

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Framework em Tempo Real para Sistema de
Gerenciamento de Energia de uma Smart
Microgrid Utilizando Sistema Multiagente.

Roberto Silva Netto

Itajubá, Novembro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Roberto Silva Netto

Framework em Tempo Real para Sistema de
Gerenciamento de Energia de uma Smart
Microgrid Utilizando Sistema Multiagente.

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: PhD. Benedito Donizeti Bonatto

Novembro de 2018
Itajubá



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Tese: **“Framework em Tempo Real para Sistemas de Gerenciamento de Energia de uma Smart Microgrid Utilizando Sistema Multiagente”**

Autor: **Roberto Silva Netto**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
3º	A		
4º	A		
5º	A		

Resultado Médio: Conceito: A , ou seja, APROVADO
Observações: _____

Itajubá, 28 de novembro de 2018

Prof. Dr. Mauricio Campos Passaro
3º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza
4º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Benedito Donizeti Donatto
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

*A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão
próximos a mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.
Toda honra e toda glória seja dada a Ele*

Agradecimentos

Meus mais sinceros agradecimentos.

A Deus por ter me dado saúde, sabedoria, capacidade e força para alcançar mais esse objetivo. Se não fosse por Ele e para Ele nada disso seria possível.

À minha família, Fernanda, Eron e Maria Clara, que serviram muitas vezes de inspiração e superação frente aos obstáculos encontrados durante essa jornada, me revigorando e dando um ânimo novo para levantar e continuar prosseguindo.

Aos meus pais, Lineu, Anna e Edna (sogra) que deram suporte nos momentos necessários, sábias palavras que me direcionaram em todos os momentos, me fizeram dar valor nas pessoas e no relacionamento com elas.

Ao meu orientador Bonatto, por ter aceitado o desafio e ter me ajudado a desenvolver este trabalho. Aos amigos do aPTIs e QMAP, pelo auxílio em pequenos problemas e momentos de concentração.

Agradeço também à Fernanda Brunheroto, Vanessa Messias, Maria Paula Souza, Pamela Duarte, Dona Olga e à todos aqueles que me ajudaram nas revisões do documento.

Por fim, agradeço as entidades governamentais CNPq, CAPES, FAPEMIG e a União Europeia por meio do programa Erasmus Mundus, por promover o suporte financeiro necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Grandes descobertas e progressos
invariavelmente envolvem a cooperação de
várias mentes”.*
(Alexander Graham Bell)

Resumo

Este trabalho apresenta um *Framework* de tempo-real composto por um sistema elétrico representado por uma microrrede, um sistema de comunicação de dados e um sistema multiagentes para monitoramento e gerenciamento do sistema elétrico. Assim, a principal contribuição desse trabalho é a criação deste *framework*, tornando possível a avaliação, em tempo real, do impacto da modelagem do sistema multiagentes (para que dentro do tempo necessário ele entregue a melhor solução possível de gerenciamento de energia na microrrede), a mensuração física das informações de telecomunicações enviadas pelos IEDs (para que os sistemas de gerenciamento possuam os dados necessários para a tomada das decisões), a determinação quantitativa do impacto na qualidade de serviço do sistema de comunicação de fluxo bidirecional, bem como os requisitos de rede para protocolos diferentes para a mesma finalidade. A simulação do sistema elétrico de potência foi realizada em um simulador digital em tempo real (*Real Time Digital Simulator*) para que fosse possível integrá-lo ao sistema multiagentes, utilizando comunicação TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) e assim avaliar o desempenho da aplicação e os requisitos de comunicação de dados desta proposta. Para o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia baseado em sistema multiagentes, utilizou-se o *framework* JADE (JAVA Agent Development Framework), baseado em JAVA. Interligando esses dois mundos, existe um sistema de comunicação de dados para possibilitar a avaliação dos impactos desse sistema dentro deste novo contexto de redes elétricas inteligentes. Esse novo contexto de simulação em tempo real e com integração de sistemas utilizando comunicação TCP/IP, proposto neste trabalho, traz como resultado inédito a medida da eficiência de SMA (Sistema MultiAgentes) como ferramenta para solução dos novos desafios das Redes Elétricas Inteligentes (REI), atuando no gerenciamento de uma microrrede em modo ilhado. Traz também questões de desempenho do sistema de comunicação em aplicações com troca de informações bidirecionais, não somente do IED (*Intelligent Electronic Device*) ao sistema de informação, mas também a resposta do mesmo ao SEP (Sistema Elétrico de Potência) de forma a otimizar um cenário dinâmico e que precisa de respostas em um curto espaço de tempo.

Palavras-chaves: Microrrede, Sistemas Multiagentes, Telecomunicações, Redes Elétricas Inteligentes.

Abstract

This work presents a real-time framework composed of an electrical system represented by a microgrid, a data communication system and a multi-agent system for monitoring and managing the electrical system. Thus, the main contribution of this work is the creation of this framework, allowing the real-time evaluation of the impact of the modeling of the multiagent system (in order to within the necessary time it delivers the best possible energy management solution in the microgrid) the physical measurement of telecommunication information sent by the IEDs (Intelligent Electronic Devices) (in manner that the management systems have the necessary data for decision making), the quantitative determination of the quality of service impact of the bidirectional flow communication system, as well as the requirements of different protocols for the same purpose. The simulation of the electric power system was performed in a real time digital simulator (RTDS) so it could be integrated into the multi-agent system using Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) and then to evaluate the performance of the application and the data communication requirements of this proposal. For the development of the multi-agent system-based energy management system, the JADE (JAVA Agent Development Framework) framework, based on JAVA, was used. Connecting these two worlds, there is a data communication system, to enable the evaluation of the impacts of these systems within this new context of intelligent electric networks. This new real-time simulation context with systems integration using TCP/IP communication, proposed in this work, results in an unprecedented measurement of the efficiency of MAS (MultiAgent System) as a tool to solve the new challenges of Smart Grids (SG), acting in the management of an island-shaped microgrid. It also addresses the performance issues of the communication system in applications with two-way information exchange, not only from the Intelligent Electronic Device (IED) to Electrical Power System (EPS), but also the response to the EPS in order to optimize dynamic scenario that needs responses in a short time.

Key-words: Microgrids, Multiagents System, Telecommunication, Smart Grids, Framework, Real-Time Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Smart Grid plane - Domínios e Zonas Hierárquicas	21
Figura 2 – Modelo da Microrrede	25
Figura 3 – Sistema de Distribuição	36
Figura 4 – Típico Sistema de Distribuição	37
Figura 5 – OSD como um ator flexível	38
Figura 6 – DSO como um facilitador de flexibilidade	38
Figura 7 – Operador Dedicado da Microrrede	38
Figura 8 – Microrrede com Gerenciamento Centralizado	39
Figura 9 – Microrrede com Gerenciamento Distribuído	40
Figura 10 – Comunicação	46
Figura 11 – Arquitetura de Camadas OSI	49
Figura 12 – Pacote TCP/IP	50
Figura 13 – Aplicações em Redes Inteligentes do IEEE 802	51
Figura 14 – Arquitetura do IEEE 802	52
Figura 15 – Pilha do Protocolo IEC 61850	55
Figura 16 – Microrrede Simulada	72
Figura 17 – Perfil de Geração de Energia para Fonte Eólica e Fotovoltáica	73
Figura 18 – Topologia Física Simulada	75
Figura 19 – Agente <i>LOAD</i>	77
Figura 20 – Classe de dados <i>LOAD</i>	77
Figura 21 – Agente <i>SOURCE</i>	77
Figura 22 – Classe <i>SOURCE</i>	77
Figura 23 – Agente <i>MIDDLE</i>	78
Figura 24 – Classe <i>MIDDLE</i>	78
Figura 25 – Agente <i>MANAGER</i>	78
Figura 26 – Classe <i>Manager</i>	78
Figura 27 – Interação entre os agentes para reconhecimento do estado	79
Figura 28 – Interação entre os agentes para rejeição de carga	80
Figura 29 – Interação entre os agentes para restabelecimento de carga	80
Figura 30 – Flowchart das ações do SMA	83
Figura 31 – Comunicação inicial dos agentes e o DF	83
Figura 32 – Troca de Dados para Atualização no SMA	84
Figura 33 – Nova Requisição de Demanda e Resposta	85
Figura 34 – Perfil de Gerenciamento de Energia	86
Figura 35 – Gerenciamento de Energia para Aumento de Geração	87
Figura 36 – Gerenciamento de Energia para Redução de Geração	87

Figura 37 – Perfil da Tensão durante o modo ilhado	89
Figura 38 – Frequência durante o modo ilhado	89
Figura 39 – Inserção de volta ao modo conectado	90
Figura 40 – Entrada de cargas na microrrede	91
Figura 41 – Setup para verificação do desempenho de rede	94
Figura 42 – Caso Base	95
Figura 43 – Perda de 80%	95
Figura 44 – Corrupção de 1%	95
Figura 45 – Reordenamento de 3%	96
Figura 46 – <i>Delay</i> de 10ms	96
Figura 47 – Largura de banda de 3Mbps	96
Figura 48 – Caso Base	97
Figura 49 – <i>Delay</i> de 10ms e <i>Jitter</i> de 500ms	97
Figura 50 – Corrupção de 40%	98
Figura 51 – Perda de 40%	98
Figura 52 – Reordenamento de 20%	99
Figura 53 – Largura de banda de 256kbps	99
Figura 54 – Topologia de teste de desempenho de rede de comunicação bidirecional	100
Figura 55 – <i>Delay</i> de 500ms e <i>jitter</i> de 100ms	101
Figura 56 – Corrupção de 50%	101
Figura 57 – Perda=60%	101
Figura 58 – Largura de Banda de 64kbps	102
Figura 59 – <i>Delay</i> de 500ms e <i>jitter</i> de 100ms	102
Figura 60 – Corrupção de 50%	102
Figura 61 – Perda=60%	103
Figura 62 – Largura de Banda de 64kbps	103
Figura 63 – Modelo de microrrede utilizada no RTDS	110
Figura 64 – Modelo do PV	111
Figura 65 – Detalhe do controle do PV	112
Figura 66 – Detalhe do controle de frequência do PV	113
Figura 67 – Detalhe do controle MPPT do PV	114
Figura 68 – Detalhe do controle do PV	115
Figura 69 – Detalhe do Banco de Capacitor	116
Figura 70 – Detalhe do modulador de sinais da turbina eólica	117
Figura 71 – Detalhe do modelamento físico da turbina eólica	118
Figura 72 – Detalhe do controle da turbina eólica	119
Figura 73 – Detalhe do modulador de sinais da turbina eólica	120
Figura 74 – Detalhe do controle PID da turbina eólica	121
Figura 75 – Nova proposta de microrrede utilizada para teste de flexibilidade	123

Figura 76 – Tensão no PCC em modo conectado	124
Figura 77 – Frequência no PCC em modo conectado	124
Figura 78 – Tensão no PCC em modo ilhado	125
Figura 79 – Frequência no PCC em modo ilhado	125

Lista de tabelas

Tabela 1 – Requerimentos de rede para Aplicações em Redes Inteligentes	56
Tabela 2 – Fontes de Energia da Microrrede [1]	72
Tabela 3 – Descrição das Cargas da Microrrede	73
Tabela 4 – Descrição dos arquivos desenvolvidos	81
Tabela 5 – Requisitos de Rede para Aplicações SCADA e SGE	105

Lista de códigos

Código 5.1 – Script para abrir um <i>Socket</i> de comunicação no RSCAD	74
Código 5.2 – Envio de mensagens	81

Lista de abreviaturas e siglas

6LoWPAN	<i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks</i>
ACL	<i>Asynchronous Connectionless Link</i>
AGC	<i>Automatic Generation Control</i> - Controle Automático da Geração
AMI	<i>Advanced Meter Infrastructure</i> - Infraestrutura de Medição Avançada
AMR	<i>Automated Meter Reading</i> - Leitura de Medidor Automatizada
AP	<i>Access Point</i> - Pontos de Acesso
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AT/MT	Alta Tensão/ Baixa Tensão
BPL	<i>Broadband over Power Line</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BT	Baixa Tensão
CC	Centro de Controle
CCMR	Controlador Central da Microrrede
CIM	<i>Common Information Model</i>
CIR	<i>Committed Information Rate</i>
CM	Controlador da Microrrede
COSEM	<i>Companion Specification for Energy Metering</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detect</i>
DARPA	Defense Advanced Research Agency
DER	<i>Distributed Energy Resource</i>
DMS	<i>Distribution Management System</i> - Sistema de Gerenciamento da Distribuição
DNP3	<i>Distributed Network Protocol</i>

DNS	<i>Domain Name Service</i>
DOE	Department of Energy
DS	<i>Distribution System - Sistema de Distribuição</i>
DSO	<i>Distribution System Operator - Operador do Sistema de Distribuição</i>
EBCDIC	<i>Extended Binary Coded Decimal Interchange Code</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
ESCO	<i>Energy Service Company</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAN	<i>Field Area Networks</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GD	Geração Distribuída
GDR	<i>Generalized Delta Rule</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Ratio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
HDLC	<i>High-Level Data Link Control</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

ISO	<i>International Standard Organization</i>
L2TP	<i>Layer 2 Tunnelling Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LLC	<i>Logic Link Control</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Networks</i>
MAS	<i>Multiagent System</i>
MC	Microsource - Microgeração
ME	Medidor Eletrônico
MGCC	<i>Microgrid Central Controller</i> - Controlador Central da Microrrede
MPLS	<i>Multi Protocol Label Switching</i>
MT/BT	Média Tensão/Baixa Tensão
NAN	<i>Neighborhood Area Network</i>
NIST	National Institute of Standards and Technology
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OMG	<i>Object Management Group</i>
OSD	Operador do Sistema de Distribuição
OSI	<i>Open Systems Interconnections</i>
PDU	<i>Protocal Data Unit</i>
PEI	<i>Power Electronic Interface</i>
PQ	<i>Power Quality</i> - Qualidade da Energia
RES	<i>Renewable Energy Source</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i> - Unidade Terminal Remota

SAP	<i>Session Announcement Protocol</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCO	<i>Synchronous Connection Oriented</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SG	<i>Smart Grid</i>
SGAM	<i>Smart Grids Architecture Model</i>
SGD	Sistema de Gerenciamento da Distribuição
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SMA	Sistemas Multiagentes
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
SOA	<i>Service-Oriented Architecture</i> - Arquitetura Orientada a Serviços
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WiFi	<i>Wireless Network</i> - Rede Sem fio
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WPAN	<i>Wireless Public Area Networks</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativas	25
1.2	Objetivos	26
1.3	Publicações Resultantes	28
1.4	Organização do trabalho	29
2	MICRORREDES	31
2.1	Considerações Iniciais	31
2.2	Introdução	31
2.3	Conceitos	33
2.4	Desafios das Microrredes	34
2.5	Métodos de controle da microrrede	35
2.5.1	Níveis de Controle Hierárquicos	35
2.5.2	Operadores da Microrrede	37
2.5.3	Controle Centralizado ou Descentralizado	39
2.6	Controle de uma Microrrede durante modo ilhado	43
2.6.1	Gerenciamento de Tensão e Frequência	43
2.6.2	Balanceamento entre Geração (<i>Supply</i>) e Demanda	43
2.6.3	Qualidade de Energia	43
2.6.4	<i>Droop Control</i>	43
2.7	Considerações Finais	44
3	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO NO CONTEXTO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	45
3.1	Considerações Iniciais	45
3.2	Introdução	45
3.3	Meios de Comunicação	46
3.3.1	Elementos de Redes de Comunicação de Dados	46
3.3.2	Serviços Orientados a Conexão e <i>Connectionless</i>	47
3.3.3	Classificação das Redes	48
3.4	O modelo ISO/OSI	49
3.5	TCP/IP	49
3.6	Protocolos de Comunicação	51
3.6.1	Família IEEE 802	51
3.6.1.1	Ethernet	52
3.7	Padrões para troca de informações	53

3.7.1	Padrões para medição inteligente - <i>smart metering</i>	53
3.7.2	Modbus	53
3.7.3	DNP3	54
3.7.4	IEC 61850	54
3.8	Requisitos de Comunicação de Dados no Contexto das Redes Elé-	
	tricas Inteligentes	55
3.9	Considerações Finais	56
4	SISTEMAS MULTIAGENTE	57
4.1	Considerações Iniciais	57
4.2	Introdução	57
4.3	Ontologia para Agentes Inteligentes	59
4.4	Sistemas Multiagente aplicados ao Sistema Elétrico de Potência . .	60
4.5	Sistema Multiagente na <i>Smart Grid</i>	61
4.6	Potenciais Benefícios do SMA e <i>Drivers</i> para o seu uso em Aplica-	
	ções de Engenharia de Potência	62
4.6.1	Desenvolvimento de Sistemas Computacionais/Hardware Flexíveis e Exten-	
	síveis	63
4.6.2	Sistemas Multiagente como uma abordagem de modelagem	66
4.7	Desafios Tecnológicos para a Engenharia de Potência	67
4.8	Considerações Finais	69
5	METODOLOGIA	70
5.1	Considerações Iniciais	70
5.2	Introdução	70
5.3	<i>Framework</i>	71
5.3.1	RTDS	71
5.3.2	Sistemas Multiagentes	75
5.3.2.1	Modelamento	75
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	82
6.1	Introdução	82
6.2	Simulações	82
6.3	Resultados	85
6.4	Sistema Ampliado	90
6.5	Discussão dos Resultados	91
7	DESEMPENHO DE REDE DE DADOS	93
7.1	Considerações Iniciais	93
7.2	Introdução	93
7.3	Testes de Desempenho	93

7.3.1	IEC61850 - SV (<i>Sampled Values</i>)	94
7.3.2	DNP3	94
7.3.3	Comunicação Bidirecional	100
7.4	Discussão dos Resultados	104
8	CONCLUSÃO	106
8.1	Tarefas Realizadas	107
8.2	Trabalhos Futuros	108
	APÊNDICE A – MODELO DE MICRORREDE NO RTDS	109
	APÊNDICE B – CURVAS DE TENSÃO E FREQUÊNCIA DA MI- CROREDE	122
	REFERÊNCIAS	126

1 Introdução

Visão Geral

O sistema elétrico atual está se tornando uma rede mais inteligente e um dos atores fundamentais é o sistema de telecomunicações o qual tem a responsabilidade de levar as informações do dispositivo eletrônico inteligente (IED - *Intelligent Electronic Device*) e entregá-lo a um software para processar e exibir as informações recebidas. Da mesma forma, as simulações desta nova rede de energia, também conhecida como *Smart Grid* (SG) ou Rede Elétrica Inteligente (REI), devem refletir essa nova interação e integração do sistema elétrico de potência, do sistema de telecomunicações e do sistema de tecnologia da informação. O Modelo de Arquitetura de Rede Inteligente (SGAM - *Smart Grid Architectural Model*) [2] fornece uma boa visão dessa integração e como todos os atores estão correlacionados conforme ilustrado na Figura 1.

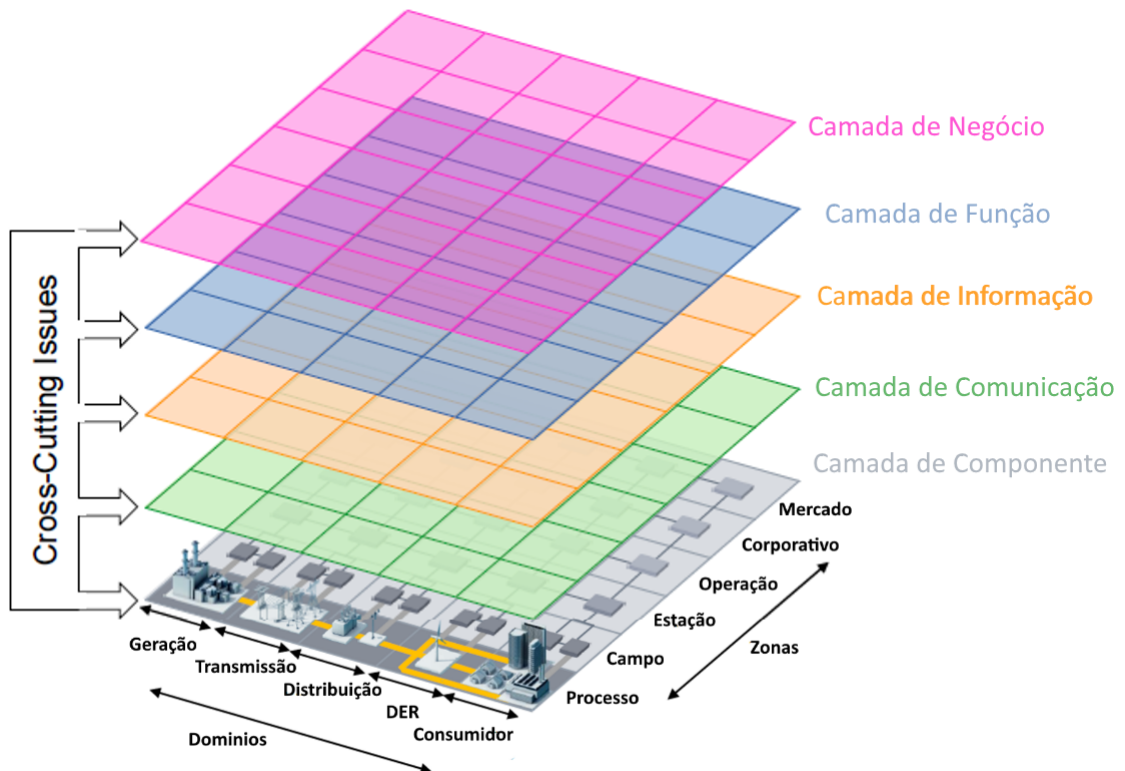


Figura 1 – Smart Grid plane - Domínios e Zonas Hierárquicas [2]

Neste modelo, têm-se domínios, zonas e camadas, onde toda proposta de solução para REI pode ser modelada e assim verificar as suas características e necessidades, além de avaliar a interoperabilidade entre dispositivos e informações entre as diversas camadas. Tais camadas representam objetivos comerciais e processos, funções, troca de informações

e modelos, protocolos de comunicação e componentes. A intenção deste modelo é representar entre quais zonas de interações de gerenciamento de informações os domínios ocorrem. Ele permite a apresentação do estado atual das implementações na rede elétrica, mas, além disso, representa a evolução para futuros cenários de *smart grid*, apoiando os princípios da universalidade, localização, consistência, flexibilidade e interoperabilidade. [2]

- **Camada de Negócios:** Representa a visão de negócios na troca de informações, que pode abranger aspectos regulatórios e econômicos (mercado), políticas, modelos de negócios. Deste modo, é nessa camada que oferece suporte para tomadas de decisões estratégicas.
- **Camada de Função:** Apresenta funções, serviços e seus relacionamentos a partir de uma visão arquitetural.
- **Camada de Informação:** Descreve a informação que está sendo utilizada e trocada entre as camadas de função, serviços e componentes.
- **Camada de Comunicação:** A sua ênfase é descrever os protocolos e mecanismos para uma troca de informação interoperável entre os componentes e as camadas superiores.
- **Camada de Componente:** Ressalta a distribuição física de todos os componentes participantes no contexto de REI. Isto inclui aplicações, equipamentos para o sistema elétrico, proteção, infraestrutura de rede de dados e qualquer tipo de computador.

