UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

LUIZ HENRIQUE LEITE ROSA

**Metodologia para desenvolvimento e aplicação de um emulador
de Redes Elétricas Inteligentes em ambiente controlado**

SÃO PAULO
2018

LUIZ HENRIQUE LEITE ROSA

**Metodologia para desenvolvimento e aplicação de um emulador
de Redes Elétricas Inteligentes em ambiente controlado**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Ciências. Programa: Engenharia Elétrica.

SÃO PAULO
2018

LUIZ HENRIQUE LEITE ROSA

**Metodologia para desenvolvimento e aplicação de um emulador
de Redes Elétricas Inteligentes em ambiente controlado**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Ciências. Programa: Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência.

Orientador:
Prof. Titular Nelson Kagan

SÃO PAULO
2018

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Josy A. C. Rosa, pelo
companheirismo e apoio incondicional
em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas bênçãos e sustento nos momentos difíceis.

À minha esposa, Josy Alvarenga Cal Rosa, presente de Deus na minha vida, pelo companheirismo, compreensão e apoio em todos os momentos.

À minha família, pelo carinho e apoio em todas as horas e por tornarem a minha vida mais feliz.

Ao amigo, professor e orientador, Prof. Nelson Kagan, pela oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa, pela confiança depositada e pelas valiosas contribuições no presente trabalho.

Aos amigos Prof. Carlos Frederico M. Almeida e Marcos R. Gouvea, pelo importante auxílio na elaboração da tese e suporte fundamental ao meu crescimento profissional.

Aos amigos do ENERQ/USP, pela convivência diária e pela dedicação de todos ao projeto de pesquisa que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

Ao grupo EDP Brasil, pelos recursos disponibilizados para a implantação do Laboratório de Smart Grids da USP no âmbito do P&D ANEEL, e aos colaboradores da EDP que trabalharam no projeto, permitindo o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos colegas do Instituto Federal de São Paulo (IFSP) pela constante troca de conhecimentos.

À todos os meus amigos e familiares, muito obrigado!

“Entregue o seu caminho ao Senhor;
confie nEle, e Ele agirá.”
Salmos 37:5 (NVI)

RESUMO

O presente trabalho visa propor uma metodologia para desenvolvimento e aplicação de um inovador emulador de redes elétricas inteligentes (REIs) para testes sistêmicos de funcionalidades de Smart Grids envolvendo dispositivos inteligentes (hardware) e sistemas de tecnologia da informação (software) em ambiente laboratorial.

Além de dar uma dimensão da importância dos laboratórios de redes elétricas inteligentes para a pesquisa do tema, o levantamento bibliográfico apresentado neste trabalho permite concluir que as pesquisas envolvendo hardware-in-the-loop (HIL) tendem a concentrar suas análises nos equipamentos de hardware testados, como dispositivos de medição, equipamentos de potência (inversores de frequência e outros), dispositivos de controle e seus algoritmos e não em estudos que envolvam análises mais sistêmicas e interações dos dispositivos com sistemas de TI normalmente presentes nos Centros de Operação da Distribuição (COD), os quais cumprem papéis cada vez mais importantes nas funcionalidades de Redes Inteligentes.

A metodologia proposta parte da premissa de que um ambiente para testes de funcionalidades de Smart Grids deve permitir análises sistêmicas, não apenas focadas nos dispositivos de controle de uma porção particular da rede ou sistemas de automação específicos, mas devem envolver a maior porção de rede possível e necessária para a correta representação das redes elétricas inteligentes.

Neste sentido, a metodologia define e caracteriza os principais módulos e etapas de desenvolvimento de um emulador de redes elétricas inteligentes, ao mesmo tempo em que propõe soluções para os desafios de integração destes módulos, aplicando conceitos de hardware-in-the-loop, software-in-the-loop (SIL), e simulação com sincronização orientada a evento, além de propor soluções com simulação de sistemas de potência em regime

permanente e hardware de baixo custo que permitiram o desenvolvimento do emulador de redes em laboratório de Smart Grid.

As principais características do emulador de REIs desenvolvido e implementado no laboratório de Smart Grid, conforme a metodologia proposta, também são descritas neste trabalho.

Por fim, são apresentados os casos teste, mais especificamente provas de conceito, envolvendo redes de teste IEEE/PES e redes reais das concessionárias do grupo EDP, financiador do projeto de implantação do laboratório no âmbito do Programa de P&D ANEEL, os quais serviram de base para a avaliação do desempenho do emulador e discussões finais sobre as contribuições da metodologia de desenvolvimento proposta neste trabalho.

Palavras-chave: Redes elétricas inteligentes, Emulador de sistemas de potência, Laboratório de Smart Grids.

ABSTRACT

This work aims to proposing a methodology for the development and application of an innovative Smart Grid emulator for systemic testing of Smart Grids functionalities involving intelligent devices and information technology systems in a laboratory environment.

Besides demonstrating the importance of the Smart Grid for the subject research, the literature review clarifies that the research involving hardware-in-the-loop (HIL) tends to concentrate its analyses in the equipment under test, such as power devices, control devices and their algorithms. Instead, it should consider systemic studies involving the interaction of these devices with Operation Centre IT systems, so relevant to the Smart Grid functionalities.

The proposed methodology is based on the premise that an environment for testing Smart Grids functionalities should allow systemic analysis instead of focusing only on control devices of a specific area or specific automation systems. Instead, it should involve a more detailed representation of the network that is necessary for the correct representation of the Smart Grid.

In this direction, the methodology defines and characterizes the development stages and main modules of a Smart Grid emulator and proposes solutions for integration issues. It applies concepts of hardware-in-the-loop, software-in-the-loop (SIL), simulation with event-driven synchronization, besides steady-state power simulation and low-cost hardware solutions that enabled the development of the Power grid emulator at a Smart Grid laboratory. The main features of the Smart Grid emulator developed and implemented at the Smart Grid laboratory, according to the proposed methodology, are also described in this work.

Finally, the description of the Smart Grid laboratory, test cases and proofs of concepts involving IEEE/PES test feeders and real networks of the EDP utility, sponsor of the project for laboratory implementation under the ANEEL R&D Program, are presented to prove the Emulator performance and to discuss the contribution of the methodology herein proposed.

Keywords: Smart Grids, Power system emulator, Smart Grid Laboratory

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribuição e quantidade dos laboratórios de Smart Grids de acordo com sua localização	19
Figura 2.2. Arquitetura da plataforma de tempo real para testes de WAC.....	23
Figura 2.3. Esquema de Hardware-in-the-loop com RTDS utilizado nos testes finais	24
Figura 2.4. Arquitetura do laboratório (A) e rede BT modelado no RTDS (B)	25
Figura 2.5. Principais equipamentos de potência do Smart Energy Integration Lab.	27
Figura 2.6. Conexão do simulador PHIL de tempo real com uma casa real.	28
Figura 2.7. Elementos de hardware e software da plataforma HIL.....	29
Figura 2.8. Visão geral da plataforma de testes de Smart Grid da Florida International University Lab.	30
Figura 2.9. Emulador de sistema de potência Hampdem 180, lado a - parte frontal, lado b - traseira.	31
Figura 2.10. Bancada de testes da plataforma HIL para fins didáticos	32
Figura 2.11. Painéis do laboratório de redes inteligentes Burns & McDonnell / K-State Smart Grid Lab.....	34
Figura 2.12. Esquema da plataforma laboratorial de testes combinando CHIL e PHIL	35
Figura 3.1. Módulos do emulador REIS e fluxo de informações envolvendo IEDs, Medidores Inteligentes (MI) e sistemas de TI externos (SCADA, DMS, MDM).....	40
Figura 3.2. Foto frontal do medidor inteligente MD2400 (A) e foto traseira do IED Form 6 (B).....	45
Figura 3.3. Exemplo de problema de sincronização entre dois softwares em ambiente de co-simulação.	51
Figura 3.4. Exemplo de sincronização por meio de lista global de eventos com estampas de tempo.	52
Figura 3.5. Exemplo de descompasso durante interação entre controlador e planta.....	52
Figura 3.6. Exemplo de sincronização orientada a eventos com atividades de planta e controlador intercaladas.....	53
Figura 3.7. Fluxo de dados/eventos na integração dos módulos do emulador de redes	54

Figura 3.8. Exemplo de falha devido à sincronização baseada em passo de simulação	55
Figura 3.9. Exemplo de falha ocorrida após dois eventos simultâneos em simulação orientada a eventos.	55
Figura 3.10. Sincronização orientada a eventos contemplando buffer para eventos.....	56
Figura 3.11. Exemplo de fila global de eventos organizada pelo Módulo Central.	57
Figura 3.12. Fluxo de dados envolvendo o Módulo Dispositivos Virtuais e sistemas SCADA e MDM.	62
Figura 3.13. Módulo Transdutor de Sinais e interação com Módulo Central e dispositivos reais.....	63
Figura 3.14. Exemplos de condicionamento dos sinais digitais. Em a) do transdutor para as entradas dos IEDs e em b) dos IEDs para as entradas do transdutor.....	65
Figura 3.15. Diagrama unifilar do alimentador teste de 13 nós do IEEE.....	70
Figura 3.16. Relatório do perfil de tensão para o alimentador teste 13 nós do IEEE.....	71
Figura 3.17. Tela do programa WireShark com detalhamento de uma mensagem DNP3.....	74
Figura 4.1. Ambiente laboratorial de Redes Elétricas Inteligentes com destaque para os objetos (I, II, III, IV e V) de cada bloco de pesquisa.....	77
Figura 4.2. Ilha de medição com emuladores de carga/geração ligados aos medidores inteligentes.....	80
Figura 4.3. COD Virtual, com destaque para os sistemas de TI no VideoWall.....	82
Figura 4.4. Barramento de interoperabilidade e sistemas de TI do laboratório de redes inteligentes.....	83
Figura 4.5. Tela gráfica do Sinap, representação de rede na forma georeferenciada.....	85
Figura 4.6. Tela do Módulo Configurador de Eventos.....	86
Figura 4.7. Tela para cadastro de equipamentos.	87
Figura 4.8. Tela para realização das conexões com o Módulo Simulador, Módulo Transdutor e Módulo de Dispositivos Virtuais.....	88
Figura 4.9. Tela para visualização dos logs de comunicação.	88
Figura 4.10. Tela do Módulo Central para visualização da progressão da simulação.	89
Figura 4.11. Tela inicial para parametrização do Módulo Gerador/Coletor de sinais.....	90
Figura 4.12. Tela gráfica para visualização dos sinais analógicos.	90
Figura 4.13. Tela gráfica para visualização dos sinais analógicos.	91
Figura 4.14. Hardware PXI 1078 e módulo de conexão integrado com as placas PXI 6723...91	
Figura 4.15. Esquema elétrico do amplificador classe AB correspondente a uma fase.	93

Figura 4.16. Módulo amplificador de corrente, a) entradas na parte frontal, b) saídas na parte traseira.	94
Figura 4.17. Esquema elétrico do amplificador de tensão.....	95
Figura 4.18. Módulo amplificador de tensão, a) entradas na parte frontal, b) saídas na parte traseira	95
Figura 4.19. Configuração dos resistores da coroa potenciométrica do comutador de derivação em carga.....	96
Figura 4.20. Esquema elétrico do emulador de coroa potenciométrica.....	97
Figura 4.21. Placa de compatibilização dos sinais digitais do Módulo de Condicionamento de Sinais.	98
Figura 4.22. Rack completo do emulador de redes	99
Figura 5.1. Tela gráfica do Módulo de Simulação com a rede IEEE 34 barras.	102
Figura 5.2. Tela do Módulo Central para emulação do teste com o relé SEL 351.....	102
Figura 5.3. Tela do Módulo Simulador: Curto-circuito na barra 820 (marcado com X).	103
Figura 5.4. Módulo Gerado/Coletor de Sinais: captura do sinal de trip (seta vermelha).	103
Figura 5.5. Abertura da chave (seta vermelha) e isolamento do trecho em falta.....	104
Figura 5.6. Lista de eventos da emulação envolvendo os comandos do SEL 351.....	104
Figura 5.7. Representação gráfica da rede e das correntes de rede após o curto-circuito	105
Figura 5.8. Lista Global de Eventos para a simulação envolvendo OpenDSS.....	106
Figura 5.9. Perfil de tensão inicial do tronco da rede 34 barras.	107
Figura 5.10. AVR (esq.) com medição do tap 4 proveniente do emulador de coroa potenciométrica (dir.)	108
Figura 5.11. Tela do Módulo de Simulação: níveis de tensão acima de 0,94 pu	108
Figura 5.12. Módulo de Simulação: piora nos níveis de tensão da rede após manobra	109
Figura 5.13. Perfil de tensão no tronco após apenas 2 comutações de tap.....	109
Figura 5.14. Tela do Módulo Gerador/Coletor de Sinais	110
Figura 5.15. Tela do Módulo de Simulação ao fim da emulação com a atuação do AVR.....	110
Figura 5.16. Perfil de tensão final do tronco da rede 34 barras.	111
Figura 5.17. Log de eventos da emulação envolvendo os comandos do AVR	111
Figura 5.18. Tela do SCADA com unifilar e IEDs do alimentador RCO 1307	114
Figura 5.19. Ilustração esquemática do cabo rompido no ambiente de simulação	115

Figura 5.20. Telas do MDM, antes (esquerda) e depois (direita) do rompimento de cabo, com representação geográfica dos medidores com energia (cor verde) e sem energia (cor vermelha).	117
Figura 5.21. Tela do DMS identificando o trecho com cabo rompido após o seu algoritmo localizar o defeito.	118
Figura 5.22. Tela do SCADA após da realização das manobras que isolaram o trecho com defeito.	118
Figura 5.23. Tela do OMS (Power On) apresentando o registro da ocorrência e localização da chave CF70870 (circulo vermelho) no mapa georeferenciado.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Características dos laboratórios pesquisados	35
Tabela 2-2. Atividades de pesquisa de Smart Grids identificadas no relatório da JRC	36
Tabela 3-1. Funcionalidades de automação divididas em segmentos e grupos.....	42
Tabela 3-2. Exemplo de cadastro de grandeza considerando a correspondência com os demais módulos	58
Tabela 3-3. Exemplo de cadastro dos Dispositivos Virtuais e suas funcionalidades	61
Tabela 5-1. Informação sobre os IEDs utilizados nos testes em laboratório.....	114
Tabela 5-2. Informações registradas para cada um dos 5 testes realizados.....	115
Tabela 5-3. Lista Global de Eventos para o teste 3	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADA	Automação Avançada da Distribuição implementada em Redes Elétricas Inteligentes, do inglês Advanced Distribution Automation
ADMS	Sistema avançado de gerenciamento da distribuição, do inglês Advanced Distribution Management System
AMI	Infraestrutura Avançada de medição que contempla um sistema integrado de medidores inteligentes, redes de comunicação e sistemas de gerenciamento da medição, do inglês Advanced Metering Infrastructure
AMR	Sistema de leitura automática de medidores, do inglês Automatic Meter Reading
BC	Banco de Capacitor
COD	Centro de Operação da Distribuição
CIS	Sistema de informação de clientes, do inglês Customer Information System
DER	Fonte de Energia distribuída, do inglês Distributed Energy Resource.
DLMS	Protocolo de comunicação definido pela norma IEC 62056, um conjunto de padrões para troca de dados de medidores de eletricidade, do inglês Device Language Message Specification
DMS	Sistema de gerenciamento da distribuição, do inglês Distribution Management System
DNP3	Protocolo de comunicação usado entre dispositivos de controle e aquisição de dados em sistemas de automação, principalmente por empresas concessionária de energia e de água, do inglês Distributed Network Protocol
EMS	Sistema utilizado por empresas concessionárias de energia para gerenciamento dos sistemas de geração e/ou transmissão, do inglês Energy Management System.
FLISR	Funcionalidade de automação que envolve detecção de falta, localização e isolamento da falta e reconfiguração automática de redes de distribuição, com transferência de carga entre alimentadores, do inglês Fault Location, Isolation and Service Restoration
GIS	Sistema repositório dos ativos do sistema de distribuição, seus relacionamentos, propriedades e atividades, proporcionando uma visão consolidada e georeferenciada de toda a rede, do inglês Geographical Information System
GOOSE	Tipo de mensagem padronizada pelo protocolo definido na norma IEC 61850, do inglês Generic Object Oriented Substation Events
HIL	Técnica de simulação com simulações de tempo real incluindo componentes de

software e componentes físicos reais, do inglês Hardware-in-the-loop

IED	Dispositivos eletrônicos inteligentes utilizados para controle de equipamentos de potência em sistemas de proteção e automação de redes elétricas, do inglês Intelligent Electronic Device
MDM	Sistema de gerenciamento da medição, do inglês Meter Data Management
MI	Medidor Inteligente
NAPREI	Núcleo de Apoio à Pesquisa de Redes Elétricas Inteligentes da USP
OLTC	Comutador sob carga de Taps de transformador, do inglês On-Line Tap Changer
OMS	Sistema de gestão de ocorrências, do inglês Outage Management System
PHIL	Técnica de simulação que envolve simulações de tempo real incluindo componentes de software e componentes físicos de potência, do inglês Power-Hardware-in-the-loop
PMU	Unidade de medição fasorial, do inglês Phasor Measurement Unit, dispositivo que mede grandezas elétricas em uma rede elétrica usando uma fonte de tempo comum para sincronização. A medição resultante é conhecida como um sincrofasor
REI	Redes Elétricas Inteligentes
RTDS	Simulador digital de tempo real para estudos de sistemas de potência, incluindo simulações de transitórios eletromagnéticos e integrações com equipamentos físicos em laço fechado (HIL), do inglês Real Time Digital Simulator
RTU	Unidade terminal remota responsável por uma função no sistema de automação, do inglês Remote Terminal Unit
SCADA	Sistema de automação para monitorar/supervisionar as variáveis e os dispositivos do sistema de potência, bem como para comando e controle dos dispositivos presentes na rede, do inglês Supervisory Control and Data Acquisition
SDBT	Sistema de Distribuição da Baixa Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição da Média Tensão
SED	Subestação da Distribuição
SIL	Ambiente de simulação contínua, em circuito fechado, com troca de dados entre mais de um software, onde os eventos gerados por um influenciam no outro e vice-versa, do inglês Software-in-the-loop
Tap	Derivação do enrolamento de um transformador
TCP/IP	Conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede, do inglês Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
WAC	Região de abrangência de um sistema de monitoramento e controle, do inglês Wide-Area Control

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos gerais e específicos.....	16
1.2	Estrutura do trabalho.....	17
2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Simuladores e plataformas de hardware-in-the-Loop em laboratórios Smart Grids	20
3	METODOLOGIA	38
3.1	Funcionalidades Smart Grid para especificação do emulador.....	40
3.2	Caracterização dos dispositivos a serem integrados ao emulador de REIs.	44
3.3	Desenvolvimento do Módulo Simulador de rede.	46
3.4	Desenvolvimento do Módulo Central e integração com o Mód. Simulador de rede....	49
3.4.1	Sincronização e troca de mensagens em ambiente SIL.....	50
3.4.2	Sincronização orientada a eventos.....	53
3.5	Desenvolvimento do Módulo Configurador de eventos e integração com Módulo Central.....	59
3.6	Desenvolvimento do Módulo Dispositivos Virtuais (IEDs e Medidores Inteligentes) e integração com Módulo Central.	60
3.7	Desenvolvimento do Módulo Transdutor e integração com Módulo Central.	63
3.7.1	Bloco gerador/coletor de sinais	64
3.7.2	Bloco de condicionamento de sinais	64
3.8	Desenvolvimento da infraestrutura de TIC.....	65
3.9	Realização de testes e validação do emulador para as funcionalidades Smart.....	68
3.9.1	Validação dos dados do Módulo Simulador.....	68
3.9.2	Validação do bloco gerador/coletor de sinais do Módulo Transdutor	71
3.9.3	Validação do bloco condicionador de sinais do Módulo Transdutor	72
3.9.4	Validação da integração dos sistemas de TI com dispositivos reais e Módulo de Dispositivos Virtuais.	73

3.9.5	Validação geral do emulador envolvendo Módulo configurador de Eventos em um teste de tempo real contemplando hardware-in-the-loop .	74
4	LABORATÓRIO DE SMART GRID.....	75
4.1	Automação Avançada.....	77
4.2	Ilha de Medição	79
4.3	TI, Interoperabilidade e COD Virtual.....	81
4.4	Emulador de Rede.....	83
4.4.1	Módulo Simulador de rede elétrica	84
4.4.2	Módulo configurador de eventos.....	85
4.4.3	Módulo Central.....	87
4.4.4	Módulo Gerador/Coletor de sinais	89
4.4.5	Módulo de Condicionamento de Sinais.....	92
5	PROVAS DE CONCEITO	100
5.1	Atuação da proteção 50 da chave religadora após falta monofásica na rede MT.....	101
5.1.1	Teste realizado com o Módulo de Simulação implementado com SINAP	101
5.1.2	Teste realizado com o Módulo de Simulação implementado com OpenDSS ..	105
5.2	Controle de tensão na rede por meio de regulador de tensão.	106
5.3	Atuação do algoritmo de localização de cabo rompido em um sistema DMS integrado aos sistemas SCADA e MDM, fazendo uso de informações de IEDs e Medidores Inteligentes.....	112
6	CONCLUSÕES.....	120
6.1	Conclusões sobre o emprego da metodologia.	120
6.2	Contribuições do trabalho.....	123
6.2.1	Contribuições para o tema de simuladores de redes inteligentes	123
6.2.2	Contribuições para o tema de testes de funcionalidades de Smart Grids	124
6.2.3	Contribuições para o desenvolvimento dos Módulos do Emulador de REIs. ..	125
6.3	Aplicações do emulador desenvolvido para o laboratório de Smart Grids da USP e trabalhos publicados.	126
7	BIBLIOGRAFIA.....	129

1 Introdução

Pela sua própria natureza, as Redes Elétricas Inteligentes (REIs) contemplam sistemas de automação avançada, medição inteligente e recursos energéticos distribuídos que, de um lado, oferecem funcionalidades que atendem objetivos específicos e, de outro, requerem infraestrutura de tecnologias da informação (TI) e telecomunicação (KAGAN, 2013).

Segundo (MANIATOPOULOS, *et al.*, 2017), as redes de distribuição estão se tornando cada vez mais "mais inteligentes", bem como mais complexas, com a adição de dispositivos eletrônicos de potência, tecnologias de informação e comunicação, medidores inteligentes e muito mais. Como resultado, estratégias de controle avançadas para gerenciar essas redes estão se tornando cada vez mais necessárias e precisam ser cuidadosamente testadas e validadas, antes que possam ser implementadas em uma rede real.

As empresas distribuidoras estão a desenvolver, em diferentes escalas e tempos de implantação, projetos piloto e provas de conceito em REIs. Os resultados a serem alcançados em tais pilotos dependerão de inúmeros fatores ligados à amostra escolhida, tamanho da rede piloto, ocorrências e eventos na rede (defeitos, sobrecargas, etc.), dentre outros. Tais projetos deverão nortear e amadurecer o conhecimento das empresas neste novo paradigma. Entretanto, verifica-se que as empresas enfrentam dificuldades para a realização de análises sistêmicas das REIs nestes projetos pilotos, ou seja, as análises ficam normalmente restritas à área piloto, não sendo consideradas as características das demais regiões da área de concessão da empresa, seus sistemas de TI, integração com o parque de equipamentos já instalado e restrições na infraestrutura de telecomunicações.

Além disso, são grandes os transtornos enfrentados na inserção de novas tecnologias em uma rede de distribuição de energia que esteja em operação, uma vez que problemas de falhas no funcionamento de equipamentos, na parametrização, na comunicação e outras adversidades

são comuns e podem comprometer tempos de comissionamento e até gerar problemas relativos à qualidade do produto e à continuidade do fornecimento de energia (SHRESTHA, CECCHI e COX, 2013).

Outro desafio para as concessionárias de energia, seja para as áreas de automação, operação, medição e manutenção destas empresas, reside no fato de que as REIs fazem uso cada vez maior de novos sistemas e de um número crescente de dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) e sensores espalhados nas redes de distribuição (SHANSHIRI, GAN e TAN, 2012) e (CHOI, *et al.*, 2010). Dessa forma, podem-se vislumbrar os seguintes cenários pouco animadores para as empresas, de um lado, manter uma estrutura interna onerosa de equipamentos e pessoal capacitado para a realização de testes e avaliações de cada novo equipamento ou solução a ser implantada na rede, bem como para o comissionamento/ajuste dos equipamentos que são instalados a cada dia e, de outro, visando custos menores, manter uma estrutura menor e assumir o risco de que sejam escolhidos equipamentos ou sistemas sem grandes garantias de que estejam funcionando adequadamente ou com a parametrização mais adequada para as funcionalidades requeridas, aumentando os custos de comissionamento e tempo de implantação na empresa.

Os transtornos mencionados acima podem ser minimizados com a realização de testes em ambiente controlado que permitam à concessionária uma análise sistêmica das funcionalidades a serem implantadas e envolvendo seus próprios sistemas de TI (legados), medidores inteligentes e IEDs, plenamente integrados e ajustados, de forma a antecipar possíveis problemas de parametrização, integração com os sistemas supervisórios, interoperabilidade entre equipamentos, problemas de comunicação e outros, diminuindo consideravelmente os custos de comissionamento de soluções para redes inteligentes.

Neste contexto, o ambiente controlado para realização dos testes mencionados, na forma de um ambiente laboratorial, pode trazer grandes benefícios em relação a projetos pilotos em redes elétricas reais. Para isso, tal laboratório deverá contar com uma plataforma de emulação dos sistemas elétricos de potência, pois, segundo (METS, OJEA e DEVELDER, 2014), são nestas plataformas que os componentes emulados imitam o mundo real em hardware.

O presente trabalho propõe uma metodologia para desenvolvimento e aplicação de um emulador de REIs para testes sistêmicos de funcionalidades de Smart Grids envolvendo equipamentos (hardware) e sistemas informáticos (software) no ambiente laboratorial.

