

Grupo de Estudo de Sistemas de Distribuição-GDI

Aspectos da Implementação de um Laboratório Híbrido e Flexível de Análise de Microrredes no LASSE/FPTI-BR

RODRIGO BUENO OTTO* (1); ARTUR BOHNEN PIARDI(1); DABIT GUSTAVO SONODA(1); FELIPE CRESTANI DOS SANTOS(1); GUILHERME LOURO JUSTINO(1); RODRIGO ANDRADE RAMOS(2); FPTI(1);USP(2);

RESUMO

Nesse Informe Técnico é apresentada a proposta de infraestrutura laboratorial para análise de microrredes a ser implementada nas atuais dependências do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), pertencente ao Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (PTI-BR). Além de suas principais características, são apresentados aspectos que fundamentaram a sua concepção. Com a sua implantação, vislumbra-se a parceria com centros de pesquisas e empresas, de forma a transformar o LASSE em referência nacional no tema de microrredes, contribuindo para a formação de competência nacional, e servindo o setor elétrico brasileiro no âmbito do conhecimento das novas tecnologias dos sistemas elétricos futuros.

PALAVRAS-CHAVE

Microrredes, Infraestrutura Laboratorial de Simulação, Simulação em Tempo Real, *Hardware-in-the-Loop* (HIL), Sistemas Reais e Emulados.

1.0 - INTRODUÇÃO

O processo de desregulamentação dos sistemas elétricos, evento que abriu caminho para acesso de produtores independentes de energia e adicionou competitividade ao mercado de energia elétrica (1), somado às necessidades demandadas pelas economias industrializadas caracterizadas pela diversificação da matriz energética e pelo aumento de eficiência nos processos de produção e transporte de energia elétrica (2), forneceu subsídios para o advento do conceito de Geração Distribuída (GD). Para os propósitos desse trabalho, a GD pode ser caracterizada como a geração de energia elétrica observada nos níveis de distribuição dos sistemas elétricos – ou seja, próxima dos centros consumidores – através de geradores de pequena capacidade (3,4), as quais são majoritariamente baseadas em fontes renováveis de energia.

Antes do conceito de GD, os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs) possuíam características predominantemente passivas, sendo observado um baixo grau de automação em seus elementos, cujo principal objetivo era atender suas cargas com confiabilidade e valores adequados de tensão e frequência, sendo verificado nos mesmos um fluxo unidirecional de potência no sentido da subestação para as cargas. A partir do surgimento da GD esse paradigma operativo foi substancialmente modificado (5). Além das características intermitentes das fontes renováveis de energia, novas possibilidades operativas foram conferidas aos SDEEs, como por exemplo, a operação autônoma com relação ao sistema de grande porte, e a depender do nível de penetração dessa modalidade de geração, o estabelecimento de um fluxo bidirecional de potência. A fim de que todos os potenciais benefícios provenientes da GD fossem completamente alcançados, foi verificada a necessidade de uma reformulação da operação dos SDEEs através do aumento do nível de automação dos seus elementos, dando origem ao conceito de microrredes. Devido ao fato deste ser um conceito amplo que envolve

(*) Av. Tancredo Neves, n° 6731 – CEP 85.867-900 – Foz do Iguaçu, PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3576-7089 – Email: rodrigobueno@pti.org.br

uma série de fatores, não existe uma única definição para o conceito de microrredes. Entretanto, para fins deste trabalho, uma microrrede pode ser descrita como conjuntos de cargas e Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) – os quais são compostos por geradores distribuídos e Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) – dispostos em uma configuração arbitrária e operados de forma coordenada com o objetivo principal de fornecer energia aos seus consumidores de forma confiável e eficiente, sendo o conglomerado conectado ao sistema de grande porte no nível de distribuição através de um Ponto Comum de Conexão (PCC) (6,7,8).

De forma a realizar suas tarefas conforme o esperado, as microrredes são constituídas por complexos sistemas elétricos, de controle e de comunicação, os quais operam de forma coordenada (9). Devido ao fato de ser razoável afirmar que as microrredes farão parte dos futuros SDEEs (10), bem como a sua inerente complexidade de operação, torna-se mandatória a caracterização do comportamento desses sistemas. Nesse contexto, é observado em nível mundial uma série de iniciativas de implantação de sistemas testes (8,10) e infraestruturas laboratoriais (11,12) dedicadas a analisar sistemas elétricos com essas características. É válido destacar que esse movimento se deve em grande parte ao fato de ainda existir uma série de desafios que envolvem esse conceito para serem superados (7,13,14).

Seguindo a tendência mundial, foi verificada a viabilidade da implantação de um laboratório para a realização de análises de microrredes na atual infraestrutura laboratorial do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), localizado nas dependências do Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (PTI-BR). Fundamentado nos conceitos de *Control-Hardware-in-the-Loop* (CHIL) e *Power-Hardware-in-the-Loop* (PHIL), em aplicação conjunta com dispositivos reais e emulados – característica que adiciona flexibilidade de análise e representação, o principal objetivo da infraestrutura proposta é a de promover pesquisa nessa área do conhecimento no território nacional, com o mesmo nível de excelência observado em centros internacionais de pesquisa, atendendo as necessidades do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) do ponto de vista técnico e regulatório.