Os domínios contidos no *framework* podem ser descritos da seguinte maneira.

- **Geração:** Representa a geração de energia elétrica em grande quantidade, como por exemplo, combustível fóssil, nuclear ou plantas hidrelétricas, fazendas eólicas *off-shore*, plantas solares em larga escala que são tipicamente ligadas ao sistema de transmissão.
- **Transmissão:** Concebe a infraestrutura e organização que transporta eletricidade por longas distâncias
- **Distribuição:** Representa a infraestrutura e organização que distribui eletricidade aos consumidores
- **DER:** Representa as fontes elétricas distribuídas, diretamente conectadas ao sistema de distribuição, utilizando tecnologias de geração de baixa escala (tipicamente na faixa entre 3.000 kW e 10.000 kW) controladas pelo OSD (operador do sistema de distribuição).

- **Consumidor:** usuários finais de eletricidade, como também produtores de eletricidades. Podem ser de perfil industrial, comercial ou residencial.

As zonas SGAM representam os níveis hierárquicos do sistema de gerenciamento de energia (IEC62357-2011). Essas zonas refletem o modelo que considera o conceito de agregação e separação funcional em um sistema de gerenciamento elétrico.

O conceito de agregação considera múltiplos aspectos como:

- **Agregação de Dados:** Dados da zona de campo são usualmente agregados ou concentrado na zona de estação, para assim reduzir a quantidade de dados a serem comunicados e processados na zona de operação.
- **Agregação Geográfica** - a partir de localizações distintas para uma grande área.

Além da separação por agregação, o particionamento em zonas pode seguir o conceito de separação funcional. Diferentes funções são designadas para zonas específicas. A razão para essa atribuição é tipicamente o de especificar a natureza da função e também considerar as suas filosofias de uso. Funções em tempo-real são tipicamente na zona de campo e estação (medição, proteção, medidas fatorias e automação). As zonas SGAM são descritas como:

- **Processo:** Inclui a transformação de energia e os equipamentos físicos diretamente envolvidos.
- **Campo:** Abrange equipamento para proteção, controle e monitoramento do processo do sistema elétrico.
- **Estação:** Representa a agregação territorial para o nível de campo, i. e., concentradores de dados, agregação funcional, automação de subestação, sistema SCADA.
- **Operação:** Hospeda os sistemas de controle e operação em seus respectivos domínios, i. e., Sistema de Gerenciamento da Distribuição (SGD), Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE), sistemas de gerenciamento de microrredes e controle de carregamento de frota de veículos elétricos.
- **Corporativo:** Compreende processos comerciais e organizacionais, serviços e infraestruturas para a empresa.
- **Mercado:** Reflete as operações de mercados possíveis ao longo da cadeia de conversão de energia.

Baseada nessa arquitetura, o modelo é implementado abrangendo as zonas de processo, campo, estação e operação, onde as três primeiras estão no RTDS (*Real Time*

Digital Simulator) e a última no Sistema Multiagentes. Dentro dos domínios, o sistema simulado utilizando uma microrrede, abrange a distribuição, DER e consumidor empregando o RTDS. Ao inserir a comunicação de dados, a mensagem passa pelas camadas de componente, comunicação, informação e função, onde esta última entrega dos dados ao Sistema Multiagentes.

Assim, as simulações do sistema de sistemas [3] devem ter o ator que integra o sistema elétrico de potência (SEP) ao sistema de informação (SI) para desta forma realizar uma simulação mais precisa. Porém, esta integração na simulação não é trivial, já que a maioria dos simuladores para sistemas elétricos não estão preparados para isto e não possuem mecanismos para serem integrados. Alguns recursos são utilizados com a intenção de integrar o SEP ao SI em simulações, mas estas tentativas não utilizam o protocolo mais comum de troca de informações no sistema de telecomunicações TCP/IP que são utilizados em algumas aplicações *Smart Grid* como Medição Inteligente, Unidades de Medição Fasorial (PMU - *Phasor Measure Unit*) e Automação de Subestações.

A necessidade de integrar este sistema com um simulador do sistema de potência provêm de requisitos de algumas ações, as quais devem ser feitas em um período de tempo específico. Tem-se também que o intervalo necessário para que os dados percorram todas as zonas e sejam processados, deve ser incluído na simulação para validar os resultados como uma solução no contexto das redes elétricas inteligentes.

Soluções de co-simulação iniciaram com EPOCHS [4] onde ocorre uma sincronização entre todos os simuladores, porém isso não é executado em tempo real. Em [5, 6] ocorre uma melhora neste mesmo modelo de co-simulação, porém ainda não é executado em tempo real. Ainda dentro deste escopo, as ferramentas de simulação passam por melhorias e novos *setups* são desenvolvidos usando, por exemplo, OpenDSS [7]. Outros modelos próximos ao proposto podem ser encontrados em [8], utilizando um RTDS e [9] utilizando o OPAL-RT, porém não existe uma ferramenta para análise de impacto dos requisitos de rede.

Pode-se ainda encontrar outras pesquisas de sistema multiagentes aplicado à microrrede em [10, 11, 12, 13] onde não foi incluído o sistema de telecomunicações, que é o responsável por obter os dados no IED e entregá-lo ao sistema de Tecnologia da Informação (TI). Outros trabalhos utilizaram simulação em tempo real com RTDS [14, 15] e Simulink/Matlab [16], entretanto em ambos os casos não foi avaliado o desempenho do sistema de comunicação de dados.

Outro aspecto importante que deve ser observado é como o SMA foi desenvolvido para resolver os problemas em uma *microgrid*. Algumas pesquisas como IDAPS [17, 18, 19], AOSE [20], diretrizes básicas aplicadas ao sistema elétrico [21, 22, 23], INGENIAS [24] têm demonstrado *frameworks* para o design, modelagem e desenvolvimento do Sistema Multi-agentes (SMA), com uma visão sobre como devem agir, interagir, socializar e buscar

o objetivo, o qual é a solução para o gerenciamento de energia do respectivo sistema de potência.

Desta maneira, a contribuição do trabalho está no modelo apresentado, integrando uma microrrede, um sistema de comunicação de dados real, um simulador de desempenho de redes de comunicação e um sistema de gerenciamento de energia baseado em sistemas multiagentes, onde pela primeira vez, todos os sistemas executam suas tarefas em tempo real, possibilitando uma análise de desempenho e impacto do sistema de comunicação em um fluxo bidirecional de informação.

1.1 Justificativas

Uma microrrede é uma rede em menor escala para suprir pequenas cargas da comunidade [25]. Segundo o *Microgrid Institute* [26] é possível definir microrrede como um pequeno sistema de potência, capaz de balancear sua geração e demanda, no intuito de manter estável o suprimento de energia dentro de uma área definida, conforme ilustrado na Figura 2.

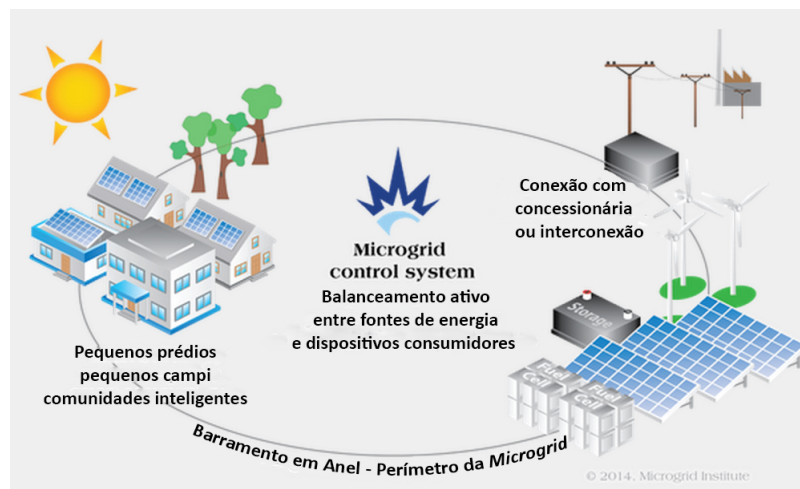


Figura 2 – Modelo da Microrrede [26]

Ela também deve ser capaz de lidar com dois modos básicos de operação: normal (conectado à rede) e emergência (ilhado). Desta forma, a fim de atingir uma capacidade de operação ilhada por um longo período, a microrrede deve atender requisitos de armazenamento de energia e microgeração contínua para suprir todas as cargas, ou em casos de operação crítica, suprir as cargas de alta prioridade [27].

Buscando operar eficientemente e assim tornando a rede mais confiável, aumentando a disponibilidade e segurança, e reduzindo os impactos ambientais, faz-se necessário um sistema de comunicação inteligente para integrar todos os componentes da microrrede e possibilitar a inserção de geração distribuída, comércio de energia, sistema de proteção

integrado, gerenciamento de qualidade de energia e monitoramento em tempo real da microrrede [25].

Ao utilizar SMA para desenvolver o sistema de gerenciamento de energia, obtêm-se maior escalabilidade, flexibilidade e autonomia frente aos sistemas centralizados, devido a sua forma de concepção e operação. Isso é possível com a interação e socialização entre os agentes, atuando de forma descentralizada na busca dos seus objetivos, pois cada agente já tem o seu papel e objetivo definidos, podendo entrar e sair do ambiente sem a necessidade de reformular toda a metodologia [21].

Alguns trabalhos recentes como [28, 29, 30] apresentam soluções abordadas neste trabalho, porém nenhuma delas avaliam a solução completa (sistema elétrico, de comunicação e da informação (SGE)), sempre um dos sistemas é deixado de lado.

Assim, como a microrrede é vista como uma pequeno sistema elétrico inteligente, ou uma pequena *Smart Grid* [27], o sistema de comunicação exerce papel fundamental na sua composição [31, 32, 33]. Da mesma forma, ao possuir um sistema de comunicação, recaem sobre ele os requisitos mínimos de rede para que os mais variados tipos de aplicações da rede elétrica inteligente possam operar de forma satisfatória [34].

Desta forma, o problema de gerenciamento de energia em uma microrrede ilhada, na qual os três sistemas estão inclusos, tendo que atender as cargas dentro da limitação imposta pela geração distribuída local, utilizando um sistema de comunicação inteligente capaz de transportar informação em ambos os sentidos no tempo apropriado, deve ser visto em todos os aspectos.

Essa iniciativa vem de encontro com a necessidade de desenvolvimento de *Cyber-Physical testbeds* de Redes Elétricas Inteligentes, para o desenvolvimento de simulações em tempo-real com comunicação de dados, de soluções complexas e interdisciplinares em áreas prioritárias de pesquisa como Gerenciamento da rede de Distribuição, Cyber Security e Redes de comunicação [35].

1.2 Objetivos

Este trabalho propõe o uso de um *framework* para a simulação de um Sistema Multiagentes para o gerenciamento de energia de uma microrrede no modo ilhado, buscando priorizar cargas com o uso de diferentes cenários. Para tanto, será realizada uma co-simulação em tempo real através da integração do simulador digital em tempo real (*Real Time Digital Simulator RTDS*) com o Sistema Multiagente desenvolvido no *framework* JADE, utilizando a comunicação TCP/IP para a troca de informações entre os sistemas.

Em [36] é proposto um sistema para gerenciamento de energia em uma microrrede

utilizando modos de operação baseados em prioridades de carga e assim aumentar a disponibilidade de energia para as cargas de alta prioridade. Porém não foi levado em consideração o sistema de comunicação, necessário para o controle das cargas e das fontes de energia, trazendo as informações necessárias para a visualização do real cenário e envio dos comandos de operação do sistema elétrico.

Dando continuidade ao trabalho anterior, em [37] é inserido na análise o sistema de comunicação, o qual também são gerenciados os seus processos internos, de forma a otimizar o consumo de energia baseado no modo de operação e estado do sistema de armazenamento de energia. Entretanto, não se tem dados de largura de banda necessária, tempo de resposta em tempo real da metodologia o qual pode impactar diretamente no bom funcionamento da metodologia e quais os requisitos de qualidade de serviço da rede de comunicação de dados são necessários para que se atinja o objetivo estipulado.

No trabalho [38], entretanto, obteve-se um visão do impacto da latência em uma aplicação unidirecional de monitoramento do sistema elétrico em simulação de tempo real. Todavia, para a operação do sistema elétrico de potência faz-se necessária a utilização de um sistema de comunicação bidirecional.

Ainda dentro deste contexto, Morstyn [39] se utiliza de um RTDS juntamente com SMA para executar o gerenciamento de energia e obteve um desempenho computacional mais baixo utilizando o SMA do que com metodologias tradicionais. Porém não é possível verificar como este foi desenvolvido, de que forma os agentes interagem, como é feita a troca de mensagens entre o RTDS e SMA ou qual a plataforma utilizada dentro do Matlab.

Desta forma, ao se aprimorar a ideia inicial em [36], a contribuição é obtida no desenvolvimento de um *framework* de tempo real [40], no qual foi possível integrar o sistema de comunicação de dados, ao sistema elétrico de potência e ao sistema de tecnologia da informação e assim: avaliar os requisitos de largura de banda e qualidade de serviço da rede de comunicação de dados, avaliar os requisitos mais profundamente tanto em uma comunicação unidirecional como bidirecional, avaliar o tempo de resposta do sistema de gerenciamento de energia, as informações necessárias para que o sistema tenha a visão correta do cenário.

Para tanto se fez necessário:

- desenvolvimento de uma microrrede com fontes de energia distribuída e que opere em modo ilhado no RTDS,
- desenvolvimento de um sistema multiagentes utilizando o *framework* JADE que tenha como objetivo suprir o maior número de cargas dentro de um estado definido, o qual determina a prioridade da carga que deverá ser atendida,

- desenvolvimento de um agente que fará o papel de intermediário entre o RSCAD e os demais agentes,
- desenvolvimento de toda a comunicação entre os agentes e suas respectivas ações,
- integração do RSCAD com o SMA através de comunicação TCP/IP utilizando o agente intermediário,
- verificação da operação da microrrede através do SMA e identificar informações e problemas que o impeça de atingir os objetivos pré-definidos,
- avaliação dos impactos que o desempenho dos meios de comunicação acarretam na solução em tempo real

Não se levou em consideração a energia utilizada para o sistema de comunicação, pois entende-se que, ele como um sistema de missão crítica possui vários mecanismos para garantir a sua disponibilidade o maior tempo possível (99.995% de *uptime*) através de sistemas redundantes, tanto do meio físico de comunicação, como de equipamentos, além de sistemas backup de energia para no mínimo de 96 horas.

Conforme descrito em [41], existem algumas metodologias de controle para microrredes durante a operação em modo ilhado, como gerenciamento de tensão e frequência, qualidade de energia, *droop control* e balanceamento entre geração e demanda. O foco deste trabalho está na última metodologia.

Não se pretende classificar como são as soluções na microrrede [42, 43, 44] e para o SMA como apresentado em [45, 46, 47].

1.3 Publicações Resultantes

1. Souza, P. M.; Silva, M. R.; de Souza, L. E.; de Souza, C. W., Netto, R. S., "Modeling using Colored Petri Net of Communication Networks based on IEC 61850 in a Microgrid Context", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2018
2. Netto, R. S.; Ramalho, G.; Bonatto, B. D.; Carpinteiro, O. A. S.; Zambroni de Souza, A. C.; Oliveira, D.; Braga, R. A. S., "Real-Time Framework for Energy Management System of a Smart Microgrid Using Multiagent Systems". *Energies*, 2018.
3. Villalta, V. O.; Netto, R. S.; Caetano, R. E.; Bonatto, B. D., "Benchmarking of performance requirements between IEC 61850 and DNP3 in Real-time Monitoring" In: 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2018, Palermo.

4. Machado, P. H. F.; SOUZA, L. E.; Netto, R. S., "Framework proposal to support grid-connected microgrid optimal planning" In: 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2018, Palermo.
5. Campos, B. P.; Netto, R. S.; Pinheiro, G. G.; Gruosso, G.; Maffezzoni, P., "Information Integration Issues for Monitoring Performance Metrics of a Microgrid" In: 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2018, Palermo.
6. Gruosso, G.; Netto, R. S.; Maffezzoni, P.; Zhang, Z.; Daniel, L., "Low Voltage Electrical Distribution Network Analysis under load variation" In: IEEE International Conference on Industrial Technology, 2018, Lyon.
7. Villalta, V. O.; Netto, R. S. ; Caetano, R. E. ; Bonatto, B. D., "Considerações sobre a IEC 61850 aplicada na Qualidade de Energia" In: XII Conferencia Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2017, Curitiba.
8. Netto, R. S.; Ramos, G.; Ribeiro, P. F. ; Belchior, F. N. ; Bonatto, B. D. ; Zambroni de Souza, A. C., "Sistema Multi-Agentes como Plataforma de Monitoramento de Qualidade da Energia Elétrica em uma Microgrid". In: Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2015, Campina Grande.
9. Oliveira, P. A. P. ; Ribeiro, P. F. ; Netto, R. S. , "Planejamento de Redes Inteligentes para Sistemas de Transmissão - Tecnologias, Aplicações e Projetos". In: XXIII SNP-TEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão De Energia Elétrica, 2015, Foz do Iguaçu.
10. Ramos, G.; Ribeiro, P. F. ; Netto, R. S. , "Comunicações Para Linhas De Transmissão: Uma Visão Panorâmica Das Tecnologias, Aplicações e Desafios". In: XXIII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2015, Foz do Iguaçu.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em oito capítulos, onde os próximos três tratam de cada sistema envolvido neste trabalho. No capítulo 2 tem-se as microrredes, seu papel dentro das redes elétricas inteligentes, desafios e oportunidades. Em seguida no capítulo 3, é explanado o sistema de comunicação de dados dentro do contexto do sistema elétrico de potência e das redes inteligentes.

No próximo capítulo 4, apresenta-se os conceitos teóricos do Sistema Multiagentes e seus principais usos dentro da solução dos desafios impostos pelo novo paradigma do

setor elétrico. No capítulo 5 é descrito a metodologia aplicada para o desenvolvimento do *framework* e de que forma ele foi integrado.

No capítulo 6 apresenta-se o desenvolvimento da solução proposta e os resultados obtidos com o uso de SMA integrados a um simulador digital em tempo real utilizando comunicação de dados através de uma conexão TCP/IP. Por meio deste *framework*, no capítulo 7 são demonstrados os testes de desempenho e impacto do sistema de comunicação de dados no SEP. No capítulo 8 tem-se a conclusão dos resultados obtidos.

2 Microrredes

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentado o conceito de microrrede e o seu papel dentro do contexto de Redes Elétricas Inteligentes. Inicialmente será introduzido o conceito que envolve esta questão, quais os principais desafios ao utilizar as microrredes, os métodos de controle bem como as questões envolvidas para esta atividade e os principais benefícios que as microrredes podem trazer para o sistema elétrico, tomando como base [27, 48].

2.2 Introdução

A *Smart Grid* (SG) ou Rede Elétrica Inteligente (REI) surgiu com novos paradigmas, e um deles é a microrrede ou *microgrid* [49], a qual é vista como uma das pedras angulares do futuro das redes inteligentes [50]. Espera-se que a evolução da SG venha através da integração *plug-and-play* de *microrredes* [51]. Uma microrrede é um agrupamento localizado de fontes geradoras de energia elétrica, armazenamento de energia e cargas. No funcionamento normal, ela é conectada a um sistema elétrico tradicional (*macrogrid*). Os usuários em uma microrrede podem gerar eletricidade em baixa tensão usando geração distribuída, como painéis solares, turbinas eólicas e células de combustível [52].