A descrição de cada etapa da metodologia proposta, também verificada durante as etapas de desenvolvimento e implantação do Emulador de REIs para o laboratório de Smart Grids do NAPREI/USP (Núcleo de Apoio à Pesquisa de Redes Elétricas Inteligentes da USP), deverá apontar novas possibilidades de estudos e aplicações no contexto das REIs, bem como nortear outros laboratórios que queiram desenvolver suas plataformas de testes e iniciar estudos de funcionalidades de redes inteligentes a partir de simuladores no domínio da frequência, contemplando uma modelagem mais detalhada de extensos sistemas elétricos de distribuição, sem a necessidade de vultosos investimentos em infraestrutura e equipamentos.

1.1 Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia para o desenvolvimento de um emulador de redes elétricas inteligentes que possibilite análises sistêmicas das funcionalidades de REIs, contemplando sistemas de TI e interações com dispositivos inteligentes em um ambiente de hardware-in-the-loop (HIL) e software-in-the-loop (SIL).

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Detalhar a metodologia apresentada, seus módulos e etapas de desenvolvimento, enfatizando as contribuições deste trabalho e o caráter inovador do emprego de simulações em regime permanente e sincronização baseada em eventos.
- Apresentar uma pesquisa bibliográfica sobre aplicações de simuladores e emuladores de rede para pesquisa e ensino das funcionalidades de REIs.
- Descrever o Emulador de REIs do Laboratório de Smart Grid - NAPREI/USP, desenvolvido conforme a metodologia apresentada neste trabalho.
- Apresentar aplicações do emulador para testes de funcionalidades de redes elétricas inteligentes, particularmente em redes de distribuição complexas e com representação detalhada da rede, justificando o emprego da metodologia proposta.

1.2 Estrutura do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma pesquisa bibliográfica sobre aplicações de simuladores e emuladores de rede para pesquisa e ensino das funcionalidades de REIs

O capítulo 3 traz uma descrição detalhada da metodologia concebida neste trabalho, apresentando: as características do emulador de rede para um laboratório de Smart Grid; a definição das funcionalidades Smart Grid a serem testadas no emulador; a caracterização dos IEDs a serem integrados ao emulador de REIs; o desenvolvimento do Módulo Simulador de rede; o desenvolvimento do Módulo Central e integração com o módulo simulador de rede; o desenvolvimento do Configurador de eventos e integração com Módulo Central; o desenvolvimento do módulo Dispositivos Virtuais e integração com Módulo Central; o desenvolvimento do Módulo Transdutor de Sinais e integração com Módulo Central; o desenvolvimento da infraestrutura de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) para o emulador, IEDs e sistemas operativos de TI; a realização de testes e validação do emulador para as funcionalidades envolvendo IEDs reais, medidores e sistemas de TI como SCADA, MDM, DMS, OMS e outros.

O capítulo 4 apresenta o laboratório de Redes Elétricas Inteligentes, o desenvolvimento do emulador de REIs e as características de software e hardware componentes deste emulador.

O capítulo 5 apresenta as provas de conceito (POC) da metodologia aplicada ao emulador de REIs do laboratório.

No capítulo 6 são apresentadas as discussões sobre os resultados obtidos, sobre a aplicação da metodologia para o desenvolvimento do emulador de redes elétricas inteligentes do laboratório de Smart Grid da USP, sobre as contribuições do trabalho para tema de simuladores de Redes Inteligentes e apresentação de tópicos ulteriores a este trabalho, bem como as potencialidades da metodologia proposta e conclusões finais.

Finalmente são apresentadas no capítulo 7 as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

2 Pesquisa Bibliográfica

Neste capítulo será apresentado o levantamento bibliográfico referente ao uso de simuladores de sistemas de potência, emuladores de redes elétricas, plataformas de hardware-in-the-loop, simulações em tempo real e laboratórios de Smart Grids, como fundamento teórico deste trabalho.

Segundo relatório “Smart Grid Laboratories Inventory 2016” da Joint Research Centre da Europa (JRC, 2016), a infraestrutura a ser utilizada em termos da crescente pesquisa em redes inteligentes é de vital importância. Esta infraestrutura de pesquisa é necessária para testar protótipos e soluções, para verificar a interoperabilidade de novos sistemas informáticos introduzidos neste ambiente e para avaliar o desempenho dessas soluções para Smart grids.

Um grande e amplo conjunto de infraestruturas de pesquisa para desenvolvimento de tecnologia e soluções é crucial para um lançamento consolidado das Redes Inteligentes. Somente através de programas de pesquisa precisos e exercícios de implementação, capazes de se replicar com um alto nível de cenários reais de precisão, a incerteza pode ser reduzida ao mínimo.

Ainda conforme (JRC, 2016), muitas organizações de pesquisa, indústria e academia projetaram e construíram seus próprios laboratórios de redes inteligentes com o objetivo de realizar atividades de pesquisa que permitiam o desenvolvimento de tecnologias e padrões de redes inteligentes para facilitar sua implantação em escala de produção. A Figura 2.1 apresenta a distribuição de acordo com a localização dos laboratórios de Smart Grids analisados pelo Joint Research Centre em seu inventário de 2016. Vale destacar a presença do laboratório de Smart Grids do NAPREI/USP como único representante no Brasil e América Latina.

Existe uma grande variedade de laboratórios. Vários são dedicados a atividades de pesquisa pura, desenvolvimento de tecnologias, serviços ou novas aplicações. Outros estão focados em

testes de fábrica, desempenho e interoperabilidade, fornecendo bancadas de teste pré-configuradas disponíveis para fabricantes interessados. Há também instalações focadas principalmente em atividades de certificação e padronização. Como consequência direta do tipo de atividades realizadas, é possível encontrar laboratórios que executem trabalhos de pesquisa de forma autônoma, uma vez que não é necessária nenhuma participação externa para completar o processo de pesquisa. Isso é típico de grandes organizações que têm a possibilidade de contar com diferentes instalações que cobrem diferentes áreas. De outro lado, as organizações menores que se concentram principalmente em áreas específicas geralmente tendem a encontrar parceiros para realizar suas atividades de pesquisa. Nesse sentido, suas instalações normalmente fazem parte de uma rede de pesquisa distribuída, onde cada recurso desempenha um papel específico e independente em todo o processo.

Figura 2.1. Distribuição e quantidade dos laboratórios de Smart Grids de acordo com sua localização

Fonte: (JRC, 2016)

Finalmente, a forma mais popular de instalação é a dos ativos físicos, onde as atividades de pesquisa são realizadas com hardware real. No entanto, também é possível encontrar instalações com equipamentos virtuais onde a maioria das atividades de pesquisa é realizada em ambientes simulados. A disponibilidade de sistemas de simulação em tempo real facilitou essa possibilidade para organizações que não contam com grandes instalações ou dedicadas a pequenos e específicos componentes. Também foi uma solução para aqueles que desejam

realizar testes de hardware-in-the-loop, simulando a rede elétrica em um sistema em tempo real e conectando apenas o dispositivo físico em teste (JRC, 2016).

2.1 Simuladores e plataformas de hardware-in-the-Loop em laboratórios de Smart Grids

As ferramentas de simulação de redes são comumente utilizadas para estudos visando reduzir os custos associados às modificações na infraestrutura dos sistemas de energia. Tais custos são relacionados não somente à realização de reformas, melhoramentos, instalação e testes de novos equipamentos, expansão da rede e outras modificações, mas também são relacionados aos riscos de desligamentos e perda de serviço que podem ocorrer como consequência. Neste caso, os impactos econômicos e sociais podem ser graves, mesmo por um curto período de tempo (LUGARIC, KRAJCAR e SIMIC, 2010).

As simulações reduzem esses riscos, permitindo a concepção e avaliação de diferentes soluções em um ambiente totalmente controlado, antes de realmente implantá-las em campo. Desta forma, os futuros sistemas de energia podem ser estudados em condições dinâmicas e para diferentes cenários (SCHUTTE, SCHERFKE e TROSCHER, 2011).

Outro benefício é que os resultados da simulação podem ocorrer mais rapidamente do que em tempo real, dependendo da complexidade do modelo, o que reduz o tempo necessário para desenvolver novas tecnologias e oferece mais flexibilidade quando comparada a estudos que dependem de instalações reais (LIBERATORE e AL-HAMMOURI, 2011).

Simuladores de rede têm sido extensivamente usados por profissionais para o planejamento da rede, operações, manutenções e previsão de custos (METS, OJEA e DEVELDER, 2014). Sobreensões, distorção harmônica, curto-circuitos, estabilidade transitória, fluxo de potência, e despacho ótimo de unidade de geração são exemplos de fenômenos importantes dos sistemas de potência que precisam ser capturados e parametrizados nas simulações.

Segundo (METS, OJEA e DEVELDER, 2014), simulações de sistemas de potência são geralmente classificadas em uma das seguintes categorias:

1) Simulações em regime permanente (domínio da frequência): formam a base para estudos de planejamento de rede. Pesquisadores e engenheiros executam estudos de cenários para medir o impacto das modificações no sistema de potência. O sistema é analisado em regime permanente com o objetivo de verificar se as variáveis do sistema estão dentro de limites adequados (como os níveis de tensão e carregamento, por exemplo). Os diferentes simuladores especializados em estudos de regime permanente oferecem uma gama completa de métodos de análise, a partir de estudos de fluxo de potência, estimação de carga e de balanceamento de carga.

2) Simulações com transitórios dinâmicos: estudam as transições entre pontos de equilíbrio devido a distúrbios e perturbações na rede elétrica. Estas simulações, no domínio do tempo, incluem estudos de transitórios eletromagnéticos com resolução, ou granularidade de tempo, na ordem de microssegundos a milissegundos, muito mais fina que os estudos em regime permanente, na qual os passos de simulação são, em geral, da ordem de segundos, dependendo do fenômeno estudado.

Se, de um lado, os simuladores de rede são utilizados para a realização de simulações dos sistemas de potência, de outro lado, os chamados simuladores de redes inteligentes suportam simulações combinadas de sistemas de potência, redes de comunicação e até sistemas de camadas mais altas como sistemas de operação e mecanismos de mercado (METS, OJEA e DEVELDER, 2014) e (LIN, *et al.*, 2011).

Os simuladores de redes inteligentes podem ser totalmente baseados em software, isto é, tanto a rede elétrica, quanto a infraestrutura de comunicação ou outro sistema qualquer são simulados, como apresentado em (GODFREY, *et al.*, 2010). Desta forma, todos os componentes do mundo físico são representados na forma de modelos em software.

Entretanto, alguns estudos demandam por mais realismo e assim podem dar suporte para simulações de tempo real e experimentos que envolvam hardware-in-the-loop (HIL), uma técnica que envolve simulações de tempo real incluindo componentes de software e componentes físicos reais (HUERTA, *et al.*, 2014).

Segundo (VENUGOPAL, WANG e BÉLANGER, 2011) as simulações de hardware in-the-loop (HIL) introduzem dispositivos físicos reais, na maioria das vezes um controlador teste ou um conjunto de dispositivos de controle distribuídos, assim como cargas reais ou outros componentes em uma simulação de malha fechada em tempo real. Além disso, as simulações HIL em tempo real provêm uma forma segura, confiável e com boa relação custo/benefício para os testes tanto no nível do componente (hardware) quanto no nível dos sistemas.

Nas simulações em tempo real, o passo da simulação e os eventos de tempo real são sincronizados. Segundo (BLANGER, VENNE e PAQUIN, 2010), um simulador de tempo real deve produzir, com precisão, suas variáveis internas e suas saídas no modelo de simulação dentro do mesmo passo de tempo que aconteceria no mundo real. Um requisito importante para o sucesso de simulações em tempo real é encontrado no trabalho de (METS, OJEA e DEVELDER, 2014), no qual os autores afirmam que as simulações de tempo real não dependem apenas da computação numérica, mas da pontualidade com que os modelos simulados interagem com os componentes externos (hardware ou software).

Uma ferramenta de pesquisa e desenvolvimento muito utilizada tanto em laboratórios industriais quanto acadêmicos é o RTDS – Real Time Digital Simulator (RTDS, 2016). Trata-se de um simulador digital de tempo real que pode ser usado para estudos detalhados de sistemas de potência, incluindo simulações com equipamentos integrados em laço fechado (HIL – Hardware-In-the-Loop) como testes de relés de proteção e dispositivos de controle, realizando simulações de transitório eletromagnético com passos de tempo na ordem 50 microssegundos (SHRESTHA, CECCHI e COX, 2013).

No trabalho apresentado em (SHRESTHA, CECCHI e COX, 2013), é descrita uma plataforma HIL de tempo real, representada na Figura 2.2, localizada no laboratório de Smart Grid da Duke Energy dentro da University of North Caroline in Charlotte, projetada e desenvolvida especificamente para validação de sistemas de automação em áreas de monitoramento e controle conhecidas como WAC (Wide-Area Control). A plataforma proposta permite incluir diversos equipamentos utilizados para controle (medidores, controladores, proteção) bem como os equipamentos de comunicação. Para simulação da rede e geração dos sinais analógicos é utilizado um RTDS provido de um cartão GTNET que permite comunicação utilizando protocolo IEC 61850 (IEC-61850, 2003). O diferencial nesta

plataforma foi o desenvolvimento de um gateway que converte os sincrofasores provenientes de medidores instalados no campo, neste caso, simulados por PMUs (Phasor Measurement Units), em mensagens GOOSE que então são enviadas para o RTDS. O retorno do RTDS para o sistema de controle estudado também é realizado via mensagens GOOSE passando pelo gateway desenvolvido.

Apesar do trabalho não apresentar um teste contemplando um controlador real (o controle é implementado no RTDS fazendo uso dos sinais capturados pelo gateway), os resultados mostram que a real inclusão de equipamentos de medição e comunicação podem revelar especificidades dos problemas reais que não seriam vistos de outra forma, ou seja, passam a incluir problemas relacionados com conversão de protocolos, atrasos ou falta de comunicação.

Figura 2.2. Arquitetura da plataforma de tempo real para testes de WAC.

Fonte: (SHRESTHA, CECCHI e COX, 2013)

Em (COELHO, *et al.*, 2014), são apresentados os resultados de um estudo para avaliar a proteção contra perda de excitação (LOE – Loss-of-Excitation) de geradores síncronos usando um RTDS. Os testes são realizados em uma simulação HIL usando um relé numérico para avaliar a resposta do gerador.

Para esse estudo, é utilizado um modelo de gerador específico que pertence à biblioteca de software do RTDS chamada RSCAD. Este componente permite o acesso a cada um dos terminais do gerador (A, B e C), tornando possível a aplicação de falhas nos enrolamentos internos.

A Figura 2.3 mostra o esquema de simulação HIL usado para estes testes. Sinais de tensão e corrente secundária simulados em RSCAD são enviadas para o relé testado por meio de um cartão GTAO (cartão de saída analógica). Os sinais reproduzidos neste cartão, em valores de tensão proporcionais de ± 10 Volts AC, passam por um amplificador para alcançar a magnitude correta do sinal simulado até as entradas do relé, o qual é sensibilizado pelo sinal proveniente do sistema simulado. Se ocorrer algum evento de falha no sistema, o relé de proteção envia um sinal de trip para o RTDS, por meio de um cartão GTFPI (painel frontal Interface Card), interrompendo a progressão da falta pela atuação os disjuntores simulados.

Segundo os autores, dentre outras contribuições, o trabalho mostra como um sistema virtual, simulado em tempo real, pode ajudar nos testes de comissionamento de unidades geradoras reais e na análise do desempenho de um dispositivo de proteção real utilizando teste com HIL.

Figura 2.3. Esquema de Hardware-in-the-loop com RTDS utilizado nos testes finais

Fonte: (COELHO, *et al.*, 2014)

Em (LÖF, *et al.*, 2013), os autores apresentam o teste do conceito INTEGRIS no ambiente RTDS, bem como os resultados dos testes para demonstrar a melhora na monitoração e gestão

de rede de baixa tensão (BT) através da utilização de dispositivos de medição no transformador secundário e no cliente final.

No conceito INTEGRIS, medidores inteligentes dos clientes e dispositivos de medição (RTU – Remote Terminal Unit) no transformador secundário são integrados como parte de um sistema maior. Todas as medidas dos clientes e do transformador secundário são agregadas e armazenadas no dispositivo que está localizado no transformador secundário e de lá a informação é enviada para o SCADA do Centro de Operação.

A arquitetura do laboratório é apresentada na Figura 2.4(A). Para o estudo de caso, uma rede BT baseada em uma rede real da Finlândia foi modelada no ambiente RTDS, conforme arquitetura apresentada na Figura 2.4(B). A rede BT tem três fases e é formada por um transformador secundário, um alimentador BT, fusíveis e sete clientes trifásicos com diferentes perfis de carga.

Cada tensão de fase e os valores atuais de RTDS são amplificados por dois equipamentos Omicron (OMICRON, 2016) para os níveis de tensão e corrente reais da rede BT. Valores de tensão e corrente calculados no RTDS a partir de valores de potência ativa e reativa (baseados em medições reais) são enviados a partir do RTDS para medidores inteligentes e RTU. As informações de medição de clientes e transformador secundário são agregados e armazenados no banco de dados do dispositivo SS-IDEV (Secondary Substation Integrid Device). O SCADA recebe dados continuamente de medição e alarmes do SS-IDEV.

Figura 2.4. Arquitetura do laboratório (A) e rede BT modelado no RTDS (B)

Fonte: (LÖF, *et al.*, 2013)

No trabalho de (CHA, WU e ØSTERGAARD, 2012), é proposto um procedimento para constituir um sistema equivalente genérico para redução da escala de sistemas de potência, tornando os sistemas compatíveis com a capacidade de hardware de um RTDS. Segundo os autores, em uma plataforma RTDS, o tamanho do hardware ou número de racks de um RTDS e, logo, o seu custo monetário, é proporcional ao tamanho do sistema modelado. Desta forma, faz sentido modelar em detalhe apenas a parte da rede que é de grande interesse e para o restante da rede formular uma rede equivalente apropriada.

O trabalho descreve o desenvolvimento de um modelo equivalente para testes de tecnologias de Smart Grid baseado no sistema elétrico de Bornhom (Dinamarca), realizado no laboratório PowerLabDK. A proposta usa o método FDNE (Frequency Dependent Network Equivalent) para obtenção do modelo equivalente dinâmico apropriado para RTDS permitindo simulações em tempo real de redes menores, mas preservando as características e propriedades da rede original. No trabalho são comparados os resultados de faltas simuladas no RTDS para o modelo completo e para o modelo reduzido e, segundo os autores, apesar das diferenças encontradas, a abordagem com redes equivalentes obteve desempenho satisfatório para os estudos das tecnologias de Smart Grid.

A pesquisa apresentada em (VENUGOPAL, WANG e BÉLANGER, 2011) traz alguns desafios para as simulações de tempo real como a representação de grandes quantidades de dispositivos eletrônicos na rede e apresenta o simulador eMEGAsim da OPAL-RT (OPAL-RT, 2016) como o estado da arte em simuladores de tempo real para sistemas de potência. Para o estudo de caso, foi escolhida uma rede de distribuição com 921 residências visando o estudo de transitórios eletromagnéticos de sobretensões causadas por manobras de chaves e faltas. Para este estudo foi utilizado um passo de simulação de 50 microssegundos.

Segundo os autores, este modelo também pode ser usado para testar o desempenho de relés de proteção integrados ao simulador através de conversores de digital/analógico e amplificadores de potência ou com o protocolo de comunicação IEC 61850 em rede Ethernet, utilizado em relés modernos. Durante a simulação, diferentes faltas, incluindo defeitos trifásicos, defeitos fase-terra e dupla-fase terra, podem ser introduzidas em locais diversos.

Em (HUERTA, *et al.*, 2014), é apresentada uma plataforma de testes de microrredes baseada em Power-Hardware-in-the-loop (PHIL). Segundo os autores, ainda que a técnica de hardware-in-the-loop (HIL) venha sendo largamente utilizada nas indústrias automobilística, elétrica, aviação e outras, somente na última década a inserção de dispositivos de potência nas simulações passou a ser significativa, estabelecendo um conceito adicional conhecido como Power-Hardware-in-the-loop.

O sistema proposto consiste de um sistema trifásico configurável que permite a criação de até cinco microrredes conectadas. Equipamentos como inversores, bancos de cargas e um sistema de armazenamento com baterias podem ser automaticamente ligados. O controle em tempo real do sistema é aplicado através de software RTTs (Real-time target) e controladores industriais.

A Figura 2.5 apresenta o Smart Energy Integration Lab, localizado no Instituto IMDEA em Móstoles-Espanha, destacando os principais equipamentos presentes no laboratório. O sistema permite a emulação de DERs (Distributed Energy Resources), estudos sobre a integração da rede, recriação de cenários de rede e eventos e desenvolvimento de estratégias de controle para microrredes. Um sistema RTT executa o software de controle e aplica ações de controle sobre o hardware real e, ao mesmo tempo, proporciona total visibilidade dos parâmetros do sistema e as medições para o usuário. Este tipo de ambiente combina a flexibilidade de simulação com o uso de dispositivos reais.

Figura 2.5. Principais equipamentos de potência do Smart Energy Integration Lab.

Fonte: (HUERTA, *et al.*, 2014)

Um ambiente de PHIL também é apresentado em (YAMANE, *et al.*, 2011). O artigo detalha um laboratório de microrredes inteligentes no Japão, chamado Smart Distribution Grid Laboratory, para estudo dos sistemas de distribuição de energia, incluindo a baixa tensão e cargas residenciais (casas modernas com múltiplas fontes e capacidade de geração de energia). Segundo os autores, o laboratório é concebido para executar simulação em tempo real de um sistema realista de distribuição ligado a várias casas.

O sistema, composto por redes de transmissão, distribuição, transformadores BT e 12 cargas residenciais, conforme esquema apresentado na Figura 2.6, é simulado em tempo real em um equipamento da OPAL-RT chamado eMEGAsim. Além disso, uma casa real é conectada ao sistema por meio de uma interface de PHIL cujo componente principal é um amplificador de potência de 10 kW.

O trabalho foca na estabilidade desta conexão PHIL variando-se os tipos de carga, as potências envolvidas, a razão entre as impedâncias das fontes e das cargas, largura de banda do amplificador (resposta em frequência) e taxa de amostragem do simulador.

Figura 2.6. Conexão do simulador PHIL de tempo real com uma casa real.

Fonte: (YAMANE, *et al.*, 2011).

No trabalho de (MONTROYA, MONTENEGRO e RAMOS, 2013) uma plataforma HIL utilizando-se Matlab-PSAT (MATLAB, 2016), Labview (LABVIEW, 2016) e dois equipamentos cRIO da National Instruments (NI, 2016) foi utilizada para testar e validar um método alternativo para coordenação de dispositivos de proteção de sobrecorrente desenvolvido com o esquema de Proteção Adaptativa (do inglês, Adaptative Protection/AP).

Apesar de ser uma plataforma HIL, os relés de sobrecorrente não foram inseridos na plataforma, mas sim modelados e configurados em um equipamento cRIO. A Figura 2.7 apresenta os elementos de hardware e software utilizados no trabalho. No equipamento cRIO chamado Server foram implementados 6 relés de sobrecorrente, enquanto no segundo, chamado cliente, foi programado o modelo da rede (neste caso uma rede IEEE 13 barras) e ambos comunicando-se via rede ethernet.

Segundo os autores, a plataforma HIL foi apropriada para validação do método de ajuste dos parâmetros dos relés para atingir a coordenação e seletividade entre os dispositivos. Porém, a metodologia de teste exigiu um hardware especial para execução em tempo real, especificamente o FPGA (do inglês Field Programmable Gate Array) e processadores dedicados no cRIO, a fim de cumprir os requisitos de tempo da simulação.

Figura 2.7. Elementos de hardware e software da plataforma HIL

Fonte: (MONTROYA, MONTENEGRO e RAMOS, 2013)

Nem sempre os sistemas elétricos são simulados para implementação de uma plataforma HIL. Em (SALEHI, *et al.*, 2012), a plataforma consiste de um sistema de potência em escala

reduzida (75 kW) baseada em hardware e software incluindo equipamentos de escala laboratorial e dispositivos comerciais, conforme apresentado na Figura 2.8. A plataforma modela o comportamento realístico de um grande sistema de potência. Um sistema específico, utilizando diferentes módulos de aquisição de dados, foi desenvolvido para monitorar em tempo real todos os parâmetros do sistema elétrico bem como controlar e operar os vários componentes.

O artigo apresenta o projeto e desenvolvimento de uma plataforma laboratorial para testes de redes inteligentes no laboratório de pesquisas em sistemas energéticos da Flórida International University. Segundo os autores, a plataforma torna possível o estudo e desenvolvimento de estratégias de controle e operação de Smart Grids em tempo real. Além disso, o laboratório pode ser utilizado como plataforma para estudo e testes relacionados com problemas de conectividade de fontes na rede e sistemas de armazenamento de energia.

Figura 2.8. Visão geral da plataforma de testes de Smart Grid da Florida International University Lab.

Fonte: (SALEHI, *et al.*, 2012)

Muitos laboratórios de Smart Grids foram desenvolvidos não somente visando o campo da pesquisa, mas também para fins educacionais, para o ensino da engenharia e de novas tecnologias de redes inteligentes, sistemas, equipamentos e tecnologias de comunicação, preparando os alunos para os desafios que enfrentarão no mercado, como se verifica nas referências a seguir.

Em (GAOUDA, ABD-RABOU e DAHIR, 2013), os autores apresentam o desenvolvimento de um laboratório de Smart Grids educacional para o ensino do projeto e implementação de Smart Grid para alunos de graduação e pós-graduação.

O trabalho descreve os estágios de desenvolvimento do laboratório que se inicia com o upgrade do simulador Hampdem 180 do Laboratório de Sistemas de Potência localizado na UAEU (United Arab Emirates University), ao qual são integrados diversos IEDs, sensores, medidores, sistemas computacionais e uma infraestrutura de comunicação.

O Hampdem 180, apresentado na Figura 2.9, emula um sistema de potência em escala reduzida, utilizando diversos equipamentos eletromecânicos, com 7 seções distintas: seções I e II - geração, III – Distribuição residencial, IV – alimentador industrial, seções V e VI – distribuição comercial e subestação, a seção VII apresenta o dispositivos para interconexão com um segundo sistema.