A partir do contexto apresentado nos parágrafos supracitados, em função do atual foco dado ao tema de microrredes pelas comunidades científica e industrial, o principal objetivo desse trabalho é o de apresentar aspectos da infraestrutura laboratorial que se pretende implementar, bem como os principais potenciais de desenvolvimento de pesquisa a partir da mesma, evidenciando pontos obtidos a partir das experiências obtidas durante a sua fase de definição. A fim de apresentar as ideias de uma forma clara e organizada, esse Informe Técnico (IT) está estruturado como segue: a Seção 2.0 apresenta os métodos de análise de microrredes em ambiente laboratorial comumente reportados na literatura; a Seção 3.0 aborda a infraestrutura laboratorial proposta e os seus principais elementos constituintes; a Seção 4.0 evidencia as possibilidades de análise previstas a partir da implantação da infraestrutura proposta; e finalmente, a Seção 5.0 encerra o trabalho com suas principais conclusões e perspectivas futuras de desenvolvimento.

2.0 - MÉTODOS LABORATORIAIS DE ANÁLISE DE MICRORREDES

Os benefícios e justificativas para a aplicação do conceito de microrredes já estão consolidados na literatura técnica (7,10). Entretanto, do ponto de vista prático, ainda existem desafios que necessitam ser superados para fazer com que todos os benefícios provenientes deste conceito sejam totalmente aproveitados (7,13,14). Assim, torna-se imprescindível o conhecimento de todos os fenômenos que envolvem esse tema.

A Figura 1 apresenta a arquitetura geral de uma microrrede, a qual é caracterizada por três principais camadas (8,9):

- Primeira camada: constituída pelos equipamentos de potência (em outros termos, o próprio sistema elétrico);
- Segunda Camada: constituída pela infraestrutura de comunicação, em que os dispositivos são interconectados por uma rede ciber-física através de protocolos de comunicação;
- Terceira Camada: constituída pelo sistema de controle de alto nível, o qual contém os controladores supervisórios e Interfaces Homem-Máquina (IHMs).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

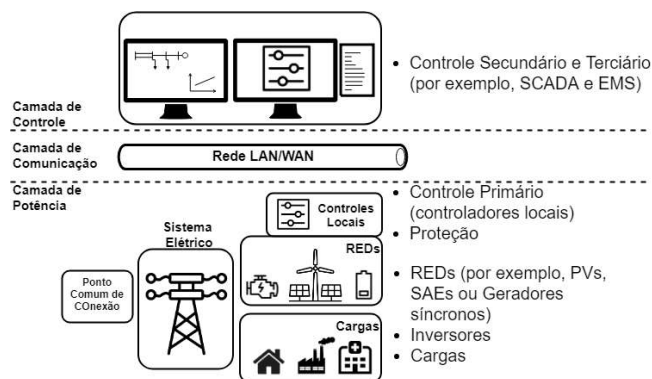


FIGURA 1 – Arquitetura geral de uma microrrede

Na primeira camada, a integração de diversos tipos de REDs e seus respectivos controles primários introduz um número considerável de desafios técnicos, os quais necessitam ser avaliados para garantir que os benefícios provenientes do conceito de microrredes sejam alcançados (7,9). Microrredes com a forte presença de fontes intermitentes, como por exemplo a solar ou a eólica, idealmente requerem a utilização conjunta com SAEs, a fim de garantir uma operação adequada do sistema. Além disso, altos níveis de penetração de REDs introduzem novos desafios para os atuais SDEEs, como por exemplo: níveis de confiabilidade, operação econômica e eficiente; comportamentos dinâmicos indesejados ou, em casos mais críticos, instáveis; controles locais de tensão e frequência;ilhamento não-intencional; descoordenação ou até mesmo operação inadequada de sistemas de proteção; e fluxo bidirecional de potência nos ramais de distribuição.

Em relação aos desafios associados a segunda camada, atenção especial deve ser direcionada para a integração de diferentes protocolos de comunicação proprietários (não-livres), o que pode vir a comprometer os requisitos de tempo proveniente dos sistemas de controle. Outra questão está diretamente relacionada a disponibilidade, confiabilidade e escalabilidade que os sistemas de comunicação podem apresentar ao ambiente de microrredes (9), atendendo em paralelo os requisitos mínimos do ponto de vista de cibersegurança. Do ponto de vista do sistema de proteção, a inclusão de um sistema de comunicação introduz um novo problema associado ao atraso de tempo inerente ao processo de transmissão de dados.

Na terceira camada são verificados desafios de origem técnica e também não-técnica para a implantação de controladores de microrredes. Esses desafios são caracterizados pela falta de regras regulatórias de operação e de estabelecimento de modelos de negócios para serviços presentes no ambiente de microrredes. Por outro lado, questões técnicas incluem a coordenação entre diferentes REDs e controladores de microrredes, a fim de estabelecer uma estratégia unificada de operação e controle do sistema (8,10), bem como o aprimoramento geral do comportamento dinâmico do sistema de modo a melhorar suas margens de estabilidade.

