *Smart Grid Reference Architecture, November 2012*. Disponível em: <<ftp://ftp.cenelec.eu/EN/EuropeanStandardization/HotTopics/SmartGrids/ReferenceArchitecture/final.pdf>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- Chiradeja, P. (2005). Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis. In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, pp. 1-5.
- CIGRÉ-Brasil (2015). Carta Aberta. In: *Workshop Internacional sobre Regulamentação para Smart Grids*, Rio de Janeiro.
- COELCE - Companhia Energética do Ceará (2014). Implantação de um Piloto de Redes Inteligentes para Automação do Sistemas Elétrico, Smart Grid MME.
- Corral, P., Coronado, B., De Castro Lima, A. C. and Ludwig, O. (2012). Design of Automatic Meter Reading based on Zigbee, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no.1, pp.1150-1155.
- CPqD [2019]. Smart Grid. Disponível em: <<https://www.cpqd.com.br/en/research-and-development/smart-grid/>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- de-la-Rosa, J. and Moreno-Muñoz, A. (2010). A web-based distributed measurement system for electrical Power Quality monitoring. In: *IEEE Sensors Applications Symposium*, pp. 206-211.
- Driesen, J. and Belmans, R. (2006). Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions. In: *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada.
- Elektro (2015). PD - 0385-0062/2013 - SMARTCITY - Modelo de Referência para Implantação de Redes Elétricas Inteligentes (Smart Grid). Disponível em: <[http://www2.elektro.com.br/html\\_pd\\_13/projetos/0385-0062\\_2013.html](http://www2.elektro.com.br/html_pd_13/projetos/0385-0062_2013.html)>. Acesso em: 17 jan. 2020.
- European Commission - Directorate-General for Research and Innovation, Horizon 2020 in brief - The EU Framework Programme for Research & Innovation, 2014
- Garcia, D. A. A. e Duzzi Jr., F. E. (2012). Aspectos de evolução do smart grid nas redes de distribuição, *Revista O Setor Elétrico*, abril, no. 75.
- Gomez, C., Vaschetti, J., Coyos, C. and Ibarlucea, C. (2013). Distributed Generation: impact on Protections and Power Quality, *IEEE Latin America Transactions*, vol.11, no.1, pp. 460-465.
- Güngör, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., Buccella, C., Cecati, C. and HanckeSmart, G. P. (2013). A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1.
- Güngör, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., Buccella, C., Cecati, C. and HanckeSmart, G. P. (2011). Grid Technologies: Communication Technologies and Standards, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4.
- IEEE (2007). IEEE 1547.3-2007 Guide for monitoring, information exchange, and control of distributed resources interconnected with electric power systems.
- IEEE (2008). IEEE Application guide for IEEE Std 1547, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems.
- Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência – INESC TEC [2019]. Laboratory of Smart Grids and Electric Vehicles. Disponível em: <<https://www.inesctec.pt/en/laboratories/laboratory-of-smart-grids-and-electric-vehicles>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- Instituto Lactec [2020]. Redes Elétricas Inteligentes (Smart Grid). Disponível em: <<https://lactec.org.br/pdei/redes-eletricas-inteligentes-smart-grid/>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- Islam, M., Ahmad, M., Islam, M., Mitul, A., Malek, M. and Rashid, M. (2012). Electronic energy meter with remote monitoring and billing system. In: *7th International Conf. on Electrical & Computer Engineering*, pp. 240-243.
- McBee, K. and Simões, M. G. (2012). Utilizing a Smart Grid Monitoring System to Improve Customer Voltage Quality, *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 738-743, vol. 3, no. 2.
- Miranda, V., Cardoso, P. A., Bessa, R. J., Decker, I. (2019). Through the looking glass: Seeing events in power systems dynamics, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 106, pp. 411-419.
- Monti, A., Ponci, F., Benigni, A. and Liu, J. (2010). Distributed Intelligence for Smart Grid Control, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrotechnical Review)*, vol. 86, no. 6, pp. 38-47.
- National Institute of Standards and Technology-NIST (2014). NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- National Renewable Energy Laboratory – NREL [2019]. Grid Modernization. Disponível em: <[http://www.nrel.gov/electricity/distribution/smart\\_grid.html](http://www.nrel.gov/electricity/distribution/smart_grid.html)>. Acesso em 17 jan. 2020.
- Rönnerberg, S.K., Bollen, M.H.J., Amaris, H., Chang, G.W., Gu, I.Y.H., Kocewiak, L.H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P.F. and Desmet, J. (2017). On waveform distortion in the frequency range of 2kHz–150kHz—Review and research challenges, *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 1-10.
- Ryerson University [2019]. Centre for Urban Energy, Ryerson University, Schneider Electric Smart Grid Lab. Disponível em: <<http://www.ryerson.ca/cue/index.html>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- Simões, M. G., et alli (2011). Smart-Grid Technologies and Progress in Europe and the USA. In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 383-390.
- Universidade de São Paulo [2019]. ENERQ – PEA – USP. Disponível em: <<http://www.pea.usp.br/pesquisa/linha-de-pesquisa/enerq-centro-de-estudos-em-regulamentacao-e-qualidade-de-energia/>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- University of Birmingham [2019]. Smart Grid Lab: Power and Control Group. Disponível em <<http://www.birmingham.ac.uk/research/activity/eese/power-control/power-control.aspx>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- University of Durham [2019]. Smart Grid Laboratory – University of Durham. Disponível em: <<https://www.dur.ac.uk/dei/research/smartgrids/laboratory/>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- University of North Carolina at Charlotte [2019]. Duke Energy Smart Grid Laboratory. Disponível em: <<http://epic.uncc.edu/laboratories/duke-energy-smart-grid-laboratory>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- University of Ottawa [2019]. Ultra-Reliable and Low Latency Communications using Machine Learning. Disponível em: <<http://www.site.uottawa.ca/~merolka2/NETCORE/researchprojects.html>>. Acesso em 17 jan. 2020.
- Vendrusculo, E. A. (2001). *Estudo e implementação de estratégia para minimização de sobretensões produzidas por inversores PWM em sistemas de acionamento de motores elétricos com cabos longos*. 2001. 150p. Tese (doutorado) - UNICAMP, FEEC, Campinas, SP.
- Wei, X., Yu-hui, Z. and Jie-lin, Zhu (2009). Energy-efficient distribution in smart grid. In: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN)*.
- Yu, X. Y., Cecati, C., Dillon, T. and Simões, M. G. (2011). The New Frontier of Smart Grids, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 49-63.