Segundo os autores, o laboratório educacional permite aos estudantes simular Smart Grids, ter contato com novos dispositivos inteligentes e experimentar novas tecnologias de comunicação, incluindo IEC 61850 e protocolos de SCADA.

Figura 2.9. Emulador de sistema de potência Hampdem 180, lado a - parte frontal, lado b - traseira.

Fonte: (GAOUDA, ABD-RABOU e DAHIR, 2013)

No trabalho apresentado em (CELEITA, *et al.*, 2016), é descrito o desenvolvimento e implementação de uma plataforma interativa para estudo da ADA (Automação Avançada da

Distribuição), na Universidade de Los Andes / Bogotá, com aplicações voltadas para soluções de controle e proteção visando o ensino de Smart Grid. Segundo os autores, esta plataforma, apresentada na Figura 2.10, oferece a possibilidade de juntar teoria e prática contribuindo para o aprimoramento do processo de aprendizagem.

A arquitetura integra ferramentas de hardware e software para emular o comportamento de um sistema de distribuição e recriar sinais previamente selecionados. Para isso, os autores desenvolveram uma arquitetura HIL, onde a plataforma simula um determinado sistema elétrico e os valores (tensões, correntes e estado dos equipamentos) de dois nós deste sistema são usados para interagir (em diferentes cenários de falta) com dois relés reais (BECO 7679 e SEL 751) em um ambiente de tempo real.

A ferramenta de simulação utilizada para o cálculo de fluxo de potência da rede é o software DSSim-PC, baseada no OpenDSS do (EPRI, 2016) e com uma interface amigável para o usuário. O equipamento escolhido para abrigar o software DSSim integrado com o Labview embarcado foi o cRIO9082 da National Instruments. Para geração dos sinais elétricos e interação com os relés foram inseridas no cRIO9082 placas para saídas/entradas digitais e uma placa de saídas analógicas conectada a um amplificador de potência de precisão - NF4510.

Figura 2.10. Bancada de testes da plataforma HIL para fins didáticos

Fonte: (CELEITA, *et al.*, 2016)

Em (PIESCIOVSKY e SCHULZ, 2014) é apresentado o laboratório de Smart Grid da universidade de Kansas/EUA chamado Burns & McDonnell - K-State Smart Grid Laboratory, um laboratório multidisciplinar que integra sistemas de controle, proteção e comunicação para subestações de energia. Ao integrar as experiências de laboratório com simuladores usando relés in-the-loop, o Laboratório combina as áreas de proteção, comunicação e áreas de medição de energia, a fim de educar o público e introduzir os alunos para as carreiras de engenharia, antecipando importantes conhecimentos para os atuais estudantes.

Segundo os autores, as atividades do laboratório enfatizam o uso de simulação em tempo real com relés in-the-loop. Os relés utilizados apresentam uma interface de teste que permite a aquisição dos dados de tensão e corrente na forma de sinais de tensão de baixa amplitude, permitindo a integração direta, sem a necessidade de amplificadores de tensão e corrente, com o simulador de tempo real da OPAL-RT, responsável por reproduzir o sistema em um ambiente de HIL.

O laboratório apresenta 6 painéis conforme apresentado na Figura 2.11. O painel de comunicação (A) abriga switches (S) e roteadores (R) que podem ser conectados a uma rede de computadores. A área de sistema de subestação tem três painéis de proteção (B, E e F) contemplando relés de proteção (PR), unidades terminais remotas (RTU) e um equipamento para sincronização via satélite (SSC). O painel de controle (C) e o painel D contemplam um osciloscópio (O), o simulador de tempo real (RTS), um relé de teste multicanal (RTS-AMS), um painel para interface de alta tensão (HVIP) e uma fonte de corrente contínua (VDCS).

Figura 2.11. Painéis do laboratório de redes inteligentes Burns & McDonnell / K-State Smart Grid Lab.

Fonte: (PIESCIOROVSKY e SCHULZ, 2014)

No trabalho apresentado em (MANIATOPOULOS, *et al.*, 2017) é descrita a infraestrutura laboratorial para testes de algoritmos de controle para Smart Grids que envolvam monitoramento da rede, tomada de decisões e comandos de despacho para vários dispositivos controláveis na rede. Segundo os autores, a plataforma de testes combina duas técnicas de simulação envolvendo hardware, a CHIL (Control Hardware-In-the-Loop) e a PHIL (Power-Hardware-In-the-Loop) para testes graduais e de cada etapa de um algoritmo de controle.

O trabalho apresenta um exemplo específico, na qual uma técnica de gerenciamento de um sistema de armazenamento é implementada como parte do algoritmo de controle de tensão coordenada da rede de distribuição. Os resultados do laboratório demonstram que a configuração proposta, apesar de sua alta complexidade, permite que o algoritmo seja efetivamente e realisticamente testado como parte do sistema geral. A Figura 2.12 apresenta o esquema de implementação do laboratório na National Technical University de Atenas/Grécia.

Figura 2.12. Esquema da plataforma laboratorial de testes combinando CHIL e PHIL

Fonte: (MANIATOPOULOS, *et al.*, 2017)

Algumas características importantes no que se refere ao ambiente de simulação dos laboratórios pesquisados neste levantamento bibliográfico são apresentadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1. Características dos laboratórios pesquisados

Item	Ref. Bibliográfica	Simulador	Domínio	HIL / PHIL	Num. barras	Área de estudo	Objetivo principal
1	Shrestha, 2013	RTDS	tempo	x	11	Controle e estabilidade em WAC	pesquisa
2	Coelho, 2014	RTDS	tempo	x	23	Proteção e estabilidade de geradores	pesquisa
3	LOF, 2013	RTDS	tempo	x	13	Medição inteligente na Baixa Tensão	pesquisa
4	CHA, 2012	RTDS	tempo	-	18	Controle distribuído em grandes sistemas	pesquisa
5	Maniatopoulos, 2017	RTDS	tempo	x	20	Controle coordenado de tensão envolvendo DER	pesquisa
6	Venugopal, 2011	OPAL-RT	tempo	-	921	Proteção e transitórios eletromagnéticos	pesquisa
7	Yamane, 2011	OPAL-RT	tempo	x	60	Controle DER para microrredes	pesquisa
8	Huerta, 2014	Matlab	tempo	x	-	Controle DER para microrredes	pesquisa
9	Montoya, 2013	Matlab	tempo	x	13	Coordenação de dispositivos de proteção	pesquisa
10	Salehi, 2012	Mod. em escala	-	-	-	Conectividade de DER	pesquisa
11	Gaouda, 2013	Mod. em escala	-	-	-	Fundamentos de Smart Grids	educacional
12	Celeita, 2016	OpenDSS	frequência	x	37	Coordenação da proteção e reconfiguração de rede	educacional
13	Piesciorovsky, 2014	OPAL-RT	tempo	x	-	Proteção e medição	Educacional

Fonte: Autor

Com exceção das áreas de estudo verificadas nos itens 1, 2, 5, 8 da Tabela 2-1, notadamente relacionadas com proteção de redes, as áreas de estudo dos demais itens estão aderentes às atividades de pesquisa de Smart Grids identificadas em (JRC, 2016), destacando-se as atividades voltadas para geração distribuída ou DER (Distributed Energy Resources).

A Tabela 2-2 apresenta uma lista de atividades de pesquisa de Smart Grids verificadas no relatório da JRC e o percentual de laboratórios em que se identifica tal pesquisa.

Tabela 2-2. Atividades de pesquisa de Smart Grids identificadas no relatório da JRC

Categoria	%
Recursos Energéticos Distribuídos	81%
Resposta pela lado da demanda	76%
Gerenciamento de rede	73%
Armazenamento	70%
Tecnologia de comunicação	69%
Eletromobilidade	66%
Smart Home/Building	64%
Automação da distribuição	61%
Cidades Inteligentes	51%
Infraestrutura avançada de medição	46%
Mercados	45%
Segurança Cibernética	42%
Sustentabilidade	33%

Fonte: (JRC, 2016)

Este capítulo apresentou um levantamento bibliográfico referente ao uso de simuladores de sistemas de potência, emuladores, plataformas de hardware-in-the-loop e simulações em tempo real.

Nos estudos realizados em laboratórios de Smart Grid, nota-se a preocupação na integração de equipamentos reais como IEDs e medidores em um ambiente HIL e até equipamentos de potência, como inversores e sistemas de baterias, nestes casos em plataformas PHIL, para pesquisas envolvendo funcionalidades de redes elétricas inteligentes.

Foi possível verificar a ampla utilização de equipamentos como o RTDS e o OPAL-RT para implantação de plataformas HIL. Entretanto, alguns laboratórios, principalmente aqueles com

uma proposta mais voltada para o ensino de Smart Grid, utilizaram-se de soluções com equipamentos mais simples, provavelmente com custos de investimento mais modestos.

De fato, o RTDS é um reconhecido simulador de sistemas de potência em tempo real, o qual é capaz de testar dispositivos em simulações HIL com ótimo desempenho. Entretanto, segundo (LIN, *et al.*, 2012), a obtenção de resultados em simulações com RTDS, envolvendo redes de distribuição de grande escala, é difícil, sendo comum a limitação da escala da simulação HIL em escopos locais.

Além disso, foi possível verificar no levantamento bibliográfico que os trabalhos envolvendo HIL tendem a concentrar suas análises nos equipamentos de hardware testados, sejam dispositivos de medição, equipamentos de potência (inversores de frequência e outros), dispositivos de controle e seus algoritmos. Entretanto, nota-se uma lacuna em estudos que envolvam a interação dos dispositivos inteligentes (IEDs e Smart meters, por exemplo) com sistemas de TI normalmente presentes nos CODs e que cumprem papéis importantes nas funcionalidades de Redes Inteligentes. Em outras palavras, com exceção dos sistemas de supervisão chamados SCADA, são raros os estudos que incorporam as funcionalidades de sistemas como MDM, DMS, OMS, GIS e outros sistemas de TI nas análises conjuntas com os equipamentos de hardware.

Ao mesmo tempo, nota-se que a grande maioria dos trabalhos que utilizaram plataformas HIL utilizou também simulações no domínio do tempo e não envolveu sistemas de potência com número elevado de barras, ou seja, foram utilizadas redes menores ou redes extensas com simplificações para redução no número de nós.

Este levantamento bibliográfico, além de servir como fundamento teórico para formulação da metodologia apresentada neste trabalho, forneceu uma dimensão da importância dos laboratórios de redes elétricas inteligentes para a pesquisa do tema. Ao mesmo tempo, mostrou uma grande variedade de tecnologias e abordagens para o estudo de Smart Grids, deixando claro que existe um grande espaço para novas contribuições, seja no campo das ferramentas a serem utilizadas para testes de hardware e/ou software, no campo da interoperabilidade e protocolos de comunicação e até no que diz respeito ao desenvolvimento de novas funcionalidades para redes elétricas inteligentes.

3 Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia para o desenvolvimento de um emulador de redes elétricas inteligentes, detalhando os blocos integrantes dessa metodologia. São apresentados ainda os problemas contornados e as contribuições da metodologia para a obtenção de um emulador de redes elétricas inteligentes com as características desejadas.

Segundo (METS, OJEA e DEVELDER, 2014) e (LIN, *et al.*, 2011), os chamados simuladores de redes inteligentes devem suportar simulações combinadas de sistemas de potência, redes de comunicação e até sistemas de camadas mais altas de TI como ferramentas de apoio à operação e de análise de mercado.

Os simuladores de redes inteligentes podem ser totalmente baseados em software, isto é, tanto a rede elétrica, quanto a infraestrutura de comunicação ou outro sistema qualquer são simulados, como apresentado em (GODFREY, *et al.*, 2010). Desta forma, todos os componentes do mundo físico são representados na forma de modelos em software.

Entretanto, alguns estudos demandam por mais realismo e fazem uso de simulações de tempo real e arquiteturas que envolvam hardware-in-the-loop (HIL), uma técnica que envolve a interação de componentes de software e componentes físicos reais (hardware) em malha fechada.

O emulador de redes elétricas inteligentes, objetivo da metodologia proposta, apresenta as seguintes características:

- Simulação digital da rede elétrica a partir de rotinas de fluxo de potência e curto-circuito no domínio da frequência envolvendo representação modelada de diversos equipamentos de potência presentes nas redes elétricas.

- Capacidade de interação com equipamentos e dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) por meio de uma arquitetura de hardware-in-the-loop (HIL), contemplando tanto a geração de sinais analógicos de tensão e corrente, bem como envio e recepção dos sinais digitais referentes aos comandos e estados de equipamentos, respectivamente.
- Capacidade de simular dispositivos de comando e controle (IEDs Virtuais) permitindo interação e troca de dados com IEDs reais e sistemas SCADA.
- Capacidade de simular medidores inteligentes (Smart Meters Virtuais) permitindo interação e troca de dados com sistemas MDM (Meter Data Management).
- Estabelecimento de infraestrutura de comunicação, baseada em rede Ethernet e protocolos apropriados, para troca de mensagens entre os equipamentos reais presentes no laboratório, o sistema SCADA e os dispositivos Virtuais, que são rotinas de software que simulam o comportamento e as ações de IEDs e Smart Meters reais.
- Capacidade de simular eventos gerados na rede como curto-circuitos diversos, manobras de chaves, variação na potência de fontes e de cargas, manobras de bancos de capacitores, alteração nos taps de reguladores de tensão e outros.

As características acima listadas devem permitir ao usuário do emulador estudar e testar uma gama de funcionalidades de redes elétricas inteligentes que envolvam inteligências localizadas tanto nos IEDs e medidores inteligentes, quanto nos sistemas de gerenciamento da distribuição (SCADA, MDM, DMS e outros).

Os blocos integrantes desta metodologia são os seguintes:

- i. Funcionalidades Smart Grid para especificação do emulador de REIs.
- ii. Caracterização dos dispositivos a serem integrados ao emulador de REIs.
- iii. Desenvolvimento do Módulo Simulador de rede.
- iv. Desenvolvimento do Módulo Central e integração com o módulo simulador de rede.
- v. Desenvolvimento do Módulo Configurador de eventos e integração com Módulo Central.
- vi. Desenvolvimento do Módulo Dispositivos Virtuais e integração com Módulo Central.
- vii. Desenvolvimento do Módulo Transdutor de Sinais e integração com Módulo Central.
- viii. Desenvolvimento da infraestrutura de TIC.

- ix. Realização de testes e validação do emulador para as funcionalidades Smart Grid envolvendo IEDs reais, medidores reais, dispositivos virtuais, sistemas SCADA, MDM, DMS e outros.

O fluxo de dados e os módulos referidos nos itens iii a viii da metodologia proposta, bem como o fluxo de informações envolvendo IEDs, Medidores Inteligentes e sistemas de TI externos (SCADA, DMS, MDM). são apresentados na Figura 3.1 a seguir:

Figura 3.1. Módulos do emulador REIS e fluxo de informações envolvendo IEDs, Medidores Inteligentes (MI) e sistemas de TI externos (SCADA, DMS, MDM).

Fonte: Autor

A descrição dos blocos integrantes da metodologia proposta é apresentada a seguir, ao mesmo tempo em que são discutidos os aspectos mais relevantes no desenvolvimento de cada um e os desafios de integração dos módulos componentes do emulador.

3.1 Funcionalidades Smart Grid para especificação do emulador.

O conceito de redes elétricas inteligentes abrange os mais importantes desenvolvimentos e avanços esperados para os sistemas elétricos do século 21 como: integração de fontes renováveis, micro-grids e geração distribuída, penetração da tecnologia da informação,

controle totalmente digital em sistemas de geração, transmissão e distribuição, usos inovadores para a energia elétrica, novas regras para os mercados de venda de eletricidade, clientes desempenhando papel de consumidor e produtor de eletricidade, além de um aumento na eficiência energética, na confiabilidade e segurança nas redes elétricas (KEZUNOVIC, 2010) e (GAOUDA, ABD-RABOU e DAHIR, 2013).

Os avanços mencionados e o aumento do nível de inteligência nos sistemas elétricos são atingidos na medida em que são implantadas as funcionalidades de Smart Grids nos sistemas atuais. Muitas das atividades de pesquisa e atuais desenvolvimentos relacionados com Smart Grids compartilham uma visão comum quanto às funcionalidades desejadas (GAOUDA, ABD-RABOU e DAHIR, 2013) e (BROWN, 2008).

Segundo (BROWN, 2008), as principais funcionalidades estão relacionadas com três grandes grupos tecnológicos:

1. Automação Avançada da Distribuição (ADA);
2. Infraestrutura Avançada de medição (AMI) e;
3. Recursos Energéticos Distribuídos.

Para (FANG, *et al.*, 2012), as funcionalidades de redes elétricas inteligentes devem possibilitar:

- a) Melhoria na confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia
- b) Otimização do uso do sistema e fontes de energia nos horários de pico, permitindo postergação de investimentos.
- c) Aumento da capacidade e eficiência das redes elétricas existentes.
- d) Aumento da resiliência do sistema e diminuição dos desligamentos.
- e) Manutenção preditiva e gerenciamento de ativos.
- f) Auto-recuperação do sistema após distúrbios.
- g) Expansão das fontes renováveis.
- h) Acomodação dos recursos energéticos distribuídos.
- i) Automação da manutenção e operação do sistema.
- j) Redução nas emissões de gases de efeito estufa.

- k) Transição para veículos elétricos e novas fontes de energia e de armazenamento.
- l) Aumento do gerenciamento pelo lado da demanda
- m) Abertura para novos produtos, serviços e mercados.

Em (KAGAN, 2013), as funcionalidades de automação foram divididas em 13 grupos e classificadas de acordo com o segmento do sistema ao qual se aplicam (SED-Subestação de distribuição, SDMT-Sistema de distribuição de Média Tensão e SDBT-Sistema de distribuição de Baixa Tensão), conforme apresentado na Tabela 3-1:

Tabela 3-1. Funcionalidades de automação divididas em segmentos e grupos

Segmento	Grupos	Descrição
SED		Monitoramento de Carregamento de Instalações e Equipamentos
	Grupo 1	Telecomando de Equipamentos de Manobra
		Transferência Automática de Carga Entre Transformadores
	Grupo 2	Sistema Automático de Rejeição de Carga na Subestação
	Grupo 3	Manutenção Preditiva Focada na Condição dos Equipamentos
	Grupo 4	Ajuste Remoto dos Dispositivos de Proteção
SDMT		Análise Automática de Oscilografia Para Diagnóstico de Ocorrências
	Grupo 5	Esquemas Lógicos de Proteção e Controle
		Monitoramento de Carregamento ao Longo do Alimentador
	Grupo 1	Telecomando de Equipamentos de Manobra
		Monitoramento de "Power Quality"
		Localização de Defeito – Nível I (Chaves e Religadores)
SDBT	Grupo 2	Manutenção Preditiva Focada na Condição dos Equipamentos
	Grupo 3	Localização de Defeito – Nível II (Chaves, Religadores, AMR e/ou Localizadores de Falta)
	Grupo 4	Self-Healing - Nível I (Automação Local)
	Grupo 5	Self-Healing - Nível II (Automação Central)
		Reconfiguração Automática para Gerenciamento dos Índices Técnicos
	Grupo 6	Controle de Tensão/VAR
SDBT	Grupo 1	Resposta a Demanda
	Grupo 2	Rejeição de Carga pela Baixa Tensão

Fonte: (KAGAN, 2013)

A escolha de uma determinada funcionalidade tem desdobramentos em três tipos de componentes:

- a) Nos equipamentos que serão emulados, que são estruturas “de potência”, responsáveis pela distribuição de energia, propriamente dita, e que deverão ser modelados corretamente no módulo simulador de rede do emulador. Estão nesta categoria: os transformadores, as linhas, os disjuntores, as chaves, os religadores, os banco de capacitores, etc.;
- b) Nos dispositivos que serão integrados ao emulador, que são componentes com função de monitoramento e comando associados aos “Equipamentos”. São estruturas “de controle” que, usualmente, operam com tensões e correntes reduzidas, constituindo sistemas elétricos acessórios justapostos ao sistema elétrico de potência. Estão nesta categoria os dispositivos de proteção, os IEDs (dispositivos eletrônicos inteligentes), os dispositivos de medição, os microprocessadores, os transmissores e receptores de dados, etc.;
- c) Nos Sistemas de Tecnologia da Informação que serão instalados no laboratório, que são softwares que contribuem para o monitoramento, o comando e o controle dos equipamentos. Há Sistemas corporativos, como GIS (Sistema de Informações Geográficas), ERP (Sistemas Integrados de Gestão Empresarial) e há Sistemas Técnicos como SCADA (Sistema de Aquisição de Dados e Controle Supervisório), EMS (Sistema de Gerenciamento da Energia), DMS (Sistema de Gerenciamento da Demanda), OMS (Sistema de Gerenciamento de Ocorrências), etc.

Além disso, as características de latência e tempos envolvidos para a realização de uma funcionalidade também devem ser levadas em conta na definição dos requisitos do emulador de redes inteligentes, principalmente no que se refere ao passo de simulação necessário para simulações em tempo real.

O emulador de redes elétricas inteligentes, objeto da metodologia proposta, destina-se ao teste de funcionalidades Smart Grid que envolvam tanto inteligências alocadas em dispositivos distribuídos na rede, quanto em soluções de software centralizadas (sistemas SCADA, DMS e outros) ou descentralizadas (localizadas em Subestações, unidades terminais remotas – RTUs e outros).

Tendo em vista que as funcionalidades a serem estudadas têm impacto direto nos requisitos de hardware e software do emulador de redes a ser desenvolvido, justifica-se que a definição de tais funcionalidades seja a primeira etapa da metodologia, devendo ser realizada de forma criteriosa.

3.2 Caracterização dos dispositivos a serem integrados ao emulador de REIs.

Como no caso das funcionalidades, a caracterização dos dispositivos a serem integrados ao emulador de Redes Elétricas Inteligentes, sejam IEDs ou medidores inteligentes, é fundamental para a definição dos seus requisitos e deverá nortear diversos aspectos do desenvolvimento deste emulador.

Dentre estes aspectos podemos destacar os seguintes:

a) Saídas analógicas

Os IEDs precisam dos sinais de tensão e corrente da rede para realização de suas funções e, em campo, estes sinais são obtidos por meio de equipamentos transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC) para adequação das tensões e correntes, respectivamente, aos níveis adequados das entradas dos dispositivos. Dependendo dos IEDs, as entradas de tensões e correntes podem variar em quantidade, dependendo do número de fases medidas, e em relação ao valor eficaz adequado, apresentando especificações para valores nominais e valores máximos permitidos.

De forma semelhante os medidores inteligentes, também conhecidos como “Smart Meters”, precisam receber os sinais de tensão e corrente em níveis adequados, seja com auxílio de TCs e TPs, quando a medição ocorrer na Média Tensão, ou sem estes equipamentos, no caso de medição direta das correntes e tensões em Baixa Tensão.

A Figura 3.2-A apresenta, a título de exemplo de medidor inteligente, a foto do medidor inteligente modelo MD2400 da ECIL (ECIL, 2018), enquanto a Figura 3.2-B apresenta a

parte traseira do Form6 (dispositivo controlador de chave religadora) da Cooper Industries (COOPER-EATON, 2016), com destaque (em vermelho) para as ligações dos terminais de TB2 para entrada dos sinais de tensão e corrente dos TP's e TC's respectivamente.

Figura 3.2. Foto frontal do medidor inteligente MD2400 (A) e foto traseira do IED Form 6 (B)

Fonte: Autor

Desta forma o emulador deverá gerar estes sinais de tensão e corrente para os dispositivos, para cada fase requerida e respeitando os limites de tensão e corrente máximos, permitindo que os dispositivos funcionem como se estivessem instalados em campo.

b) Entradas e saídas digitais

Os dispositivos IEDs fazem uso das saídas digitais para o controle dos equipamentos de rede. São exemplos de controle os comandos de abrir e fechar chaves, ligar e desligar bancos de capacitores, subir e descer taps de um OLTC, dentre outros.

As saídas digitais destes dispositivos podem ser contatos secos que se fecham para realização de um comando ou até contatos que apresentam um nível de tensão para excitar o equipamento a ser controlado. Seja qual for o tipo de saída digital do IED, o emulador deve ser capaz de receber este sinal e interpretar o comando corretamente.

Por sua vez, as entradas digitais são utilizadas pelos IEDs para receber os sinais referentes aos estados e alarmes dos equipamentos de rede. São exemplos de sinais de equipamentos

recebidos nas entradas digitais os estados aberto/fechado de uma chave, os estados ligado/desligado de bancos de capacitores, dentre outros.

Desta forma, o emulador deve ser dimensionado para receber os sinais das saídas digitais dos IEDs e interpretar corretamente os comandos realizados e ainda enviar os sinais referentes aos estados dos equipamentos em níveis adequados para excitação dos dispositivos.

Após a definição das características dos dispositivos inteligentes, como a quantidade de sinais analógicos, níveis de tensão e corrente, quantidade de entradas e saídas digitais, bem como o número máximo de dispositivos a serem integrados ao emulador de rede, é possível dimensionar a quantidade necessária de sinais analógicos gerados, as potências dos amplificadores de tensão e corrente para obtenção de níveis adequados aos IEDs e dimensionar a quantidade de entradas e saídas digitais do emulador.

3.3 Desenvolvimento do Módulo Simulador de rede.

O Módulo Simulador de rede constitui um dos principais componentes do emulador e é responsável pela determinação dos níveis de tensão e corrente em cada elemento da rede através de cálculos do fluxo de potência e curto-circuito em regime permanente, consistente com as funcionalidades consideradas.

As funcionalidades desejadas para o módulo simulador de rede são as seguintes:

- Cálculo de Fluxo de Potência e Curto-circuito;
- Consideração de modelos elétricos apropriados para os diversos equipamentos de rede como os transformadores, as linhas, os disjuntores, as chaves, os religadores, os banco de capacitores e outros.
- Capacidade para simulação de redes com muitos nós (característica de redes de distribuição) mantendo passo de simulação compatível com os eventos de componentes externos (tempo real).
- Visualização gráfica de rede elétrica, das manobras e eventos ocorridos;

- Comunicação com o Módulo Central para transferência dos dados calculados e recepção de eventos que alterem a rede como manobras e faltas no sistema.