Com o objetivo de identificar e propor soluções para superar os desafios anteriormente apresentados, diversas abordagens são propostas na literatura para a avaliação da performance de equipamentos e diretrizes de operação, controle, e proteção aplicados em microrredes – cada uma apresentando suas vantagens e desvantagens (15). Em termos gerais, conforme apresentado na Figura 2, essas abordagens podem ser separadas em três classes distintas:

- Abordagem puramente física;
- Abordagem puramente simulada;
- Abordagem intermediária.

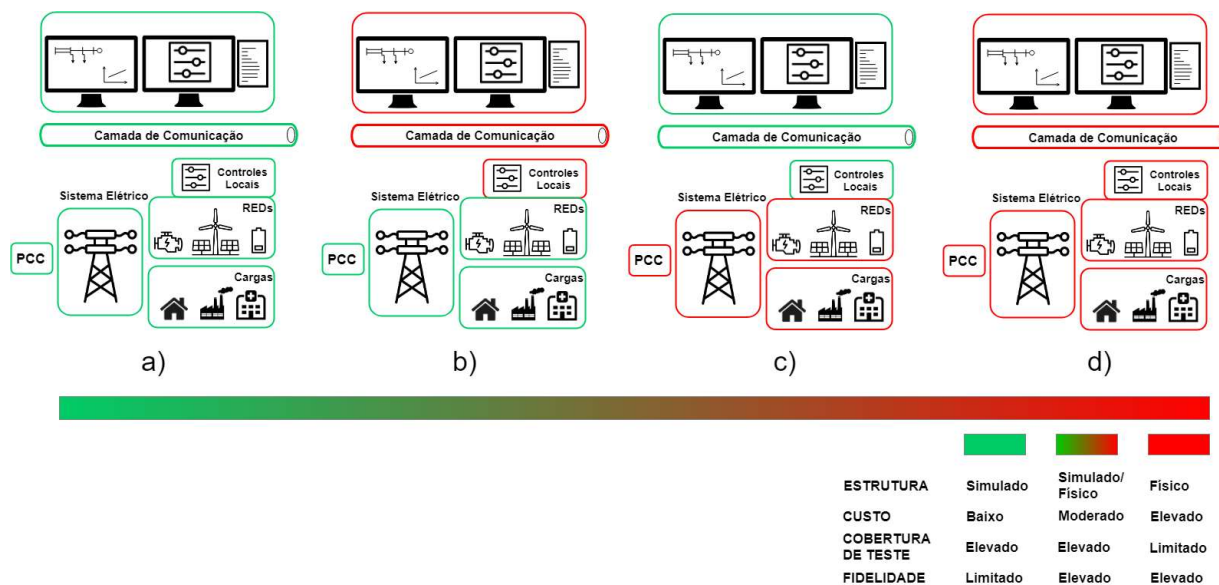


FIGURA 2 – Abordagens de análise de microrredes reportadas na literatura – a) Sistema puramente simulado – b) e c) ambientes intermediários com utilização dos conceitos de CHIL e PHIL – d) Sistema puramente físico

A abordagem puramente física (Figura 2.d) utiliza apenas dispositivos reais para realizar as análises desejadas. Por essa razão, apresenta o comportamento real dos elementos que irão operar em uma microrrede, representando fenômenos encontrados em campo, como ruídos em sinais de controle e potência e eventuais problemas de comunicação entre equipamentos. Por outro lado, essa abordagem possui como principais limitações a impossibilidade de análise envolvendo qualquer cenário de operação – especialmente os piores casos – e de representação de diferentes topologias e capacidades nominais daquelas fornecidas pelos existentes na infraestrutura. Exemplos desse tipo de abordagem podem ser encontrados: no *Engineering Laboratory Building*, da Universidade do Texas (16); no projeto *Secure Scalable Microgrid Test Bed* desenvolvido pela *Sandia National Laboratories* (17); e no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP), localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (11).

Ao contrário do caso anterior, a abordagem puramente simulada (Figura 2.a) – a qual, dentre as citadas, constitui a abordagem mais simples, econômica e fácil de operar – permite a avaliação de qualquer cenário operativo da microrrede sob análise, possibilitando a representação de diferentes topologias, equipamentos e eventos. Entretanto, a principal limitação dessa abordagem é a eventual diferença entre o comportamento obtido via simulação e aqueles verificados em um sistema real, sendo este um efeito diretamente relacionado a imprecisões de representação e modelagem no ambiente computacional (15).