O único ponto comum de acoplamento com o SEP pode ser desconectado, tornando autônomo o funcionamento da microrrede [53]. Esta operação resultará em uma microrrede em modo ilhado, na qual geradores distribuídos continuam a alimentar os usuários nesta microrrede, sem obter energia do sistema elétrico localizado na *macrogrid* ou concessionária. Assim, os múltiplos geradores distribuídos e a capacidade de isolar a microrrede de uma rede maior em perturbação, poderá fornecer uma energia altamente confiável. Este isolamento intencional de geração e cargas tem o potencial de proporcionar uma maior confiabilidade local do que a proporcionada pelo sistema de energia como um todo [54].

Observe que, embora esses usuários não obtenham a energia de fora no modo ilhado, eles ainda podem trocar algumas informações com a *macrogrid*. Por exemplo, eles podem querer saber o *status* da mesma e decidir se eles devem se reconectar à *macrogrid* e obter energia do SEP. Lasseter [55] também apontou que o uso de microrredes no sistema de distribuição é simples e também simplifica a implementação de muitas das funções da REI. Isso inclui maior confiabilidade, alta penetração de fontes renováveis, auto-recuperação (*self-healing*), controle de carga ativa e maior eficiência. Por exemplo, a

fim de realizar *self-healing* durante interrupções, microrredes podem mudar para o modo ilhado e, como resultado, os usuários em microrredes não serão afetados por interrupções. Tem-se também em [49], que a capacidade de *self-healing* em caso de falha deverá ser uma característica importante da SG de acordo com os padrões [26] do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST).

A abordagem da microrrede permite o controle local da geração distribuída, reduzindo ou eliminando a necessidade de despacho central. Durante as perturbações, a geração e as cargas correspondentes podem separar-se do sistema de distribuição para isolar a carga da perturbação (e assim manter um nível elevado de serviço) sem prejudicar a integridade da rede de transmissão. O tamanho reduzido das tecnologias emergentes de geração, possibilita que os geradores sejam colocados de forma otimizada em relação às cargas térmicas permitindo o uso de calor residual. Essas aplicações podem mais do que duplicar a eficiência global dos sistemas [56, 57].

A definição de microrrede ainda está em discussão, mas todas têm os mesmos componentes básicos como conjunto de cargas, unidades de Geração Distribuída (DG) e Sistemas de Armazenamento de Energia, e um único ponto de conexão à rede principal, o Ponto de Acoplamento Comum. O conceito de microrrede pode ser adotado como o paradigma para a integração da geração distribuída, permitindo que os problemas técnicos possam ser resolvidos descentralizados e assim reduzindo todos os exigentes requerimentos usando uma complexa coordenação central. Uma das definições de microrrede é de uma rede elétrica local, escalável e sustentável, consistindo de uma agregação de carga elétrica e suas fontes de energia correspondentes. Em [44] está definido que o conceito de microrrede foi introduzido pela primeira vez na literatura técnica em [58] e [56] como uma solução para a integração confiável de DERs (*Distributed Energy Resources*), incluindo *Energy Storage Systems* (ESSs) e Cargas controláveis que devem ser vistas pela rede ou sistema elétrico principal como um único elemento.

Segundo Fang [49], a microrrede pode operar, embora em uma condição restrita, com a ajuda da energia gerada pelos clientes. Este sistema inteligente ainda pode ser dividido em três subsistemas: o subsistema de energia inteligente, o subsistema de informação inteligente e o subsistema de comunicação inteligente:

- O subsistema de **energia inteligente** é responsável pela geração, entrega e consumo avançado de eletricidade.
- O subsistema de **informação inteligente** é responsável pela medição, monitoramento e gestão de informações avançadas no contexto da SG.
- O subsistema de **comunicação inteligente** é responsável pela conectividade de comunicação e pela transmissão de informações entre sistemas, dispositivos e aplicações no contexto da SG.

2.3 Conceitos

Segundo Chowdhury [48] as microrredes são redes de fornecimento em pequena escala, projetadas para alimentar cargas elétricas em uma pequena comunidade, como um bairro, ou uma comunidade acadêmica ou pública, como uma universidade ou escola ou uma área comercial, industrial, como uma propriedade comercial ou uma região municipal. Microrrede é essencialmente uma rede de distribuição ativa porque é o conglomerado de sistemas DG (*Distributed Generation*) e cargas diferentes no nível de tensão de distribuição. Os geradores ou *microsources* empregados em uma microrrede são geralmente DERs renováveis e não-convencionais integrados em conjunto para gerar energia em tensão de distribuição. Do ponto de vista operacional, as micro-fontes devem ser equipadas com interfaces eletrônicas de potência (PEI - *Power Electronic Interface*) e controles para fornecer a flexibilidade necessária para garantir o funcionamento como um único sistema agregado e para manter a qualidade de energia e a quantidade de energia especificadas. Esta flexibilidade de controle permitiria que a microrrede se apresentasse ao sistema de energia elétrica principal como uma única unidade controlada que satisfaz as necessidades de energia local para confiabilidade e segurança.

As principais diferenças entre uma microrrede e uma planta de energia convencional são as seguintes:

1. Microgeração são de pequena capacidade de geração em comparação aos grandes geradores nas plantas de energia convencional.
2. Geração de energia na tensão da distribuição pode ser diretamente conectada ao sistema de distribuição da concessionária.
3. As micro-fontes são normalmente instaladas perto das instalações dos clientes de forma que as cargas elétricas/térmicas possam ser eficientemente fornecidas com perfil de tensão e frequência satisfatória e perdas de elétricas insignificantes.

As características técnicas de uma microrrede a tornam adequada para o fornecimento de energia para áreas remotas de um país onde a conexão com o sistema da rede principal é de difícil acesso devido à topologia e é frequentemente interrompido devido a condições climáticas severas ou perturbações causadas pelo homem.

Do ponto de vista da rede, a principal vantagem de uma microrrede é ser tratada como uma entidade controlada dentro do sistema elétrico de potência. Pode ser operada como uma única carga agregada. Isso determina seu fácil controle e conformidade com regras e regulamentos de rede, sem prejudicar a confiabilidade e segurança do usuário de energia. Do ponto de vista dos clientes, microrredes são benéficas para satisfazer localmente suas necessidades elétricas. Elas podem fornecer energia ininterrupta, melhorar a

confiabilidade local, reduzir as perdas de alimentação e fornecer suporte de tensão local. Do ponto de vista ambiental, microrredes reduzem a poluição ambiental e aquecimento global através da utilização de tecnologia de baixa produção de carbono e gases do efeito estufa.

No entanto, para alcançar uma operação estável e segura, uma série de questões técnicas, regulamentares e econômicas devem ser resolvidas antes das microrredes podem se tornar comuns. Algumas áreas problemáticas que requerem a devida atenção, são a natureza intermitente e dependente do clima das GDs, baixo conteúdo energético dos combustíveis e falta de normas e regulamentação para operar as microrredes em sincronismo com a concessionária de energia. O estudo de tais questões exigiria extensa pesquisa em tempo real e *off-line* [48].

2.4 Desafios das Microrredes

De acordo com [44] os desafios mais relevantes de proteção e controle da microrrede são:

- **Fluxo bidirecional de potência:** Como os alimentadores de distribuição foram inicialmente projetados para fluxo de energia unidirecional, a integração de unidades DG em baixos níveis de tensão pode causar fluxos de energia inversa e levar a complicações na coordenação de proteção, padrões indesejáveis de fluxo de energia, distribuição de corrente de falha e controle de tensão.
- **Aspectos de estabilidade:** As oscilações locais podem emergir da interação dos sistemas de controle das unidades DG, exigindo uma análise completa de estabilidade de pequenas perturbações. Além disso, são necessárias análises de estabilidade transitória para garantir uma transição perfeita entre os modos de operação autônomos em uma microrrede.
- **Baixa inércia:** Ao contrário dos sistemas de alimentação de grande porte, onde um elevado número de geradores síncronos garante uma inércia relativamente grande, as microrredes podem apresentar uma característica de baixa inércia, especialmente se houver uma parcela significativa das unidades DG com interface eletrônica. Essa interface pode melhorar o desempenho dinâmico do sistema, porém a baixa inércia do sistema pode levar a graves desvios de frequência em operação autônoma, se um mecanismo de controle adequado não for implementado.
- **Incerteza:** A operação econômica e confiável das microrredes requer um certo nível de coordenação entre diferentes GDs. Esta coordenação torna-se mais desafiadora em microrredes isoladas, onde o equilíbrio demanda-oferta crítico e taxas de falha

tipicamente mais elevadas requerem a resolução de um problema fortemente acoplado num horizonte ampliado, tendo em conta a incerteza de parâmetros como perfil de carga e previsão meteorológica. Esta incerteza é maior do que a dos sistemas de energia de grande porte, devido ao número reduzido de cargas e variações altamente correlacionadas dos recursos energéticos disponíveis (efeito de média limitada).

Uma maneira de superar esses desafios é o uso do controle descentralizado da microrrede, e o uso da teoria do Sistema Multiagentes (MAS) é uma abordagem usada para projetar e desenvolver o sistema descentralizado.

2.5 Métodos de controle da microrrede

2.5.1 Níveis de Controle Hierárquicos

Segundo [27] não há uma estrutura geral da arquitetura de controle de microrrede, pois a configuração depende do tipo da microrrede ou da infraestrutura existente. Antes de analisar a arquitetura de gerenciamento de microrrede, deve-se analisar os sistemas de distribuição atuais.

A Figura 3 apresenta a maior parte da infraestrutura de controle e gerenciamento de um típico sistema de distribuição com aumento de penetração de GD. Pode se distinguir o Sistema de Gerenciamento da Distribuição (DMS - *Distribution Management System*) e a Leitura Automatizada de Medidores (AMR - *Automated Meter Reading*). O DMS é responsável principalmente pelo monitoramento de AT/MT de algumas subestações críticas de MT/BT. O sistema de hardware consiste de um servidor principal e várias unidades de terminais remotas (RTU - *Remote Terminal Units*) ou equipamentos eletrônicos inteligentes (IEDs).

Geralmente, o DMS não controla as DGs/RES (*Renewable Energy Sources*) (exceto algumas grandes instalações em certos casos) ou as cargas. As ações de controle típicas são a reconfiguração da rede, através de operações de comutação nos alimentadores principais, e o controle da tensão através da comutação de banco de capacitores ou, talvez, a alteração de taps de transformadores (principalmente manualmente). O sistema AMR é responsável pela coleta de leituras eletrônicas de medidores e é usado principalmente para fins de faturamento (*billing*). Na Figura 3 não é considerada a existência da infraestrutura de medidores avançados (AMI - *Advanced Meter Infrastructure*), uma vez que esta é considerada adjacente, como parte do sistema de controle da microrrede. Por AMI, é entendido também como a capacidade de controlar algumas cargas localmente, diretamente através do medidor ou de uma rede de área residencial (HAN - *Home Area Network*), quando o medidor eletrônico é o *gateway*.

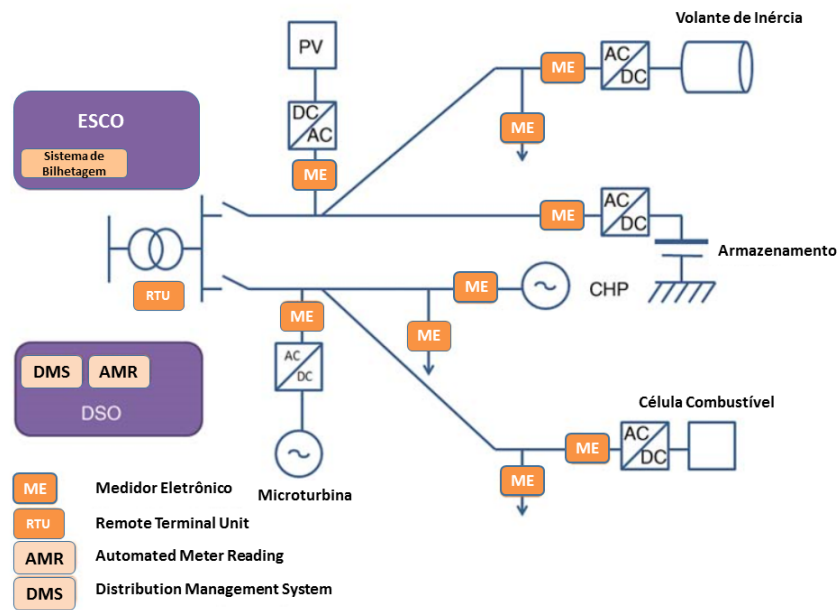


Figura 3 – Sistema de Distribuição [27]

O DSO (*Distribution System Operator*) é responsável pela gestão e controle do sistema de distribuição e também é responsável pela coleta de dados de medição de energia, embora em alguns países a leitura de medidores possa ser tratada por uma entidade independente. O DSO envia os dados de medição para a Concessionária/ESCO, que é um agente do mercado e é responsável, entre outras coisas, pelo faturamento da energia elétrica.

A estrutura mostrada na Figura 3 não é suficiente para gerenciamento da microrrede, uma vez que possui capacidade de controle limitada, especialmente dentro de um ambiente de mercado. Assim, é importante introduzir um novo nível de controle localmente em DG e cargas, capaz de cumprir os objetivos de permitir que todos os atores relevantes sejam escaláveis, e assim permitir a integração de um grande número de usuários (escalabilidade) permitindo a integração dos componentes de diferentes fornecedores (arquitetura aberta) facilidade de instalação de novos componentes (*plug-and-play*) facilidade de integração de novas funcionalidades e *business cases* (expansibilidade).

Usando o nível de controle local, uma estrutura hierárquica mais complexa é introduzida na Figura 4. Esta arquitetura compreende o seguinte: O controlador de microsource/microgeração (MC), que é responsável pelo controle e monitorização dos recursos energéticos distribuídos, tais como DG, dispositivos de armazenamento e cargas, incluindo veículos elétricos. O MC pode ser um dispositivo de hardware separado ou um pacote de software instalado tanto no medidor eletrônico, na interface da eletrônica de potência do DG ou em qualquer dispositivo de campo com capacidade de processamento suficiente. Isso é mostrado como um quadro tracejado que envolve tanto o MC quanto o EM (Eletronic Meter).

O controlador central da microrrede (MGCC - *Microgrid Central Controller*) fornece a interface principal entre a microrrede e outros atores como o DSO ou o ESCO, e pode assumir papéis diferentes, variando da responsabilidade principal para a maximização do valor da microrrede à coordenação simples dos MCs locais .

Ele pode fornecer pontos de ajuste para os MCs ou simplesmente monitorar ou supervisionar sua operação. Está alojado na subestação MT/BT e compreende um conjunto de rotinas de software de várias funcionalidades, dependendo do seu papel.

O sistema de gerenciamento de distribuição (DMS - *Distribution Management System*) é responsável, entre outros, pela colaboração entre o DSO, o ESCO e o operador da microrrede. A existência de um sistema *backbone*, uma plataforma, baseada na arquitetura orientada a serviços é assumida para a integração de suas funcionalidades. Em alguns casos, o software MGCC pode ser integrado nesta plataforma.

2.5.2 Operadores da Microrrede

O operador da microrrede pode ser ainda mais distinto dependendo do tipo de microrrede e das funções do OSD e da Concessionária/ESCO. O papel do OSD como um "facilitador de flexibilidade" ou "ator de flexibilidade" é central nestas distinções. Com base na Figura 4, podem ser identificadas três configurações gerais principais, conforme apresentado nas Figuras 5 - 7. Deve-se notar que o objetivo desses números é mostrar o fluxo de informações entre atores e não apresentar modelos de negócios da microrrede.

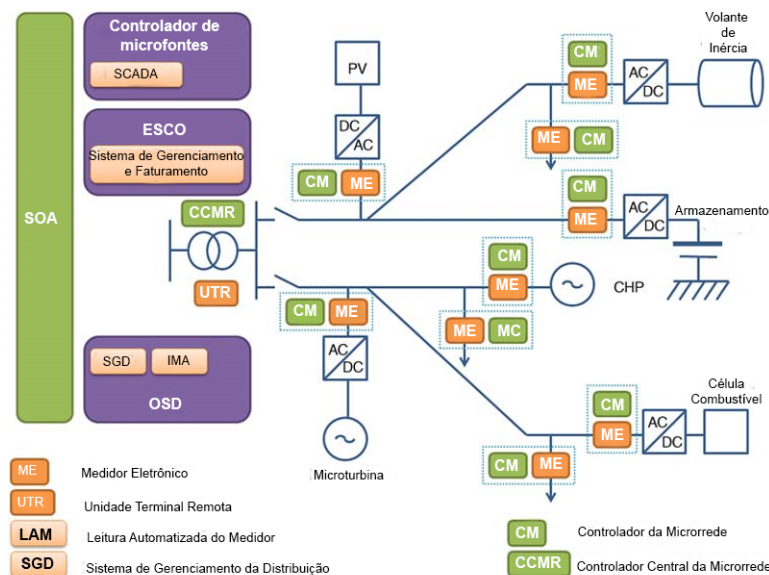


Figura 4 – Típico Sistema de Distribuição [27]

O OSD controla o DER através da infraestrutura disponível. O ESCO envia solicitações ao OSD e não diretamente ao campo. Esta função é plenamente aplicável no

modelo de monopólio do OSD, mas também pode ser relevante para o modelo de mercado liberalizado.



Figura 5 – OSD como um ator flexível [27]

O OSD como facilitador de flexibilidade: A Concessionária/ESCO instala equipamento de controle separado no campo e gerencia diretamente pelo menos parte do DER. Existe uma estreita colaboração com o OSD. Operador de microrrede dedicado: Esta é uma configuração especial adequada para uma parte independente (de propriedade privada) da rede de distribuição, como um shopping ou um aeroporto. Neste caso, um operador de microrrede dedicado pode ser responsável pela gestão desta parte da rede.

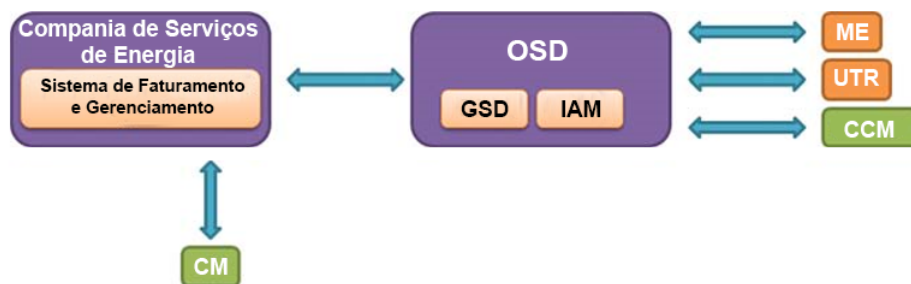


Figura 6 – DSO como um facilitador de flexibilidade [27]

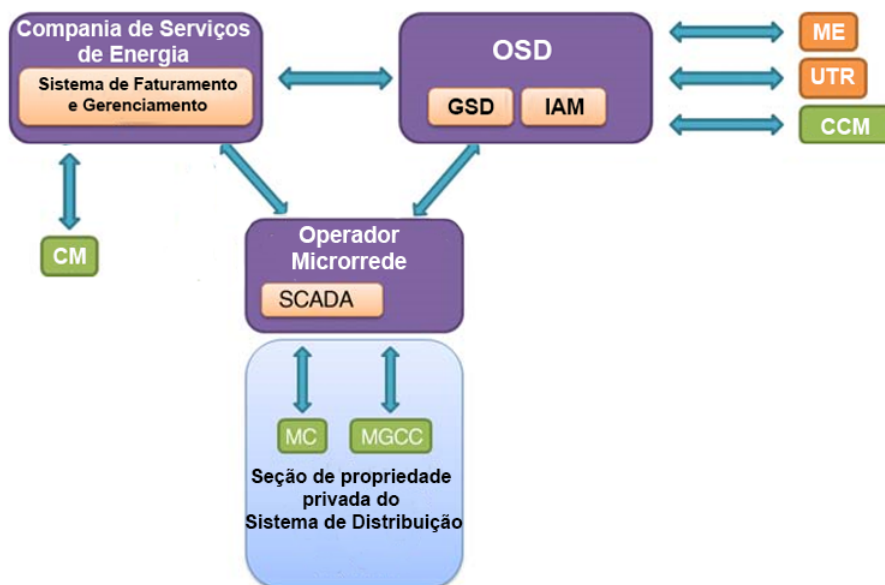


Figura 7 – Operador Dedicado da Microrrede [27]

2.5.3 Controle Centralizado ou Descentralizado

A estrutura da microrrede ilustrada na Figura 4 pode ser operada de forma centralizada ou descentralizada, dependendo das responsabilidades assumidas pelos diferentes níveis de controle. No controle centralizado, a responsabilidade principal pela maximização do valor da microrrede e pela otimização de sua operação é a do MGCC. O MGCC utiliza os preços de mercado dos custos de eletricidade e gás e, com base em preocupações de segurança da rede e serviços auxiliares solicitados pelo DSO, determina a quantidade de energia que a microrrede deve importar do sistema de distribuição *upstream*, otimizando a produção local ou capacidades de consumo.