Para que o emulador de redes elétricas inteligentes funcione apropriadamente, o módulo simulador deve calcular corretamente as tensões e correntes em cada nó do sistema após cada alteração na rede, ou seja, após cada manobra e/ou ocorrências na rede como faltas trifásicas, dupla fase, dupla fase-terra, fase-terra, com ou sem impedância de falta.

Como já mencionado, (METS, OJEA e DEVELDER, 2014) classificam as simulações de sistemas de potência em simulações em regime permanente (estudos de fluxo de potência, estimação de carga e de balanceamento de carga), e simulações com transitórios dinâmicos, que estudam as transições entre pontos de equilíbrio devido a distúrbios e perturbações na rede elétrica.

Enquanto as simulações em regime permanente trabalham no domínio da frequência, as simulações com transitórios dinâmicos trabalham no domínio do tempo e incluem estudos de transitórios eletromagnéticos com resolução, ou granularidade de tempo, na ordem de microssegundos a milissegundos, muito menor que os estudos em regime permanente, na qual a granularidade de tempo é, em geral, da ordem de segundos, dependendo do fenômeno estudado.

Conforme apresentado na pesquisa bibliográfica, os simuladores utilizados para tarefas de tempo real e ambiente de hardware-in-the-loop (HIL) realizam, em sua maioria, simulações com transitórios dinâmicos, como no caso do RTDS e OPAL-RT. Entretanto, alguns laboratórios conseguem realizar estudos com HIL utilizando simuladores que trabalham em regime permanente como o OpenDSS, o que pode ser explicado por cumprirem um importante requisito encontrado em (METS, OJEA e DEVELDER, 2014), no qual os autores afirmam que as simulações de tempo real dependem do sincronismo no tempo entre os modelos simulados e os componentes externos (hardware ou software) com os quais interage.

A metodologia apresentada neste trabalho propõe a adoção de simulação em regime permanente para a implementação do Módulo Simulador de rede. Primeiramente, porque as simulações em regime permanente servem para solucionar a grande maioria dos problemas

que envolvem as funcionalidades de Redes Elétricas Inteligentes mencionadas no item anterior, sem perder as características de simulações dinâmicas que auxiliam no entendimento dos eventos ao longo do tempo, com exceção de funcionalidades que, intrinsecamente, precisam de simulações com análises de transitórios eletromagnéticos, análises de oscilografias e de conteúdo harmônico.

A segunda razão está relacionada com os elevados custos envolvidos na aquisição de equipamentos conhecidos como simuladores de tempo real e que fazem uso de simulações com transitórios dinâmicos, principalmente quando envolvem uma grande quantidade de nós simulados, algo comum em se tratando de redes elétricas de distribuição. Segundo (CHA, WU e ØSTERGAARD, 2012), em uma plataforma RTDS, o tamanho do hardware ou número de racks de um RTDS e, portanto, o seu custo monetário, é proporcional ao tamanho e detalhamento do sistema modelado.

Nesse contexto, os simuladores que trabalham em regime permanente, tradicionalmente utilizados para estudos de expansão e planejamento de grandes redes de distribuição, tornam-se uma alternativa econômica, podendo ser instalados em computadores com arquitetura de hardware mais simples e tornando a relação custo/benefício mais atraente.

Entretanto, a utilização de simuladores com regime permanente, envolvendo o cálculo de redes com centenas ou até milhares de nós, pressupõe passos de simulação com tempos muito maiores que aqueles presentes nos simuladores de tempo real, tornando desafiador a interação entre o software e dispositivos reais dentro de uma arquitetura de hardware-in-the-loop.

Na metodologia apresentada, o Módulo Central é o responsável por contornar os problemas envolvidos neste tipo de arquitetura, especialmente os desafios de sincronização e compatibilização dos passos de simulação do simulador de rede com os eventos de tempo real. As contribuições deste trabalho para solução do problema mencionado são detalhadas em item específico adiante.

Além disso, a escolha da arquitetura de hardware que abriga o software de simulação deve ser objeto de estudo criterioso e deve ser compatível com o simulador, visando minimizar as limitações de seu emprego, ou seja, sem restringir a gama de funcionalidades estudadas.

Outra característica importante para o Módulo de Simulação é a visualização gráfica da rede elétrica, que pode ser uma representação unifilar, esquemática ou na forma georeferenciada, que apresente os principais equipamentos do sistema, as linhas, as barras e, principalmente, indique para o usuário as manobras e eventos que ocorrem na rede.

A rede visualizada deve ser sempre a mais atual, ou seja, atualizada para cada manobra que altere sua topologia, a fim de que o usuário possa acompanhar a evolução da funcionalidade estudada ao longo do tempo e interprete corretamente os comandos e controles enviados pelos dispositivos IEDs.

Uma arquitetura de HIL demanda um ambiente de simulação contínua, em circuito fechado, com troca de dados entre o hardware e o software, onde os eventos gerados por um influenciam no outro e vice-versa. O mesmo ocorre em uma arquitetura de SIL, porém a interação ocorre entre dois softwares de simulação independentes.

Para que o emulador possa funcionar com uma arquitetura HIL ou SIL, é primordial que os dados calculados no Módulo Simulador sejam externados (não apenas visualizados em tela) e os eventos de rede sejam internados para o ambiente de simulação, alterando a rede e originando um novo ciclo de dados simulados. Somente dessa forma existirá ciclo de simulações contínuas e um ambiente de troca de dados entre os diversos módulos do circuito fechado (loop). Para tanto, o Módulo Simulador deve apresentar um meio de comunicação para troca de dados, de preferência uma conexão de rede com alta velocidade com o Módulo Central, permitindo um fluxo adequado das informações.

3.4 Desenvolvimento do Módulo Central e integração com o Módulo Simulador de rede.

O desenvolvimento do Módulo Central tem impacto direto no desempenho do emulador de rede, uma vez que este módulo é responsável pelo controle do fluxo de dados entre os demais blocos funcionais e pela ordenação dos eventos ao longo do tempo.

O Módulo Central tem por objetivo fazer com que os eventos gerados nos demais blocos cheguem ao Módulo Simulador e, no sentido inverso, que os dados calculados no Módulo Simulador sejam levados aos outros módulos. Esta tarefa torna-se desafiadora na medida em que os módulos trabalham em malha fechada e devem estar sincronizados entre si. Em outras palavras, trata-se de uma arquitetura SIL onde as mensagens estão atreladas a um determinado instante da simulação.

Vale lembrar que nesta arquitetura SIL são envolvidos, além dos módulos do próprio Emulador de REIs, os sistemas de TI importantes para as funcionalidades de REIs, como sistemas SCADA, MDM e DMS, os quais interagem e influenciam os dispositivos inteligentes integrados ao Emulador, conforme já apresentado na Figura 3.1.

3.4.1 Sincronização e troca de mensagens em ambiente SIL

O problema de sincronização entre dois softwares tem sido abordado em diversos trabalhos, principalmente em ambiente de co-simulação, ambiente onde existem interações entre os softwares de simulação. Em (LIN, *et al.*, 2012) os autores apresentam uma solução de co-simulação entre um simulador de sistema de potência e um simulador de rede de comunicação (responsável pela simulação da troca de mensagens entre dispositivos inteligentes contemplando atrasos e disponibilidade de rede), utilizando um mecanismo de simulação orientada a eventos (Event-Driven) para se obter uma sincronização entre os dois simuladores, ou seja, uma troca de dados entre sistemas que seja coerente com os instantes dos eventos simulados.

Segundo os autores, quando a integração da co-simulação depende de instantes de sincronização ao longo do tempo, ou seja, a troca de dados acontece apenas em instantes específicos, ainda que o simulador do sistema de potência possua passos de simulação definidos, os eventos no simulador da rede de comunicação pode não apresentar um padrão de ocorrência. Neste caso, quando a necessidade de interação entre as duas simulações, seja o simulador de potência informando sobre um evento na rede, seja o simulador da comunicação informando que a mensagem chegou ao seu destino, se apresenta entre dois instantes de sincronização, esta interação deve esperar até a próxima sincronização ser processada. Estes problemas são indicados por “Error 1” e “Error 2” na Figura 3.3.

No caso do “Error 1”, após a interação requerida pelo sistema de potência (marcado com um x vermelho), o simulador acaba tendo que aguardar 3 passos de simulação adicionais antes que a informação seja passada para o simulador da comunicação no próximo instante de sincronização (linha tracejada vermelha). No caso do “Error 2”, o evento 4 ocorrido no simulador da comunicação acaba sendo informado para o simulador de potência somente após 5 passos de simulação e ainda um 5º evento (event 5) ocorre antes da sincronização, comprometendo a co-simulação.

Figura 3.3. Exemplo de problema de sincronização entre dois softwares em ambiente de co-simulação.

Fonte: (LIN, VEDA, et al., 2012)

Nesse artigo os autores propuseram uma solução que evita os erros mencionados por meio de uma co-simulação globalmente orientada a eventos (global event-driven). Nesse caso, cada passo de simulação do sistema de potência é tratado como um evento discreto e um organizador global de eventos (global event scheduler) fica responsável pela coordenação e pela referência de tempo dos eventos.

Desta forma, os eventos de ambas as simulações são inseridos e ordenados em uma lista global de eventos de acordo com suas estampas de tempo (timestamps), conforme ilustrado na Figura 3.4. Quando chega o momento de interação entre as simulações (marcações em vermelho), esta interação pode ser processada respeitando o instante do evento.

Figura 3.4. Exemplo de sincronização por meio de lista global de eventos com estampas de tempo.

Fonte: (LIN, VEDA, et al., 2012)

No trabalho apresentado em (YANG, *et al.*, 2013) os autores descrevem uma solução para sincronização de simulação em ambientes HIL também baseada em simulação orientada a evento. Primeiramente os autores estudam a interação entre planta (controlada) e equipamento controlador em malha fechada e demonstram que o comportamento da planta simulada pode ser muito diferente da vida real devido ao descompasso, ou falta de sincronismo, entre os passos de simulação e os comandos do equipamento controlador, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5. Exemplo de descompasso durante interação entre controlador e planta

. Fonte: (YANG, ZHABELOVA, et al., 2013)

O modelo da planta opera em intervalos de tempo discretos ($S_1, S_2, \dots, S_i$) e está trocando mensagens com o controlador apenas nos limites destes intervalos. Assim, a notificação do evento e_1 é atrasada até o fim do intervalo discreto “ e_{1s} ”, bem como a notificação de retorno “ e_4 ”. Como resultado disso, o intervalo $[e_1, e_4]$ na simulação pode ser substancialmente mais longo do que no mundo real.

A solução proposta pelos autores foi adotar blocos funcionais conforme a norma IEC 61499 (IEC-61499, 2005) e tornar o ambiente de simulação totalmente orientado a eventos. Uma característica importante desta norma é que seus componentes orientados a eventos permitem o ajuste do sistema de simulação de forma que as atividades da planta e do controlador não sejam concorrentes, mas intercaladas, como apresentado na Figura 3.6. Uma vez que o modelo da planta notifica o controlador sobre o evento e_1 no passo S_i , a planta deverá se "congelar" e retomar do passo S_{i+1} apenas depois de receber o evento de retorno e_4 .

Figura 3.6. Exemplo de sincronização orientada a eventos com atividades de planta e controlador intercaladas.

Fonte: (YANG, ZHABELOVA, et al., 2013)

3.4.2 Sincronização orientada a eventos

Ainda que os trabalhos mencionados anteriormente tenham aplicado a sincronização orientada a eventos somente em ambientes de co-simulação envolvendo duas entidades, nota-se que a solução é robusta o suficiente para ambientes mais complexos como no caso do emulador de redes elétricas inteligentes aqui em foco. A Figura 3.7 apresenta o ambiente SIL proposto nesta tese, envolvendo integração dos cinco módulos do emulador de redes e detalha o fluxo de dados, destacando o papel do Módulo Central na troca de informações entre os módulos.

De forma mais ampla, este ambiente SIL envolve ainda os sistemas de TI (software) responsável pelo controle dos dispositivos inteligentes presentes no ambiente. Esse controle se traduz em uma grande quantidade de dados que passam pelo Módulo Transdutor, impactando o fluxo de dados e aumentando o caráter não determinístico deste ambiente.

É possível notar que eventos originados nos módulos 2-Configurador de Eventos, 3-Transdutor e 4-Dispositivos Virtuais, são levados para 5-Simulador de rede pelo Módulo Central e que os dados da rede simulada, alterados a cada novo evento, são levados novamente para os módulos 2, 3 e 4.

Figura 3.7. Fluxo de dados/eventos na integração dos módulos do emulador de redes

Fonte: Autor

Neste contexto, os eventos gerados em cada módulo afetam todos os demais e cada um deles possui uma estampa de tempo, ou seja, estão atrelados a um determinado instante da simulação, demandando uma estreita sincronização entre os módulos.

A falta de uma correta sincronização entre os eventos e os passos de simulação pode comprometer totalmente os resultados da simulação. A Figura 3.8 apresenta uma sincronização baseada apenas nos tempos de cada passo de simulação, ou seja, ao fim de cada passo de simulação os dados de rede são enviados para o Módulo Central, um determinado evento somente será considerado na rede simulada se ocorrer antes do início de cada passo.

Figura 3.8. Exemplo de falha devido à sincronização baseada em passo de simulação

Fonte: Autor

Verifica-se que em t_5 são enviados para o módulo central os dados da rede simulada que ainda não consideram o evento do módulo transdutor enviado em t_4 e somente em t_6 os dados corretos são enviados para o Módulo Central, comprometendo o resultado da simulação por falta de sincronismo.

Em uma primeira análise, a aplicação da sincronização orientada a eventos parece ser uma forma de viabilizar a simulação sem a falha de sincronização apresentada no exemplo anterior. Entretanto, a sincronização no âmbito do emulador de redes elétricas inteligentes envolve a integração de cinco módulos e existe ainda o caráter aleatório dos eventos de cada um deles, bastando lembrar do caráter não determinístico da rede de comunicação. Dessa forma, o problema apresentado na Figura 3.8 poderia persistir como, por exemplo, nos casos em que um ou mais eventos sejam gerados após o início de um mesmo passo de simulação conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9. Exemplo de falha ocorrida após dois eventos simultâneos em simulação orientada a eventos.

Fonte: Autor

Verifica-se que a falha de sincronização ocorre porque os dados da rede simulada, enviados para o Módulo Central em t_5 , contabilizam os eventos do Módulo Transdutor enviados em t_3 , mas não os eventos do módulo Dispositivos Virtuais enviados em t_4 . O mesmo problema ocorreria se fosse enviado mais de um evento do Módulo Transdutor antes do término de um passo de simulação.

Neste contexto, a metodologia para desenvolvimento do emulador de rede apresentada neste trabalho propõe a utilização da sincronização orientada a eventos para integração dos módulos componentes, porém com uma modificação visando contornar o problema mencionado, ou seja, um buffer colocado para armazenamento de eventos que sejam gerados após o início do passo de simulação, conforme apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10. Sincronização orientada a eventos contemplando buffer para eventos

Fonte: Autor

Dessa forma, os dados da rede simulada, enviados para o Módulo Central, estarão sincronizados com os eventos gerados nos demais módulos, ou seja, os dados da simulação estarão atrelados aos eventos e suas estampas de tempo a cada passo de simulação.

O Módulo Central será o responsável pelo controle no fluxo de dados, inserção das estampas de tempo e pela ordenação das mensagens trocadas entre os módulos, ou seja, este módulo é responsável pela coordenação e pela referência de tempo dos eventos exatamente como o organizador global de eventos descrito em (YANG, *et al.*, 2013), porém considerando as

mensagens trocadas entre todos os módulos. A Figura 3.11 apresenta uma fila global de eventos organizada pelo Módulo Central, respeitando as estampas de tempo de cada evento.

Figura 3.11. Exemplo de fila global de eventos organizada pelo Módulo Central.

Fonte: Autor

Para realização desta organização dos eventos, o Módulo Central deve possuir um relógio interno que permita definir a estampa de tempo de cada mensagem enquanto faz o controle da troca de mensagens com os demais módulos. Conforme observado na Figura 3.11, as trocas de mensagens ocorrem nas 4 integrações envolvendo o Módulo Central, descritas a seguir:

- a) Módulo Central / Módulo Simulador de rede: conexão por meio da qual são recebidos os dados de simulação e enviados os eventos gerados nos demais módulos para o simulador, utilizando o protocolo de comunicação do simulador. As mensagens contendo os dados de rede devem possuir estampa de tempo que identifique o momento da simulação.
- b) Módulo Central / Módulo Configurador de eventos: por meio desta integração o Módulo Central coleta os eventos armazenados no Módulo Configurador de acordo com a estampa de tempo de cada evento.
- c) Módulo Central / Módulo Transdutor: conexão por meio da qual são recebidos os eventos gerados no Módulo Transdutor, referentes aos comandos provenientes dos IED reais, e envio dos dados de rede simulados. Os eventos recebidos do Módulo Transdutor ganham uma estampa de tempo assim que chegam ao Módulo Central e são organizados na lista global de eventos.

d) Módulo Central / Módulo Dispositivos Virtuais: por meio desta integração o Módulo Central coleta os eventos gerados no Módulo dos Dispositivos Virtuais e envia dos dados de rede simulados. Como na integração anterior, os eventos recebidos do Módulo Dispositivos Virtuais ganham uma estampa de tempo assim que chegam ao Módulo Central e são organizados na lista global de eventos.

Além de ser responsável pelo controle do fluxo de mensagens e pela organização da lista global de eventos, o Módulo Central também tem papel fundamental na interpretação das mensagens trocadas com cada um dos módulos e encaminhamento dos dados utilizando o protocolo específico de cada integração, uma vez que os protocolos utilizados nas diversas integrações não são necessariamente os mesmos.

A diferença entre os protocolos pode estar até mesmo no endereçamento dos equipamentos, ou seja, a codificação utilizada para identificar os equipamentos ou os sinais referentes aos equipamentos pode ser diferente para cada um dos módulos. Isto ocorre porque o protocolo utilizado em cada integração leva em consideração as conveniências de cada módulo.

Desta forma, faz-se necessária a realização de um cadastramento dos equipamentos no Módulo Central em uma etapa que antecede a emulação, onde cada equipamento cadastrado recebe a configuração ou endereçamento utilizado em cada um dos módulos. A Tabela 3-2 apresenta um exemplo de cadastramento de determinada grandeza no Módulo Central, destacando-se a correspondência desta grandeza nos demais módulos, ou seja, no Módulo de Simulação, Módulo Transdutor e Módulo Dispositivos Virtuais.

Tabela 3-2. Exemplo de cadastro de grandeza considerando a correspondência com os demais módulos

Exemplo de Cadastro	Exemplo de descrição
Identificação no Módulo Central	Grandeza 6 do equipamento 1
Referência para o Módulo de Simulação	Corrente na fase A da chave RA123
Referência para o Módulo Transdutor	Saída analógica 32 da placa PXI
Referência para o Módulo Dispositivos Virtuais	Endereço DNP3 = 22, ponto AO6 (para o caso de um IED virtual com DNP3)

Fonte: Autor

3.5 Desenvolvimento do Módulo Configurador de eventos e integração com Módulo Central.

O Módulo Configurador de Eventos é responsável pelo armazenamento dos eventos pré-definidos e agendados para a emulação. Por meio deste módulo o usuário pode realizar o cadastro dos eventos com o detalhamento necessário de informações para Módulo Simulador. Para que este evento seja agendado e corretamente utilizado no ambiente de SIL orientado a eventos, cada um deve ter a sua estampa de tempo cuidadosamente cadastrada.

Conforme se verifica na Figura 3.7, na integração entre o Módulo Configurador de Eventos e o Módulo Central o fluxo de dados possui um único sentido, ou seja, os dados seguem no sentido do Módulo Central. Em uma primeira análise, o Módulo Configurador de Eventos pode ser independente, enviando os eventos cadastrados de acordo com seu relógio interno. Entretanto, como foi dito no item anterior, o Módulo Central é responsável pela ordenação dos eventos ao longo do tempo e já possui um relógio interno, o qual poderia ser utilizado para todo o ambiente de simulação, inclusive para determinar o instante de “coleta” de eventos armazenados no módulo configurador de eventos.

Desta forma, durante a emulação, o Módulo Central verifica no Módulo Configurador de Eventos se existe algum evento para aquele instante da simulação e, se a estampa de tempo é condizente com o momento da simulação, o evento é coletado e enviado para o Módulo Simulador.

Durante o cadastro dos eventos e suas respectivas estampas de tempo, o usuário deve cuidar para que o tempo entre eventos seja maior que o tempo de um passo de simulação, facilitando a coordenação das mensagens de dados de rede e eventos por parte do Módulo Central.

Os eventos criados no Módulo Configurador de eventos são os mais variados e devem permitir a simulação de todos os cenários necessários para os testes de uma determinada funcionalidade de Smart Grid. Dentre estes eventos, podemos destacar:

- curto-circuitos diversos
- manobras de chaves

- manobras de bancos de capacitores
- mudança de taps de transformadores e reguladores de tensão
- alteração no valor de cargas e fontes

Além disso, os eventos devem apresentar todas as informações requeridas pelo simulador, por exemplo, um evento de curto circuito deve informar o tipo de falta (fase-terra, dupla fase, dupla fase-terra ou trifásico), a impedância do defeito e o local exato da rede em que ocorre o defeito.

3.6 Desenvolvimento do Módulo Dispositivos Virtuais (IEDs e Medidores Inteligentes) e integração com Módulo Central.

Os Dispositivos Virtuais são rotinas de software que simulam o comportamento de um IED ou um medidor inteligente real, contemplando leitura de grandezas elétricas, controle de equipamentos e funções inteligentes, incluindo a capacidade de comunicação com softwares supervisórios como SCADA e MDM para IEDs e medidores inteligentes respectivamente.

O estudo de funcionalidades que utilizam muitos dispositivos reais pode se tornar inviável, seja por causa do custo ou pela dificuldade de se instalar fisicamente tantos equipamentos dentro de um laboratório. Neste contexto, a integração de dispositivos Virtuais no emulador pode viabilizar o estudo, uma vez que podem se “comportar” como dispositivos reais, com características equivalentes e, ao mesmo tempo, atender determinada funcionalidade, substituindo um ou mais dispositivos reais.

O Módulo de Dispositivos Virtuais é responsável pela simulação dos IEDs virtuais e de medidores inteligentes virtuais de forma integrada ao Módulo Central, sem um limite de quantidade específico. Para isso, o módulo deve realizar as seguintes tarefas:

- Cadastro dos Dispositivos Virtuais.
- Simulação de IEDs virtuais com comportamento similar aos dos IEDs reais
- Simulação de Medidores virtuais com comportamento similar aos dos medidores reais

- Comunicação com IEDs reais e SCADA utilizando protocolos de mercado.
- Comunicação com sistemas MDM utilizando protocolos de mercado para medidores.
- Troca de informações com o Módulo Central.

É importante salientar que o cadastro dos dispositivos virtuais deve contemplar todas as informações necessárias para que possa atender a funcionalidade desejada, conforme exemplos apresentado na tabela Tabela 3-3 a seguir.

Com relação às suas funcionalidades, o comportamento do dispositivo virtual pode ser tão similar quanto se queira ao de um dispositivo real, realizando desde uma simples medição de grandezas, uma operação telecomandada ou até inteligências locais. Seja qual for a funcionalidade desejada, esta deverá ser implementada via rotinas de software dentro do Módulo Dispositivos Virtuais.

Tabela 3-3. Exemplo de cadastro dos Dispositivos Virtuais e suas funcionalidades

Dispositivo Virtual			Funcionalidade
Controlador de chave religadora			Abrir e Fechar chave por telecomando. Medição de correntes e tensões a montante e jusante. Medição do estado da chave.
Controlador de BC			Ligar e desligar Banco de Capacitores por telecomando. Medição de tensão e Fator de Potência. Medição do estado do BC.
Controlador de OLTC			Subir e descer tap por telecomando. Medição de tensão no secundário do transformador. Medição do tap atual do OLTC.
Medidor Inteligente (Smart Meter)			Alarme de falta de energia (Last Gasp), Corte-Religa, medição de correntes e tensões de uma carga ou gerador.

Fonte: Autor

Além disso, para que seja possível a comunicação com sistemas MDM, SCADA ou mesmo com outros IEDs, a implementação de protocolo de comunicação específico no Módulo Dispositivos Virtuais se faz necessária. Por exemplo, se o sistema SCADA se comunica por meio do protocolo DNP3 com os IEDs reais, este mesmo protocolo deve ser utilizado para a comunicação dos IEDs virtuais e se o sistema MDM se comunica com protocolo DLMS com

os medidores inteligentes, este mesmo protocolo deve ser utilizado para troca de mensagens com os medidores virtuais.

Novamente o cadastro dos dispositivos tem grande responsabilidade para o Módulo Dispositivos Virtuais, uma vez que são vários os parâmetros a serem cadastrados para se estabelecer a comunicação externa. Por exemplo, no caso de comunicação com SCADA via TCP/IP, devem ser inseridos os parâmetros de conexão como endereço IP (Internet Protocol), porta de rede, endereço DNP, mapa de pontos analógicos e digitais, alarmes e outros.

Por fim, a integração para troca de informações entre o Módulo Dispositivos Virtuais e o Módulo Central deve respeitar a arquitetura de SIL do emulador, ou seja, de forma que as mensagens e eventos sejam alocados na lista global de eventos.

A Figura 3.12 ilustra, de forma esquemática, a troca de mensagens entre o Módulo Dispositivos Virtuais e, de um lado, o Módulo Central, de outro, por meio de uma rede de comunicação TCP/IP, com outros sistemas e equipamentos. Destaque para o sistema SCADA, que supervisiona e comanda tantos os IEDs reais quanto os dispositivos do Módulo de Dispositivos Virtuais utilizando protocolo DNP3, e para o sistema MDM, que realiza medições tanto de medidores inteligentes reais quanto de medidores virtuais do Módulo Dispositivos Virtuais, utilizando protocolo DLMS.