As abordagens intermediárias (Figuras 2.b e 2.c) são capazes de combinar as vantagens dos ambientes puramente físicos e simulados. Neste caso, uma parte do sistema avaliado pode ser representado por um modelo matemático digital que realiza interface com equipamentos reais aplicados no sistema elétrico. Assim, essas abordagens permitem a análise de dispositivos reais com níveis de fidelidade de resultados adequados, sem a necessidade de um sistema físico completo. O principal problema observado nas metodologias intermediárias é caracterizado pela escolha de uma interface apropriada entre a plataforma de simulação e os dispositivos físicos reais. Para essas aplicações, é recomendado o uso de um *hardware* com capacidades de simular sistemas elétricos com processamento de passos de integração de forma determinística, como é o caso de Simuladores em Tempo Real (STRs) (18). Os STRs usualmente aplicados em análises de sistemas elétricos incluem soluções das fabricantes RTDS®, Opal-RT®, Typhoon HIL® e Speedgoat®.

A grande vantagem dos STRs está em possibilitar a interface de dispositivos externos – comumente referenciados como Dispositivos em Teste (DTs) – com o sistema elétrico sendo simulado, permitindo a caracterização do comportamento destes em condições operacionais muito próximas das encontradas em

campo, até mesmo sobre condições extremas, entretanto em um ambiente controlado. Esse tipo de simulação é usualmente referenciado na literatura técnica como testes *Hardware-in-the-Loop* (HIL), e pode ser classificado em duas subclasses (18,19,20):

- **Control-HIL:** nesse caso, o qual é representado pela Figura 2.b, elementos reais de controle ou relés de proteção são interfaceados com o STR através da troca de sinais analógicos ou digitais a nível de sensoriamento. Nessa classe, também é possível estabelecer interfaces via protocolos de comunicação industriais;
- **Power-HIL:** nesse caso, o qual é representado pela Figura 2.c, equipamentos de potência – como por exemplo, inversores de frequência ou cargas eletrônicas – são interfaceadas com o modelo digital do sistema elétrico de potência. Nessa aplicação, um amplificador de quatro quadrantes (4Q) é requerido, a fim de que seja realizado o intercâmbio de potência entre o modelo simulado e o DT, fazendo com que este constitua parte do sistema de potência simulado. A partir do exposto, no atual estado da arte é razoável afirmar que a metodologia PHIL constitui a abordagem de simulação mais avançada e desafiadora reportada na literatura.

Exemplos de plataformas HIL com o uso de STRs para avaliação de microrredes são encontrados: no *Energy Systems Integration Facility* (ESIF), localizado nas dependências do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (12); no projeto *KERI Microgrid*, realizado pelo *Korea Electrotechnology Research Institute* (21); e no *Lincoln Laboratory*, localizado no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (22).

3.0 - INFRAESTRUTURA LABORATORIAL PROPOSTA

Com o objetivo de contribuir com os aspectos apresentados nas seções anteriores, esse trabalho propõe uma infraestrutura laboratorial híbrida e flexível para a realização de análises de microrredes. Ressalta-se que os termos híbrido e flexível são utilizados aqui devido ao fato das quatro abordagens apresentadas na Figura 2 serem contempladas, resultando na capacidade de realização de análises em ambientes puramente simulados, puramente físicos ou intermediários, com possibilidade de operação separada ou conjunta.

A plataforma proposta será integrada junto a atual infraestrutura do LASSE. Esse laboratório desempenha suas atividades para o SEB há mais de uma década, trabalhando especialmente em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) e fornecendo serviços com alto conteúdo técnico para a Itaipu Binacional, concessionárias distribuidoras e empresas do setor privado. A atual infraestrutura laboratorial do LASSE inclui um STR do fabricante RTDS®, a qual é utilizada principalmente para a realização de testes CHIL de sistemas de proteção e de controle aplicados em sistemas elétricos. A partir desse estágio, a capacidade de simulação e processamento do STR do LASSE será ampliada com o objetivo de realizar análises utilizando a metodologia PHIL.

O diagrama unifilar da infraestrutura laboratorial que espera-se implantar no LASSE é apresentado na Figura 3. A mesma é constituída por vários elementos, incluindo interfaces de eletrônica de potência (como por exemplo, inversores e conversores), geradores com a capacidade de representar diferentes fontes primárias (reais ou emuladas), amplificadores 4Q, bem como sistemas de monitoramento e controle. Destaca-se que no atual estágio de desenvolvimento, a infraestrutura apresentada ainda se encontra em fase de concepção. Portanto, a apresentação de seus aspectos e principais características será majoritariamente realizada a partir de um ponto de vista qualitativo, visto que parcela dos seus equipamentos ainda não estarem completamente definidos. Mas de um modo geral, é prevista que a infraestrutura possua uma potência nominal de 100kVA (sendo esta potência essencialmente definida pela potência dos amplificadores 4Q aplicados), operando em baixa tensão, visando a segurança dos seus operadores.

De uma forma geral, a infraestrutura proposta pode ser separada em quatro principais grupos, conforme descrito nas próximas subseções.