O cenário operacional otimizado é realizado controlando as micro-fontes e cargas controláveis dentro da microrrede, enviando sinais de controle para o campo. Neste quadro, as cargas não críticas e flexíveis podem ser reduzidas. Além disso, é necessário monitorar a potência ativa e reativa real dos componentes. Numa abordagem totalmente descentralizada, a responsabilidade principal é dada aos MCs que competem ou colaboram, para otimizar sua produção, para satisfazer a demanda e provavelmente fornecer o máximo possível de exportação para a rede, levando em conta os preços atuais do mercado.

Esta abordagem é adequada em casos com diferentes proprietários de DERs, onde várias decisões devem ser tomadas localmente, tornando o controle centralizado muito difícil. Além dos principais objetivos e características da microrrede controlada, a escolha entre abordagens centralizadas e descentralizadas para o controle de microrrede depende dos recursos disponíveis ou acessíveis: pessoal e equipamentos. As duas abordagens são apresentadas nas Figuras 8 e 9. Em ambas, algumas funções básicas estão centralmente disponíveis, como produção local, previsão de demanda e monitoramento de segurança.

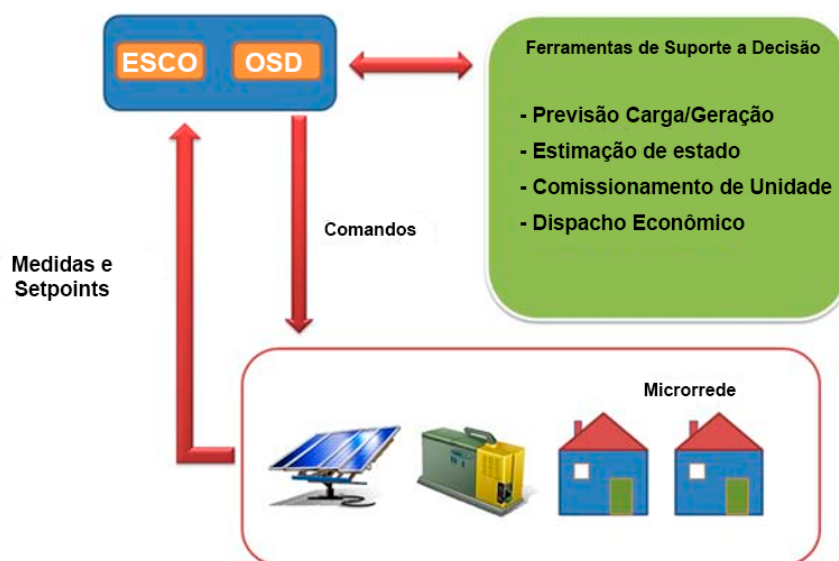


Figura 8 – Microrrede com Gerenciamento Centralizado [27]



Figura 9 – Microrrede com Gerenciamento Distribuído [27]

Neste ponto, a análise da complexidade do algoritmo é útil, pois refere-se ao tempo de cálculo que um algoritmo precisa para concluir uma tarefa. Esse cálculo costuma correlacionar o tempo de execução necessário com um ou mais argumentos, como por exemplo, o tempo de solução do problema de comprometimento da unidade é correlacionado ao número de unidades geradoras disponíveis. Será utilizado O para denotar a classificação de algoritmos de acordo com sua resposta (por exemplo, tempo de processamento, número de mensagens trocadas ou requisitos de memória) para mudanças no tamanho de entrada.

Como exemplo, considera-se o problema de classificar uma lista de n números em ordem crescente. O algoritmo classifica a lista trocando em cada iteração um par de números entre duas posições da lista. A tarefa crítica neste algoritmo é o número de trocas entre números. Se a complexidade do algoritmo de classificação é $O(n^2)$, isso significa que o número máximo de *swaps* é o quadrado do número de itens na lista. Então uma lista de 10 números requer no máximo 100 *swaps*, uma lista de 100 números exige no máximo 10 000 *swaps*, e assim por diante.

Esta noção é importante para comparar as duas abordagens não apenas com relação ao número de nós (por exemplo, o número de itens na lista), mas também sua correlação com a ação que consome mais tempo ou esforço (por exemplo, número de *swaps*). Desta forma, são listados a seguir, os principais atributos que afetam o desempenho dos algoritmos de controle para microrredes [27].

- **Número de nós:** Uma microrrede é constituída por várias micro-fontes e cargas controláveis. O número de DERs afeta criticamente a complexidade do problema e o tempo computacional.
- **Número de trocas de mensagens:** DGs e cargas em microrredes geralmente são

dispersas, e sistemas de comunicação em BT normalmente têm largura de banda limitada. Em vários casos, o número de mensagens necessárias para executar uma tarefa é de importância primordial. Uma abordagem de controle descentralizada reduz o número de mensagens, uma vez que apenas uma pequena parte da informação é transferida para os níveis mais altos da hierarquia de controle.

- **Tamanho e estrutura do modelo do sistema:** A estrutura e a complexidade do sistema precisam ser consideradas. As decisões tomadas por diferentes atores podem não apenas aumentar o número de nós, mas também impor restrições não técnicas. Uma questão relevante é o nível de informação, como qual parâmetro ou restrição deve ser disponibilizado para o processo de decisão dos vários atores. Por exemplo, o estado de carga de uma bateria pode ser importante para as DGs vizinhas, enquanto a temperatura interna ou o nível de tensão de uma célula e as restrições técnicas associadas podem não ser relevantes.
- **Precisão e otimização:** Um algoritmo pode convergir para a solução ótima ou próximo da solução ótima. É evidente que a convergência e a precisão das soluções dependem da precisão dos modelos utilizados e de dados de entrada relevantes. A questão é se uma solução não ótima é aceitável e, em caso afirmativo, a que custo. A escolha entre a abordagem centralizada e descentralizada para o controle da microrrede depende dos principais objetivos e das características especiais da microrrede controlada e dos recursos disponíveis ou acessíveis: pessoal e equipamento. O controle centralizado pode ser mais adequado, se os usuários da microrrede (DG e proprietários de carga) têm metas comuns ou um ambiente operacional comum buscando cooperação, a fim de atingir seus objetivos.

Tal exemplo é uma microrrede industrial, no qual um único proprietário pode exercer o controle total de todas as suas fontes de energia e cargas, é capaz de continuamente monitorá-los e pretende operar o sistema da maneira mais econômica. Considerando os atributos gerais listados anteriormente, o número de nós é geralmente limitado e é relativamente fácil instalar um sistema de comunicação rápido e um conjunto de sensores. Além disso, o problema de otimização tem um conjunto limitado de restrições e objetivos específicos, como a minimização de custos. Finalmente, a solução solicitada deve ser a mais precisa possível, uma vez que a solução não otimizada pode levar a perdas de lucro.

Microrredes operando em um ambiente de mercado, podem exigir que as ações competitivas do controlador de cada unidade possuam um certo grau de independência e inteligência. Além disso, os proprietários de DER locais podem ter objetivos diferentes: além de vender energia para a rede, eles podem ter outras tarefas, como manter a tensão localmente em um determinado nível ou fornecer um sistema de backup para cargas críticas locais em caso de falha do sistema principal. Alguns clientes da microrrede podem

buscar sua própria redução de custos de energia e ter necessidades diversas, embora todos possam se beneficiar do objetivo comum de reduzir os custos operacionais do seu provedor de serviços de energia.

Em uma microrrede residencial, por exemplo, uma família pode ter em um determinado momento, um aumento das necessidades de energia elétrica, por exemplo, para cozinhar, enquanto outra casa pode não precisar de nenhuma energia, porque todos os seus membros estão ausentes. Ambas as famílias gostariam de vender a energia extra produzida localmente para a rede, mas é improvável que eles aceitariam o controle remoto de sua produção. Considerando novamente os atributos gerais mencionados anteriormente, deve-se identificar que, neste caso, o número de nós pode aumentar significativamente.

Um bairro pode ter dezenas de famílias ou DGs instaladas, e se forem consideradas multi-microrredes o número estaria aumentando ainda mais. Nesses casos, não é possível ter um sistema de comunicação dedicado, mas a infraestrutura existente deve ser usada. Assim, parte do sistema pode não ter largura de banda suficiente ou a comunicação pode ser cara. Uma abordagem que limita a quantidade de transferência de dados é essencial. A disponibilidade de poderosas instalações de computação ou operadores dedicados também é altamente improvável.

Além disso, o problema de otimização está se tornando extremamente complexo, como resultado de características específicas. Por exemplo, é extremamente complicado modelar os requisitos de conforto em cada casa ou incluir todas as restrições técnicas especiais de todos os aparelhos eletrodomésticos num único problema de otimização. A abordagem descentralizada sugere que este tipo de restrição e sub-problema deve ser resolvido localmente em cada família ou DG. No problema de controle geral, cada casa poderia ser apresentada como um nó de carga que tem a capacidade de reduzir ou deslocar alguma carga, ou um nó de produção com DGs que podem oferecer uma certa quantidade de energia sem se preocupar com o tipo de motor ou restrições técnicas.

Finalmente, neste caso, uma solução não ótima é provavelmente aceitável, dados os altos custos da instalação de redes de comunicação rápidas ou processadores poderosos dedicados à otimização de energia. Outro fator importante é a utilização de um sistema aberto. A tecnologia de computação distribuída permite que os fabricantes de DG e cargas forneçam componentes *plug-and-play* embarcando agentes de controle (seguindo algumas regras) em seus dispositivos. O *software* deve ser inteligente o suficiente para monitorar o processo e seguir a melhor política. A disponibilidade de pessoal dedicado responsável pela instalação e manutenção do sistema, provavelmente em sistemas centralizados, pode amenizar este requisito até certo ponto. Neste caso, também poderia haver pessoal dedicado para monitorar o processo, que poderia intervir em caso de emergência. A conclusão geral é que a abordagem centralizada é adequada para um sistema com um objetivo específico e um sistema descentralizado em um sistema com vários objetivos.

2.6 Controle de uma Microrrede durante modo ilhado

Segundo [41], o controle de uma microrrede em modo ilhado pode ser dividido em quatro aspectos, gerenciamento de tensão e frequência, balanceamento entre geração e demanda, qualidade de energia e *droop control*.

2.6.1 Gerenciamento de Tensão e Frequência

As partes cruciais de operação do sistema abrangem o *droop* tensão versus potência reativa (V/Q) e *droop* frequência versus potência (f/P). O ajuste de tensão é indispensável para a confiabilidade e constância de suprimento local. Sem controle de tensão local, casos com altas penetrações de MG poderiam encontrar oscilações de tensão e/ou potência reativa [54]. Em modo ilhado, complicações vindas de pequenos desvios na frequência gerada em cada inversor e a necessidade de troca dos pontos de operação de potência para acomodar as mudanças, devem ser atendidas. Circunstâncias de crises ocorrem devido ao déficit de potência ativa ou conseqüente queda de frequência podem levar a microrrede ao colapso [59].

2.6.2 Balanceamento entre Geração (*Supply*) e Demanda

Quando a microrrede entra em modo de operação ilhado, o desbalanceamento entre as cargas locais e a geração interna pode causar um grande desvio de frequência. Quando a carga excede o valor de geração local disponível, as cargas não essenciais devem ser temporariamente desconectadas [60].

2.6.3 Qualidade de Energia

A microrrede deve manter de forma eficiente e satisfatória a qualidade de energia, mesmo quando a mesma se encontra em modo ilhado. A fim de garantir uma rede mais estável, os componentes de potência ativa e reativa são importantes a fim de garantir pequenos desvios de tensão e frequência [59].

2.6.4 *Droop Control*

Droop control envolve dois arranjos, potência real versus frequência da tensão e magnitude da tensão versus potência reativa [61]. As microfuentes tendem a variar suas saídas por ΔP ou ΔQ quando ocorre uma variação da frequência ou tensão em razão dos seus respectivos valores nominais. Com a implementação do *droop control*, as alterações da carga em uma microrrede suportarão em regime permanente (*steady-state*) desvios de frequência, baseados nas características de *droop* e sensibilidade de frequência/tensão da carga [60].

2.7 Considerações Finais

A microrrede é vista como uma parte importante dentro das Redes Elétricas Inteligentes e seu papel é fundamental para reduzir os problemas que estão surgindo tanto em escala como em complexidade. Por ser basicamente um conjunto de cargas e fontes geradoras, podem possuir diversos tamanhos. Podem operar conectadas à rede principal ou de forma ilhada, fazendo uso de seu sistema de geração distribuída interna. Para a sua operação, tem-se dois modelos de gestão, um centralizado e outro descentralizado. No modo ilhado, que é o foco deste trabalho, apresentou-se quatro opções de operação, sendo que a utilizada para validação do modelo gerenciamento de energia e do *framework* em tempo real é o balanceamento energético.

3 Sistemas de Comunicação no Contexto das Redes Elétricas Inteligentes

3.1 Considerações Iniciais

Nesse capítulo será abordado o papel do sistema de comunicação dentro das redes elétricas inteligentes. Para isso, serão apresentados os meios de comunicação através do modelo de camadas OSI (*Open Systems Interconnection*) e o principal protocolo de comunicação de dados TCP/IP (*Transfer Control Protocol/Internet Protocol*). Em seguida serão apresentados os protocolos de comunicação de camada física, responsáveis pelo transporte da informação dentro do contexto de redes elétricas inteligentes. Ainda nesse contexto, tem-se protocolos responsáveis pela codificação da informação e que dão suporte aos novos serviços e aplicações para o sistema de potência e os requisitos de comunicação de dados e segurança necessários para que a troca de informação ocorra de forma plena e eficaz.

3.2 Introdução

Nessas últimas décadas, várias indústrias passaram por modificações devido à inserção de sistemas de comunicação. Pode-se citar como exemplo a indústria fonográfica que após o surgimento do NAPSTER em 1999 criada por Shawn Fanning e Sean Parker, passou por severas modificações tanto na sua estrutura como no seu modelo de negócio. O mesmo ocorreu com a indústria televisiva após o surgimento de troca de arquivos Peer to Peer, um advento da tecnologia proveniente do Napster e que hoje tem grandes concorrentes como Netflix e Amazon. A própria indústria de telefonia, que com a popularização dos *smartphones* e de aplicativos de troca de mensagens, como o Whatsapp, teve que passar por modificações em todas as esferas.

No sistema elétrico de potência, que permanecia sem grandes alterações nos últimos 100 anos [62], iniciou-se uma modernização e aperfeiçoamento buscando integração, confiabilidade, disponibilidade, integração de fontes de energia alternativas e renováveis e redução na emissão de gases do efeito estufa, a qual é reconhecida como *Smart Grid* ou Redes Elétricas Inteligentes (REI). Sendo assim, uma REI pode ser definida como uma infraestrutura moderna das redes elétricas de potência que busca melhorias através de controle automático e tecnologias modernas de comunicação [49].

3.3 Meios de Comunicação

A troca de dados e informações através dos meios de comunicação são essenciais em qualquer sistema elétrico de potência moderno e a sua importância só tende a aumentar conforme as REIs se desenvolvem [63].

Para que essa troca de dados possa ocorrer, se faz necessário um meio para transportar essa informação da sua origem para o seu destino. No contexto do SEP, isso pode ser do dispositivo do SEP, como um transformador, até um computador ou sistema computacional de gerenciamento e monitoramento.

Essa comunicação pode ocorrer em um canal dedicado ou compartilhado, ou seja, um meio de transmissão exclusivo para este fim ou em um meio no qual outros tipos de aplicações também usam [64].

3.3.1 Elementos de Redes de Comunicação de Dados

Segundo Budka [65], uma rede de comunicação (ou simplesmente rede) é usada para transferir informações de um *endpoint* de rede (também chamado de *host*) conectado na rede de comunicação a outro *endpoint* conectado à rede como se pode ver na Figura 10.

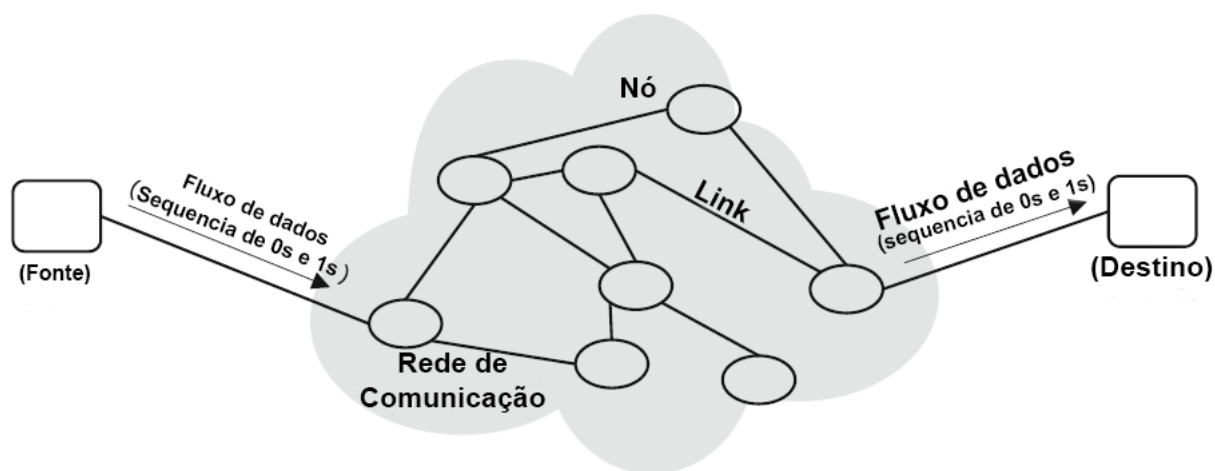


Figura 10 – Comunicação [65]

O significado real ou o formato da informação não é relevante aqui, desde que essa informação seja codificada num fluxo de bits ("0" e "1"s) no *endpoint* da origem, antes de ser enviada, através da rede para o *endpoint* de destino. Alguns exemplos de codificação da informação em um fluxo de bits são os seguintes:

1. Uma medida de tensão registrada por um IED SCADA na subestação pode ser codificada como dados de 32 bits (ou 4 bytes), representando um número de ponto flutuante correspondente ao valor de tensão.

2. O estado de uma chave de subestação, fechada ou aberta, pode ser codificada com um único bit (por exemplo, 0 para "fechado" e 1 para "aberto").
3. Uma sequência de texto pode ser codificada usando 8 bits para cada caractere na sequência de texto.

3.3.2 Serviços Orientados a Conexão e *Connectionless*

A rede fornece serviço de transferência de dados para seus *endpoints*. Um serviço é chamado de orientado à conexão se recursos de rede são reservados exclusivamente para a comunicação entre os dois *endpoints* para a duração da conexão. Na sua forma mais simples, a transferência de dados entre dois *endpoints* segue o mesmo caminho através dos links dedicados a essa conexão durante o período de duração [66, 67]

Há uma taxa de dados garantida disponível para transferência de dados entre os pontos de extremidade, mesmo em momentos em que não há transferência de dados real. Não pode haver atrasos nos nós, pois os dados podem não precisar ser armazenados nos nós se os links estiverem sempre disponíveis. A comunicação dentro da rede (entre os nós) permite que os recursos sejam reservados quando uma conexão é solicitada por um nó de extremidade e antes que a conexão correspondente seja estabelecida.

Um processo semelhante libera recursos após a conexão ter terminado. Assim, existem sobrecargas no estabelecimento da conexão e no encerramento. No entanto, os custos gerais necessários na transferência de dados reais podem ser muito pequenos, uma vez não há necessidade da origem incluir a identidade do nó de destino com a transferência de dados, pois a ligação já estabelecida garante a entrega ao destino correto no *endpoint*.

A rede pode fornecer conexões virtuais (em vez da simples conexão descrita até agora), em que a rede fornece entrega garantida. Muitas vezes tais garantias são feitas para a taxa de transferência de dados em termos da taxa de informação comprometida (CIR - *Committed Information Rate*). Assim, embora não haja recursos específicos (link) reservados para esta conexão virtual, uma taxa mínima de dados de ponta a ponta é assegurada ao valor CIR. Os pontos de extremidade podem ser autorizados a transferir dados a taxas de dados superiores à CIR; No entanto, não existem garantias na entrega de dados para os elementos adicionais.

O serviço de conexão virtual também pode fornecer garantias para parâmetros diferentes da CIR, como atrasos e perda de dados. Os custos indiretos são associados à conexão virtual e à desconexão, bem como aos custos indiretos associados à transferência de dados. Por exemplo, uma vez que não existe atribuição de recursos de ligação específica para uma ligação virtual, um link pode ser compartilhado entre várias ligações virtuais. Portanto, os dados recebidos por um nó em um link devem carregar a identidade da conexão

virtual correspondente. Esse identificador de conexão virtual é um componente dos custos indiretos associados à transferência de dados.

O serviço fornecido por uma rede pode ser sem conexão, pelo fato do *endpoint* de origem ter a possibilidade de enviar dados para o *endpoint* de destino sem primeiro estabelecer uma conexão. Naturalmente, é necessário que o *endpoint* de origem forneça minimamente o endereço do *endpoint* de destino com os dados, de modo que os dados sejam entregues ao ponto de extremidade correto pela rede. Embora não existam custos de conexão e desconexão, existem sobrecargas associadas ao endereçamento e outras informações que devem acompanhar uma "unidade" de transferência de dados. Essas unidades de dados são genericamente referidas como unidades de dados de protocolo (PDUs)[64].