Figura 3.12. Fluxo de dados envolvendo o Módulo Dispositivos Virtuais e sistemas SCADA e MDM.

Fonte: Autor

3.7 Desenvolvimento do Módulo Transdutor e integração com Módulo Central.

O Módulo Transdutor de Sinais é responsável pelo envio das informações obtidas da rede simulada para os dispositivos reais, sejam IEDs ou Medidores Inteligentes, ligados ao emulador, bem como os comandos dos IEDs para dentro do emulador.

Este módulo é chamado transdutor porque os dados obtidos da rede (grandezas elétricas, estados de equipamentos e outros), na forma digital, são transformados em sinais, analógicos ou digitais, com potências e amplitudes suficientes para sensibilizar os dispositivos reais. De outro lado, os comandos provenientes dos dispositivos reais são transformados em controles e eventos para o emulador.

Para realizar estas tarefas o transdutor de sinais apresenta dois blocos interligados, conforme ilustrado na Figura 3.13, sendo eles:

- 1) Bloco gerador/coletor de sinais
- 2) Bloco de condicionamento de sinais

Figura 3.13. Módulo Transdutor de Sinais e interação com Módulo Central e dispositivos reais.

Fonte: Autor

3.7.1 Bloco gerador/coletor de sinais

Este bloco é responsável pela troca de mensagens com o Módulo Central e pela geração/aquisição de sinais que seguirão para o bloco condicionador de sinais.

Na troca de mensagens com o Módulo Central são obtidos os dados da rede referentes às grandezas elétricas e estados dos equipamentos. Os dados das grandezas elétricas estão na forma fasorial (módulo/ângulo), informação suficiente para que este bloco realize a geração de sinais elétricos defasados no tempo e com a frequência da rede, sendo que o ângulo de fase usa uma referência que é única para todo o sistema emulado.

No caso dos IEDSs, os dados sobre os estados dos equipamentos, ou seja, se estão ligados/desligados ou abertos/fechados são transformados em sinais nas saídas digitais deste bloco, por exemplo, 0V ou 5V para representar cada estado.

Este bloco também faz a aquisição dos sinais digitais que representam os comandos dos dispositivos reais que serão internados à simulação. Por exemplo, um comando de corte de carga emitido por um medidor inteligente deve ser imediatamente traduzido pelo emulador para que o mesmo passe a gerar sinais de tensão nos bornes de entrada do medidor inteligente, mas não nos bornes do lado da carga e sem nenhuma corrente circulante no medidor.

Entretanto, os sinais gerados por este bloco são de baixa amplitude e insuficientes para sensibilizar os dispositivos reais, sendo indispensável o bloco a seguir.

3.7.2 Bloco de condicionamento de sinais

Este bloco é responsável pelo condicionamento dos sinais aos níveis adequados para cada dispositivo ligado ao emulador e é constituído pelos amplificadores de tensão, amplificadores de corrente e relés para compatibilizar as entradas e saídas digitais.

Por meio dos amplificadores de tensão e corrente, os sinais gerados no bloco anterior, de pequena amplitude, alcançam os níveis adequados para cada dispositivo real, por exemplo,

níveis de tensão de 115V e corrente de 5A. Desta forma, cada dispositivo recebe os sinais de tensão e corrente como se estivesse instalado em campo.

No caso de IEDS, as saídas digitais ($0 V_{cc}$ ou $5 V_{cc}$) do emulador também devem ser condicionadas para que os dispositivos recebam corretamente as informações sobre os estados dos equipamentos que controlam, normalmente através de um simples contato seco nos estados aberto/fechado. Para tanto, utiliza-se um relé como apresentado na Figura 3.14 a).

Além disso, os comandos provenientes das saídas digitais dos IEDs, com níveis de tensão em corrente contínua que variam de $5 V_{cc}$ até dezenas de volts, são compatibilizados para os níveis das entradas digitais do bloco gerador/coletor de sinais (0 a $5 V_{cc}$) por meio de relés, conforme ilustrado na Figura 3.14 b).

Figura 3.14. Exemplos de condicionamento dos sinais digitais. Em a) do transdutor para as entradas dos IEDs e em b) dos IEDs para as entradas do transdutor.

Fonte: Autor

3.8 Desenvolvimento da infraestrutura de TIC

Muitas funcionalidades de redes inteligentes são concentradas em seus sistemas de tecnologia da informação (TI), destacando-se os sistemas SCADA, DMS e MDM que são sistemas chamados técnicos dentre os sistemas de TI da concessionária.

O sistema SCADA (do inglês Supervisory Control and Data Acquisition) é um software utilizado em sistemas de automação para monitorar/supervisionar as variáveis e os dispositivos do sistema de potência, bem como para comando e controle dos dispositivos

presentes na rede. Trata-se do principal sistema técnico presente no COD da concessionária e tem papel fundamental na operação do sistema.

O sistema DMS (Distribution Management System) ganhou grande importância com os avanços das funcionalidades de REIs. Segundo a norma IEC 61968-1 (IEC-61968, 2003), o DMS consiste de vários sistemas distribuídos para auxiliar a distribuidora de energia no gerenciamento das redes de distribuição e incluem várias tarefas, destacando-se o gerenciamento do sistema de potência e seus equipamentos, gerenciamento dos processos que garantem confiabilidade do sistema, gerenciamento da tensão e perdas na rede, gerenciamento pelo lado da demanda, gerenciamento de ocorrências e das equipes de campo e outras utilidades.

O sistema MDM ou sistema de gerenciamento de dados da medição refere-se a um software que realiza armazenamento e gerenciamento de dados para uma grande quantidade de informações entregues por sistemas de medição inteligentes. Essas informações consistem principalmente em dados de consumo e eventos que são trazidos por meio de uma infraestrutura de medição avançada (AMI). Um sistema MDM normalmente importará os dados, depois validará e processará antes de disponibilizá-lo para faturamento e análise.

Dentre as funcionalidades dos sistemas MDM, destacam-se:

- Medição remota dos medidores inteligentes.
- Planejamento e gerenciamento da implantação de medidores inteligentes;
- Aprovisionamento automatizado de medidores inteligentes (por exemplo, adição, exclusão e atualização de informações do medidor no lado da concessionária);
- Fornecimento de recursos de relatórios para previsão de carga e demanda, relatórios de gerenciamento e métricas de atendimento ao cliente;
- Facilidade para realização remota de corte/religa de energia, verificação de status de energia e verificação de restauração de energia;

Desta forma, para a realização dos testes destas funcionalidades em laboratório são necessários, além do emulador de rede, que os requeridos sistemas de TI também estejam presentes no laboratório.

A infraestrutura de comunicação é formada por cabeamento específico e infraestrutura de hardware e deve ser especificada para atender os requisitos de comunicação dos equipamentos e sistemas de TI.

Vale mencionar que o objetivo da infraestrutura de comunicação do ambiente laboratorial é proporcionar o meio de comunicação para os equipamentos e sistemas a serem testados e não para análises de desempenho da própria infraestrutura, as quais devem ser realizadas em campo e considerando todas as variáveis ambientais.

Ainda que a gama de tecnologias para implementação da infraestrutura de comunicação seja muito ampla, abrangendo desde tecnologias com cabeamento metálico, fibra óptica, rádios de diversas potências, celular e até micro-ondas, a especificação da infraestrutura deve estar focada no atendimento de requisitos mínimos e ainda permita a análise dos protocolos de comunicação e troca de mensagens que trafegam na rede.

Para a infraestrutura de comunicação do ambiente laboratorial recomenda-se o uso de uma rede ethernet, uma vez que esta rede deve cumprir os requisitos de comunicação na grande maioria dos casos, ou seja, a rede ethernet apresenta requisitos de velocidade, latência e disponibilidade suficientes para não comprometer os estudos das funcionalidades de REIs.

Para os casos em que os IEDs utilizados apresentem apenas comunicação serial, ou seja, não possuam porta de comunicação ethernet, será necessária a utilização de dispositivos que façam a ponte entre a rede ethernet e a porta serial do equipamento. Estes dispositivos são conhecidos como “terminal servers” e fazem conversão tanto do meio físico, por exemplo, de RS232 para ethernet, quanto do protocolo (serial – TCP/IP).

Para os casos de medidores inteligentes com comunicação via rádio, ainda que o foco do laboratório não seja o estudo do desempenho nas comunicações, a implementação da infraestrutura de rádio terá grande relevância nos estudos das funcionalidades inteligentes, uma vez que cada funcionalidade está intimamente ligada ao protocolo utilizado pelos medidores e impacta nas questões de interoperabilidade e integração com o sistema MDM.

3.9 Realização de testes e validação do emulador para as funcionalidades Smart.

Nesta última etapa da metodologia são realizados os testes finais para validação do emulador de redes elétricas inteligentes.

Os testes prescritos nesta etapa têm como objetivo validar as integrações dos diversos módulos componentes do emulador bem como sua performance geral para aplicações de funcionalidades de REIs.

A ordem dos testes descritos a seguir determina uma sequência importante para validação de cada módulo e de sua integração com o módulo testado anteriormente. A sequência de testes é a seguinte:

1. Validação dos dados do Módulo Simulador.
2. Validação do bloco gerador/coletor de sinais do Módulo Transdutor.
3. Validação do bloco condicionador de sinais do Módulo Transdutor.
4. Validação da integração dos sistemas de TI (SCADA, MDM, DMS) com dispositivos reais e Módulo de Dispositivos Virtuais.
5. Validação geral do emulador envolvendo Módulo configurador de Eventos em um teste de tempo real contemplando hardware-in-the-loop.

3.9.1 Validação dos dados do Módulo Simulador

A melhor forma de validar os dados do Módulo Simulador é simulando uma rede conhecida e comparando os resultados com os dados esperados.

Em se tratando de redes radiais de distribuição de energia, sugere-se a adoção das redes de teste do IEEE/PES (IEEE/PES, 2016) disponibilizadas pelo grupo de trabalho “Distribution Test Feeder Working Group”, as quais contemplam informações completas sobre cada uma das redes, bem como os resultados calculados para os fluxos de potência e curto-circuitos em diversos pontos da rede.

Em (KERSTING, 2001) são apresentadas cinco redes testes de distribuição, incluindo suas descrições e comentários pertinentes. Segundo o autor, os alimentadores apresentam as seguintes características:

- a) Alimentador teste de 13 nós (IEEE 13 Node Test Feeder): alimentador muito pequeno, mas ainda apresenta muitas características importantes e é um ótimo teste para análises de redes de distribuição.
- b) Alimentador teste de 123 nós (IEEE 123 Node Test Feeder): é o mais abrangente e prevê problemas de queda de tensão que devem ser resolvidos com a aplicação de reguladores de tensão e capacitores.
- c) Alimentador teste de 34 nós (IEEE 34 Node Test Feeder): é um alimentador real localizado no Arizona e devido à sua grande extensão e cargas desbalanceadas pode apresentar problemas de convergência durante as simulações.
- d) Alimentador teste de 37 nós (IEEE 37 Node Test Feeder): é um alimentador real localizado na Califórnia.
- e) Alimentador teste de 4 nós (IEEE 4 Node Test Feeder): é alimentador simples cujo objetivo principal é o de proporcionar um sistema para o teste de todas as possíveis conexões de transformadores trifásicos.

Para exemplificar como os alimentadores testes do IEEE podem ser utilizados nesta etapa da metodologia para validação dos resultados do Módulo Simulador, o alimentador teste de 13 nós (IEEE 13 Node Test Feeder) foi selecionado.

A Figura 3.15 apresenta o diagrama unifilar do alimentador teste de 13 nós, o qual possui as seguintes características:

- Alimentador curto e com alto carregamento para um alimentador de 4,16 kV.
- Um regulador de tensão da subestação composto por três unidades monofásicas conectadas em estrela.
- Linhas aéreas e subterrâneas.
- Bancos de capacitores ao longo do alimentador.
- Cargas desbalanceadas pontuais e distribuídas.

Figura 3.15. Diagrama unifilar do alimentador teste de 13 nós do IEEE.

Fonte: (IEEE/PES, 2016)

Após a simulação da rede, contemplando exatamente os mesmos parâmetros de linha, transformador, regulador de tensão, banco de capacitor e cargas, os resultados do Módulo Simulador devem ser comparados com as informações disponíveis no site do IEEE para o alimentador teste de 13 nós. As informações disponibilizadas e que servirão para validação dos resultados são as seguintes:

- Fluxo de potência: potências ativa, reativa e aparente, nas fases A, B, C e total, no início do alimentador e total de perdas por fase no alimentador.
- Perfil de tensão: Módulo e ângulo das tensões de fase A-N, B-N e C-N em cada nó do alimentador.
- Curto-circuito: correntes de curto-circuito para falta trifásica, trifásico-terra, fase-terra, dupla fase AB, BC, CA e dupla fase-terra AB-N, BC-N, CA-N.

A Figura 3.16 apresenta resultados do perfil de tensão para o alimentador teste 13 nós do IEEE, contemplando os valores de módulo (MAG) e fase (ANGLE) das três fases (A-N, B-N e C-N) para cada um dos nós (NODE) do circuito.

Figura 3.16. Relatório do perfil de tensão para o alimentador teste 13 nós do IEEE.

--- V O L T A G E P R O F I L E ---- DATE: 6-24-2004 AT 15:33:12 HOURS ----						
SUBSTATION: IEEE 13; FEEDER: IEEE 13						
NODE	MAG	ANGLE	MAG	ANGLE	MAG	ANGLE mi.to SR
	A-N		B-N		C-N	
650	1.0000	at .00	1.0000	at -120.00	1.0000	at 120.00 .000
RG60	1.0625	at .00	1.0500	at -120.00	1.0687	at 120.00 .000
632	1.0210	at -2.49	1.0420	at -121.72	1.0174	at 117.83 .379
633	1.0180	at -2.56	1.0401	at -121.77	1.0148	at 117.82 .474
XFXFM1	.9941	at -3.23	1.0218	at -122.22	.9960	at 117.35 .474
634	.9940	at -3.23	1.0218	at -122.22	.9960	at 117.34 .474
645			1.0329	at -121.90	1.0155	at 117.86 .474
646			1.0311	at -121.98	1.0134	at 117.90 .530
671	.9900	at -5.30	1.0529	at -122.34	.9778	at 116.02 .758
680	.9900	at -5.30	1.0529	at -122.34	.9778	at 116.02 .947
684	.9881	at -5.32			.9758	at 115.92 .815
611					.9738	at 115.78 .871
652	.9825	at -5.25				.966
692	.9900	at -5.31	1.0529	at -122.34	.9777	at 116.02 .852
675	.9835	at -5.56	1.0553	at -122.52	.9758	at 116.03 .947

Fonte: (IEEE/PES, 2016)

3.9.2 Validação do bloco gerador/coletor de sinais do Módulo Transdutor

A validação do bloco gerador/coletor consiste em testar os sinais gerados, a aquisição de sinais digitais e a comunicação com o Módulo Central.

A realização destes testes será facilitada se o Módulo Transdutor tiver uma interface para visualização das mensagens trocadas com o Módulo Central, uma vez que a comunicação correta entre os dois módulos é imprescindível para o funcionamento do bloco gerador/coletor de sinais.

A visualização das mensagens enviadas pelo Módulo Central será a base para verificar se os sinais gerados estão em conformidade com os valores recebidos, dentro de certa tolerância, considerando módulo e fase.

Sugere-se que a interface apresente os sinais gerados em forma de onda na tela ou na forma fasorial, tornando a verificação das defasagens simples e direta. Caso contrário, um

osciloscópio poderá ser utilizado para medição dos sinais gerados e posterior comparação com os dados enviados.

Os sinais digitais, em corrente contínua (CC), gerados pelo bloco gerador/coletor poderão ser testados com auxílio de um multímetro, que poderá ser utilizado para verificar alterações nos níveis de tensão que indicam, por exemplo, a mudança de estado dos equipamentos.

Os testes da coleta dos sinais digitais, provenientes do bloco condicionador de sinais, serão realizados pela verificação do envio das mensagens específicas para o Módulo Central, no instante das alterações dos níveis de tensão (bordas de subida ou descida), referentes aos comandos dos IEDs, por exemplo, abrir/fechar uma chave.

3.9.3 Validação do bloco condicionador de sinais do Módulo Transdutor

A validação do bloco condicionador de sinais será realizada testando-se os amplificadores de tensão, os amplificadores de corrente e os dispositivos utilizados para compatibilizar os sinais digitais entre o Módulo Transdutor e os dispositivos reais.

Uma forma simples de realizar estes testes é utilizando os próprios dispositivos integrados ao Módulo Transdutor, uma vez que, para os sinais digitais e analógicos gerados no bloco gerador/coletor de sinais são, esperadas medições e respostas dos dispositivos.

A comparação entre os resultados esperados e os resultados efetivamente medidos pelos dispositivos permitirá aferir a qualidade dos sinais gerados pelo bloco condicionador de sinais, sejam sinais de tensão e corrente, os quais podem ser visualizados no display do IED ou do medidor inteligente ou por meio do software de configuração/supervisão do dispositivos, sejam sinais digitais, no caso de IEDs, relacionados com estados do equipamento controlado como posição de TAP, estado de chave e outros.

De outro lado, o bloco condicionador de sinais deve receber adequadamente os comandos provenientes dos dispositivos e uma forma de validar a coleta destes sinais digitais é verificando as mudanças nos níveis de tensão (bordas de subida ou descida) nas entradas digitais do bloco gerador/coletor de sinais para cada comando recebido.

3.9.4 Validação da integração dos sistemas de TI com dispositivos reais e Módulo de Dispositivos Virtuais.

Tendo em vista que o sistema SCADA é responsável pela supervisão e controle dos IEDs nas redes de distribuição reais, no ambiente laboratorial este sistema terá papel semelhante, sendo responsável tanto pela supervisão e controle dos IEDs instalados no laboratório quanto dos IEDs simulados no Módulo de Dispositivos Virtuais.

De forma análoga, o sistema MDM é responsável pela medição remota dos medidores inteligentes, cumprindo o mesmo papel dentro do laboratório, incluindo recebimento de mensagens de falta de energia (last gasp) e comandos de corte/religa.

Neste contexto, a validação da integração dos sistemas de TI contempla o teste do meio de comunicação entre os integrantes e, principalmente, do protocolo de comunicação utilizado.

Muitos sistemas SCADA possuem ferramentas próprias de diagnóstico para os casos em que os valores das grandezas apresentadas não estejam corretos ou quando os comandos enviados pelo SCADA não surtem o efeito esperado nos IEDs. Caso estas ferramentas não estejam disponíveis no SCADA, outras ferramentas para análises de mensagens e protocolos, conhecidas como “sniffers”, poderão ser utilizadas para verificação da estrutura da mensagem.

A Figura 3.17 apresenta um tela do software WireShark (WIRESHARK, 2016) destacando a estrutura de uma mensagem do protocolo DNP3, facilitando a tarefa de análise de erros na troca de informações com o SCADA.

Figura 3.17. Tela do programa Wireshark com detalhamento de uma mensagem DNP3

Fonte: Autor

3.9.5 Validação geral do emulador envolvendo Módulo configurador de Eventos em um teste de tempo real contemplando hardware-in-the-loop .

Finalmente, um teste geral deve ser realizado com todos os módulos do emulador, IEDs, medidores inteligentes e sistemas de TI (SCADA, DMS, MDM e outros) integrados. Tendo em vista a validação do emulador para os objetivos propostos nesta metodologia, o teste deve considerar uma determinada funcionalidade de REIs que permita analisar:

- O ambiente de HIL, com os dispositivos reais integrados ao emulador;
- O ambiente de SIL envolvendo os sistemas de TI;
- Sincronismo correto no tempo entre os modelos simulados e os componentes externos (hardware ou software) com os quais interage como deve ocorrer nas simulações em tempo real;
- Os resultados da funcionalidade estudada.

A utilização de uma rede conhecida deve facilitar a validação da funcionalidade, uma vez que os resultados obtidos com o emulador devem ser comparados com os resultados esperados.

4 Laboratório de Smart Grid

O Laboratório de Smart Grids do NAPREI/USP serve como plataforma para testes de IEDs, medidores inteligentes, sistemas de TI, soluções e funcionalidades de REIs em ambiente controlado, auxiliando as concessionárias de energia em muitas etapas de implantação das Redes Elétricas Inteligentes.

O projeto de desenvolvimento do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes foi patrocinado pelas distribuidoras brasileiras EDP São Paulo e EDP Espírito Santo por meio do programa de pesquisa e desenvolvimento P&D ANEEL.

Neste capítulo é apresentado o laboratório de Smart Grids e o desenvolvimento do emulador de REIs conforme metodologia apresentada no capítulo anterior, ressaltando as características de software e hardware componentes deste emulador.

O laboratório de Smart Grids possibilita as seguintes funções principais:

- Emulação de Redes Elétricas Inteligentes, considerando IEDs e medidores inteligentes instalados no laboratório.
- Análise prévia e sistêmica das funcionalidades de REIs como localização de falta, isolamento da falta, self-healing, controle de tensão e reativos, medição inteligente e outras.
- Testes de integração e de protocolos de comunicação entre equipamentos de fabricantes diversos.
- Testes de interoperabilidade de sistemas de TI
- Treinamento de pessoal no COD Virtual, possibilitando a capacitação necessária para novos sistemas, procedimentos e tecnologias.

Para cumprir tais funções, o desenvolvimento do laboratório de Smart Grids foi estruturado em cinco blocos de pesquisa:

- 1) Automação de redes elétricas inteligentes.
- 2) Ilha de medição.
- 3) Tecnologia da informação e interoperabilidade.
- 4) Centro de operação da distribuição (COD) virtual.
- 5) Emulador de REIs.

A Figura 4.1 apresenta, de forma esquemática, o ambiente laboratorial de REIs contemplando os objetos de pesquisa de cada bloco, com o Emulador (I) e a Ilha de medição (II) na parte de baixo da figura, infraestrutura de telecomunicações (III) e IEDs (IV) ao centro e os sistemas de TI (V) na parte superior.

No bloco 1 são testadas as funcionalidades de automação utilizando, de forma integrada, os objetos dos demais blocos, validando a metodologia objeto deste trabalho. O objeto do bloco 2 são os medidores inteligentes e contempla os emuladores de carga integrados ao emulador de rede, permitindo os testes de funcionalidades que envolvam medidores inteligentes e sistemas de gerenciamento da medição (MDM).

No bloco 3 são avaliados os sistemas de TI relevantes para as funcionalidades de Smart Grids, os quais são integrados por um barramento de interoperabilidade para intercâmbio de informações entre estes. Os sistemas de TI apresentados na Figura 4.1 são os componentes típicos de um sistema de gerenciamento da distribuição mapeados no modelo de referência da norma IEC 61968-1.

O bloco 4 abriga o ambiente chamado COD Virtual, criado para pesquisa, treinamento e familiarização de operadores com novas funcionalidades das redes elétricas inteligentes.

Finalmente, no bloco 5 são concentrados os esforços para o desenvolvimento de todos os módulos do emulador de redes elétricas inteligentes conforme a metodologia apresentada no capítulo anterior, contemplando infraestrutura de software e hardware, bem como os IEDs que serão integrados ao emulador.

Figura 4.1. Ambiente laboratorial de Redes Elétricas Inteligentes com destaque para os objetos (I, II, III, IV e V) de cada bloco de pesquisa.

Fonte: Autor

4.1 Automação Avançada

Atualmente, a automação das redes de distribuição de energia elétrica envolve a integração de equipamentos de campo com o sistema centralizado de supervisão, controle e aquisição de dados (SCADA) por meio de funcionalidades simples de telemedicação ou telecomando.

Entretanto, o conceito de automação avançada de redes de distribuição de energia elétrica envolve ainda outros sistemas (MDM, Meter Data Management; DMS, Distribution Management System, OMS, Outage Management System, CIS, Customer Information System e outros.), e a aplicação de IEDs e medidores inteligentes.

Nesse novo contexto, uma quantidade maior de informações é utilizada para determinar ações corretivas de forma mais rápida ou, até mesmo, de melhoria de desempenho do sistema. Além disso, de acordo com as particularidades das empresas de distribuição, as definições das ações podem ser feitas de forma distribuída, por meio dos IEDs instalados em campo, ou de forma centralizada, com o apoio de sistemas altamente sofisticados, nos centros de operação.

O bloco de automação do projeto de pesquisa e desenvolvimento do Laboratório de Smart Grids do NAPREI/USP envolveu a realização de atividades que permitem reproduzir, em ambiente controlado, o exato funcionamento da rede de distribuição real, bem como averiguar o impacto de tecnologias de vanguarda, como a aplicação de funcionalidades avançadas de automação da distribuição. As atividades desenvolvidas durante o desenvolvimento desse bloco podem ser divididas em:

a) Implantação de DMS no laboratório.

Foi escolhido o software SINAP, concebido originalmente na USP e hoje atualizado e mantido pela empresa Sinapsis (SINAPSIS, 2016), como ambiente DMS para o desenvolvimento de funcionalidades avançadas centralizadas de automação da distribuição, destacando-se a funcionalidade de localização de cabo rompido, utilizado nos estudos de caso deste trabalho.

Neste sistema são inseridas as informações relacionadas à representação de todo o sistema de distribuição MT/BT das empresas concessionárias de energia ou apenas da área de estudo.

b) Implantação de SCADA no laboratório

Essa etapa caracterizou-se pela instalação do sistema SCADA que faz a supervisão e controle dos IEDs presentes no laboratório. Inicialmente foi utilizado o Action.NET da empresa SPIN (SPIN, 2016) para as atividades de integração com IEDs. Esta etapa foi concluída com a instalação do sistema SCADA ScateX Plus, da empresa Power Solutions (POWER, 2016). A possibilidade de serem aplicados diferentes sistemas com a mesma finalidade ilustra o potencial de contribuição do laboratório, permitindo avaliar as contribuições de diferentes tecnologias disponíveis.

c) Integração do SCADA com IEDs instalados no laboratório

Essa etapa caracterizou-se pela instalação, no laboratório, dos IEDs de diferentes fabricantes e tipicamente utilizados pelas empresas distribuidoras, seguida de integração destes IEDs ao sistema SCADA. Foram considerados IEDs para monitoração e proteção de alimentadores, para monitoração e controle de chaves religadoras, para monitoração e controle de OLTCs (On-load Tap Changer) em transformadores AT/MT, e para monitoração e controle de bancos de capacitores e reguladores de tensão.

d) Simulação das funcionalidades "FLISR" e "Volt-var"

Nessa etapa foram realizadas simulações da funcionalidade FLISR (Fault Location, Isolation and Service Restoration) que contempla as funcionalidades de detecção de falta, localização e isolamento da falta e reconfiguração automática de redes de distribuição, com transferência de carga entre alimentadores por meio de chaves religadoras, e da funcionalidade Volt-var, que contempla o controle automático dos níveis de tensão e reativos na rede. A funcionalidade FLISR foi desenvolvida pela equipe da EDP e é atualmente executada no próprio ambiente SCADA da empresa, já o algoritmo da funcionalidade Volt-var foi desenvolvido em laboratório e visa a manutenção do nível adequado de tensão da rede a partir do controle de OLTCs de transformadores das SEs e Bancos de Capacitores ao longo da rede elétrica.