3.1 Subsistema de Elementos Reais

Como o próprio nome sugere, esse subsistema consiste de um conjunto de REDs e cargas – por exemplo, painéis PVs, gerador síncrono, sistema de armazenamento de energia através de baterias, cargas controláveis e

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

não controláveis pertencentes ao próprio laboratório – formando assim um ambiente real de microrrede. Seu objetivo é o de realizar análises fundamentadas na abordagem puramente física representada pela Figura 2.d, envolvendo soluções comerciais ou personalizadas. Como uma microrrede real, esse grupo pode ser operado tanto no modo conectado com a rede principal, quanto no modo ilhado. Será permitido ao usuário interagir com os elementos da microrrede através de um sistema SCADA, o qual será especialmente desenvolvido para essa aplicação.

3.2 Subsistema de Elementos Emulados

Esse subsistema será responsável por complementar o subsistema de elementos reais, visto que o mesmo não depende de variáveis externas ou de lenta alteração para modificar o seu ponto de operação (como por exemplo, o nível de insolação nos painéis solares para o primeiro caso ou o estado de carga das baterias para o segundo caso), permitindo assim a repetibilidade e a flexibilidade nas análises realizadas. Esse subsistema também permitirá a representação de diferentes fontes de energia – como geradores eólicos, geradores a células combustíveis e microturbinas a gás – distintas tecnologias de armazenamento, carregadores veiculares e cargas controláveis. A estrutura proposta também irá permitir a representação de um barramento de Corrente Contínua (CC). A conexão entre os barramentos em Corrente Alterada (CA) e CC será realizada através de conversores apropriados. Os usuários poderão controlar os elementos emulados de duas maneiras: via STR ou via sistemas supervisórios. Semelhante a rede de elementos reais, esse subsistema também permitirá a realização de análises usando soluções comerciais ou personalizadas.

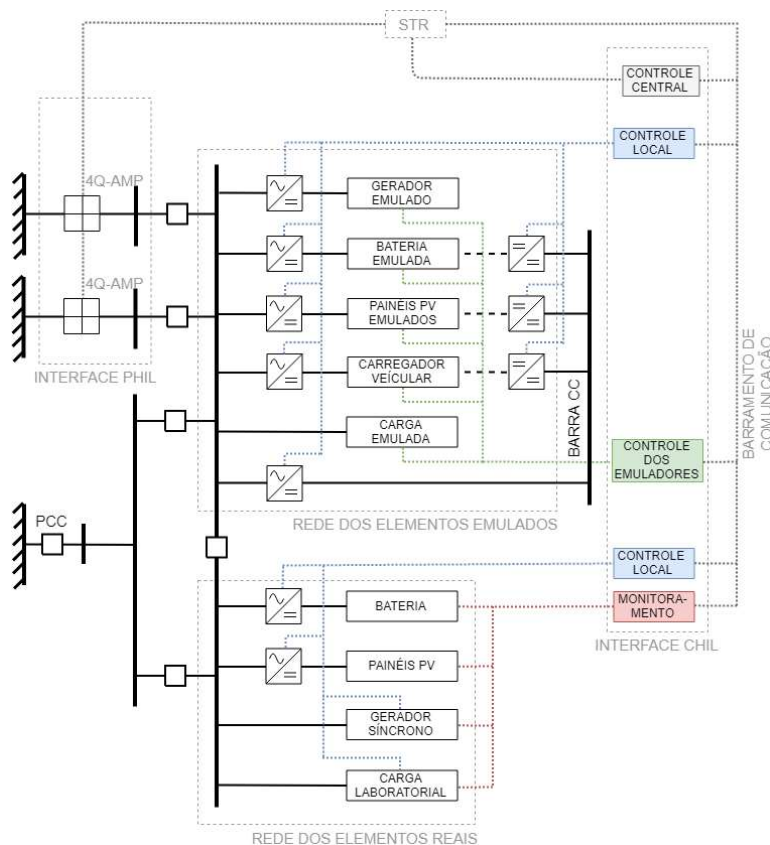


FIGURA 3 – Infraestrutura laboratorial proposta para o LASSE

3.3 Subsistema Interface PHIL

A interface de potência entre o STR e os dispositivos físicos será realizada pelo subsistema “Interface PHIL”, no qual será possível realizar as análises representadas pela Figura 2.c. Esse subsistema consiste basicamente de um conjunto de amplificadores 4Q que tem por função realizar o balanço de potência entre os dispositivos físicos e o sistema elétrico simulado no STR, permitindo assim a representação de elementos que operam tanto no modo *sink* (absorvendo potência) quanto no modo fonte (fornecendo potência), sendo possível – a depender da aplicação – a representação de redes CA e CC.