3.3.3 Classificação das Redes

Segundo [65], a classificação de rede descrita aqui é baseada na cobertura da rede. Se a rede está confinada a um edifício ou a um complexo de edifícios, é chamada de rede local ou *Local Area Network* (LAN). Todas as outras redes são chamadas *Wide Area Networks* (WANs). Às vezes as redes confinadas a uma cidade ou a uma área metropolitana são chamadas redes de área metropolitana (MANs - *Metropolitan Area Networks*).

Na comunidade de utilitários, no entanto, o termo WAN é usado para se referir à rede principal que conecta os locais de utilitários principais. Muitas vezes, essas redes são implantadas sobre a infraestrutura de fibra e microondas de propriedade pública. As redes que conectam pontos de extremidade de usuários remoto à WAN são chamadas de Redes de Área de Campo (FANs - *Field Area Networks*). O termo Rede de Área de Vizinhança (NAN - *Neighborhood Area Network*) às vezes é usado para redes que se limitam a conectar pontos de extremidade de serviços públicos dentro de uma pequena área, como os medidores inteligentes de consumidores em um bairro. Considera-se um NAN um caso especial de um FAN.

Há um conjunto de regras, referido como um protocolo que define como executar uma tarefa associada a um processo de comunicação de dados. Uma coleção desses protocolos que funcionam em conjunto para suportar a comunicação de dados entre Origem e Destino é chamada de pilha de protocolos. Em uma pilha, os protocolos são organizados em camadas. A organização de protocolos em camadas também pode ser vista como a decomposição da tarefa complexa de troca de informações em subtarefas menores que são na maioria independentes uma da outra. Portanto, um protocolo pode ser alterado ou modificado sem afetar os outros protocolos da tarefa de comunicação global ou outros protocolos na pilha.

3.4 O modelo ISO/OSI

O ‘*Open System Interconnection Model*’ desenvolvido pelo e *International Standard Organisation* (ISO/OSI) é uma arquitetura de protocolo que consiste em sete camadas que descrevem as tarefas associadas para a movimentação de informação da Origem para o Destino através de uma rede de comunicação. A pilha de sete camadas do modelo de referência OSI é mostrada na Figura 11 [63].



Figura 11 – Arquitetura de Camadas OSI [63]

Neste modelo, além da camada Física, todas as outras camadas usam os serviços da camada imediatamente abaixo delas. Por exemplo, a camada Aplicação utiliza os serviços da camada Apresentação para garantir que as informações enviadas da camada Aplicação de um sistema sejam legíveis pela camada Aplicação de outro sistema usando diferentes formatos de representação de dados.

As camadas superiores apresentam uma interface para o usuário. Elas são orientadas ao aplicativo e não se preocupam com como os dados são entregues aos aplicativos. As camadas inferiores estão mais preocupadas com a transmissão de dados e são independentes da aplicação. Normalmente, os prestadores de serviços oferecem serviços definidos nas camadas inferiores. A camada intermediária separa as camadas superiores orientadas para aplicativos das camadas inferiores orientadas para transmissão.

3.5 TCP/IP

O Protocolo de Controle de Transmissão (TCP)/Protocolo de Internet (IP) ou TCP/IP é a arquitetura de protocolo mais utilizada atualmente. É resultado de um projeto chamado ARPANET (*Advanced Research Projects Agency Network*), financiado pela *Defense Advanced Research Project Agency* (DARPA) no início da década de 1970. A arquitetura de protocolo TCP/IP usada na Internet evoluiu de ARPANET. Cinco cama-

das, como mostrado na Figura 12, são definidas na arquitetura TCP/IP. Eles são: camada física, camada de acesso à rede, camada da Internet, camada de transporte e camada de aplicação [66].

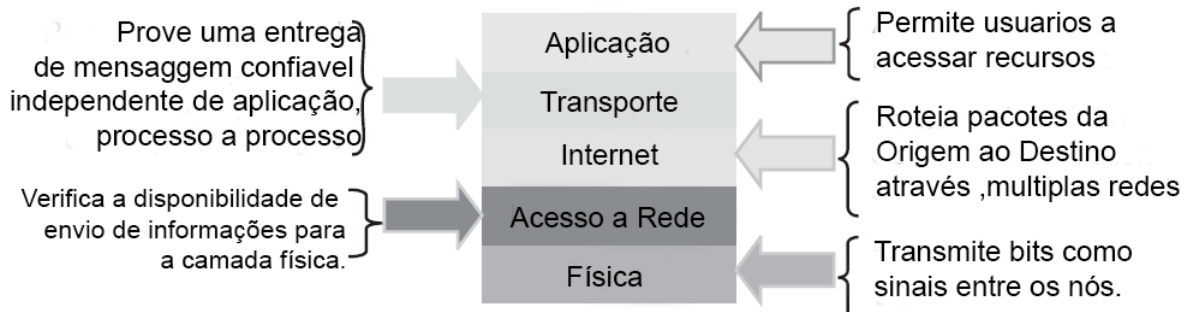


Figura 12 – Pacote TCP/IP [63]

O papel da camada física do TCP/IP é idêntico ao da camada física no modelo de referência ISO/OSI. Trata-se das especificações dos aspectos elétricos e mecânicos das interfaces e meios de transmissão. É, também, responsável pela codificação de dados em sinais, definindo taxa de dados e sincronização de bits.

A camada de rede é responsável por fornecer um canal sem erros para a camada da Internet. Suas funções incluem: encapsulamento de pacotes IP provenientes da camada da Internet em quadros, sincronização de quadros, detecção e correção de erros, controle de link lógico, fornecimento de controle de fluxo e erro, controle de acesso de mídia, endereçamento físico (endereçamento MAC), enfileiramento de pacotes de dados ou algoritmos de agendamento e endereço IP de/para resolução de endereços físicos [67].

A responsabilidade principal da camada da Internet é encaminhar pacotes de origem para destino. Identificar os *Hosts* de forma única e universal é essencial para roteamento de pacotes como datagramas em redes. A camada da Internet usa um identificador chamado endereço IP para identificar dispositivos conectados a uma rede. Existem duas versões, IPv4 e IPv6, de endereçamento IP atualmente em uso. IP versão 4 (IPv4) ainda é o mais comumente usado. Desde a sua introdução em 1998 com a publicação de IETF RFC2373 [68] e RFC 2460 [69], IP versão 6 está se tornando mais amplamente utilizado na internet.

A camada Transporte é representada pelo *Transmission Control Protocol* (TCP). O TCP cria um circuito virtual entre a Origem para o Destino e é responsável pelo envio de todos os datagramas gerados pela Fonte. O TCP estabelece uma transmissão informando o Destino que há mais dados a serem transmitidos e termina a conexão somente quando todos os datagramas tiverem sido transmitidos.

A camada Aplicativo no TCP/IP é uma combinação de camadas de sessão, apresentação e Aplicação do modelo OSI. Alguns dos protocolos associados à camada de

A subcamada LLC é definida pelo IEEE 802.2 e fornece mecanismos de multiplexação, controle de fluxo e controle de erros. O pacote, então, é encaminhado para a subcamada MAC.

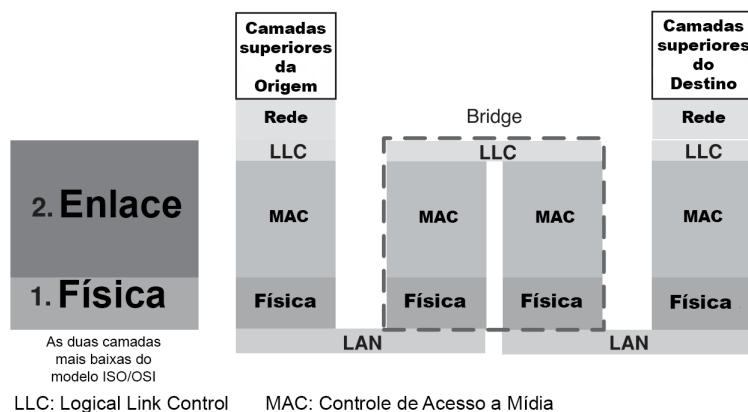


Figura 14 – Arquitetura do IEEE 802 [63]

Na subcamada MAC, um cabeçalho e um *trailer* (dependendo da LAN em que o pacote está entrando) são adicionados ao pacote. Em seguida, é encaminhado para a camada física e o canal de comunicação e chega à *Bridge*. Na camada MAC da *Bridge*, o cabeçalho e o *trailer* são removidos e o pacote original é recuperado e encaminhado para a subcamada LLC da *Bridge*. Em seguida, o pacote é processado (adicionando um cabeçalho e *trailer* apropriados) para a LAN para a qual é encaminhado (para o Destino) pela camada MAC. Este uso de uma ponte (*Bridge*) é essencial pois diferentes LANs usam diferentes comprimentos de quadros e velocidades de transmissão. Por exemplo, IEEE 802.3 usa um quadro de 1500 bytes enquanto a IEEE 802.4 usa um quadro de 8191 bytes [63, 67].

3.6.1.1 Ethernet

Tanenbaum [67] descreve que o Ethernet tornou-se a tecnologia de rede mais utilizada para LANs com fio devido à sua simplicidade, facilidade de manutenção, capacidade de incorporar novas tecnologias e confiabilidade. É uma tecnologia de comunicação baseada em quadros IEEE 802.3. Sua *baseband* é definida em um número de padrões tais como 10BASE5, 10BASE2, 10BASE-T, 1BASE5, 100BASE-T, e assim por diante. O primeiro número, ou seja, 1, 10 e 100, indica a taxa de dados em Mbps. O último número ou letra indica o comprimento máximo do cabo e o tipo do cabo.

Ethernet usa um meio compartilhado onde mais de um dispositivo tenta usar o meio comum. Isso pode causar colisões de quadros transmitidos por vários *hosts*. A questão da colisão é tratada por um protocolo chamado *Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect* (CSMA/CD). Um conjunto de *hosts* conectados a um segmento compartilhado de rede, de tal forma que a transmissão simultânea por dois *hosts* no conjunto leve à

colisão, cria um domínio de colisão. As LANs Ethernet também possuem quadros de difusão definidos pelo endereçamento da camada 3 do modelo ISO/OSI. O domínio que esses quadros de difusão (*Broadcast*) alcançam é chamado de domínio de difusão.

O desempenho da rede sob condições de tráfego pesado é afetado pelos domínios de colisão e os domínios de *broadcast* estão localizados dentro da rede. Portanto, isolá-los corretamente é vital para manter o desempenho máximo de LANs. É importante notar que *Switches*, *Bridges* e *Routers* limitam domínios de colisão e *Routers* e *Switches* de camada 3 também limitam domínios de *broadcast*.

3.7 Padrões para troca de informações

3.7.1 Padrões para medição inteligente - *smart metering*

Em [63] os medidores inteligentes podem ser utilizados de várias maneiras e estes definem diferentes requisitos para o sistema de comunicação de medição. A leitura automatizada de medidores (AMR) requer apenas transmissão ocasional de dados de energia gravados (talvez uma vez por mês), enquanto a infra-estrutura de medição avançada (AMI) requer comunicação bidirecional frequente (talvez a cada 30 minutos). O uso de medidores inteligentes para suportar uma operação inteligente da rede de distribuição ainda não foi amplamente implementado, mas é susceptível de colocar severas exigências sobre o sistema de comunicação.

IEC 62056 e ANSI C12.22 são dois conjuntos de padrões que descrevem sistemas de comunicação abertos para medidores inteligentes. A IEC 62056 define as camadas de Transporte e Aplicação para medição inteligente sob um conjunto de especificações chamado COSEM (*Companion Specification for Energy Metering* - Especificação Complementar para Medição de Energia). ANSI C12.22 especifica o envio e recebimento de dados de medição de e para sistemas externos. Ele pode ser usado em qualquer rede de comunicação.

3.7.2 Modbus

Modbus é um protocolo de mensagens e fornece comunicação entre dispositivos conectados em vários barramentos e redes. Pode ser implementado através de Ethernet ou utilizando transmissão serial assíncrona sobre EIA 232, EIA 422, EIA 485 e fibras ópticas. Destes, a implementação mais comum é Modbus sobre EIA485.

Modbus sobre EIA 485 é usado extensivamente em automação de subestação. Em uma subestação, vários dispositivos compartilham um link comum. A comunicação em um Modbus sobre EIA 485 é iniciada por um *Master* com uma consulta a um *Slave*. O *Slave* que está constantemente monitorando a rede para consultas reconhecerá apenas as

consultas endereçadas a ele e responderá executando uma ação (definindo um valor) ou retornando uma resposta. Somente o *Master* pode iniciar uma consulta. O *Master* pode endereçar *Slaves* individuais, ou, usando um endereço da transmissão, pode iniciar uma mensagem da transmissão a todos os *Slaves*.

3.7.3 DNP3

DNP3 (*Distributed Network Protocol*) é um conjunto de protocolos de comunicação desenvolvidos para comunicações entre vários tipos de equipamentos de aquisição de dados e controle. Ele desempenha um papel crucial nos sistemas SCADA, onde é usado por Centros de Controle, RTUs e IEDs. DNP3 foi recentemente aprovado como um padrão IEEE 1815-2010.

DNP3 tem cinco camadas onde a camada *DNP User* pode ter entradas analógicas e binárias e sinais analógicos e binários de saída. Uma estação DNP3 mestre envia solicitações e normalmente as estações DNP3 escravas respondem a essas solicitações. No entanto, uma estação escravo DNP3 também pode transmitir uma mensagem sem um pedido. A camada física DNP3 mais comumente usa protocolos de comunicação serial como EIA 232 ou EIA 485. Recentemente foram desenvolvidas aplicações de DNP3 sobre uma conexão Ethernet.

3.7.4 IEC 61850

IEC 61850 é um padrão aberto para comunicação Ethernet dentro de subestações. É um padrão baseado em função que assegura a interoperabilidade de equipamento da subestação. As funções são divididas em:

1. funções de suporte ao sistema: gerenciamento de rede, sincronização de tempo e auto verificação dos dispositivos físicos;
2. função de configuração ou manutenção do sistema: gerenciamento do software, gerenciamento de configuração, modos de teste e definições;
3. funções operacionais ou de controle: comutação de parâmetros, gestão de alarmes e recuperação de falhas;
4. Funções de automação de processos: proteção, intertravamento e controle de carga.

A IEC 61850 usa um modelo de objeto para descrever as informações disponíveis dos diferentes equipamentos da subestação e do controlador da subestação. Além de definir protocolos de comunicação, o IEC 61850 especifica uma estrutura de dados. Conforme mostrado na Figura 15, um modelo de dispositivo começa considerando um dispositivo

físico. Em seguida, dispositivos lógicos dentro desse dispositivo são especificados. Cada dispositivo lógico é então mapeado em 86 classes diferentes de nós lógicos definidos na IEC 61850.

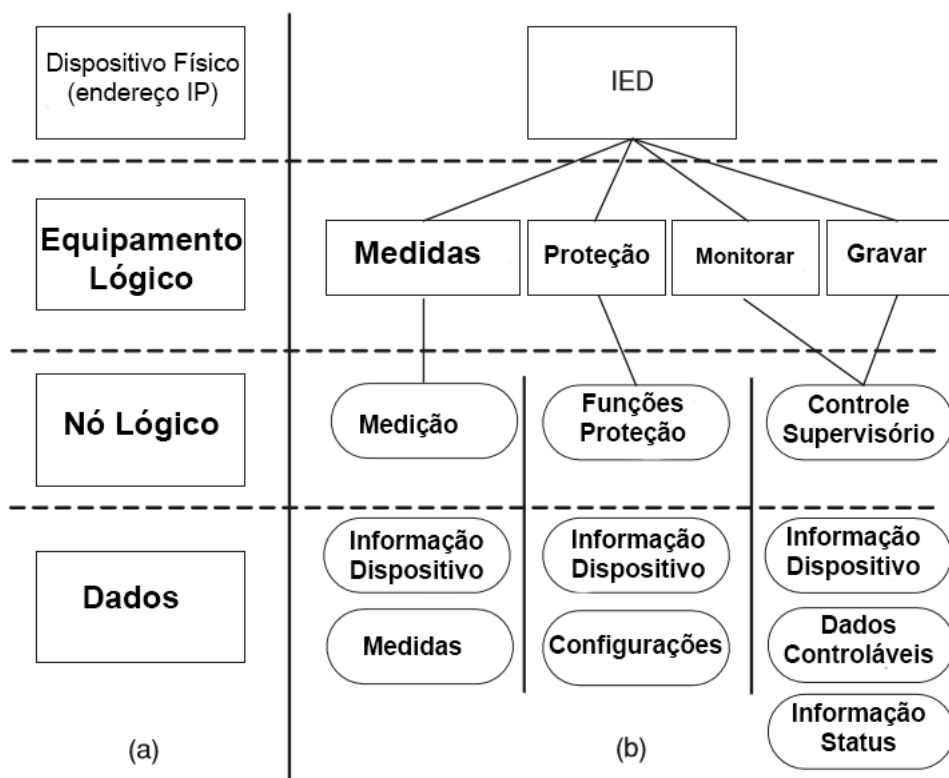


Figura 15 – Pilha do Protocolo IEC 61850 [63]

Os nomes desses nós são especificados. Finalmente, os dados relacionados a cada nó lógico são especificados. Um exemplo de um IED é mostrado na Figura 15. Em um IED, dispositivos lógicos como medidas, proteção, monitoramento e gravação podem ser encontrados. Cada dispositivo lógico tem vários nós lógicos que refletem suas funções. Mesmo que os nós lógicos associados aos dispositivos lógicos de proteção sejam especificados como um único nó, eles são divididos em cerca de 40 nós lógicos que incluem distância, diferencial, sobrecorrente e assim por diante.

3.8 Requisitos de Comunicação de Dados no Contexto das Redes Elétricas Inteligentes

Mesmo definindo por qual meio enviar a mensagem e que protocolo a informação será codificada, ainda existem alguns requisitos que devem ser respeitados. Estes estabelecem limites de tempo e disponibilidade do meio físico para que a troca de informação possa atingir a sua finalidade, seja ela somente para monitoramento, controle, proteção, entre

outros. Aplicações como VoIP, Videoconferência, transmissões de vídeo *online* (*stream*), automação de processos industriais, movimentações financeiras, por exemplo, possuem requisitos básicos como largura de banda, tempo de resposta ou *delay*, *jitter* (variação de *delay*), perda de pacotes.

Da mesma forma, o SEP deve definir quais são os seus requisitos dentro de cada aplicação que as REIs possuem. O Departamento de Energia dos Estados Unidos [70], Khan [71], Gungor [62] iniciaram estudos ondem apontam estes parâmetros, porém, conforme as tecnologias vão avançando, faz-se necessário uma atualização dos mesmos. Na Tabela 1 tem-se os requisitos mínimos para as aplicações em SG.

Tabela 1 – Requerimentos de rede para Aplicações em Redes Inteligentes [72]

Aplicações	Requerimentos de Rede				
	Largura de Banda	Latência	Confiabilidade	Segurança	Energia de Reserva
AMI	10-100 kbps/node, 500 kbps for backhaul	2 - 15 sec	99 - 99.99%	Alta	Não necessário
Resposta à Demanda	14 kbps - 100 kbps por nó/equipamento]	500 ms - muitos minutos	99 - 99.99%	Alta	Não necessário
Wide Area Situational Awareness	600 - 1550 kbps	20 ms - 200 ms	99.999 - 99.9999%	Alta	24 horas
Distribution Energy Resources and Storage	9.6 - 56 kbps	20 ms - 15 sec	99 - 99.99%	Alta	1 hour
Transporte Energia	9.6 - 56 kbps, 100 kbps	2 sec - 5 min	99 - 99.99%	Relativamente Alta	Não necessário
Gerenciamento Rede de Distribuição	9.6 - 100 kbps	100 ms	99 - 99.999%	Alta	24 -72 horas

3.9 Considerações Finais

Como parte integrante da REI, este capítulo apresenta os conceitos básicos de uma rede de comunicação de dados, como a informação é codificada e de que forma ela está sendo utilizada dentro desse novo contexto do setor elétrico. Por entender que este sistema desempenha uma função fundamental, que é a de trazer o cenário do sistema elétrico para o sistema de gerenciamento (próximo capítulo), a forma como isso é feito e o impacto no desempenho desta tarefa afetam diretamente o comportamento desejado pelo sistema gestor/operador do SEP.

4 Sistemas Multiagente

4.1 Considerações Iniciais

Esse capítulo apresenta uma nova metodologia para desenvolvimento de soluções utilizando uma abordagem distribuída, que pode operar de forma autônoma e interagindo com os outros agentes dentro da plataforma. É apresentado o conceito principal da metodologia de Sistemas Multiagente e como está sendo aplicado nas SG, seus potenciais benefícios e desafios.