A aplicação dessa funcionalidade em laboratório permitiu a validação do Emulador de redes, da integração entre IEDs e SCADA, das configurações de IEDs em laboratório, bem como a avaliação do desempenho do conjunto.

4.2 Ilha de Medição

O sistema denominado ilha de medição (IM) é constituído por emuladores de cargas/geração (ECG), medidores inteligentes (MI) e infraestrutura de comunicação, sendo capaz de representar qualquer situação de consumo/geração de um consumidor de energia elétrica pertencente a uma rede elétrica de distribuição. As situações emuladas são detectadas e registradas pelos MIs, que processam os sinais medidos e enviam as leituras para um sistema

MDM através da infraestrutura de comunicação do laboratório, além de receber comandos operativos pela mesma infraestrutura.

O sistema permite simular e testar funcionalidades presentes em MIs, como: comunicação com sistemas de gestão de medições, funções de corte e religamento de energia remoto e alarme de “last-gasp” que é caracterizado pelo envio de uma rápida mensagem em caso de falta de energia nos medidores.

Esse sistema também permite simular diversas situações com origem nas redes elétricas, tais como: faltas de energia, afundamentos ou elevações de tensão por fase, efeitos de reconfiguração de rede, etc. Para tanto, os ECGs desenvolvidos no âmbito do projeto de P&D, os quais também tiveram como base as especificações da metodologia do capítulo 3 para transdutores, acabam impondo aos MIs condições controláveis de consumo ou geração de energia através do controle individual das amplitudes e ângulos de fase de cada uma das tensões e correntes que percorrerão o circuito de alimentação dos MIs. Cada ECG é um dispositivo que conta com três canais de saída de tensão e corrente, com controle individual das amplitudes e ângulos de fase de cada canal, de forma a alimentar um MI trifásico ou até três MI monofásicos por ECG.

A Figura 4.2 apresenta a ilha de medição do laboratório com destaque para os ECGs instalados na parte alta dos painéis (total de 40 equipamentos) e interligados aos diferentes medidores inteligentes presentes na ilha.

Figura 4.2. Ilha de medição com emuladores de carga/geração ligados aos medidores inteligentes.

Fonte: Autor

A IM está integrada à infraestrutura de medição inteligente constituída por um sistema de comunicação conectado ao MDM. Dessa forma, os MIs que fazem parte da IM enviam, através da infraestrutura de comunicação, os registros de medição emulados para o MDM, que disponibiliza as medições para os demais sistemas através do barramento de interoperabilidade. Testes de funcionalidades de envio de mensagens e comandos de corte/religa dos MIs podem ser realizados por meio da mesma infraestrutura de comunicação da IM. Nota-se, então, que o sistema permite realizar diversas avaliações e explorar diversos aspectos de medição inteligente.

4.3 TI, Interoperabilidade e COD Virtual

Interoperabilidade é a habilidade de dois ou mais sistemas ou componentes em trocar informações entre si e utilizá-las, sendo fundamental a utilização de padrões abertos para os componentes tecnológicos envolvidos, uma vez que padrões proprietários podem embutir tecnologias patenteadas, criando barreiras econômicas.

Ao se tratar a interoperabilidade de processos e sistemas, diversos aspectos devem ser considerados, entre os quais a interoperabilidade técnica (padrões de comunicação, transporte, armazenamento e representação de informações), a interoperabilidade semântica (significado ou semântica das informações de diferentes origens) e a interoperabilidade organizacional (organizações que tenham processos de cooperação).

No contexto das REIs, a aplicação dos conceitos de interoperabilidade é de importância fundamental, dado que os processos e funcionalidades relacionados envolvem a interação de inúmeros componentes e sistemas.

No âmbito do laboratório, a implementação do barramento de interoperabilidade foi realizada utilizando-se da ferramenta de mercado WSO2 (WSO2, 2018), permitindo a troca de mensagens entre os diversos sistemas.

No laboratório, uma sala de controle denominada COD Virtual, interligada ao Emulador de Rede, abriga os sistemas de TI e o barramento de interoperabilidade. Este ambiente,

apresentado na Figura 4.3 vem sendo utilizado para testes de funcionalidades, treinamentos e realização de simulações com foco em Redes Elétricas Inteligentes.

Figura 4.3. COD Virtual, com destaque para os sistemas de TI no VideoWall.

Fonte: Autor

As aplicações que fazem parte do COD Virtual e que concorrem para os principais processos e funcionalidades relacionados ao Smart Grid, operando de forma integrada, são:

- GIS (Geographical Information System): trata o repositório dos ativos do sistema de distribuição, seus relacionamentos (conectividade), propriedades e atividades, proporcionando uma visão consolidada de toda a rede, representado no laboratório pelo sistema Smallworld Electric Office, fornecido pela empresa GE (GE, 2016).
- OMS (Outage Management System): efetua o gerenciamento de faltas/ocorrências desde a investigação até o diagnóstico e restauração de fornecimento, além de ser o responsável pelo registro de informações sobre manobras e restabelecimento, representado no laboratório pelo sistema PowerON, fornecido pela empresa GE.
- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): efetua a supervisão, monitoramento e controle das operações da rede, representado no laboratório pelos sistemas Action Net e ScateX+, fornecidos pelas empresas Spin e Power Solutions respectivamente.

- DMS (Distribution Management System): monitora e controla equipamentos do sistema de distribuição. Conhecido como ADMS quando inclui funções avançadas (A–advanced) de gerenciamento da distribuição, representado no laboratório pelo sistema SinapGrid, fornecido pela empresa Sinapsis.
- MDM (Meter Data Management): efetua a coleta de dados de medição de medidores inteligentes e faz a gestão de comunicação, além de tratar, processar e publicar todos os dados de energia, representado no laboratório pelo sistema Sm@rtering, fornecido pela empresa CGI.

A Figura 4.4 apresenta a arquitetura de TI atualmente implantada no laboratório com destaque para o barramento de interoperabilidade (ESB).

Figura 4.4. Barramento de interoperabilidade e sistemas de TI do laboratório de redes inteligentes.

Fonte: Autor

4.4 Emulador de Rede

Como já descrito no capítulo anterior, o emulador de redes elétricas inteligentes pode ser entendido como uma representação digital e dinâmica de redes elétricas, realizando simulações de sistemas contemplando diversos eventos de rede e sendo capaz de gerar os sinais elétricos de tensão e corrente para IEDs reais, bem como receber sinais e comandos destes dispositivos, trazendo o equipamento para um ambiente da simulação de tempo real.

O Emulador de Redes do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes foi desenvolvido implementando-se os 5 módulos de software/hardware previstos na metodologia deste trabalho, conforme descrição a seguir:

4.4.1 Módulo Simulador de rede elétrica

Este módulo é responsável pelos cálculos de fluxo de potência, curto-circuito e alterações na rede de estudo. Para esta tarefa o Emulador de REIs dispõe de dois softwares de simulação de sistemas de potência, o SINAP da (SINAPSIS, 2016) e o OpenDSS do (EPRI, 2016).

Escolhido primeiramente para a função deste módulo, o software de simulação de sistemas de potência SINAP tem sido largamente utilizado por empresas brasileiras de distribuição de energia para planejamento da expansão e estudos de perdas de energia na rede. As funcionalidades básicas deste simulador de rede importantes para o emulador são as seguintes:

1. Visualização gráfica de redes de distribuição com representação georreferenciada;
2. Rotinas de cálculo de fluxo de potência;
3. Rotinas de cálculo de curto-circuito;
4. Representação de chaves manobráveis na rede;
5. Representação de geradores, cargas e suas curvas de demanda diárias.

Alternativamente, o Emulador pode fazer uso do simulador OpenDSS, o qual vem sendo utilizado por empresas brasileiras de distribuição de energia notadamente para estudos de perdas de energia na rede.

Para integração ao emulador de rede, os softwares de simulação foram adaptados com conectores TCP/IP para comunicação com o Módulo Central do emulador, utilizando um protocolo desenvolvido no âmbito deste projeto. Por meio desta integração, o Módulo Central pode solicitar qualquer informação calculada pelo Módulo Simulador, como valores de tensão nas barras, valores de correntes nos elementos de rede e transferir estas informações imediatamente para o transdutor. O Módulo Central pode também atuar sobre o simulador, enviando, por exemplo, comandos para abertura de fase, alteração das chaves existentes, dos

bancos de capacitores, dos taps de transformadores e reguladores de tensão, provocando assim alteração no estado da rede.

A Figura 4.5 mostra uma tela gráfica do Sinap contendo um sistema de distribuição da EDP São Paulo com representação georeferenciada.

Figura 4.5. Tela gráfica do Sinap, representação de rede na forma georeferenciada.

Fonte: Autor

4.4.2 Módulo configurador de eventos

O Módulo Configurador de Eventos é responsável pela definição e configuração de eventos, como por exemplo, ocorrência de curto-circuitos diversos em qualquer ponto da rede, alteração no valor de cargas e fontes, manobras e outras alterações no estado da rede, que advêm durante a simulação com base em uma linha de tempo pré-definida.

Seguindo a metodologia apresentada no capítulo anterior, foi desenvolvido o Módulo Configurador de Eventos, conforme apresentado na Figura 4.6, contemplando uma interface

para criação e parametrização dos eventos, com tipo de evento, local da rede onde acontece o evento, equipamento(s) envolvido(s), parâmetros específicos (por exemplo, a impedância do curto no caso de uma falta para terra), entre outros. Além disso, através deste módulo, o usuário pode informar dentro da linha de tempo da simulação, os instantes em que cada evento deverá ocorrer.

Figura 4.6. Tela do Módulo Configurador de Eventos.

Módulo Central - [Configurar Eventos]

Estabelecer comunicação Cadastrar equipamentos Configurar eventos Simulação Log de comunicação

Abrir configuração salva Salvar configuração atual Limpar configuração atual Imprimir lista de eventos

1 - Definir temporização

- Horário de início (simulação): 00:40:00 - Horário de término (simulação): 01:05:00

- Tempo mínimo entre eventos (real): 5 [seg]

Obs: Deve ser maior que o tempo necessário para o simulador calcular o fluxo de potência da rede.

- Escala de tempo: 1 [h] (simulação) : 1 [min] (real) (x60)

Tempo total de simulação (real): 00:00:25

Avançar

2 - Programar eventos

Horário: 00:50:00 Tipo: 06 - Alterar tap de transformadores Voltar

Código do equipamento: 130TRCSO1 Alterar tap: Variação de tap: 1

Adicionar à lista atual

Configuração atual

Lista de eventos programados

Horário	Descrição
00:45:00	Simular falta 3F na barra B_9937 com pré-falta.
00:50:00	Abrir chave 150RE000715789.
01:00:00	Eliminar falta.
01:05:00	Fechar chave 150RE000715789.

Conectado com o transdutor
Conectado com o simulador

Fonte: Autor

Foram criadas as seguintes opções de eventos para serem executadas durante a simulação:

- Alteração de estado (aberto/fechado) das chaves.
- Simular ou eliminar faltas (curto circuito) na rede.
- Alteração do tap de OLTC de transformadores.
- Alteração do tap de reguladores de tensão.
- Alteração do valor de reativo em bancos de capacitores.
- Alteração de estado (ligado/desligado) dos bancos de capacitores.
- Alteração do valor de tensão e potência em geração/suprimento
- Alteração do valor de demanda (P e Q) nas cargas.
- Abrir uma fase qualquer da rede (para simulação de cabo rompido)

4.4.3 Módulo Central

O módulo central é responsável pelo controle do fluxo de informações entre os demais blocos do Emulador, conforme já apresentado na Figura 3.7.

Por meio deste módulo são realizadas as seguintes configurações:

- Cadastro de equipamentos.
- Conexões com o Módulo Simulador e Módulo Transdutor.
- Controle do fluxo de informações.

A Figura 4.7 apresenta a tela para cadastro de equipamento, ou seja, definição do tipo de equipamento, configuração de parâmetros que são importantes para a emulação, como relações de TC, TP, ganhos do amplificador de tensão, ganhos do amplificador de corrente e definição das grandezas que deverão ser emuladas.

Figura 4.7. Tela para cadastro de equipamentos.

Módulo Central - [Cadastrar Equipamentos]

Estabelecer comunicação | Cadastrar equipamentos | Configurar eventos | Simulação | Log de comunicação

Abzir cadastro | Salvar cadastro atual | Limpar cadastro atual | Imprimir lista de conexões

Cadastrar novo equipamento

Tipo do equipamento: 04 - Transformador

Código do equipamento: 130TRCSO1

Adicionar ao cadastro atual

Saídas do transdutor

- Analógicas

Primário		Secundário		
☒ Van	☒ Ia	☒ Van	☒ Ia	☒ Tap
☒ Vbn	☒ Ib	☒ Vbn	☒ Ib	
☒ Vcn	☒ Ic	☒ Vcn	☒ Ic	
☒ Vnt	☒ In	☒ Vnt	☒ In	

Relação de transformação: 1 / 1 1 / 1 1 / 1 1 / 1

Correção do ganho do amplificador: Tensão 1,0 Corrente 1,0

Entradas do transdutor

- Digitais

☒ Subir Tap ☒ Descer Tap

Cadastro atual

Lista de saídas analógicas

Número da saída	Código do equipamento	Tipo do equipamento	Saída analógica	Relação de transf.	Correção do ganho
1	150RE000715789	Chave	Ia	300/1	1
2	150RE000715789	Chave	Ib	300/1	1
3	150RE000715789	Chave	Ic	300/1	1

Saídas analógicas utilizadas: 3 / 128

Lista de saídas digitais

Número da saída	Código do equipamento	Tipo do equipamento	Saída digital

Lista de entradas digitais

Número da entrada	Código do equipamento	Tipo do equipamento	Entrada digital
1	150RE000715789	Chave	Abzir
2	150RE000715789	Chave	Fechar

Canais digitais utilizados: 2 / 32

Conectado com o transdutor
Conectado com o simulador

Fonte: Autor

Ao cadastrar o equipamento, o usuário informará o código do equipamento que o identifica no simulador, desta forma, o Módulo Central fará a correta correspondência entre as grandezas simuladas e aquelas que deverão ser geradas pelo emulador.

A Figura 4.8 apresenta a tela para realização das conexões com o Módulo Simulador, Módulo Transdutor e Módulo de Dispositivos Inteligentes, com destaque para o cadastro de endereço IP e porta de comunicação.

Figura 4.8. Tela para realização das conexões com o Módulo Simulador, Módulo Transdutor e Módulo de Dispositivos Virtuais.

Fonte: Autor

A Figura 4.9 apresenta a tela do Módulo Central que permite ao usuário acompanhar os logs de comunicação, ou seja, o fluxo de mensagens com as devidas estampas de tempo.

Figura 4.9. Tela para visualização dos logs de comunicação.

Fonte: Autor

Por fim, a Figura 4.10 apresenta a tela do Módulo Central para visualização da simulação em tempo real, apresentando os eventos que serão gerados nos momentos especificados e a barra de progressão da simulação.

Figura 4.10. Tela do Módulo Central para visualização da progressão da simulação.

Fonte: Autor

4.4.4 Módulo Gerador/Coletor de sinais

O Módulo Gerador/Coletor de sinais é responsável pelo recebimento e interpretação dos dados provenientes do módulo central, geração dos sinais analógicos e digitais, aquisição dos dados digitais provenientes dos IEDs e envio de mensagens para o Módulo Central.

O software deste módulo foi programado na linguagem Labview (LABVIEW, 2016) e foi desenvolvido de forma a se integrar com o Módulo Central por meio de um protocolo de comunicação criado especificamente para este fim, agilizando a geração e coleta dos sinais.

Visando facilitar a análise das informações tratadas no Módulo Gerador/Coletor de sinais, foram desenvolvidas 4 telas de interface. A primeira tela, apresentada na Figura 4.11 permite que o usuário possa inserir os parâmetros para comunicação com o Módulo Central (comunicação TCP/IP) e os parâmetros do Labview para Entradas e Saídas Digitais.

A segunda tela é utilizada para visualizar os sinais analógicos na forma de fasores ou formas de onda dos sinais analógicos ao longo do tempo, conforme apresentado na Figura 4.12. Uma

terceira tela, que se sobrepõe à segunda, possibilita a visualização das entradas digitais (comandos provenientes dos IEDs) ao longo do tempo conforme apresentado na Figura 4.13

Figura 4.11. Tela inicial para parametrização do Módulo Gerador/Coletor de sinais.

Fonte: Autor

Figura 4.12. Tela gráfica para visualização dos sinais analógicos.

Fonte: Autor

Figura 4.13. Tela gráfica para visualização dos sinais analógicos.

Fonte: Autor

O hardware PXI 1078 da National Instruments [6], apresentado na Figura 4.14, é quem abriga o Módulo Gerador/Coletor. Com um processador Intel I7 2,3 GHz, o hardware contempla ainda 4 placas com 32 canais analógicos e 8 canais digitais cada (PXI 6723), possibilitando a geração dos sinais digitais e analógicos e aquisição de sinais digitais para o emulador.

Figura 4.14. Hardware PXI 1078 e módulo de conexão integrado com as placas PXI 6723.

Fonte: Autor

Os sinais analógicos externados são sinais de tensão, com amplitude de 10V e defasados no tempo, que representam os fasores de tensões e correntes simulados na rede digital. Estes sinais são encaminhados ao módulo de condicionamento de sinais, que se encarregará de amplificar e condicionar para os níveis de tensão e corrente requeridos pelos IEDs. Os amplificadores de corrente e de tensão são descritos a seguir.

4.4.5 Módulo de Condicionamento de Sinais

O módulo de Condicionamento de Sinais é responsável pela adequação dos sinais provenientes do Módulo Gerador/Coletor de Sinais para as entradas de tensão e corrente dos IEDs. Em outras palavras, os sinais são condicionados para os mesmos níveis dos sinais de tensão e corrente provenientes dos secundários dos transformadores TP e TC respectivamente, que normalmente fornecem os sinais para os IEDs instalados em campo. Desta forma, através deste módulo, os IEDs podem funcionar e atuar como se estivessem recebendo os sinais de campo, instalados em uma rede real e não emulada.

Para o condicionamento dos sinais de tensão, são utilizados amplificadores de tensão com valores de saída na ordem de $115 V_{rms}$, condizente com as tensões encontradas nos secundários de TPs. Para o condicionamento de sinais de corrente, são utilizados transdutores de tensão/corrente (V/A) que convertem os sinais de tensão de entrada de um nível de 10 V para saídas de corrente com valores na ordem de 5 A, coerente com as entradas de correntes dos IEDs.

AMPLIFICADOR DE CORRENTE

Para realizar a tarefa de reproduzir as correntes calculadas pelo Módulo Simulador e geradas pelo Módulo Gerador/Coletor, o sinal de saída da placa PXI 6723 é condicionado através de um amplificador linear de potência classe AB alimentando um shunt resistivo. Em série com o shunt resistivo, na saída do amplificador de potência, será conectada a entrada do IED com fundo de escala geralmente de 5 Arms ou 10 Arms (padrão na medida de corrente de TCs comerciais).

O circuito utilizado para gerar a corrente simulada em uma fase de um circuito simulado é apresentado na Figura 4.15. O funcionamento desse circuito é equivalente ao de um amplificador de áudio de potência classe AB, ou seja, o lado positivo do sinal de entrada é amplificado pelo transistor Darlington NPN (TIP142) e o lado negativo pelo transistor Darlington PNP (TIP147). A malha de controle é feita por um amplificador operacional inversor de ganho ajustável de forma a permitir a calibração do ganho ou relação A/V desejada entre saída e entrada. Para alimentar o circuito é utilizada uma fonte de alimentação dupla tipo chaveada de mercado com tensão de ± 5 V e capacidade de corrente de 20 A. Além da fonte de potência há uma segunda fonte dupla isolada para alimentação dos amplificadores de sinal com tensão de ± 15 V e capacidade de corrente de 10 A.

Figura 4.15. Esquema elétrico do amplificador classe AB correspondente a uma fase.

Fonte: Autor

O ganho deste amplificador de potência é calibrado em laboratório de forma a garantir que o valor de corrente calculado apareça na saída do amplificador, isto é, na entrada do IED. Para calibração de ganho e offset do circuito amplificador são ajustados os potenciômetros de ganho (P2) e offset (P1) do amplificador de potência, garantindo desta maneira a relação A/V desejada do circuito completo, isto é, amplificador de corrente, shunt e entrada dos IEDs.

A Figura 4.16 apresenta a montagem final de um módulo, desenvolvido no laboratório, contendo 12 amplificadores de corrente, ou seja, adequado para amplificação de 3 conjuntos de 4 sinais de correntes (IA, IB, IC e IN) para os IEDs.

Figura 4.16. Módulo amplificador de corrente, a) entradas na parte frontal, b) saídas na parte traseira.

Fonte: autor

AMPLIFICADOR DE TENSÃO

O amplificador de tensão foi desenvolvido para amplificar os sinais analógicos da placa PXI 6723 de $0\sim 6V_{rms}$ para $0\sim 220V_{rms}$, a fim de adequar o nível de tensão para a entrada dos IEDs.

O circuito elétrico do amplificador de tensão consiste de um amplificador operacional na entrada, de um driver de potência e de um transformador elevador de tensão na saída. Em cada placa de circuito impresso foram montados quatro amplificadores de tensão, sendo três para simular o TP do sistema trifásico (ligação estrela) e um para simular a diferença de potencial entre o neutro e terra, conforme apresentado na Figura 4.17.

Figura 4.17. Esquema elétrico do amplificador de tensão.

Fonte: Autor

A Figura 4.18 apresenta a montagem final de um módulo de tensão, desenvolvido no laboratório, contendo 6 amplificadores de tensão, ou seja, amplifica 6 conjuntos de 4 tensões (V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} e V_N) ou 8 conjuntos de 3 tensões (V_A , V_B e V_C) para os IEDs.

Figura 4.18. Módulo amplificador de tensão, a) entradas na parte frontal, b) saídas na parte traseira

Fonte: Autor

COROA POTENCIOMÉTRICA

Nos transformadores e reguladores de tensão, o transmissor de posição de tap do comutador de derivação em carga são normalmente do tipo potenciométrico, ou seja, apresentam uma resistência de saída variando de zero ao valor máximo para a posição inicial e final do comutador respectivamente.

A Figura 4.19 apresenta a configuração dos resistores da coroa potenciométrica, a título de exemplo, de um comutador de derivação em carga de 11 taps (-5 até +5).

Figura 4.19. Configuração dos resistores da coroa potenciométrica do comutador de derivação em carga.

Fonte: (TREETECH, 2016)

Para emular uma coroa potenciométrica de 17 taps (-8 até +8), ou seja, informar aos equipamentos reais que controlam comutadores o valor de resistência condizente com o valor de tap do equipamento simulado, foi desenvolvido um transdutor que recebe um sinal analógico do Módulo Gerador/Coletor de sinais referente ao valor de tap do equipamento simulado e apresenta como saída um valor de resistência condizente, sensibilizando o equipamento controlador do comutador como se este estivesse instalado em campo.

A Figura 4.20 apresenta o esquema elétrico do emulador de coroa potenciométrica, no qual foi utilizado um conversor A/D (ADC0804) com a função de coletar o sinal analógico proveniente da placa PXI 6723 e decompor nas saídas D_0 à D_3 , um dispositivo

demultiplexador (SN74LS138), cujas saídas comandam os relés (LS1 à LS14) que, por sua vez, interligam resistores de 10 ohms de forma a conseguir a resistência desejada na saída.

Figura 4.20. Esquema elétrico do emulador de coroa potenciométrica.

Fonte: Autor

GERAÇÃO E AQUISIÇÃO DE SINAIS DIGITAIS

Tão importante quanto as saídas analógicas, as saídas digitais do emulador são imprescindíveis para o processo de emulação e representam os estados dos equipamentos presentes na rede simulada como, por exemplo, o estado das chaves (aberto/fechado) que segue para os respectivos IEDs.

Além disso, o módulo realiza a aquisição dos sinais de comandos referentes aos controles dos equipamentos de potência (trip/close de disjuntor, comandos para subir/descer taps, fechar

chaves e outros). Tais comandos são provenientes das saídas digitais específicas dos IEDs utilizadas para comandar os equipamentos de campo. Porém, no ambiente laboratorial, são integrados através do módulo de condicionamentos de sinais até as entradas digitais das placas PXI 6723.

A integração do emulador com os IEDs foi realizada conforme a metodologia apresentada no item 3.7.2, utilizando-se relés para compatibilização dos sinais digitais de entrada/saída do emulador e IEDs.

A Figura 4.21 apresenta a montagem de uma placa de compatibilização dos sinais digitais do Módulo de Condicionamento de Sinais. Em cada placa são utilizados 4 relés (CP1CR), sendo que os relés 1 e 2 (na parte de cima da figura) são utilizados para compatibilizar as saídas digitais das placas PXI6723 do transdutor para o IED e servem para representar os estados dos equipamentos, por exemplo, aberto e fechado. Os relés 3 e 4 (parte de baixo da figura) são utilizados para condicionamento das saídas digitais do IED para o nível de tensão das entradas digitais do transdutor e servem para repassar os comandos do IED para o emulador, por exemplo, abrir e fechar uma chave.