Amplificadores 4Q em escala comercial são comumente classificados em lineares e não-lineares, e geralmente constituem dispositivos críticos para a estabilidade e precisão da simulação (18). Amplificadores lineares possuem como vantagem uma elevada largura de banda de resposta em frequência, e por consequência, baixos tempos de resposta. São essas características que permitem a representação de transitórios rápidos no ambiente de simulação. Entretanto, sua principal desvantagem é a reduzida capacidade de potência quando em operação no modo *sink* – alguns fabricantes informam o valor de 30% em relação a capacidade nominal do equipamento (quando este opera no modo fonte). Essa limitação está relacionada a capacidade de dissipação térmica de seus circuitos internos, os quais são responsáveis por consumir internamente a potência drenada. Por outro lado, amplificadores 4Q não-lineares não apresentam limitações quando operam no modo *sink*. Entretanto, decorrente da presença de circuitos adicionais de controle, essa classe de amplificadores apresenta uma reduzida largura de banda de resposta em frequência, e por consequência, tempos de resposta elevados. Essas características implicam na necessidade de aumento do passo de integração da simulação, o que vem em detrimento da habilidade de representação de elementos que apresentam transitórios rápidos nos respectivos comportamentos.

Do exposto no último parágrafo, infere-se que uma classe de amplificadores complementa a outra. Desse modo, na infraestrutura provisionada será considerada as duas classes de amplificadores. Esses amplificadores serão utilizados de duas formas no ambiente de testes, conforme apresentado na Figura 4. Na primeira, os amplificadores irão operar como emuladores de rede, permitindo representar o comportamento de determinadas barras do sistema elétrico simulado no STR, objetivando a conexão de elementos pertencentes aos subsistemas de elementos reais e emulados, conforme apresentado na Figura 4.a. Nessa aplicação é requerida a habilidade da operação no modo *sink*, sem a necessidade da representação de dinâmicas rápidas, sendo portanto adequada a aplicação da classe de amplificadores não-lineares. Por sua vez, na segunda forma de aplicação os amplificadores 4Q irão realizar a interface entre os subsistemas de elementos reais e emulados com modelos matemáticos embarcados no STR, conforme apresentado pela Figura 4.b. Esses modelos podem representar determinados dispositivos como fontes ou cargas com características específicas, e que não são cobertas pelos elementos presentes nos outros subsistemas. Nessa aplicação – dependendo do elemento modelado no STR – é requerido baixos tempos de resposta para a adequada representação, sendo conveniente o uso de amplificadores lineares.



FIGURA 4 – Aplicações dos amplificadores 4Q na infraestrutura laboratorial proposta

3.4 Subsistema Interface CHIL

Outra abordagem para integrar os ambientes físicos e simulados é a simulação CHIL. Essa classe de simulação é responsável por realizar análises de sistemas de controle e proteção através de sinais de baixa amplitude, conforme apresentado pela Figura 2.b. Essa interface pode ser realizada através da conexão direta do STR e o DT através de sinais analógicos ou através de protocolos de comunicação industriais. Algumas aplicações podem requisitar sinais de tensão e corrente com amplitudes superiores as fornecidas pelo STR. Nesses casos são utilizados amplificadores de dois quadrantes (2Q), os quais atuam apenas como fontes de tensão ou corrente. Como amplificadores pertencentes a essa classe não necessitam fornecer ou consumir potência para o



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

3891
GDI/17

DT, ao contrário do que ocorre em aplicações PHIL, a performance do amplificador não é tão crítica em aplicações CHIL.

3.5 Subsistema de Comunicação

Caracterizado por um barramento de comunicação, esse subsistema apresenta duas funções principais: comunicar todos os equipamentos na plataforma laboratorial proposta, e fornecer uma rede de comunicação emulada para representar diferentes cenários de estudo. Em relação a primeira função, a comunicação entre o STR e outros elementos de controle é realizado através do barramento de comunicação. Por essa razão, o mesmo deve garantir uma mínima latência durante o processo de comunicação. Já a segunda função está direcionada em contribuir para a flexibilidade da plataforma laboratorial proposta, em que será possível emular distintas topologias, diferentes ambientes físicos e protocolos de comunicação industriais. Através dessa abordagem, o usuário será capaz de realizar análises no sistema de comunicação considerando diferentes cenários envolvendo modificações na taxa de transferência, na latência, bem como nos índices de precisão da informação processada.

3.6 Subsistema STR

O subsistema STR fornece a interface entre o modelo digital simulado e os dispositivos elétricos físicos, tanto no nível de controle quanto no nível de potência. Com relação ao ambiente simulado, todos os componentes que não são dispositivos físicos devem ser adequadamente representados no modelo digital. Com relação a atual infraestrutura do LASSE, o laboratório possui quatro racks da fabricante RTDS® com arquitetura de processamento baseada em placas do tipo GPC. Entretanto, essa estrutura será substituída pela plataforma NovaCor, de mesma fabricante. A escolha dos produtos da plataforma RTDS® é motivada pela experiência que a equipe técnica possui, visto que o LASSE trabalha há mais de uma década em parceria com essa fabricante.