4.2 Introdução

Um sistema multiagente (MAS - *Multiagent System*) é conjunto de entidades ou organismos (agentes) imersos em um ambiente, que interagem entre si através de troca de informações e das habilidades de cooperação, coordenação e negociação, para alcançar um objetivo. Os sistemas multiagents podem ser vistos com uma perspectiva organizacional: eles são uma consequência da suposta autonomia e interação. Estes não são pressupostos fortes, por isso, por exemplo: especialização e distribuição de tarefas, mercado livre ou um jogo de futebol pode ser visto como sistemas multiagente. Em qualquer um deles está-se na presença de entidades autônomas que perseguem um objetivo, em colaboração, competição ou qualquer outro nível de interação. Com a execução de um SMA virtual, pode-se analisar as propriedades emergentes do sistema em geral, com a finalidade de simular seus equivalentes reais e projetar soluções distribuídas onde as aplicações centralizadas não são apropriadas, excessivamente complicadas ou simplesmente não práticas [73]

Por exemplo, se alguém quiser criar um programa que utilize inteligência artificial para um jogo de futebol virtual, uma solução centralizada clássica seria programar uma mente de gerente com todas as informações e onde os jogadores estariam apenas recebendo ordens. Um programa desta forma, teria de processar doze informações de jogadores e o algoritmo seria bem complexo e de difícil desenvolvimento. Ao utilizar uma abordagem multiagente, seria necessário desenvolver o comportamento dos jogadores de uma forma conhecida como, Atacar, EvitarGol, Defender, NaoFazerGolContra, o que torna o desenvolvimento, compreensão e adaptação mais fácil [74].

Assim, de acordo com [75], programação orientada a Agente é relativamente um novo paradigma de software que traz conceitos de teorias de inteligência artificial para o domínio de sistemas distribuídos. Programação Orientada a Agentes essencialmente modela uma aplicação como uma coleção de componentes chamados de agentes que são

caracterizados por, entre outras coisas, autonomia, proatividade e habilidade de se comunicar. Ao ser autônomo, ele pode independentemente carregar tarefas complexas e frequentemente de longa duração. Ao ser proativo, ele pode tomar iniciativa de executar uma dada tarefa mesmo sem uma interação com o usuário. Sendo comunicativo, ele pode interagir com outras entidades para auxiliá-las a alcançar os objetivos próprios ou de outros. O modelo de arquitetura de uma aplicação baseada em agente é intrinsecamente *peer to peer*, pois qualquer agente é capaz de iniciar uma comunicação com qualquer outro agente ou ser sujeito de uma comunicação a qualquer momento.

Para Wooldridge [73], a idéia de um sistema multiagente é muito simples. Um agente é um sistema computacional que é capaz de ações independentes em benefícios próprio ou do seu dono. Em outras palavras, um agente pode descobrir por si mesmo o que é necessário ser realizado para satisfazer seus objetivos, ao invés de receber uma ordem explícita do que fazer em um dado momento. Um sistema multiagente é um sistema que consiste de um número de agentes, que interagem entre si, tipicamente por troca de mensagens através de alguma infraestrutura de rede de computadores. No caso mais geral, os agentes em um sistema multiagente serão representados atuando em nome do usuário ou proprietário, com diferentes objetivos e motivações. Mas ainda é necessário desenvolver alguns comportamentos para fazer esses agentes atuarem como agentes inteligentes, que para [76, 21] são três:

- Reatividade: é a habilidade de perceber seu ambiente e responder de maneira oportuna às mudanças que ocorrem para satisfazer os objetivos deste projeto.
- Proatividade: Como agente inteligente, eles são capazes de exibir comportamento orientado por objetivo, tomando a iniciativa a fim de atingir as metas dos objetivos de design.
- Capacidade social: É o comportamento onde os agentes interagem com outros agentes (ou humanos também), a fim de atingir seus objetivos.

Uma característica muito importante para o agente é atingir um bom equilíbrio entres suas características antagonistas, reatividade e pro-atividade [73]. Assim, de acordo com a OMG (*Object Management Group*) [77], a criação de sociedades de agentes criam os sistemas multiagente, que utilizam da cooperação e competição para a sua coordenação e interação. Destaca-se ainda que:

Sistemas multiagente são compostos por sociedades de agentes que não só interagem entre si, mas que também se coordenam, seja através de cooperação ou de competição ou ainda da combinação de ambas propriedades [77]. Sistemas multiagente são, então, compostos por agentes coordenados através de seus relacionamentos com outros agentes. O grupo OMG faz algumas considerações sobre os sistemas multiagente:

- A fim de evitar problemas de desempenho, confiabilidade, manutenção, etc, não se deve criar agentes que façam tudo sozinhos. Ao dividir as funcionalidades entre vários agentes obtêm-se uma maior modularidade, flexibilidade, extensibilidade e manutenibilidade.
- Quando necessário, é possível integrar o conhecimento espalhado pelos vários agentes, e assim obter-se uma visão geral do ambiente.
- Sistemas multiagente suportam melhor aplicações que precisam de processamento distribuído. Dessa forma, os agentes podem trabalhar em paralelo se forem projetados como pequenos componentes autônomos.

4.3 Ontologia para Agentes Inteligentes

Para um sistema interdisciplinar evoluir sem problemas na troca de informações, é necessário uma linguagem comum que deve ser entendida por todos os sistemas envolvidos. Esta linguagem deve fornecer um entendimento compartilhado em uma determinada área de estudo [78] em um ambiente de projeto colaborativo [79].

Ontologia foi criada para ajudar as pessoas a fazer todas essas tarefas, definindo um vocabulário em um determinado domínio que é compreendido por todos os atores envolvidos, como Yahoo! fez para categorizar Web Sites, Amazon.com para categorizações de produtos para venda e suas características e o (DARPA), em conjunto com o WWW Consortium (W3C), desenvolvendo uma construção mais expressiva, destinada a facilitar a interação do agente na Web [80].

Da mesma forma, a *Smart Grid* precisa de uma linguagem comum que deve ser usada para ajudar a melhorar o desenvolvimento de soluções que envolvem mais de um sistema. O Sistema Elétrico de Potência (SEP) já não está sozinho, pois ele possui muitos atores que são integrados pelos Sistemas de Telecomunicações, os quais fornecem informações para um Sistema de Informação, que poderia monitorar, gerenciar e operar o SEP. Esta linguagem comum, deve acelerar o desenvolvimento de soluções compartilhando uma compreensão comum da estrutura da informação entre pessoas ou agentes de software, permitindo a reutilização de conhecimento de domínio, fazendo suposições de domínio explícitas, separando o conhecimento de domínio do conhecimento operacional e analisando o conhecimento de domínio [80].

Neste documento, o foco é a microrrede como um novo paradigma da REI [49], já que ela é vista como um dos seus futuros pilares [50]. Espera-se que a evolução orgânica do REI venha através da integração *plug-and-play* de microrredes [51]. Quando tem-se uma microrrede em uma condição ilhada, uma abordagem possível para o gerenciamento de energia é um processo de negociação, onde as cargas e fontes trocam pedidos e infor-

mações para fornecer energia para o máximo de cargas possível com a geração de energia naquele momento. Estas mensagens devem ser compreendidas pelas cargas que requerem informação de suprimento e as fontes devem ter um modelo ou linguagem para enviar as informações necessárias para as cargas [81].

Um método possível para resolver este tipo de problema em ambientes complexos e ter a capacidade de processar uma negociação é o sistema multiagente. Os desafios para construir um SMA envolve todos os problemas do sistema distribuído tradicional e que surgem a partir deste novo conceito [82].

O sistema de energia elétrica já tem seu sistema de informação, mas no novo contexto de *Smart Grids* eles devem ser integrados às novas soluções e sistemas que vieram com este novo paradigma. Entretanto, a integração do sistema legado aumenta as dificuldades de projetar o sistema multiagente devido à semântica variável de diferentes sistemas de informação [82].

Gruber em [83] define a ontologia como uma especificação explícita da conceituação, isto é, um corpo de conhecimento formalmente representado.

Ontologia em um contexto de SMA é a linguagem ou vocabulário usado pelos agentes durante a troca de mensagens ou de comunicação e tanto o remetente e o receptor devem atribuir o mesmo significado para estes símbolos [75] para uma comunicação eficaz. Uma característica da ontologia que difere das linguagens de conteúdo, também conhecida como idioma, é que enquanto a segunda é tipicamente independente do domínio, ou seja, ela pode ser usada para vários campos, como engenharia, química, física, enquanto que a segunda é específica para um dado domínio, ou seja, somente dentro do contexto do SEP.

4.4 Sistemas Multiagente aplicados ao Sistema Elétrico de Potência

O desenvolvimento do SMA pode beneficiar a operação inteligente de sistemas elétricos de potência de várias maneiras, mas ainda existem alguns desafios que precisam ser resolvidos. Uma breve discussão de alguns desses desafios é apresentada a seguir [45]:

1. *Formulação de Problema:* Os problemas no sistema de energia precisam ser formulados de modo que as características do SMA sejam capturadas para projetar e selecionar uma arquitetura apropriada para agentes inteligentes, o que ainda é um dilema dessa maneira [84, 21].
2. *Padronização:* Outro desafio é a seleção de Linguagem de comunicação e protocolo para a interação do agente, para descobrir a troca de informações do agente, comunicação e negociação. Como a seleção de protocolos e linguagem de conteúdo afetam

a capacidade social e a interoperabilidade dos SMAs, a padronização ainda é um dilema que precisa ser resolvido [84, 21, 85].

3. *Comunicação*: O desenvolvimento de sistemas de comunicação do SMA enfrenta desafios como dados incompletos, perda de pacotes de dados devido a algumas restrições de comunicação, atraso na transferência de dados em tempo real e existência de dados ruidosos [86, 87, 88]. Também a segurança da comunicação em uma arquitetura aberta é considerada como outro desafio que pode influenciar a mensagem do agente [21]. A maioria desses desafios de comunicação ainda permanecem sem solução.
4. *Coerência*: A falta de perspectiva global, controle e dados são vistos como desafios de coerência. A ausência de coerência na tomada de decisões e ações de agentes autônomos pode levar a resultados imprevisíveis no SMA, particularmente no caso em que as decisões locais têm influência sobre todo o sistema e também no caso de interações em tempo de execução de uma série de ferramentas e técnicas díspares [84, 89, 85]. Estes problemas são particularmente importantes quando as dimensões do sistema se tornam maiores. No sistema de potência moderno com enorme quantidade de dados, elevado número de agentes e conexões de comunicação a escalabilidade de SMA é ainda duvidosa [84, 85].
5. *Robustez*: A tecnologia SMA é considerada robusta já que a mesma elimina pontos únicos de falha, no caso seus agentes. Porém existem outros pontos potenciais de falhas (comunicação por exemplo,) que podem resultar em uma falha de todo o sistema [89, 86]. Isso pode ser visto como um desafio importante para a robustez do SMA.
6. *Implementação*: Modelagem e simulação de SMA têm encontrado popularidade nos últimos anos, mas a falta de experiência prática na aplicação de SMA para a indústria é uma preocupação da aplicabilidade do SMA na engenharia de energia [21, 47]. Selecionar uma plataforma tecnológica apropriada, fornecendo um sistema robusto para aplicações *on-line*, garantindo flexibilidade e extensibilidade em uma arquitetura aberta, bem como identificando restrições práticas são consideradas como implementação principal.

4.5 Sistema Multiagente na *Smart Grid*

Em [46] foi observado que vários artigos utilizam uma implementação de plataforma de agente para desenvolver seu SMA, sendo JADE o mais utilizado. No entanto, deve-se considerar que os trabalhos revisados nesta tese, não fazem um uso extensivo das principais características da tecnologia do agente no contexto de microrredes:

- Na maioria dos casos, há uma instância de cada agente. Assim, os autores não consideram qualquer interação entre agentes similares. Como será mostrado mais adiante, a possibilidade de ter mais de uma instância de um agente pode afetar positivamente o desempenho do sistema no caso de sistemas multiagente.
- Os agentes têm pouca escolha ou as escolhas não são evidentes na abordagem. Muitos dos artigos citados consideram a autonomia do agente como uma característica relevante. No entanto, autores não estão explicitando as alternativas que cada agente tem ou mesmo considerando que um agente se recusa a produzir eletricidade, por exemplo.
- A descentralização é feita através da distribuição. Existe um centro de controle que pode ser alocado em locais diferentes, mas há apenas um elemento de controle. A descentralização acontece quando o controle é distribuído ao longo dos diferentes agentes existentes. Um caso trivial seria ter mais de um elemento de controle. A literatura revista é na sua maioria centralizada, mesmo que os SMA propostos sejam distribuídos. Há uma tendência para ter um agente distinto que controla ou coordena tudo.
- A relação entre Agentes geralmente é cliente-servidor. A abordagem *Peer to peer*, que é mais natural para a tecnologia de agentes, não está presente nos artigos revisados. Usando o JADE, qualquer agente pode endereçar a qualquer outro agente. No entanto, nos documentos analisados agentes podem abordar outros agentes específicos e apenas de uma forma muito particular. Além disso, nos artigos selecionados, os agentes desempenham apenas um papel. Isso reduz a flexibilidade que poderia permitir uma solução SMA mais pura, ou seja, mais próxima do modelo ideal.
- Não há *blueprints*. O que os autores introduzem como design é geralmente uma representação gráfica (*custom made*) de elementos-chave no sistema, juntamente com anotações. Estes gráficos não são úteis para detalhar um sistema baseado em agentes e já existem metodologias para capturar e especificar SMA desde, pelo menos, 2002.

4.6 Potenciais Benefícios do SMA e *Drivers* para o seu uso em Aplicações de Engenharia de Potência

Em [21] é descrito que a tendência atual do uso de SMA em Sistemas de Potência pode ser dividida em dois modos: um como uma metodologia para desenvolvimento de sistemas computacionais/hardware flexíveis e extensíveis; e a outra como uma metodologia de modelamento de problemas.

4.6.1 Desenvolvimento de Sistemas Computacionais/Hardware Flexíveis e Extensíveis

Existem muitas áreas de aplicação de engenharia para que soluções flexíveis e extensíveis sejam benéficas. A flexibilidade caracteriza-se pela capacidade de responder corretamente as situações dinâmicas e suporte para replicação em situações variadas (ambientes). Isso parece muito semelhante à autonomia e, portanto, os agentes inteligentes devem ser automaticamente flexíveis; Mas se a autonomia é a capacidade de um agente agendar suas próprias ações, a flexibilidade se relaciona com uma série de ações possíveis para selecionar o mais apropriado. Alguns exames específicos de comportamento flexível seriam o tratamento correto de diferentes formatos de um tipo de dados (como temperaturas em centígrados ou Fahrenheit); Ou a capacidade de construir um novo plano se uma ação de controle particular falhar; Ou um sistema que pode ser implantado em qualquer alimentador, que detecta a conexão da geração distribuída e altera as configurações de proteção de acordo.

A extensibilidade denota a capacidade de adicionar facilmente nova funcionalidade a um sistema, aumentando ou atualizando qualquer uma já existente. Por exemplo, um sistema de monitoramento de condições pode ganhar um novo tipo de sensor e requer um novo algoritmo analógico de dados. Um sistema estimador de estado pode ser atualizado para usar um algoritmo de cálculo de fluxo de carga mais rápido. Para as redes de distribuição, um sistema de controle e gerenciamento de rede distribuído responsável pelo controle de tensão pode ser ampliado para também automatizar a restauração e o gerenciamento de geração distribuída. Um sistema verdadeiramente extensível permitirá que novas funcionalidades sejam adicionadas sem a necessidade de reimplementar a funcionalidade existente. Em muitas aplicações na engenharia de energia, existe também um requisito para a tolerância a falhas: se uma parte do sistema falhar por qualquer motivo, o sistema ainda deve poder atingir seu objetivo de projeto ou, se não for possível, deve realizar o que pode, sem interferir com outros sistemas.

O SMA pode fornecer uma maneira de construir esses sistemas. De fato, a capacidade do SMA para ser flexível, extensível e tolerante a falhas é muitas vezes parte da justificativa para seu uso. No entanto, para que essa justificativa seja válida, a forma como o SMA oferece flexibilidade, extensibilidade e tolerância a falhas precisa ser entendida. As propriedades dos agentes e SMA que produzem essas qualidades são examinadas abaixo;

1. *Benefícios de Autonomia e Encapsulamento de Agentes*: um agente encapsula uma determinada tarefa ou conjunto de funcionalidades de forma semelhante a programação modular ou orientada a objetos. Isso significa que os benefícios das interfaces padrões e a ocultação de informações também estão disponíveis com a programação do agente através do uso de mensagens com um idioma de comunicação de agente

padrão, mas também há a capacidade adicional de ação autônoma. Lembre-se de que a ação autônoma significa que cada agente pode agendar sua própria atividade para alcançar seus objetivos.

Em uma situação de programação modular, os módulos externos podem chamar funções que o módulo não tem mais escolha além de executar o que foi definido. Com a programação voltada a agente, os agentes externos só podem enviar mensagens solicitando que o agente tome alguma ação: o agente autônomo pode decidir se deve cumprir o pedido, a prioridade da tarefa e se outras ações também devem ser agendadas. Isso pode ser útil em situações em que um agente está recebendo muitas solicitações e não pode cumpri-las todas dentro de uma escala de tempo razoável, como por exemplo, com múltiplas solicitações para uma tarefa intensiva em processamento, como um cálculo de fluxo de carga.

A autonomia de cada agente e a interface de mensagens são o que mais contribuem para sistemas flexíveis e extensíveis. Como os agentes não estão diretamente ligados a outros, é fácil tirar um de operação ou adicionar um novo enquanto os outros estão em execução. Qualquer agente que interaja com o parado pode usar o serviço padrão de localização para encontrar outro agente que executa a mesma tarefa, e por esse mecanismo, novos agentes podem ser incluídos no sistema. A estrutura do agente fornece a funcionalidade para mensagens e localização do serviço, o que significa que a integração e as comunicações dos novos agentes são tratadas sem o esforço do designer do sistema. Isso permite que os sistemas sejam extensíveis: funcionalidades extras podem ser adicionadas pela inserção de novos agentes, que usam o serviço de localização para encontrar outras pessoas para se comunicar; e partes de sistemas podem ser atualizadas implantando um agente substituto e removendo o obsoleto.

A combinação apropriada de agentes pode ser implantada para se adequar aos detalhes de situações individuais, e o tratamento flexível das mensagens entre os agentes permite que o sistema se auto-configure. Finalmente, os sistemas legados podem ser incorporados no sistema principal simplesmente envolvendo funcionalidades legadas em uma camada de mensagens de agentes.

2. *Benefícios das arquiteturas Open MAS*: uma arquitetura de agente aberto não impõe restrições à linguagem de programação ou origem dos agentes que se juntam ao sistema e permite uma comunicação flexível entre os agentes. Isso é possível através da adesão aos padrões de mensagens: a separação de um agente de seu ambiente significa que a linguagem de mensagens que um agente entende é importante para a comunicação entre agentes, em vez da linguagem de programação em que foi implementada.

Um exemplo de um conjunto de padrões para uma arquitetura aberta é definido pela Fundação para Agentes Físicos Inteligentes (*Foundation for Intelligent Physical*

Agents - FIPA). O Modelo de Referência de Gerenciamento de Agentes do FIPA abrange a "estrutura dentro da qual os agentes do FIPA existem", definindo padrões para criar, localizar, remover e comunicar com agentes. Isso geralmente é chamado de plataforma de agente e é simplesmente uma parte do ambiente de um agente.

Um requisito de uma arquitetura de agente aberto é que a plataforma não impõe restrições à criação e mensagens de agentes, enquanto que um segundo é que algum mecanismo deve estar disponível para localizar agentes ou agentes particulares que ofereçam serviços específicos dentro da plataforma. Sob o modelo FIPA, isso é conseguido através de um agente separado chamado Facilitador de Diretório: um agente que gerencia uma lista pesquisável de serviços oferecidos por outros agentes dentro da plataforma. Os primeiros sistemas de agentes tendiam a ser arquiteturas fechadas, como um conjunto de agentes seria implantado toda vez que o sistema fosse executado, com toda a comunicação explicitamente definida pelo criador do sistema.

Um exemplo é o sistema ARCHON [90] para gerenciamento de rede de distribuição, originalmente criado para integrar quatro sistemas legados. Essa arquitetura parece estar fechada porque novos agentes não podem ser adicionados à comunidade: mesmo que um novo agente seja criado e executado, outros agentes não têm como localizá-lo e se comunicar com ele. Uma arquitetura fechada remove a possibilidade de um sistema extensível ou flexível, limitando severamente os benefícios do uso de agentes.

3. *Plataforma para sistemas distribuídos*: um agente é distinto do seu ambiente, o que significa que ele pode ser colocado em diferentes ambientes e ainda tem os mesmos objetivos e habilidades. No entanto, o ambiente impacta sobre quais ações um agente toma e em que ordem, como o agente agenda de forma autônoma sua ação em resposta a entradas e mensagens de sensores.

Por esse motivo, um agente é inerentemente distribuível, sem vínculos fixos com seu ambiente. Na prática, a distribuição de agentes em uma rede é suportada pela plataforma do agente: a plataforma é executada em todos os computadores que hospedarão um agente e os agentes serão implantados dentro da plataforma, como de costume. Para agentes dentro de uma plataforma, não há diferença entre os agentes no mesmo computador e os agentes em um computador diferente, pois as instâncias da plataforma que funcionam em máquinas separadas se conectam e aparecem de forma simples como uma única instância. Isso significa que o mesmo conjunto de agentes pode ser implantado em um computador e, alternativamente, em vários computadores em rede, sem modificar ou alterar o código do agente.