Figura 4.21. Placa de compatibilização dos sinais digitais do Módulo de Condicionamento de Sinais.

Fonte: Autor

Finalmente o rack completo do emulador de redes é apresentado na Figura 4.22, com destaque para os racks do centro que abrigam o hardware do emulador (transdutores de sinais e amplificadores de tensão e corrente). Os IEDs estão instalados nos racks laterais.

Figura 4.22. Rack completo do emulador de redes

Fonte: Autor

5 Provas de Conceito

Neste capítulo são apresentados os testes realizados com o emulador de redes elétricas inteligentes. Tais testes constituem provas de conceito, com o intuito de avaliar a metodologia de desenvolvimento e a aplicação do emulador para funcionalidades que envolvam equipamentos reais (IEDs e medidores inteligentes) e sistemas de TI.

Para a realização dos testes, o software do emulador de redes elétricas inteligentes, contemplando o Módulo de Configuração de Eventos, Módulo Central e Módulo de Simulação, foi instalado em um computador com sistema operacional Windows 7, processador de 3,3 GHz e 24GB de RAM.

As provas de conceito realizadas envolveram as seguintes funcionalidades:

- a) Atuação da proteção 50 (sobrecorrente de fase instantânea) de um relé de chave religadora após falta no sistema.
- b) Controle de tensão na rede pela atuação de um regulador de tensão.
- c) Atuação do algoritmo de localização de cabo rompido em um sistema DMS integrado aos sistemas SCADA e MDM, fazendo uso de informações de IEDs e Medidores Inteligentes.

Para aplicação das funcionalidades mencionadas nos itens a) e b) foi utilizada uma rede de teste do IEEE/PES disponível em (IEEE/PES, 2016), especificamente a rede teste 34 barras de um alimentador real localizado no Arizona com tensão nominal de 24,9 kV, caracterizada por sua grande extensão, cargas desbalanceadas, grande desequilíbrio entre as fases, presença de reguladores de tensão para manutenção dos níveis de tensão e de capacitores para correção de fator de potência na rede.

Para o teste da funcionalidade mencionada no item c) foi utilizada uma rede real proveniente do cadastro de rede da EDP São Paulo, particularmente o alimentador RCO 1307 com uma extensão de 215 km e cerca de 3 mil barras.

A descrição dos testes realizados e o desempenho, em simulações de tempo real com hardware-in-the-loop, são apresentados nos itens a seguir.

5.1 Atuação da proteção 50 de uma chave religadora após falta monofásica na rede MT.

Esta prova de conceito visa apresentar a evolução da funcionalidade desde a aplicação do evento de curto-circuito no sistema, até a eliminação do defeito pela atuação da chave monofásica controlada por um relé com a proteção 50 (sobrecorrente/instantâneo) habilitada.

O teste envolve um relé SEL 351, com parametrização para a proteção 50, integrado ao emulador de redes elétricas inteligentes contendo a rede de 34 barras.

Tendo em vista a comprovação da metodologia que prevê a possibilidade de se utilizar diferentes ferramentas de simulação de rede no Emulador de REIs, são apresentados dois testes desta mesma funcionalidade, no primeiro deles utilizando o Módulo de Simulação é constituído pelo software SINAP e no segundo teste o Módulo de Simulação é implementado com base no software OpenDSS.

5.1.1 Teste realizado com o Módulo de Simulação implementado com SINAP

Neste primeiro estudo, o Módulo de Simulação do emulador de redes fez uso do SINAP, no qual foi inserida a rede IEEE de 34 barras para os devidos testes.

A Figura 5.1 apresenta a tela do Módulo de Simulação de rede com a simulação da rede teste.

Figura 5.1. Tela gráfica do Módulo de Simulação com a rede IEEE 34 barras.

Fonte: Autor

O emulador de rede foi preparado para uma simulação HIL e configurado para integração com o relé SEL 351, o qual controla a chave colocada na barra 816 responsável pela proteção do ramal de média tensão que alimenta as cargas C_4 e C_5 (marcadas com setas vermelhas), como apresentado anteriormente na Figura 5.1.

A emulação tem início às 00:00:00 e o único evento cadastrado no Módulo Configurador de eventos foi um curto-circuito fase-terra aplicado na barra 820 da rede. A Figura 5.2 apresenta a tela do Módulo Central do emulador no início desta simulação.

Figura 5.2. Tela do Módulo Central para emulação do teste com o relé SEL 351.

Fonte: Autor

Às 00:01:00 o curto-circuito fase-terra é aplicado na barra 820 conforme apresentado na Figura 5.3 e sentido pelo relé SEL 351. Sendo a corrente de falta suficiente para atuação da proteção 50 do relé, o sinal de trip gerado pelo SEL 351 é capturado pelo emulador de rede, mostrado na Figura 5.4, atualizando a rede simulada com a abertura da chave religadora, isolando o trecho em falta e eliminando o curto-circuito, como mostra a Figura 5.5.

Figura 5.3. Tela do Módulo Simulador: Curto-circuito na barra 820 (marcado com X).

Fonte: Autor

Figura 5.4. Módulo Gerado/Coletor de Sinais: captura do sinal de trip (seta vermelha).

Fonte: Autor

Figura 5.5. Abertura da chave (seta vermelha) e isolamento do trecho em falta.

Fonte: Autor

As mensagens trocadas entre o Módulo Central e o Módulo Simulador e entre o Módulo Central e o Módulo Gerador/Coletor de Sinais são capturadas no log de mensagens juntamente com as estampas de tempo possibilitando análises futuras da simulação.

A Figura 5.6 apresenta o relatório de eventos mostrando a evolução da funcionalidade desde a aplicação do evento de curto-circuito no sistema, envio da corrente de falta para o transdutor (00:01:00:154 milissegundos), comando de trip enviado pelo relé SEL 351 (00:01:00:341 milissegundos) e eliminação do defeito no simulador (00:01:00:435 milissegundos).

Figura 5.6. Lista de eventos da emulação envolvendo os comandos do SEL 351.

o Cadastrar equipamentos Configurar eventos Simulação Fila de eventos Log de comunicação				
Fila de eventos				
Intervalo	Timestamp	Origem	Destino	Descrição
00:00:55	0:0:55:84	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:55	0:0:55:115	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:55	0:0:55:131	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:00	0:1:0:92	Módulo Central	Simulador	Simular falta 1FT na barra 820 com pré-falta. (Evento programado)
00:01:00	0:1:0:92	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:00	0:1:0:138	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:00	0:1:0:154	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:00	0:1:0:341	Transdutor	Módulo Central	Abrir chave CH_teste.
00:01:00	0:1:0:341	Módulo Central	Simulador	Abrir chave CH_teste. (Comando recebido do transdutor)
00:01:00	0:1:0:357	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:00	0:1:0:435	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:00	0:1:0:435	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.

Fonte: Autor

5.1.2 Teste realizado com o Módulo de Simulação implementado com OpenDSS

Nesta etapa, a mesma funcionalidade do item anterior foi testada, porém com o Módulo de Simulação do emulador de redes sendo implementado com o software de simulação OpenDSS no lugar do SINAP. Mais uma vez utiliza-se a rede IEEE de 34 barras para os devidos testes.

O emulador de rede foi preparado para uma simulação HIL e configurado para integração com o relé SEL 351, o qual controla a chave colocada na barra 816. A emulação tem início às 00:00:00 e o único evento é um curto-circuito fase-terra aplicado na barra 820 da rede. Às 00:00:30 o curto-circuito fase-terra é aplicado na barra 820 e sentido pelo relé SEL 351.

A Figura 5.7 apresenta o relatório, com representação esquemática da rede, gerado automaticamente pelo OpenDSS após a simulação do curto-circuito. Nessa figura, os equipamentos são destacados com triângulos vermelhos, os trechos destacado com círculos vermelhos possuem um traço azul mais grosso que se refere aos elevados valores de corrente no trecho devido ao evento e a barra 820, na qual se aplicou o curto-circuito, é indicada com uma seta vermelha.

Figura 5.7. Representação gráfica da rede e das correntes de rede após o curto-circuito

Fonte: Autor

Sendo a corrente de falta suficiente para atuação da proteção 50 do relé, o sinal de trip gerado pelo SEL 351 é capturado pelo emulador de rede, atualizando a rede simulada com a abertura da chave religadora, isolando o trecho em falta e eliminando o curto-circuito.

A Figura 5.8 apresenta o relatório de eventos mostrando a evolução da funcionalidade desde a aplicação do evento de curto-circuito no sistema (00:00:30:092 milissegundos), envio da corrente de falta para o transdutor (00:00:30:139 milissegundos), comando de trip (abertura) enviado pelo relé SEL 351 (00:00:30:233 milissegundos) e eliminação do defeito no simulador (00:00:30:280 milissegundos).

Figura 5.8. Lista Global de Eventos para a simulação envolvendo OpenDSS

Módulo Central				
Estabelecer comunicação Cadastrar equipamentos Configurar eventos Simulação IEDs virtuais Fila de eventos Log de comunicação				
Fila de eventos				
Intervalo	Timestamp	Origem	Destino	Descrição
00:00:25	0:0:25:85	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:25	0:0:25:100	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:25	0:0:25:100	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:00:30	0:0:30:92	Módulo Central	Simulador	Simular falta 1FT na barra 820 com pré-falta. (Evento programado)
00:00:30	0:0:30:92	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:30	0:0:30:124	Simulador	Módulo Central	ACK - Função 4
00:00:30	0:0:30:124	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:30	0:0:30:139	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:00:30	0:0:30:233	Transdutor	Módulo Central	Abrir chave CH1.
00:00:30	0:0:30:233	Módulo Central	Simulador	Abrir chave CH1. (Comando recebido do transdutor)
00:00:30	0:0:30:248	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:30	0:0:30:264	Simulador	Módulo Central	ACK - Função 3
00:00:30	0:0:30:280	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:00:30	0:0:30:295	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.

Fonte: Autor

5.2 Controle de tensão na rede por meio de regulador de tensão.

Esta prova de conceito visa apresentar a evolução do controle de tensão na rede teste IEEE 34 barras realizado pelo regulador de tensão colocado entre as barras 814 e 850.

O teste envolve um controlador de comutador de tap chamado AVR da empresa Treetech (TREETECH, 2016), integrado ao emulador de redes elétricas inteligentes contendo a rede de 34 barras.

O emulador de rede foi preparado para uma simulação HIL e configurado para integração com AVR que ficou responsável pelo controle do regulador de tensão da fase A colocado entre as barras 814 e 850.

A emulação tem início às 00:00:00 com o mesmo estado em que terminou o teste do item 5.1, ou seja, com a chave instalada no ramal da barra 816 aberta e, além disso, com os níveis de tensão dentro da faixa de 0,94 pu à 1,05 pu, como pode-se verificar no perfil de tensão no tronco do alimentador mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.9. Perfil de tensão inicial do tronco da rede 34 barras.

Fonte: Autor

Para manutenção destes níveis de tensão, o comutador está no tap e no início da emulação, conforme indicado (seta vermelha) no emulador de coroa potenciométrica mostrado na Figura 5.10 e o desvio medido pelo AVR é de -1,9% em relação à tensão de referência ajustada.

Figura 5.10. AVR (esq.) com medição do tap 4 proveniente do emulador de coroa potenciométrica (dir.)

Fonte: Autor

O único evento cadastrado no Módulo Configurator de eventos foi a manobra da chave religadora instalada na barra 816 às 00:01:00. Para uma melhor visualização dos níveis tensão ao longo da rede foi utilizada a ferramenta de mapas temáticos do SINAP através da qual é possível visualizar os níveis de tensão abaixo de 0,94 pu em vermelho. Na Figura 5.11 é possível verificar que os níveis de tensão estão praticamente acima de 0,94 pu (cor amarela ou verde) enquanto que a Figura 5.12 apresenta a piora nos níveis de tensão após a manobra da chave religadora.

Figura 5.11. Tela do Módulo de Simulação: níveis de tensão acima de 0,94 pu

Fonte: Autor

Figura 5.12. Módulo de Simulação: piora nos níveis de tensão da rede após manobra

Fonte: Autor

Os sinais referentes ao novo nível de tensão são enviados para o AVR que passa a enviar comando para mudança de tap visando subir a tensão no secundário do regulador de tensão para um nível de tensão acima de 1 pu (24,9 kV). A Figura 5.13 apresenta o perfil de tensão após apenas dois comandos de subida de tap enviados pelo AVR. Destaque para o grande desequilíbrio de tensão entre a fase A e as demais.

Figura 5.13. Perfil de tensão no tronco após apenas 2 comutações de tap

Fonte: Autor

Ao todo são realizados 4 comandos de subida de tap do AVR para o regulador de tensão emulado e a rede vai se modificando dinamicamente ao longo da simulação.

Os 4 comandos proveniente do AVR foram corretamente detectados pelo Módulo Gerador/Coletor de Sinais, como mostra a Figura 5.14 e enviados para o Módulo de Simulação.

Figura 5.14. Tela do Módulo Gerador/Coletor de Sinais

Fonte: Autor

Após enviar 4 comandos de subida de TAP, o AVR detecta que o nível de tensão está dentro da faixa desejada, cessando a sequência de comandos.

A Figura 5.15 apresenta a última tela do Módulo de Simulação indicando a melhora nos níveis de tensão na rede ao fim da emulação com a atuação do AVR.

Figura 5.15. Tela do Módulo de Simulação ao fim da emulação com a atuação do AVR

Fonte: Autor

Por fim é apresentado na Figura 5.16 o perfil de tensão final da rede onde é possível verificar a diminuição no desequilíbrio das tensões no tronco do alimentador, com sensível melhora no nível de tensão da fase A, no secundário do primeiro regulador de tensão (seta vermelha), que chega a quase 1,01 pu, diminuindo a diferença para as demais fases.

Figura 5.16. Perfil de tensão final do tronco da rede 34 barras.

Fonte: Autor

A Figura 5.17 apresenta as mensagens trocadas entre o Módulo Central e o Módulo Simulador e entre o Módulo Central e o Módulo Gerador/Coletor de Sinais juntamente com as estampas de tempo.

Figura 5.17. Log de eventos da emulação envolvendo os comandos do AVR

o Cadastrar equipamentos Configurar eventos Simulação Fila de eventos Log de comunicação				
Fila de eventos				
Intervalo	Timestamp	Origem	Destino	Descrição
00:00:55	0:0:55:115	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:00	0:1:0:91	Módulo Central	Simulador	Fechar chave CH_teste. (Evento programado)
00:01:00	0:1:0:91	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:00	0:1:0:169	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:00	0:1:0:185	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:05	0:1:5:99	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:05	0:1:5:130	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:05	0:1:5:146	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:10	0:1:10:106	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:10	0:1:10:138	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:10	0:1:10:138	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:10	0:1:11:261	Transdutor	Módulo Central	Subir tap do regulador Reg_A.
00:01:10	0:1:11:276	Módulo Central	Simulador	Subir tap do regulador Reg_A. (Comando recebido do transdutor)
00:01:10	0:1:11:292	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:10	0:1:11:354	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:10	0:1:11:370	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:15	0:1:15:114	Módulo Central	Simulador	Solicitação dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:15	0:1:15:145	Simulador	Módulo Central	Recebimento dos registros dos equipamentos cadastrados.
00:01:15	0:1:15:145	Módulo Central	Transdutor	Envio de dados das saídas analógicas e digitais.
00:01:15	0:1:16:315	Transdutor	Módulo Central	Subir tap do regulador Reg_A.
00:01:15	0:1:16:331	Módulo Central	Simulador	Subir tap do regulador Reg_A. (Comando recebido do transdutor)

Fonte: Autor

Pode-se verificar na lista de eventos da Figura 5.17 o fluxo de mensagens contendo os dados de tensão enviados para o AVR e os eventos relacionados com os comandos de subir tap do AVR capturados pelo emulador em 00:01:11:261 milissegundos e em 00:01:16:315 milissegundos.

Analisando as diferenças entre as estampas de tempo das mensagens, é possível verificar o tempo de 109 milissegundos entre a captura do comando de subir tap (00:01:11:261 milissegundos) e o retorno das novas grandezas elétricas calculadas para aquele novo estado (00:01:11:370 milissegundos).

5.3 Atuação do algoritmo de localização de cabo rompido em um sistema DMS integrado aos sistemas SCADA e MDM, fazendo uso de informações de IEDs e Medidores Inteligentes.

Este estudo de caso apresenta os testes e validação de um algoritmo específico para localização de cabo rompido, com alta impedância de defeito para terra, em uma rede elétrica inteligente contendo medidores inteligentes e tecnologias de automação da distribuição.

O algoritmo foi implementado no sistema DMS instalado no laboratório de Smart Grids e se baseia nos dados de consumidores com falta de energia em um dado instante, permitindo a identificação de cabos rompidos ou faltas de alta impedância em redes radiais a partir de dados de consumidores sem energia.

As informações sobre falta de energia são provenientes do sistema MDM que coleta os alertas de falta de energia enviados por medidores inteligentes. Por outro lado, as informações sobre o estado da rede e alarmes dos dispositivos de proteção (religadores, relés) são provenientes do sistema SCADA. Todos estes sistemas, bem como o sistema de Gerenciamento de Ocorrências (OMS) são integrados de forma a permitir a troca de informações entre eles.

De forma simplificada, a sequência de eventos que se verifica durante a execução da funcionalidade é a seguinte:

1. Smart Meters sem energia, devido ao rompimento de cabo, enviam mensagens de “last gasp” para o MDM.
2. MDM registra as mensagens dos medidores e encaminha para o DMS.
3. DMS localiza o cabo rompido e informa ao OMS, que registra a ocorrência.
4. DMS envia sugestão de manobras para o SCADA para isolamento do defeito.
5. SCADA envia os comandos para os IEDs que vão atuar no campo (emulador).

A rápida identificação e isolamento de um cabo rompido que chega ao solo é muito relevante para a concessionária, pois pode prevenir acidentes fatais com transeuntes. Entretanto, em muitos casos, o cabo que chega ao solo, seja pelo lado da fonte, seja pelo lado da carga, não produz altas correntes de falta e, portanto, não sensibiliza os elementos de proteção da rede, como disjuntores, religadores ou chaves fusíveis, denotando as chamadas faltas de alta impedância. Este problema é agravado em redes muito desequilibradas, nas quais a proteção de neutro recebe valor elevado para evitar atuações em condição normal, diminuindo a sensibilidade para detecção de cabos rompidos.

Existe uma vasta bibliografia de estudos visando soluções para estes problemas, como encontradas em (ABUSDAL, HEYDT e RIPEGUTU, 2015), (MING, JHY e JIN, 2005) e (SANTANDER, *et al.*, 2005), porém, nota-se a dificuldade de se validar em campo um sistema que se proponha a solucionar o problema, uma vez que não se pode ter o controle sobre quando e como as faltas vão ocorrer, dificultando os testes e a definição dos parâmetros da solução para trabalhar de forma coordenada com os parâmetros dos equipamentos de campo como, por exemplo, valores de pick-up para sobrecorrentes de fase e sobrecorrentes de neutro dos relés, alarmes de ‘last-gasp’ de medidores inteligentes e outros.

Neste contexto, o emulador de redes tem muito a contribuir, provendo um ambiente que integra, de um lado, os sistemas de TI com os seus respectivos algoritmos de controle e de outro os Medidores Inteligentes e os IEDs com as mesmas parametrizações de campo.

Para este estudo de caso foi escolhida uma rede real da concessionária EDP São Paulo, particularmente o alimentador RCO 1307, o qual possui aproximadamente 3.000 barras, 35 km de rede secundária e 215 km de rede primária, onde aplicou apenas um evento inicial, o rompimento do cabo da fase A, chegando ao solo com uma alta impedância de defeito.

Visando a avaliação da influência dos parâmetros dos religadores na aplicação da funcionalidade, foram integrados os IEDs responsáveis pelo controle dos religadores ao emulador de redes, sendo 3 reais e 1 virtual, responsável pelo controle da chave RE071546. A Figura 5.18 apresenta a tela do SCADA com representação unifilar do alimentador RCO 1307, localização dos dispositivos e indicação da porção da rede (circulo verde) onde será simulada a falta. A Tabela 5-1 apresenta as características destes equipamentos, os quais foram parametrizados em laboratório e no Módulo Dispositivo Virtuais, com os mesmos valores dos equipamentos de campo.

Figura 5.18. Tela do SCADA com unifilar e IEDs do alimentador RCO 1307

Fonte: Autor

Tabela 5-1. Informação sobre os IEDs utilizados nos testes em laboratório

IED	Código do equipamento	Estado inicial	Protocolo / comunicação	Corrente de Pickup fase/neutro
Relé	DJCSO022	Fechado	TCP/IP / DNP 3.0	500 A / 200 A
Controlador de Religador	RE0715789	Fechado	Serial / DNP 3.0	500 A / 200 A
Controlador de Religador	RE070902	Fechado	Serial / DNP 3.0	500 A / 200 A
Disp. Virtual	RE071546	Fechado	TCP/IP / DNP 3.0	500 A / 200 A

Fonte: Autor

Para o estudo de caso, os testes foram realizados às 10:00:30 horas, cada um com uma falta fase-terra envolvendo somente a fase A, com diferentes impedâncias de falta, a uma distância de 20 km da subestação, conforme as configurações feitas no Emulador de redes. A Figura 5.19 ilustra o ponto de falta, um cabo rompido na barra B_425014 da rede de distribuição primária, bem como os pontos de medição na baixa tensão, barras B_446549 e B_447041.

Figura 5.19. Ilustração esquemática do cabo rompido no ambiente de simulação

Fonte: Autor

Após a realização de cada um dos testes, diferenciados pela variação da impedância de falta, o emulador registrou os valores de tensão e corrente obtidos nos pontos de interesse do estudo. A Tabela 5-2 mostra os dados registrados para cada impedância de falta no ponto de falta e nas cargas de BT com medidores inteligentes localizados a montante e a jusante da falta e no dispositivo de proteção a montante.

Tabela 5-2. Informações registradas para cada um dos 5 testes realizados.

Test index		1	2	3	4	5
Características da falta	Z (ohm)	35 Ω	30 Ω	25 Ω	20 Ω	15 Ω
	I _{CC} (A)	194,8	219,7	250,1	289,2	340,9
Correntes do religador (RE0715789)	I _A (A)	196,4	221,3	251,6	290,7	342,4
	I _B (A)	61,3	61,8	62,4	63,2	64,0
	I _C (A)	58,9	58,9	59,1	59,4	60,2
	I _N (A)	147,0	170,2	198,4	234,9	283,8
Tensão na barra B_446549	V _A (pu)	0,896	0,880	0,860	0,833	0,799
	V _A (pu)	0,534	0,540	0,545	0,552	0,560
Tensões na barra B_447041	V _B (pu)	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962
	V _C (pu)	0,533	0,533	0,534	0,538	0,545
Atuação da proteção de neutro (50N)		Não	Não	Não	Sim	Sim
Localização da falta pelo DMS		Sim	Sim	Sim	Não	Não
Atuação do DMS no SCADA		Sim	Sim	Sim	Não	Não

Fonte: Autor

Pode-se notar que, para os testes 1, 2 e 3 (impedância de faltas maior ou igual a 25 Ω), a proteção de sobrecorrente de neutro do religador (50N) não foi sensibilizada quando a corrente de pickup foi maior que a corrente nominal (I_N), enquanto que, para os mesmos testes, o DMS identifica e localiza corretamente as faltas, fazendo uso das últimas mensagens enviadas pelos medidores inteligentes virtuais a jusante da falta que tiveram suas fases com valores abaixo de 0,7 pu.

Quanto aos ensaios 4 e 5 (impedância de faltas menor que 25 Ω), verificou-se atuação de proteção, impedindo a localização pelo DMS que, nestes casos, suspende o algoritmo de localização, uma vez que todos os medidores a montante do elemento de proteção enviam mensagens de “last-gasp” para o MDM após atuação de proteção.

Após a localização do condutor rompido, o DMS envia mensagens para o SCADA, a fim de manobrar os interruptores para isolamento das falhas, desde que não haja atuação da proteção, extinguindo a corrente de curto-circuito e diminuindo o risco de acidentes aos transeuntes. O estudo demonstrou que o DMS sempre atuou como esperado, ou seja, comandou o SCADA nos casos 1, 2 e 3 (faltas de alta impedância) e, corretamente, não atuou nos testes 4 e 5.

Visando a demonstração do correto sequenciamento de eventos, foi escolhido o teste 3 para efeito de detalhamento dos eventos e efeitos sobre os sistemas envolvidos. A Tabela 5-3 apresenta a lista global de eventos organizada pelo módulo central e as respectivas estampas de tempo para o teste 3.

Tabela 5-3. Lista Global de Eventos para o teste 3

Time Stamp	Origem	Destino	Descrição do evento
10:0:30:210	Mod. Central	Simulador	Evento de cabo rompido
10:0:30:611	Mod. Central	Simulador	Solicitação de dados do simulador
10:0:33:119	Simulador	Mod. Central	Dados simulados
10:0:33:135	Mod. Central	Transdutor	Dados dos sinais analógicos e digitais
10:1:25:832	Transdutor	Mod. Central	Comando de abertura de chave
10:1:25:847	Mod. Central	Simulador	Comando de abertura de chave
10:1:26:268	Mod. Central	Simulador	Solicitação de dados do simulador
10:1:28:125	Simulador	Mod. Central	Dados simulados
10:1:28:125	Mod. Central	Transdutor	Dados dos sinais analógicos e digitais

Fonte: Autor

As figuras a seguir mostram o funcionamento esperado do emulador de redes e validação da funcionalidade de localização do cabo rompido.

A Figura 5.20 mostra as telas do MDM onde são apresentados os estados dos medidores inteligentes, de forma georeferenciada, antes e depois do rompimento de cabo, com destaque para as sinalizações em vermelho na tela da direita, mostrando a identificação dos pontos sem energia na rede. A Figura 5.21 mostra a tela do DMS identificando o trecho com cabo rompido após o seu algoritmo localizar o defeito, com destaque para a mensagem de sugestão de manobra para o SCADA, visando a isolamento do trecho com defeito. A Figura 5.22 apresenta a tela do SCADA após da realização das manobras que isolaram o trecho com defeito conforme comandos recebidos do DMS, encerrando a sequência de eventos. A Figura 5.23 apresenta a tela do OMS (Power On), que registra a ocorrência enviada automaticamente pelo DMS. O OMS identifica a chave (CF70870) imediatamente a montante do trecho com defeito e permite a visualização para o operador no mapa georeferenciado.