4.0 - CAPACIDADE DE ANÁLISE DA INFRAESTRUTURA LABORATORIAL PROPOSTA

A partir da infraestrutura proposta será possível realizar uma série de análises, contribuindo com o desenvolvimento e proposição de soluções às lacunas técnicas e regulatórias associadas ao conceito de microrredes. Em termos gerais, a avaliação de uma microrrede em um ambiente laboratorial permite a realização de testes em várias condições operativas, incluindo casos extremos, sem causar danos aos elementos da rede e até mesmo aos consumidores conectados a mesma (15). Dentre os aspectos que podem ser avaliados na infraestrutura proposta, destacam-se os apresentados na sequência:

- Controle e Gestão de REDs: testes de algoritmos de controle para a gestão de fontes de energia locais (por exemplo, fontes renováveis, geradores e armazenadores de energia) e cargas da microrrede avaliada, considerando tanto o modo conectado com a rede principal quanto o modo isolado (15). Nesse aspecto, será possível analisar o despacho de unidades sob incerteza nos níveis de geração e demanda, a fim de serem determinados níveis apropriados de reservas de energia para que os índices de confiabilidade de operação de microrredes sejam mantidos dentro de valores adequados. Além disso, será possível estabelecer linhas de ação para obter uma operação confiável e econômica para esses sistemas, até mesmo para casos com altos níveis de penetração de geração intermitente;
- Impactos de REDs sobre os SDEEs: verificação do impacto da conexão de diferentes tecnologias de geração – despacháveis ou não – e sistemas de armazenamento de energia sobre a performance de SDEEs com diferentes topologias;
- Microrredes CC: análises de microrredes formadas por fontes e cargas do tipo CC. Essa classe de microrredes é de comum aplicação em sistemas marítimos ou aeronáuticos. Devido a isso, esse tipo de análise apresenta grande interesse por parte de agências militares e fabricantes de aeronaves e embarcações;
- Eletrônica de Potência: realização de testes de diferentes topologias e controles aplicados a interfaces de eletrônica de potência presentes em fontes renováveis de energia e sistemas de armazenamento, atentando a aspectos correlatos a performance e a eficiência dos conversores;
- Comunicação: avaliação do impacto de diferentes protocolos de comunicação, e os efeitos da operação inadequada desses sistemas sobre o desempenho da microrrede. Nesse mesmo tema, será possível propor e testar novos protocolos de comunicação para aplicações em microrredes;

Suporte Regulatório: da mesma forma que o verificado em escala mundial, o conceito de microrredes é um tema relativamente recente para o SEB. Nesse contexto, a infraestrutura proposta pode ser utilizada para a formulação de normas de operação e concepção de microrredes;

- Propostas de Sistemas de Gestão pelo Lado da Demanda: proposição de esquemas de gestão pelo lado da demanda para permitir aos consumidores – com o consenso da concessionária distribuidora – reagirem as condições de geração e energia armazenada na microrrede e de novas arquiteturas de medidores inteligentes. A participação ativa dos consumidores é benéfica para o ambiente de microrredes, especialmente aquelas que operam isoladas dos sistemas de grande porte (15);
- Cibersegurança: avaliação de aspectos associados a cibersegurança sobre a performance e confiabilidade de microrredes. Além disso, será possível propor e testar arquiteturas de *firewalls* para evitar problemas dessa natureza;
- Aspectos Associados ao Ilhamento e Ressincronização: realização de testes e proposição de algoritmos para a identificação da operação ilhada, bem como para o processo de ressincronização com o sistema, considerando diferentes composições de tecnologias de geração, topologias de rede e cargas;
- Proteção: testes de funções e conformidade de parametrização de sistemas de proteção usualmente aplicados ao ambiente de microrredes. Nesse mesmo tema, será possível propor novos algoritmos que sejam aderentes a realidade operativa de microrredes, especialmente aquelas que apresentam um elevado grau de penetração de fontes interfaceadas com a rede através de dispositivos de eletrônica de potência;
- Avaliação de Desempenho de Regime Permanente e Dinâmico: realização de análises do ponto de vista sistêmico, obtendo a caracterização da interação entre os elementos que compõem a microrrede. Através dessa avaliação serão obtidos o perfil de tensão do sistema, níveis de curto-circuito, perdas, e o desempenho dinâmico;
- Qualidade de Energia Elétrica: análises de aspectos associados a qualidade de energia elétrica, especialmente em sistemas com uma alta penetração de REDs interfaceadas com a rede através de dispositivos de eletrônica de potência, e com a presença massiva de cargas com características não-lineares;
- Testes de Conformidade: realização de testes para verificar a conformidade de dispositivos (como por exemplo, inversores) com as atuais normas de conexão e boas práticas de engenharia;
- Treinamentos: realização de treinamentos em temas associados a microrredes, especialmente do ponto de vista operacional, para colaboradores de empresas do setor elétrico, estudantes e pesquisadores.