4. *Tolerância a falhas*: redundância de construção em sistemas é uma das abordagens de engenharia padrão para obter tolerância a falhas. Reduzir a redundância no SMA

simplesmente envolve o fornecimento de mais de um agente com um determinado conjunto de habilidades. Se um agente necessitar dos serviços de um segundo agente para cumprir seus objetivos e o segundo agente falhar, o agente pode procurar proativamente um agente alternativo (talvez usando o Facilitador de Diretório) para fornecer os serviços necessários. Essa redundância pode ser fornecida por duplicação simples de cada agente, possivelmente com distribuição de duplicatas em diferentes computadores.

Isso proporcionaria uma tolerância a falhas físicas, como perda de conexão de rede ou danos a um computador. A tolerância às falhas relacionadas à programação exigiria uma solução mais intensiva em design: em vez de simplesmente executar duas cópias de um único agente, a mesma funcionalidade seria codificada de forma diferente em dois agentes. As diversas aplicações e ambientes operacionais terão diferentes requisitos para níveis de robustez e tolerância a falhas, e assim a abordagem adotada deve ser específica da aplicação. No entanto, a flexibilidade oferecida por uma arquitetura aberta de agentes com boa capacidade social leva facilmente ao design de um sistema tolerante a falhas.

4.6.2 Sistemas Multiagente como uma abordagem de modelagem

Os sistemas multiagente são mais do que um método de integração de sistemas, eles também fornecem uma abordagem de modelagem. Ao oferecer uma maneira de ver o mundo, um sistema de agente pode representar intuitivamente uma situação real de entidades interagindo e dar uma maneira de testar a forma como os comportamentos complexos podem surgir. A representação natural do mundo já foi dada como uma vantagem do design de sistemas orientados a objetos (OO), onde entidades em um sistema são modeladas como objetos [21].

Esse pensamento foi bem-visto e adotado pela comunidade de engenharia de energia em padrões como o *Common Information Model* (CIM) e IEC 61850. O principal benefício da abordagem do objeto é o encapsulamento de dados: as estruturas de dados particularmente usadas para armazenar atributos de um objeto estão ocultas de objetos externos, mas são indiretamente acessíveis através de chamadas de método e interfaces padrões.

O design baseado em agentes adiciona outro nível de abstração para isso, não basta apenas que as estruturas internas de dados sejam ocultas, mas os "métodos"(ações) que um agente pode executar também devem ser ocultos. Porém devem ser indiretamente acessíveis através de interfaces de mensagens padrão. Esta é uma maneira muito natural de modelar atores em alguns sistemas, como os mercados: em um mercado real, os atores possuem atributos (como preço desejado e menor preço para um vendedor) e ações possíveis (por exemplo, iniciar leilão, aceitar oferta) que outros atores não podem manipular

diretamente. O acesso indireto está disponível, por exemplo, apresentando o vendedor com uma oferta alta, com a esperança de que seja aceito.

Ao modelar cada participante do mercado como um agente separado em um sistema multiagente, é fácil executar simulações de diferentes cenários de mercado; Os atributos de participantes de mercado únicos ou múltiplos podem ser ajustados, alterando as condições iniciais de um ou mais agentes. A simulação de *Marketplace* é uma aplicação na qual os benefícios de usar agentes inteligentes para representar atores autônomos são bastante claros. Ao modelar o comportamento e a comunicação de agentes individuais, a operação do mercado pode ser estudada para padrões de comportamento emergentes. No entanto, muitas outras aplicações de engenharia de sistemas de potência podem aplicar esta maneira de visualizar o mundo, como operação e controle de sistemas de energia. Os geradores possuem um certo grau de autonomia e não podem ser diretamente afetados por atores do sistema externo, prestando-se a serem representados por agentes.

Tal aplicação seria usar agentes para suas propriedades de modelagem e também como forma de construir um sistema flexível e extensível. Através de seu uso para integração ou modelagem de sistemas, o MAS oferece abordagens significativamente diferentes para projetar sistemas para aplicações típicas de sistemas de potência e energia elétrica. Pechouk e Thompson fornecem perspectivas interessantes sobre as aplicações industriais dos sistemas multiagente em um relatório da *Industry Track* da Quarta Conferência Conjunta Internacional sobre Agentes Autônomos e Sistemas Multiagente (AAMAS 2005) [91]. Eles indicam que a maioria dos industriais está interessada em agentes para as seguintes aplicações: planejamento; agendamento; recursos e tomada de decisão estratégica; diagnósticos; controle e replanificação em tempo real; integração de sistemas de software; interoperabilidade; integração do conhecimento; ontologias; simulação e modelagem.

4.7 Desafios Tecnológicos para a Engenharia de Potência

Embora os benefícios potenciais da tecnologia de agentes tenham sido descritos até agora, é importante identificar os principais desafios técnicos que ainda não foram superados para permitir a implementação mais eficaz de sistemas multiagente na comunidade de engenharia de energia. Segundo [21] estes incluem o seguinte.

- **Plataformas:** existe uma série de plataformas de sistemas multi-proprietários. No entanto, é necessária uma seleção criteriosa para assegurar a compatibilidade a longo prazo e a robustez necessária para aplicativos on-line. A necessidade de desenvolver agentes que possam interagir um com o outro, independentemente da plataforma em que são executados, é fundamental para o desenvolvimento de arquiteturas flexíveis, extensíveis e abertas. Por esse motivo, a escolha da plataforma para a adesão aos padrões é extremamente importante.

- **Toolkits:** com base na crescente quantidade de pesquisa de agentes na comunidade de engenharia de energia, há a oportunidade de reutilizar projetos e funcionalidades de agentes para o benefício de toda a comunidade. Portanto, há um papel para kits de ferramentas que permitam a reutilização de comportamentos e capacidades de agentes existentes.
- **Design de agente inteligente:** novos pesquisadores e implementadores industriais precisam de orientação sobre como exatamente um agente deve ser projetado ou, pelo menos, conhecimento das opções disponíveis. Uma série de arquiteturas diferentes para agentes inteligentes podem ser encontradas na literatura: agentes de desejo e intenção de crença (BDI), agentes reativos, agentes com arquiteturas em camadas e agentes implementados usando programação baseada em modelo. Cada uma dessas estratégias de implementação produzirá agentes com diferentes graus de reatividade, pro-atividade e capacidade social. O que não é fácil de entender é a autonomia flexível que varia entre essas estratégias de implementação e sua adequação para diferentes aplicativos de engenharia de energia.
- **Idiomas e ontologias de comunicação do agente:** apoiar a capacidade social dos agentes são as linguagens de comunicação dos agentes. Estes definem como os agentes trocam informações, comunicam e negociam. Dentro deles estão protocolos e linguagens de conteúdo que permitem que mensagens significativas sejam compostas e interpretadas. Os padrões internacionais são definidos pela Fundação para Agentes Físicos Inteligentes (FIPA). Um aspecto-chave do uso da tecnologia baseada em agente é que todos os agentes dentro de aplicativos de engenharia de energia devem ser capazes de cooperar e interoperar, e isso deve ser independente do Desenvolvedor individual. Portanto, a comunidade deve concordar com a adoção de padrões adequados de linguagem de comunicação do agente. Isso se estende à área de ontologias que define os termos e conceitos que os agentes podem trocar, interpretar e entender.
- **Padrões de dados:** a comunidade de engenharia de energia gastou esforços significativos na definição de padrões de dados para várias áreas de aplicação. Um exemplo é o Modelo de Informação Comum (CIM) para troca de dados entre Sistemas de Gerenciamento de Energia e aplicações relacionadas. Outro é o padrão de redes e sistemas de comunicação IEC 61850 em subestações para troca de dados entre dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs). Esses padrões não podem ser aplicados diretamente para a comunicação do agente, pois as habilidades de conversação dos agentes exigem um idioma mais rico do que um padrão de passagem de dados. No entanto, há potencial para usá-los como base para uma ontologia.
- **Segurança:** devido à natureza peer-to-peer dos sistemas de agentes, a segurança

deve ser uma preocupação fundamental. Se os agentes se juntam perfeitamente a uma comunidade de agentes, deve haver medidas para determinar o nível de confiança entre os agentes e a segurança da mensagem. Os agentes de uma outra concessionária podem receber menos serviços, por exemplo, indicando a menor confiança depositada neles. Da mesma forma, a comunicação entre dois agentes está aberta a ataques como a falsificação de um remetente (a mensagem pretende ser de um agente mais confiável) e modificação de mensagem (uma mensagem é alterada enquanto viaja entre agentes, particularmente em situações de negociação).

- **Mobilidade:** vários pesquisadores estão interessados em agentes móveis, que se deslocam completamente (código fonte e dados) de máquina para máquina. Embora isso tenha surgido dentro de alguns aplicativos de engenharia de sistemas de potência, até o momento, não existe nenhum indicativo que essa abordagem seja adequada, visto que Pechoucek e Thompson declaram "As pessoas muitas vezes afirmam que a mobilidade do agente é inevitável e mais essencial do que realmente é de fato. Muitas vezes, a migração de dados ou a comunicação simples é suficiente, em vez da migração do código de um agente".

4.8 Considerações Finais

Novos problemas surgiram com a inserção de fontes de geração distribuída e uma das soluções promissoras para este problema, entre outros, é a utilização de SMA. Compreender a sua metodologia de operação e otimizar as suas funcionalidades dentro do contexto do SEP tem sido um desafio desde o início da sua utilização como solução para problemas conhecidos em REI. O uso de *frameworks* com JADE possibilitam um desenvolvimento mais rápido, pois as funções básicas já foram implementadas de acordo com as normas da FIPA. Porém, o desafio maior continua no modelamento dos problemas neste contexto, onde metodologias tradicionais não entregam o melhor resultado para a abordagem distribuída em agentes inteligentes.

5 Metodologia

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo visa definir o problema a ser modelado e a metodologia utilizada para a sua solução. Inicialmente é tratado da microrrede e a forma em que ela será simulada, em seguida é feito o modelamento do sistema multiagente, ou seja, definição do objetivo principal que o mesmo deve perseguir. Por fim é executado a integração dos sistemas simulados, utilizando uma plataforma de simulação de parâmetros de desempenho de rede, para assim verificar os impactos que o sistema de comunicação acarreta sobre o sistema como um todo.

5.2 Introdução

Como visto nos capítulos anteriores, tem-se três sistemas que devem operar integrados para que seja possível obter o que é conhecido como Redes Elétricas Inteligentes ou *Smart Grids*. Esta proposta, situada nesse contexto, visa executar em uma plataforma de tempo real, não somente um sistema, mas sim os 3 interligados/integrados e sendo executados em tempo real.

Foi definido assim o RTDS como plataforma de execução do sistema elétrico, o qual tem a capacidade de realizar simulações em tempo real, comunicação de dados utilizando protocolo TCP/IP, DNP3, IEC61850 e C37.118 além de conexão de dispositivos externos através de interfaces de entrada e saída de sinais.

Como a proposta visa o controle de uma microrrede em modo ilhado, Conforme Bakar [41], é possível dividir metodologia de controle de uma microrrede em modo ilhado em 4 (quatro) categorias, sendo elas; gerenciamento de tensão e frequência, balanceamento entre geração e demanda, qualidade de energia e *droop control*. Desta forma, optou-se pela metodologia de balanceamento entre geração e demanda para validar o *framework*.

No Capítulo 2, também foi demonstrado que é possível executar o controle de uma microrrede de modo centralizado ou distribuído. Optou-se pelo modo distribuído para executar o controle da microrrede utilizando a metodologia de balanceamento energético.

A implementação do controle será feita usando o SMA, pois o mesmo possibilita trabalhar de forma distribuída. Para que o sistema elétrico envie os dados em tempo real para o SMA, foi estabelecido um canal de comunicação de dados entre o sistema escada do RTDS (RSCAD) e o SMA. Isso possibilitou que o controle possa atuar em tempo real e assim permitiu que posteriormente fosse realizado o teste de impacto no sistema de

comunicação de dados.

Esse é um fator importante para a contribuição do trabalho, pois simulações do sistema elétrico integradas a sistemas computacionais e com fluxo de informação bidirecionais já foram estudadas em [92, 93, 94], porém o tempo de resposta do sistema elétrico não ocorre em tempo de execução, o que acarreta em um certo atraso de tempo *delay*.

Algumas soluções foram implementadas para o sincronismo de tempo entre o processamento do sistema elétrico simulado, o envio das informações através de um sistema de comunicação e o processamento dos dados por um sistema computacional, como visto em [95, 96, 5, 97], porém o tempo de resposta do sistema computacional fica parcialmente comprometido por estar em outra base de tempo, já que a solução apenas sincroniza o tempo do sistema elétrico simulado com o sistema de comunicação simulado.

Ao abordar soluções no contexto de redes inteligentes, o tempo de resposta impacta diretamente a viabilidade da solução, pois para algumas aplicações, os requisitos de tempo chegam a ser menores que 3s conforme [98], requerendo assim estudos mais aprofundados no quesito tempo de resposta necessário. Baseado nesta nova premissa advinda de novos paradigmas contidos nas redes inteligentes, foi executado o modelamento de todos os sistemas envolvidos em tempo real, para que as respostas bidirecionais obtidas fossem as mais confiáveis possíveis.

5.3 *Framework*

5.3.1 RTDS

O simulador digital em tempo real, foi utilizado pois executa as simulações em tempo real, possibilitando avaliação de tempo de resposta, possui interfaces de comunicação de dados, a qual possibilita uma integração mais completa do sistema elétrico com um sistemas de dados e uma interface de interação em tempo real. A sua utilização como ferramenta de simulação traz ao *framework* várias possibilidades, pois permite uma análise de transitórios, análise em regime permanente, análise de tempo de resposta de aplicação de gerenciamento e controle, também é uma tendência no desenvolvimento de testbed de microrredes [35]. Dessa forma, utilizou-se o modelo de microrrede descrito na Figura 16 para realizar os ensaios necessários.

O sistema proposto para essa simulação foi baseado em [1] sendo composto por um gerador eólico, um gerador fotovoltaico e um gerador diesel, conforme apresentado na Tabela 2. Existem também 7 cargas descritas na Tabela 3 com suas respectivas prioridades. Estas podem ser definidas conforme os critérios particulares de cada microrredes em particular.

Os geradores de energia renováveis possuem os perfis de velocidade do vento e

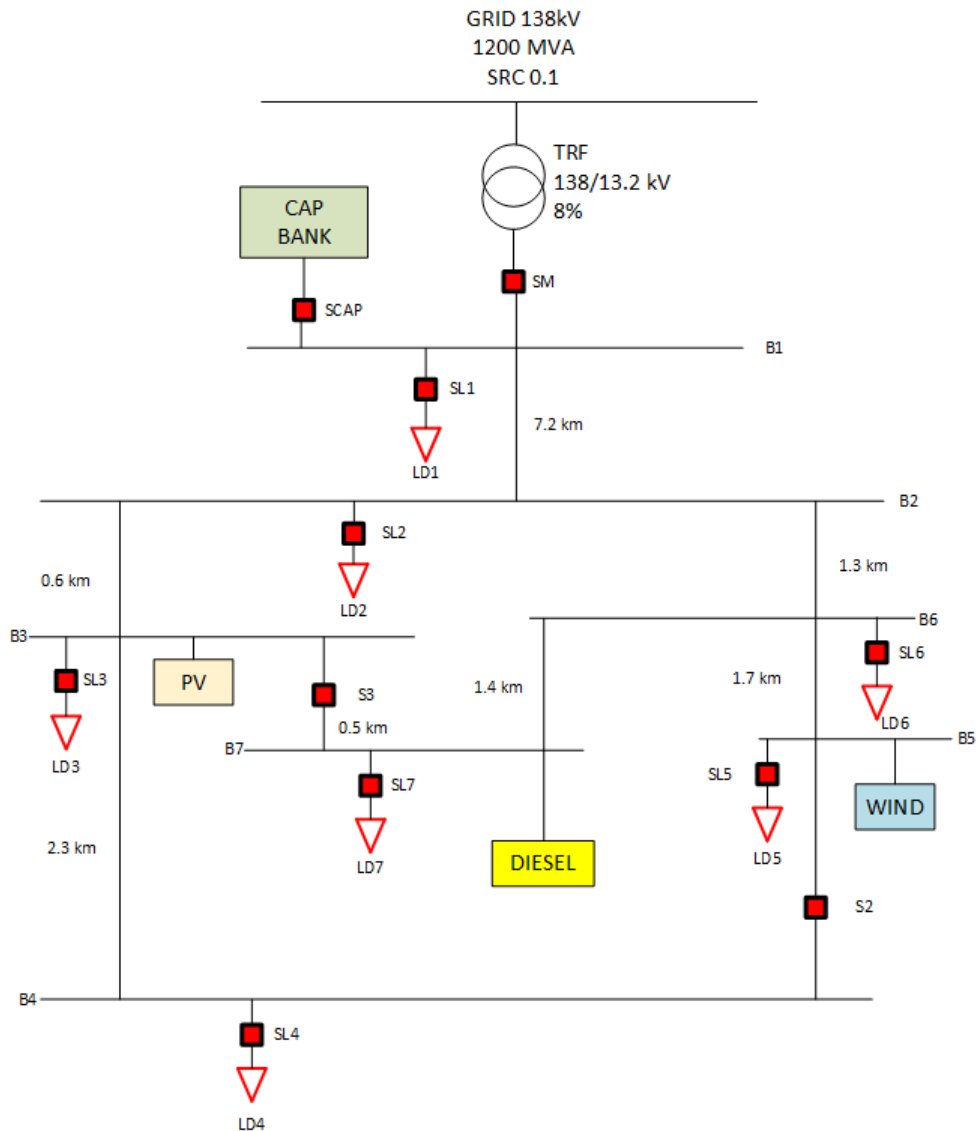


Figura 16 – Microrrede Simulada [1]

irradiação solar conforme descrito na Figura 17. Os dados relativos a esses perfis típicos foram obtidos no *website* do operador do sistema de transmissão de energia belga (ELIA). Qualquer outro perfil pode ser utilizado neste modelo, como também casos mais complexos. Este simples caso foi selecionado a fim de provar os conceitos envolvidos e possibilitar a reprodução dos resultados.

Tabela 2 – Fontes de Energia da Microrrede [1]

Fontes		
ID	Potência [MW]	Tipo
SRC01	3,00	Fossil
SRC02	1,80	PV
SRC03	2,50	Eólica

Tabela 3 – Descrição das Cargas da Microrrede

Cargas		
ID	Demanda [MW]	Grupo (Prioridade)
LD01	1,60	3
LD02	1,60	2
LD03	0,60	3
LD04	1,00	1
LD05	0,70	1
LD06	0,60	2
LD07	1,10	1

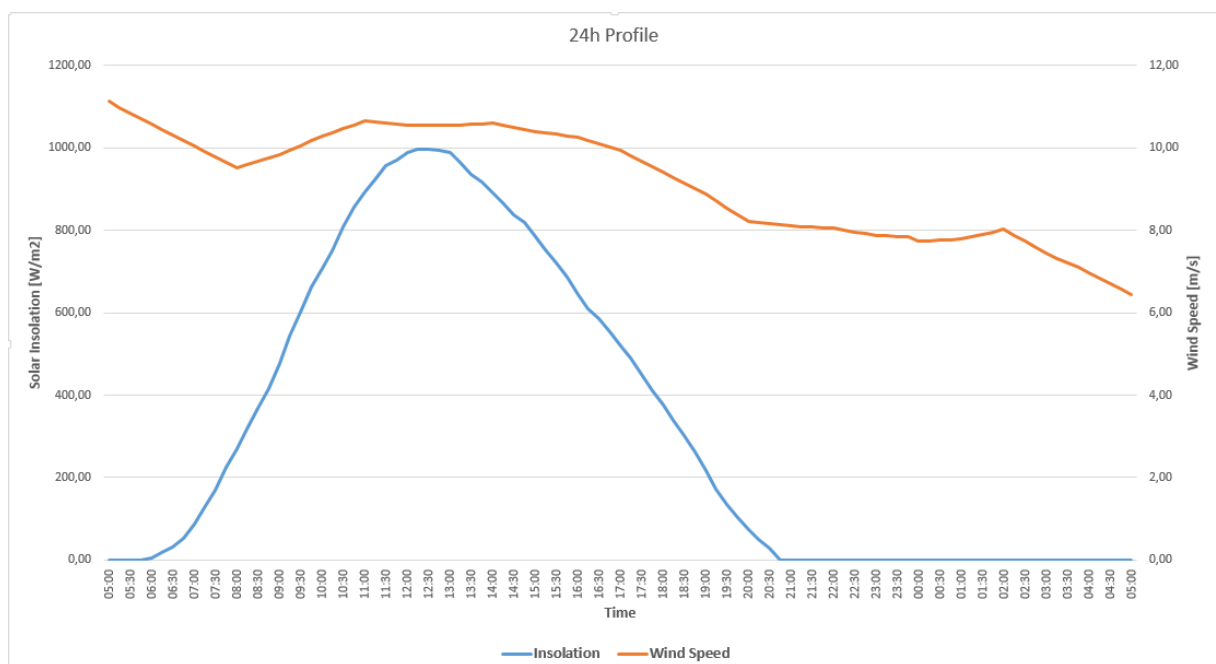


Figura 17 – Perfil de Geração de Energia para Fonte Eólica e Fotovoltáica

O detalhamento dos sistemas de controle de frequência e tensão utilizados neste modelo, pode ser visto no Apêndice A

Quanto à comunicação de dados entre o sistema elétrico e o SMA, utilizou-se do código 5.1 para abrir uma porta de comunicação de dados e envio de comandos ao simulador.

```
1 //Variable Initialization
2 //PLD01
3 float temp_float;
4 //PLD02
5 float temp_float2;
6 //PLD03
7 float temp_float3;
8 //PLD04
9 float temp_float4;
10 //PLD05
11 float temp_float5;
12 //PLD06
13 float temp_float6;
14 //PLD07
15 float temp_float7;
16
17
18 float temp_float5;
19 //PSRC01 - Gerador
20 float temp_float11;
21 //PSRC02 - Gerador Eolico
22 float temp_float12;
23 //PSRC02 - Gerador Eolico
24 float temp_float13;
25
26 //String for information return
27 string temp_string;
28
29 //Close the door if any is open
30 ClosePort(4575);
31
32 //Open the door for MAS Middle Agent
33 ListenOnPort(4575, true);
34 fprintf(stdmsg, "Initialization of RTDS Simulation");
35
36 fprintf(stdmsg, "Execution of script is done\n");
```

Código 5.1 – Script para abrir um *Socket* de comunicação no RSCAD

Assim, foi criado um ambiente utilizando o sistema RTDS acoplado ao seu software de simulação e monitoramento do sistema elétrico RSCAD no computador, o qual estava ligado por uma *switch* de 100Mbps ao segundo computador onde estava sendo executado o Sistema Multiagente. A topologia pode ser vista conforme Figura 18. Por se tratar de um equipamento compartilhado, o tráfego de dados existente na *switch* era muito pequeno e desta forma não comprometeu o desempenho da simulação. Isto foi possível pois o equipamento utilizado trabalha em *wire-rate* ou seja, ele é capaz de entregar o máximo de largura de banda em cada porta sem ter perda de pacotes.