Figura 5.20. Telas do MDM, antes (esquerda) e depois (direita) do rompimento de cabo, com representação geográfica dos medidores com energia (cor verde) e sem energia (cor vermelha).

Fonte: Autor

Figura 5.21. Tela do DMS identificando o trecho com cabo rompido após o seu algoritmo localizar o defeito.

Fonte: Autor

Figura 5.22. Tela do SCADA após da realização das manobras que isolaram o trecho com defeito.

Fonte: Autor

A Figura 5.23 apresenta a tela do sistema PowerOn (OMS) com o registro da ocorrência informada pelo sistema DMS. Destaque para o mapa georeferenciado indicando a chave CF70870 que isola o trecho com defeito conforme localização do cabo rompido realizada pelo DMS e informada via barramento de interoperabilidade.

Figura 5.23. Tela do OMS (Power On) apresentando o registro da ocorrência e localização da chave CF70870 (circulo vermelho) no mapa georeferenciado.

Fonte: Autor

6 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta tese no que se referem ao emprego da metodologia, contribuições do trabalho para o tema, aplicações do emulador desenvolvido para o laboratório de Smart Grids da USP segundo esta metodologia, desdobramentos e trabalhos já publicados.

6.1 Conclusões sobre o emprego da metodologia.

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para desenvolvimento do emulador de redes elétricas inteligentes, seguida por sua implementação no laboratório de Smart Grids da USP, dos primeiros testes realizados para validação da metodologia e de verificação do desempenho do emulador.

O teste envolvendo a proteção de sobrecorrente instantânea (função ANSI 50) do relé SEL 351 serviu como primeira prova de conceito bem sucedida na medida em que a evolução da funcionalidade ocorreu conforme esperado, com o evento programado de curto-circuito monofásico iniciado no Módulo de Configuração de Eventos (00:01:00:092 milissegundos), com a atuação da proteção do relé no instante 00:01:00:341 milissegundos, enviando um comando de trip para abertura da chave religadora e após 94 milissegundos a completa eliminação da falta, incluindo a chegada do novo estado da chave ao relé. Durante toda a simulação o relé SEL 351 recebeu os sinais de tensão e corrente em regime permanente e se comportou como se estivesse instalado em campo.

A mesma funcionalidade foi testada novamente no emulador de redes, porém com o módulo de simulação sendo implementado pelo software de simulação OpenDSS no lugar do SINAP. A emulação tem início às 00:00:00 e o único evento cadastrado no Módulo Configurador de eventos foi um curto-circuito fase-terra aplicado na barra 820 da rede IEEE de 34 barras.

No instante 00:00:30:092 milissegundos o curto-circuito fase-terra é aplicado na barra 820 e sentido pelo relé SEL 351, seguido do envio da corrente de falta para o transdutor (00:00:30:139 milissegundos), com o comando de trip sendo enviado pelo relé SEL 351 (00:00:30:233 milissegundos) e após 62 milissegundos a completa eliminação da falta, incluindo a chegada do novo estado da chave ao relé.

Apesar de não ainda possuir uma interface gráfica, o módulo de simulação com OpenDSS mostrou-se mais ágil, com um tempo de simulação após abertura de chave na ordem de 47 milissegundos contra 97 milissegundos do SINAP. Entretanto, verifica-se que esta diferença é insignificante para o teste da funcionalidade e ambos os simuladores são adequados para o desempenho do Módulo Simulador.

O teste envolvendo a regulação de tensão (função ANSI 90) pelo relé AVR da Tretech foi a segunda prova de conceito e apresentou a correta evolução da funcionalidade, mostrando como o teste em ambiente controlado, utilizando o emulador de redes elétricas inteligentes, pode ser utilizado para verificar a correta parametrização de um IED para o cumprimento de sua função, no caso, ajuste da tensão no secundário do regulador de tensão pelo controle de taps do comutador. Foi possível verificar que em 15 milissegundos o comando de subir tap já havia sido enviado para o Módulo Simulador e após 109 milissegundos o valor de tensão já estava atualizado nos Módulo Transdutor.

Estes testes mostraram a robusta integração dos relés com o emulador de redes elétricas inteligentes em um ambiente HIL, destacando-se a importância de um hardware transdutor compatível com os IEDs utilizados, como amplificadores com potência suficiente para sensibilizar os IEDs, dispositivos para condicionamentos de sinais digitais e para emulação de coroa potenciométrica, itens previstos na metodologia.

No ambiente SIL, onde a sincronização dos dados tem importância vital para obtenção de resultados corretos nas simulações, o número de sistemas integrados mostrou-se desafiador, uma vez que envolveu o Módulo de Simulação, Módulo Dispositivos Virtuais, Módulo de Configuração de Eventos e Módulo Transdutor, além de outros softwares de TI utilizados para a execução da funcionalidade como os sistemas SCADA, MDM e DMS.

Neste contexto, o Módulo Central, principal contribuição da metodologia apresentada neste trabalho, mostrou-se eficaz no controle do fluxo de informações entre os módulos, justificando a proposta da sincronização orientada a eventos.

Verifica-se também que o relatório (ou log de mensagens) apresentando a lista de eventos de forma ordenada pelo Módulo Central, de acordo com suas estampas de tempo, é uma ferramenta interessante para análise e validação das funcionalidades de Smart Grid testadas pelo emulador de redes elétricas inteligentes.

Com relação ao emprego da metodologia para o desenvolvimento de um emulador de redes elétricas inteligentes destacam-se os seguintes pontos:

- As simulações em regime permanente mostram-se adequadas para os testes de funcionalidades de Smart Grid. Enquanto as simulações que trabalham no domínio do tempo se mostram importantes para os estudos de transitórios dinâmicos, as simulações em regime permanente (domínio da frequência) comportam a simulação de redes com grande número de barras e cobrem a maior parte dos eventos de interesse em estudos de funcionalidades de Smart Grids.
- A metodologia de desenvolvimento do emulador não sugere um software específico de simulação e nem o hardware para implementação do Módulo Transdutor, apenas as características e requisitos mínimos de software e hardware para o bom funcionamento do emulador, ficando o pesquisador livre para implementações de acordo com as ferramentas e recursos disponíveis.
- A proposição do Módulo Dispositivos Virtuais na metodologia deste trabalho mostrou-se bastante acertada, uma vez que permitiu os testes de funcionalidades que exigiam um grande número de dispositivos. Ainda que no laboratório da USP tenham sido implementados módulos separados para IEDs virtuais e Medidores virtuais, ambos seguiram a metodologia proposta e foi possível verificar que atenderam o objetivo ao se comportarem como dispositivos reais, a ponto de os sistemas SCADA e MDM não diferenciá-los dos IEDs e medidores reais.
- A metodologia também poderá ser utilizada para construção de emuladores de pequeno porte para laboratórios de Smart Grid didáticos, ou seja, com finalidade de

pesquisa e ensino dos conceitos de redes elétricas inteligentes e familiarização com dispositivos inteligentes.

- Os resultados obtidos nos emuladores dependem fortemente da qualidade da rede usada na simulação, a qual é obtida da concessionária de energia por meio de extrações dos sistemas legados da empresa.

6.2 Contribuições do trabalho

Dentre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se as relacionadas aos simuladores de redes inteligentes, testes de funcionalidades de Smart Grids e aplicações para o Laboratório de Redes Inteligentes, conforme descrito nos itens subsequentes.

6.2.1 Contribuições para o tema de simuladores de redes inteligentes

O trabalho aqui apresentado tem relevância para o desenvolvimento tanto de plataformas HIL (hardware-in-the-loop) quanto SIL (software-in-the-loop) visando testes de funcionalidades de Smart Grids em ambiente controlado.

Nota-se, pela bibliografia estudada, que a grande maioria dos trabalhos contemplando plataformas HIL considerou simulações no domínio do tempo. A exceção, identificada através da pesquisa bibliográfica, recai no trabalho apresentado em (CELEITA, *et al.*, 2016), o qual integrou o simulador OpenDSS. Todavia, o trabalho utilizou um sistema operacional de tempo real e demonstrou grande preocupação na pontualidade com que os modelos simulados interagem com componentes externos, ou seja, houve um rígido controle dos passos de simulação. Além disso, os trabalhos relacionados com testes de funcionalidades de Smart Grids não envolveram sistemas de potência com número elevado de barras, ou seja, foram utilizadas redes menores ou redes de grande porte com redes equivalentes, isto é, com simplificações para redução no número de nós.

Uma contribuição importante deste trabalho vem no sentido de conceber uma solução que viabiliza os testes de funcionalidades de Smart Grid em uma plataforma HIL, considerando IEDs e Medidores Inteligentes integrados com simuladores de sistemas de potência, como o

SINAP ou OpenDSS, que trabalham no domínio da frequência. Através da abordagem proposta, permite-se a realização de cálculos de fluxos de potência e curto-circuitos em regime permanente para redes de distribuição reais, com elevado número de nós.

É importante ressaltar que no ambiente de HIL aqui proposto, como em qualquer ambiente HIL visto na bibliografia estudada, é mantida a sincronização entre os resultados dos modelos simulados e os eventos de componentes externos (hardware) com os quais interagem, graças à aplicação de uma abordagem de simulação orientada a eventos em ambientes HIL, como apresentado em (YANG, *et al.*, 2013), todavia utilizando simulações em regime permanente e sistemas de potência muito mais complexos.

A aplicação de uma simulação orientada a eventos no Emulador de REIs, tipicamente utilizada em co-simulações como vistas em (LIN, *et al.*, 2012), possibilitou contribuições não somente quanto a viabilização do HIL, mas também o desenvolvimento de um complexo ambiente SIL totalmente não determinístico, na medida em que levou à integração de vários módulos do Emulador de REIs (Módulo Simulador, Módulo Configurador de Eventos, Módulo Dispositivos Virtuais), bem como a interação do Emulador de REIs com outros sistemas de TI imprescindíveis para os testes de funcionalidades de Smart Grids, como o DMS, OMS e MDM.

6.2.2 Contribuições para o tema de testes de funcionalidades de Smart Grids

A metodologia proposta não trata apenas do desenvolvimento do Emulador de REIs, mas propõe também contribuir com o desenvolvimento de uma forma original e inovadora de se testar sistemicamente as funcionalidades de Smart Grids em ambiente controlado, na medida em que apresenta um ambiente que envolve IEDs, infraestrutura de telecomunicações, sistemas de TI e simulações em redes de distribuição complexas e sem simplificações.

A utilização de redes sem simplificações, ou seja, mantendo-se a rede original como no cadastro da empresa, além de conceder maior fidelidade ao teste e de agilizar o tempo de preparo da simulação, maximiza a possibilidade de detecção de falhas que poderiam não ser percebidas devido às simplificações ou equivalentes da rede original, na medida em que

podem ser estudados os mais diversos eventos envolvendo todos os elementos presentes na rede.

Vale destacar que a detecção de falhas na etapa de testes, passando por uma correta avaliação tanto do software quanto do hardware envolvidos na funcionalidade de Smart Grids, é de suma importância. Desta forma, possíveis problemas de parametrização de equipamentos, algoritmos de sistemas de controle, integração de sistemas, interoperabilidade entre equipamentos, problemas de comunicação e outros, podem ser antecipados e resolvidos em ambiente controlado, diminuindo consideravelmente os custos de implantação e comissionamento em campo das soluções para redes inteligentes. A representação simplificada da rede não permite a identificação de possíveis problemas na adoção de novas funcionalidades, seja pela omissão dos elementos presentes na rede de distribuição, seja pela impossibilidade de se realizar testes por toda a sua extensão.

Apenas através da emulação de redes em ambiente de HIL e SIL viabilizadas pela abordagem aqui proposta, considerando a integração com os sistemas de TI tipicamente utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica, é que se pode avaliar de forma precisa os impactos da disponibilização de novas funcionalidades de energia nos processos de operação e planejamento comumente praticados pelas empresas. Vale destacar que é essa integração com sistemas de TI reais, tipicamente utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia, que exige a representação detalhada de redes de distribuição reais, sem simplificações ou desenvolvimento de equivalentes.

6.2.3 Contribuições para o desenvolvimento dos Módulos do Emulador de REIs.

O desenvolvimento específico dos módulos do Emulador de REIs implantados no Laboratório de Smart Grids da USP constitui importante contribuição desta tese. Estes módulos foram desenvolvidos conforme a metodologia proposta neste trabalho, sejam os módulos de software, como o Módulo Central, o Módulo Gerenciador de Eventos, os Módulos Dispositivos Virtuais, ou os módulos de hardware, como o Módulo Transdutor e o Emulador de Cargas, passando pelas soluções de integração e sincronização dos diversos módulos.

As provas de conceito apresentadas neste trabalho mostraram nitidamente a importância de se envolver dispositivos reais nos testes das funcionalidades e o quanto os parâmetros destes dispositivos influenciam no funcionamento das funcionalidades de Smart Grids.

Neste contexto, a pesquisa bibliográfica apontava para a utilização de onerosos simuladores de tempo real como RTDS e OPAL-RT, com limitações no tamanho e ou no detalhamento das redes estudadas, para a obtenção de plataformas HIL e integração com os dispositivos reais.

Entretanto, algumas contribuições deste trabalho como a utilização de simuladores de sistemas de potência no domínio da frequência, utilização de equipamentos comerciais, ditos “de prateleira”, como o rack PXI da National Instruments e suas placas digitais e analógicas para geração de sinais e desenvolvimento de um hardware modesto para amplificação dos sinais de tensão e corrente, mostraram-se muito acertadas, na medida em que possibilitaram a implementação de uma robusta plataforma HIL para IEDs e Medidores Inteligentes.

Finalmente, visando contornar a limitação física e orçamentária para aquisição de muitos equipamentos para o laboratório durante o teste sistêmico de uma funcionalidade, importante contribuição do trabalho consiste na especificação e desenvolvimento do Módulo Dispositivos Virtuais, o qual abriga as rotinas de software que simulam muitos IEDs e medidores inteligentes, incluindo a capacidade de comunicação com sistemas SCADA e MDM, respectivamente, por meio de protocolos de comunicação de mercado.

6.3 Aplicações do emulador desenvolvido para o laboratório de Smart Grids da USP e trabalhos publicados.

Durante o projeto de desenvolvimento do Laboratório de Redes Inteligentes da USP, no âmbito do projeto de P&D ANEEL, financiado pelas empresas concessionárias do grupo EDP, a implementação do emulador de redes foi seguida de testes de funcionalidades de interesse da concessionária, mais especificamente as funcionalidades de ADA conhecidas como FLISR, controle Volt-var (já mencionadas no item 4.1) e localização de cabo rompido.

Tais aplicações são exemplos efetivos e atuais, que contribuem para melhoria da segurança e da qualidade de energia elétrica provida por empresas de distribuição no país.

Essas foram as primeiras aplicações do emulador considerando redes reais da concessionária, com elevado número de barras e dispositivos de rede. Destaca-se o teste da funcionalidade de cabo rompido, apresentado no item 5.3 do capítulo 5-Provas de Conceito deste trabalho, o qual envolveu todos os módulos do emulador, infraestrutura de comunicação e ainda diversos sistemas de TI implantados no laboratório como SCADA, MDM, DMS e OMS.

Durante o referido teste, o Emulador de REIs mostrou o quanto tem a contribuir para a validação de funcionalidades de Smart Grids em laboratório, provendo um ambiente controlado que integra, de um lado, os sistemas de TI com os seus respectivos algoritmos de controle e de outro os Medidores Inteligentes e os IEDs com as mesmas parametrizações de campo.

Outras aplicações podem ser vislumbradas em trabalhos futuros e desdobramentos da metodologia desenvolvida neste trabalho, destacando-se as seguintes:

- A utilização do Emulador de REIs para integrar os sistemas de TI (SCADA, DMS, OMS, MDM) presentes no laboratório de Smart Grids com sistemas de distribuição de energia elétrica virtuais possibilita que o COD Virtual seja utilizado de forma dinâmica, não somente para os testes de sistemas, mas para o treinamento de operadores de CODs das empresas distribuidoras e familiarização com as novas funcionalidades de REIs.
- A ilha de medição, contemplando medidores inteligentes e emuladores de carga e geração integrados ao Emulador de REIs, permitirá o desenvolvimento e teste de soluções para AMI, contemplando inclusive injeção de energia na rede por meio de fontes de energia nos consumidores, bem como a validação de requisitos importantes como interoperabilidade de equipamentos e sistemas, previamente à implantação das soluções em campo.
- A integração de sistemas para o despacho centralizado de unidades de geração distribuída presentes em redes de distribuição, de modo a garantir a operação segura das redes de distribuição, identificando condições limites para funcionamento das

unidades de geração, bem como forma de contribuição das mesmas para melhoria da qualidade de fornecimento.

- A metodologia poderá ser utilizada para construção de emuladores de pequeno porte e baixo custo para laboratórios de Smart Grids didáticos, ou seja, com finalidade de pesquisa e ensino dos conceitos de redes elétricas inteligentes e familiarização com dispositivos inteligentes.

No que diz respeito à publicação de trabalhos e participações em congressos nacionais e internacionais referentes à metodologia proposta neste trabalho, bem como testes e aplicações de funcionalidades no laboratório Smart Grid, destacam-se os seguintes:

1 - A Laboratory infrastructure to support utilities in attaining Power Quality and Smart Grid goals. International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th - 16/10/2016 – Belo Horizonte. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7783348/>

2 - Fault Location, Isolation and service restoration (FLISR) functionalities tests in a Smart Grids laboratory for evaluation of the quality of service. International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th - 16/10/2016 – Belo Horizonte. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7783370/>

3 - Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes. IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL - 02/08/2017- João Pessoa. http://www.citenel.gov.br/pages/exporta_trabalhos.aspx

7 Bibliografia

ABUSDAL, ; HEYDT, ; RIPEGUTU,. **Utilization of Advanced Metering Infrastructure in Back-fed Ground Fault Detection**. IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver: IEEE. 2015. p. 1 - 5.

BLANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J. N. The what, where and why of real-time simulation. **IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA**, Julho 2010.

BROWN, R. E. Impact of Smart Grid on distribution system design. **Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE**, Pittsburgh, PA, Julio 2008. 1-4.

CELEITA, D. et al. Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids. **Electric Power Systems Research**, v. 130, p. 156–166, Janeiro 2016.

CHA, S. T.; WU, Q.; ØSTERGAARD, J. A generic danish distribution grid model for smart grid technology testing. **2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)**, Berlin, Outubro 2012. 1-6.

CHOI, S. et al. Autonomous State Estimation for the Smart Grid - Laboratory Implementation. **Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES**, New Orleans, LA, USA, Abril 2010. 1-8.

COELHO, A. L. M. et al. Loss-of-Excitation Protection and Underexcitation Controls Correlation for Synchronous Generators in a Real Time Digital Simulator. **Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE**, Vancouver, BC, Outubro 2014. 1-10.

COOPER-EATON. EATON - Cooper Industries, 2016. Disponível em: <<http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>>. Acesso em: abril 2016.

ECIL. ECIL Energia, 2018. Disponível em: <<http://www.ecilenergia.com.br/>>. Acesso em: 2018 março.

EPRI. EPRI - Simulation Tool – OpenDSS, 2016. Disponível em: <<http://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>>. Acesso em: abril 2016.

FANG, X. et al. Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 14, n. 4, p. 944 - 980, Outubro 2012.

GAOUDA, A. M.; ABD-RABOU, A.; DAHIR, A. Developing educational smart grid laboratory. **Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE), 2013 IEEE International Conference on**, Bali, Agosto 2013. 404 - 409.

GE. **GE**, 2016. Disponível em: <<https://www.ge.com/br/>>. Acesso em: abril 2016.

GODFREY, T. et al. Modeling smart grid applications with co-simulation. **Proc. 1st IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications 2010**, 2010.

HUERTA, F. et al. A Power-HIL microgrid testbed: Smart energy integration lab (SEIL). **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Pittsburgh, PA, Setembro 2014. 3998 - 4003.

IEC-61499. Function Blocks for industrial-process measurement and control systems. **International Electrotechnical Commission**, 2005.

IEC-61850. Communication networks and systems in substations. **International Electrotechnical Commission**, 2003.

IEC-61968. Application integration at electric utilities - System interfaces for distribution management. **International Electrotechnical Commission**, 2003.

IEEE/PES. **IEEE/PES - Distribution Test Feeders**, 2016. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: abril 2016.

JRC. Smart Grid Laboratories Inventory 2016. **Joint Research Centre**, 2016. Disponível em: <<http://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-grid-laboratories-inventory>>. Acesso em: Agosto 2017.

KAGAN, N. **Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. **Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE**, Columbus, OH, v. 2, p. 908 - 912, Fevereiro 2001.

KEZUNOVIC, M. Teaching the smart grid fundamentals using modeling, simulation, and hands-on laboratory experiments. **IEEE PES General Meeting**, Minneapolis, MN, Julho 2010. 1-6.

LABVIEW. National Instruments, 2016. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>>. Acesso em: abril 2016.

LIBERATORE, V.; AL-HAMMOURI, A. Smart grid communication and co-simulation. **Proc. IEEE Energytech 2011**, Maio 2011. 1-5.

LIN, H. et al. Power system and communication network co-simulation for smart grid applications. **Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES**, Hilton Anaheim, CA, Janeiro 2011. 1-6.

- LIN, H. et al. GECO: Global Event-Driven Co-Simulation Framework for Interconnected Power System and Communication Network. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1444 - 1456, Setembro 2012.
- LÖF, A. et al. Low Voltage Network Monitoring in RTDS Environment. **Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES**, Lyngby, Outubro 2013. 1-5.
- LUGARIC, L.; KRAJCAR, S.; SIMIC, Z. Smart city - platform for emergent phenomena power system testbed simulator. **Proc. IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe 2010**, Outubro 2010. 1-7.
- MANIATOPOULOS, M. et al. Combined control and power hardware in-the loop simulation for testing smart grid control algorithms. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 12, p. 3009 - 3018, 8 Maio 2017.
- MATLAB. Mathworks, 2016. Disponível em: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Acesso em: abril 2016.
- METS, K.; OJEA, J. A.; DEVELDER, C. Combining power and communication network simulation for cost-effective smart grid analysis. **IEEE COMMUN. SURVEYS & TUTORIALS – SPECIAL ISSUE ON ENERGY AND SMART GRID**, Agosto 2014.
- MING, Y.; JHY, C. G.; JIN, G. **Detection of downed conductor in distribution system**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. San Francisco: IEEE. 2005. p. 1107 - 1114 Vol. 2.
- MONTOYA, L. A.; MONTENEGRO, D.; RAMOS, G. Adaptive protection testbed using real time and hardware-in-the-loop simulation. **PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble**, Grenoble, Junho 2013. 1-4.
- NI. National Instruments, 2016. Disponível em: <http://www.ni.com/pt-br.html>. Acesso em: abril 2016.
- OMICRON. Omicron Energy, 2016. Disponível em: <https://www.omicronenergy.com/>. Acesso em: abril 2016.
- OPAL-RT, T. OPAL-RT Technologies, 2016. Disponível em: <http://www.opal-rt.com/>. Acesso em: abril 2016.
- PIESCIOROVSKY, E. C.; SCHULZ, N. N. Burns & McDonnell — K-State Smart Grid Laboratory: Protection, communication & power metering. **2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition**, National Harbor, MD, Julho 2014. 1-4.
- POWER, S. Power Solutions, 2016. Disponível em: <http://www.psolutionsbrasil.com.br/>. Acesso em: abril 2016.

RTDS, T. RTDS Technologies, 2016. Disponível em: <<http://www.rtds.com/>>. Acesso em: abril 2016.

SALEHI, V. et al. Laboratory-based smart power system, Part I: Design and system development. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1394 - 1404, Junho 2012.

SANTANDER, L. G. et al. Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 152, n. 2, p. 180 - 184, 2005.

SCHUTTE, S.; SCHERFKE, S.; TROSCHER, M. Mosaik: A framework for modular simulation of active components in smart grids. **Proc. 1st Int. Workshop Smart Grid Modeling and Simulation at IEEE SmartGridComm 2011**, Outubro 2011. 55-60.

SHANSHIRI, M.; GAN, C. K.; TAN, C. W. A Review of Recent Development in Smart Grid and Micro-Grid Laboratories, Melaka, Malaysia, p. 367-372, Junho 2012.

SHRESTHA, A.; CECCHI, V.; COX, R. W. A Real-Time Platform for Validating Continuous Wide-Area Control Systems. **Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2013 IEEE PES**, Washington, DC, Fevereiro 2013. 1-6.

SINAPSIS. Sinapsis Inovação em Energia, 2016. Disponível em: <<http://www.sinapsisenergia.com/portal/>>. Acesso em: abril 2016.

SPIN. SPIN Engenharia de Automação, 2016. Disponível em: <<http://spinengenharia.com.br/>>. Acesso em: abril 2016.

TREETECH. Treotech, 2016. Disponível em: <<http://www.treotech.com.br/>>. Acesso em: abril 2016.

VENUGOPAL, R.; WANG, W.; BÉLANGER, J. Advances in Real-Time Simulation for power distribution systems. **Energy, Automation, and Signal (ICEAS), 2011 International Conference**, Bhubaneswar, Odisha, Dezembro 2011. 1-6.

WIRESHARK. Wireshark, 2016. Disponível em: <<https://www.wireshark.org/>>. Acesso em: abril 2016.

WSO2. ESP Enterprise Service Bus, 2018. Disponível em: <<http://wso2.com/products/enterprise-service-bus/>>. Acesso em: 30 março 2018.

YAMANE, A. et al. A Smart Distribution Grid Laboratory. **IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, Melbourne, VIC, Novembro 2011. 3708 - 3712.

YANG, C. H. et al. Cosimulation Environment for Event-Driven Distributed Controls of Smart Grid. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 3, p. 1423 - 1435, Agosto 2013.