5.0 - CONCLUSÕES


As microrredes constituirão importante parcela dos futuros sistemas elétricos. O movimento em direção a esta tendência é decorrente da necessidade do uso de fontes de energia de uma forma mais inteligente e eficiente, bem como pelo constante crescimento nos níveis de automação nos patamares de distribuição dos sistemas elétricos. Sobre os pontos de vista apresentados, se torna mandatório o conhecimento e o domínio de aspectos associados a microrredes para a criação de massa crítica nacional nesse tema. Nesse contexto, esse trabalho faz a sua contribuição através da proposição de uma infraestrutura laboratorial dedicada a análises de microrredes. Com a perspectiva de ser implantada na atual infraestrutura do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), localizado nas dependências do Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (PTI-BR), a infraestrutura laboratorial proposta irá contemplar as principais características de sistemas verificados em institutos internacionais e laboratórios de referência nesse tema. Como seu principal diferencial, pode ser destacada a flexibilidade de análise adicionada pela presença do STR com o uso do conceito PHIL, bem como a presença de elementos reais e emulados, os quais podem ser operados em conjunto ou até mesmo, dependendo das necessidades, de forma isolada. Com sua implantação, vislumbra-se a parceria com centros de pesquisas e empresas, de forma a transformar o LASSE em referência nacional no tema de microrredes, contribuindo para a formação de competência nacional, e servindo o setor elétrico nacional no âmbito do entendimento das novas tecnologias dos futuros sistemas elétricos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) B. Lundstrom, M. Shirazi, M. Coddington and B. Kroposki, "An Advanced Platform for Development and Evaluation of Grid Interconnection Systems Using Hardware-in-the-Loop: Part III – Grid Interconnection System Evaluator," *in* 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Denver, CO, 2013, pp. 392-399.
- (2) A. Keyhani, A. Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems, Volume 1, New York: Wiley-IEEE Press, 2011, p. 592.
- (3) J. Driesen and R. Belmans, "Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions," *in* 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, p. 1-8.
- (4) R. H. Salim, Uma Nova Abordagem para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos. Tese em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- (5) W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis. 1st ed. Boca-Raton, US: CRC Press, 2002.
- (6) DOE, Summary Report: 2012 Microgrid Workshop Report, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability Smart Grid R&D Program, Chicago, Illinois, 2012.
- (7) D. E. Olivares *et al.*, "Trends in Microgrid Control," *in* IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, Jul. 2014, pp. 1905-1919.
- (8) CIGRE. Working Group C6.22 Microgrids Evolution Roadmap, Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience. 2015.
- (9) A. Bani-Ahmed and A. Nasiri, "Development of Real-Time Hardware-in-the-Loop Platform for Complex Microgrids," *in* 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, 2015, pp. 994-998.
- (10) N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," *in* IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007.
- (11) M. S. Ortmann *et al.*, "Architecture, Components and Operation of an Experimental Hybrid AC/DC Smart Microgrid," *in* 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Florianópolis, 2017, pp. 1-8.
- (12) NREL, "ESIF 2017" Modernizing Our Grid and Energy System. Energy Systems Integration Facility (ESIF) 2017 Annual Report, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- (13) P. Dondi, *et al.* "Network Integration of Distributed Power Generation". Journal of Power Sources, vol. 106, Issues 1–2, 2002, pp 1-9.
- (14) J. A. P. Lopes, "Integrating Distributed Generation into Electric Power Systems: A Review of Drivers, Challenges and Opportunities", *in* Electric Power Systems Research, vol. 77, Issue 9, 2007, pp. 1189-1203.
- (15) A. Maitra *et al.*, "Microgrid Controllers: Expanding Their Role and Evaluating Their Performance," *in* IEEE Power and Energy Magazine, vol. 15, no. 4, pp. 41-49, July-Aug. 2017.
- (16) V. Salehi, A. Mohamed and O. A. Mohammed, "Implementation of real-time optimal power flow management system on hybrid AC/DC smart microgrid," *in* 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, 2012, pp. 1-8.
- (17) S. Glover *et al.*, "Secure Scalable Microgrid Test Bed at Sandia National Laboratories," *in* 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Bangkok, 2012, pp. 23-27.
- (18) RTDS. Power Hardware in the Loop Simulation (PHIL), Real Time Digital Simulator PHIL Report, Canadá, 2018, p. 42.
- (19) W. Ren, M. Steurer and T. L. Baldwin, "Improve the Stability and the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms," *in* IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 4, pp. 1286-1294, Jul-Ago. 2008.

- (20) J. Wang, Y. Song, W. Li, J. Guo and A. Monti, "Development of a Universal Platform for Hardware In-the-Loop Testing of Microgrids," *in* IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 4, pp. 2154-2165, Nov. 2014.
- (21) Bailu Xiao *et al.*, "Development of Hardware-in-the-Loop, Microgrid Testbed," *in* 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 1196-1202.
- (22) J. H. Jeon *et al.*, "Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid," *in* IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 12, pp. 2919-2929, Dec. 2010.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Autor de Contato:</p> <p>Nome: Rodrigo Bueno Otto</p> <p>Formação Acadêmica: bacharel em Engenharia Elétrica (UFPR, 2009). Mestrado em Engenharia de Energia aplicada a Agricultura (UNIOESTE, 2015). Atualmente cursa Doutorado em Engenharia Elétrica (USP, 2020).</p> <p>Experiência Profissional: gerente Do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE) no Parque Tecnológico de Itaipu – Brasil – PTI-BR desde 2010. Diretor do Instituto de Tecnologia Aplicada a Inovação – ITAI desde 2016.</p>
--	--