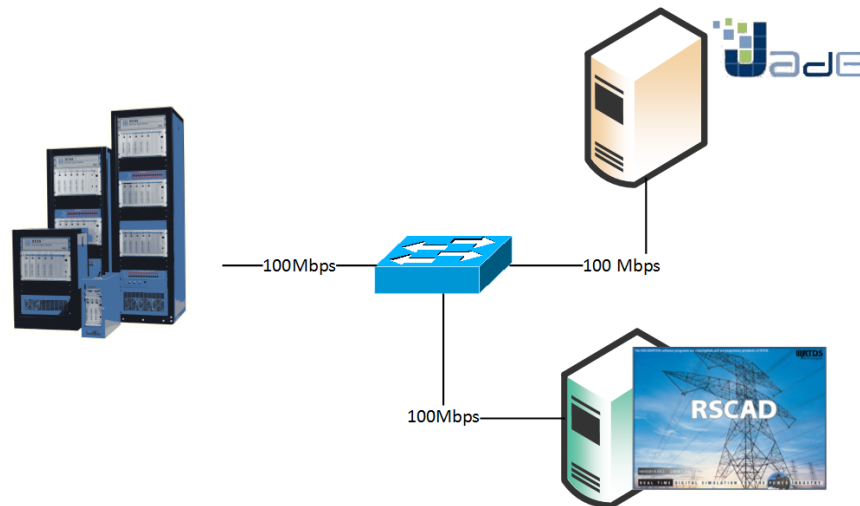


Figura 18 – Topologia Física Simulada

5.3.2 Sistemas Multiagentes

Para a implementação do sistema multiagente, foi escolhido o *Framework* JADE que é baseado em JAVA e está em conformidade com os padrões FIPA (Fundação para Agentes Físicos Inteligentes). Ele tem um Diretório Facilitador (DF Directory Facilitator) que foi usado para possibilitar o conhecimento de todos os agentes que estão ativos na plataforma multiagente e suas informações. Possui também um agente *sniffer* que possibilita analisar como a comunicação entre agentes está funcionando.

Para o desenvolvimento do SMA, baseou-se na metodologia GAIA [99] e definiu-se os papéis que serão exercidos, os agentes que irão participar e executar os papéis e os serviços que cada agentes terão para executar para alcançar o objetivo desejado.

5.3.2.1 Modelamento

No modelo apresentado neste trabalho, demonstra-se o sistema multiagente interagindo com uma microrrede em modo ilhado, buscando o seu objetivo de suprir todas as cargas o maior tempo possível com a geração interna disponível. O SMA não tem conhecimento e não leva em consideração o tempo de desconexão da microrrede para realizar as sus tomadas de decisões.

Desta forma, o objetivo pode ser descrito conforme equação 5.3 onde a potência de fontes de energia renováveis é definida por 5.1, sendo que o valor de P_{Diesel} para essa simulação foi definido em 1,5 MW. Porém esse valor pode ser ajustado para outro dentro do limite do gerador.

A potência total de cargas é definida por 5.2, sendo que o grupo de cargas de prioridade 1 pertencem ao estado de Emergência, as cargas do grupo 2 ao estado Crítico e o do grupo 3 ao estado de Sobrevivência. Esta plataforma de modelamento também demonstra os potenciais deste tipo de simulação em tempo real, integrando os 3 sistemas.

Pontos fracos e restrições imprevistas podem então, serem verificadas na esfera de tempo real.

$$P_{DER} = P_{Eólica} + P_{PV} \quad (5.1)$$

$$P_{Cargas} = \sum P_{Prioridade_1} + \sum P_{Prioridade_2} + \sum P_{Prioridade_3} \quad (5.2)$$

$$P_{Geração} \geq P_{DER} + P_{Diesel} \quad (5.3)$$

De posse da problemática e de seu equacionamento, partiu-se então para a definição e modelamento do SMA utilizando a metodologia GAIA [99]. Inicia-se o modelamento definindo os papéis que cada agente pode assumir, sendo eles: Equipamento, Gerente e Tradutor. Equipamento são todos os agentes responsáveis pelo gerenciamento dos IEDs, sejam eles acoplados às cargas ou às fontes de geração de energia, o Gerente é aquele responsável em verificar a atual situação da microrrede e definir um estado (emergência, crítico ou sobrevivência) e o Tradutor é o responsável por fazer a conexão entre o sistema elétrico ou microrrede e o SMA.

Os modelos dos agentes são baseados nos papéis a serem exercidos e nos ambientes em que estarão imersos. Assim, definiu-se quatro agentes, *LOAD* (carga) responsável pelo monitoramento das cargas da microrrede e que tem "Equipamento" como papel a ser exercido; *SOURCE* (geração) responsável pelos equipamentos de geração de energia e que possui o mesmo papel que o *LOAD*; *MIDDLE* (tradutor) responsável pela troca de informações e tradução de comandos entre a microrrede e o SMA executando o papel "Tradutor"; e o *MANAGER* (gerente) que é responsável da coleta das informações daqueles que executam o papel "Equipamento" para a definição de um estado de prioridade ao exercer o papel "Gerente".

O próximo passo foi a codificação dos SMA utilizando o *framework* JADE, através da definição tanto da classe dos agentes, como os agentes. A definição do Agente *LOAD* é demonstrada na Figura 19, sendo responsável pelo monitoramento e ações relativas às cargas, bem como a classe de dados oriunda do modelamento do seu comportamento e atributos conforme Figura 20.

A definição do Agente *SOURCE* apresentada na Figura 21 é responsável pelo monitoramento e ações relativas às fontes de geração de energia (Eólica, Solar, Bateria e Gerador), bem como a classe de dados oriunda do modelamento do seu comportamento e atributos Figura 22.

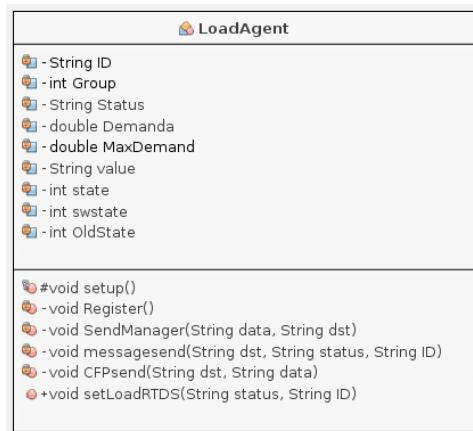


Figura 19 – Agente *LOAD*

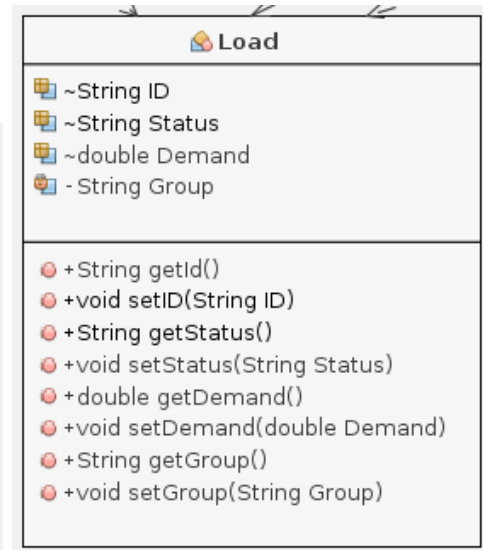


Figura 20 – Classe de dados *LOAD*

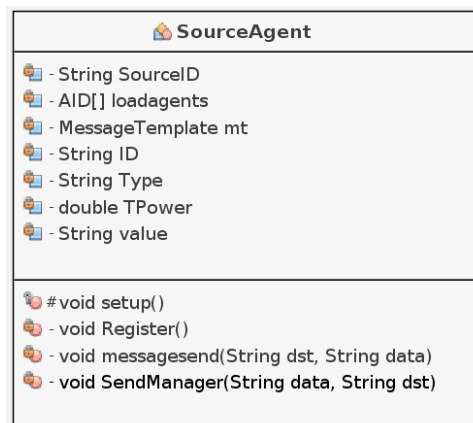


Figura 21 – Agente *SOURCE*

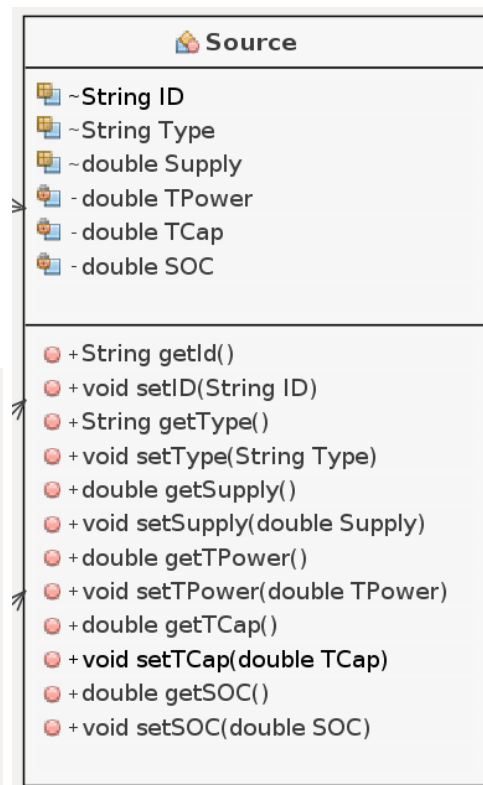


Figura 22 – Classe *SOURCE*

Na Figura 23, tem-se a definição do Agente *MIDDLE*, o qual é responsável pelo interfaceamento entre o sistema elétrico (RTDS) e o sistema de controle e gerenciamento de energia baseado em um SMA(JADE), bem como a classe de dados na Figura 24 oriunda do modelamento do seu comportamento e atributos.

A definição do Agente *MANAGER* pode ser vista na Figura 25. Ele é o responsável pela verificação do balançamento na microrrede e definição do estado. Juntamente com o

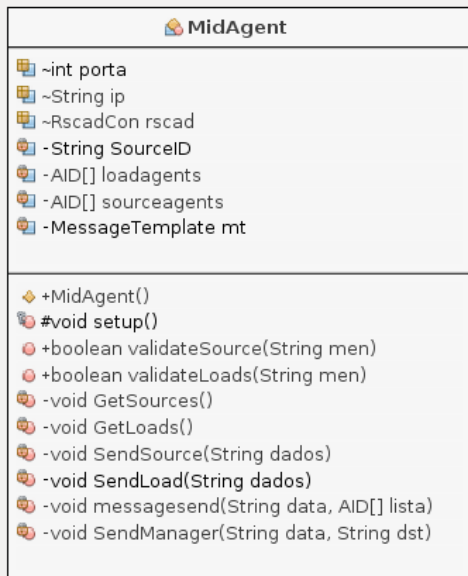


Figura 23 – Agente *MIDDLE*

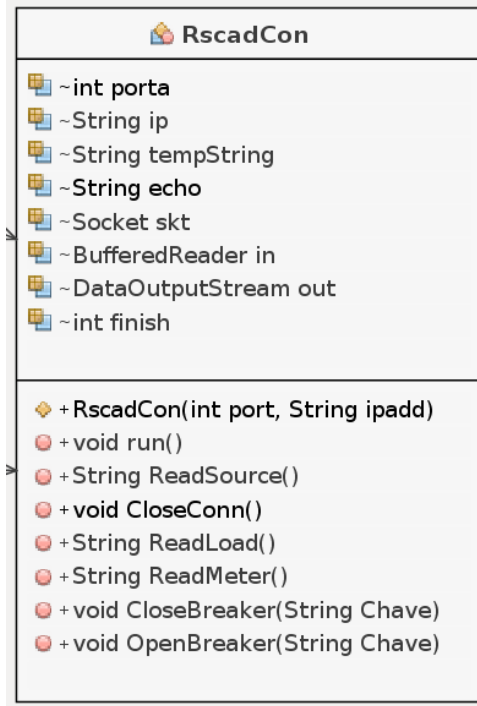


Figura 24 – Classe *MIDDLE*

agente *MANAGER* foi desenvolvida a classe *MANAGER* a qual possibilita a visualização das informações recebidas pelo agente *MANAGER*, bem como o modo e o estado da microrrede conforme Figura 26.

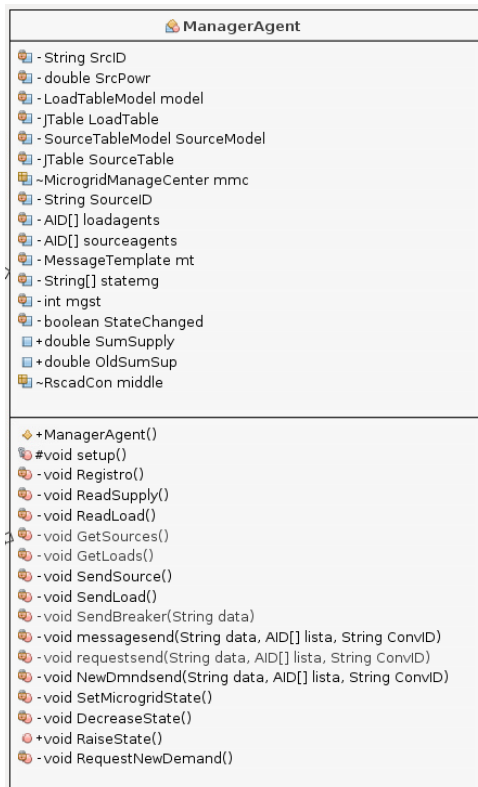


Figura 25 – Agente *MANAGER*

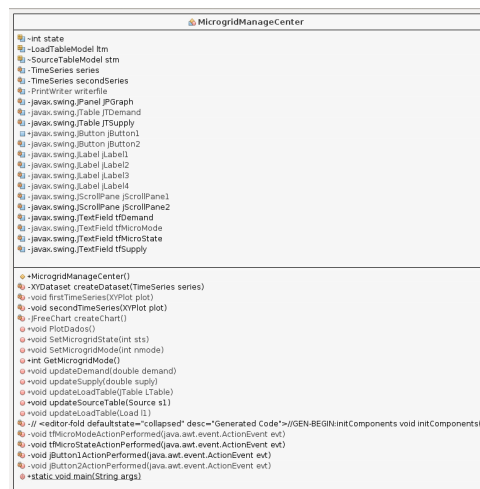


Figura 26 – Classe *Manager*

Passa-se para a definição dos principais serviços, métodos de interação com o ambiente e com o outro agente, que serão necessários para que o objetivo principal possa ser alcançado. O Tradutor tem o serviço de leitura dos IEDs da microrrede para que essas informações alcancem os seus respectivos destinatários. Também possui o serviço de abertura e fechamento de chaves, para que as cargas possam ser operadas corretamente pelos agentes *LOAD*. O Gerente tem o serviço de definição de estado da microrrede, o qual será utilizado pelos agentes *LOAD* para o balanceamento energético dentro da microrrede.

Na Figura 27 tem-se o comportamento necessário ao agente *MANAGER* para obter as informações necessárias da microrrede. Ele inicia com uma requisição aos agentes *LOAD* e *SOURCE*, os quais respondem com o seu atual consumo de energia.

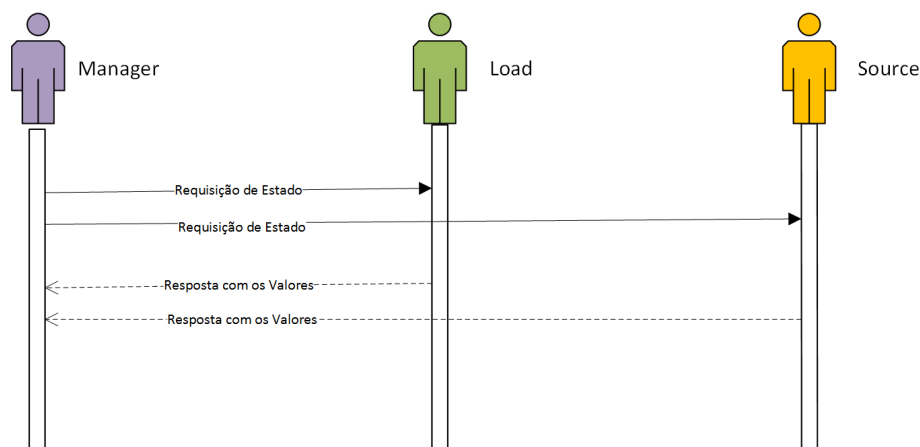


Figura 27 – Interação entre os agentes para reconhecimento do estado

Quando o *MANAGER* detecta que está para ocorrer um desbalanceamento energético negativo (demanda maior que a geração) na microrrede, ele altera o estado atual para um mais crítico ou maior e informa os agentes *LOAD*. Este verifica as prioridades e define quem deve ser desconectado, enviando a informação ao *MIDDLE*. Este recebe a informação e a traduz em um comando dentro do RTDS, conforme Figura 28.

Porém, o desbalanceamento pode ocorrer de forma positiva, ou seja, haver uma geração maior que a demanda. Neste caso, conforme ilustra a Figura 29, existe a necessidade de conhecer a demanda do novo estado, a fim de possibilitar o religamento de novas cargas.

De posse do modelamento do SMA, partiu-se para a codificação dentro da plataforma JADE. Esta provê vários métodos implementados para o uso de um SMA, porém é necessário a codificação da linguagem, comportamento e serviços dos agentes.

Como existe a interação entre o SMA e o SEP simulado, os comandos enviados ao agente *MIDDLE* eram interpretados usando a linguagem FIPA e depois enviados ao RTDS por comandos conhecidos.

A comunicação entre os agentes, envolve vários tipos de mensagens, pois cada

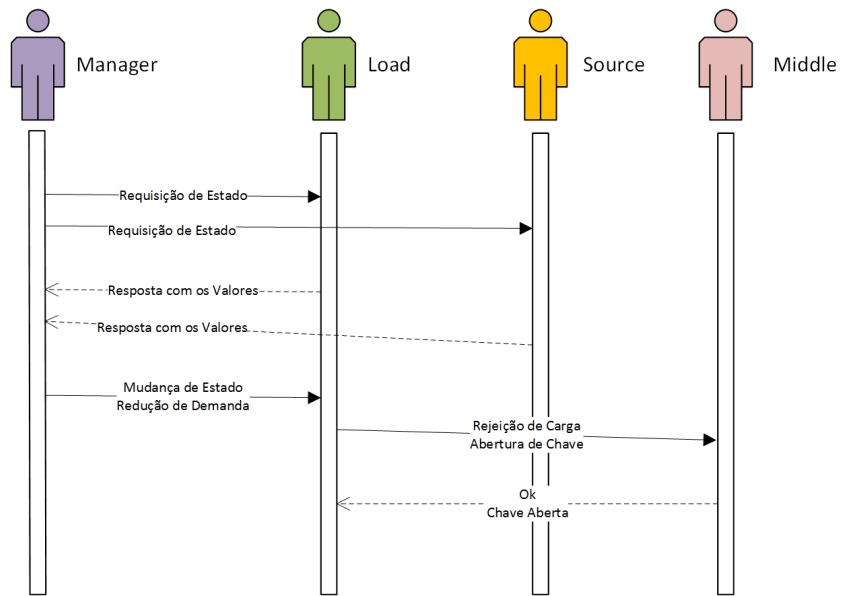


Figura 28 – Interação entre os agentes para rejeição de carga

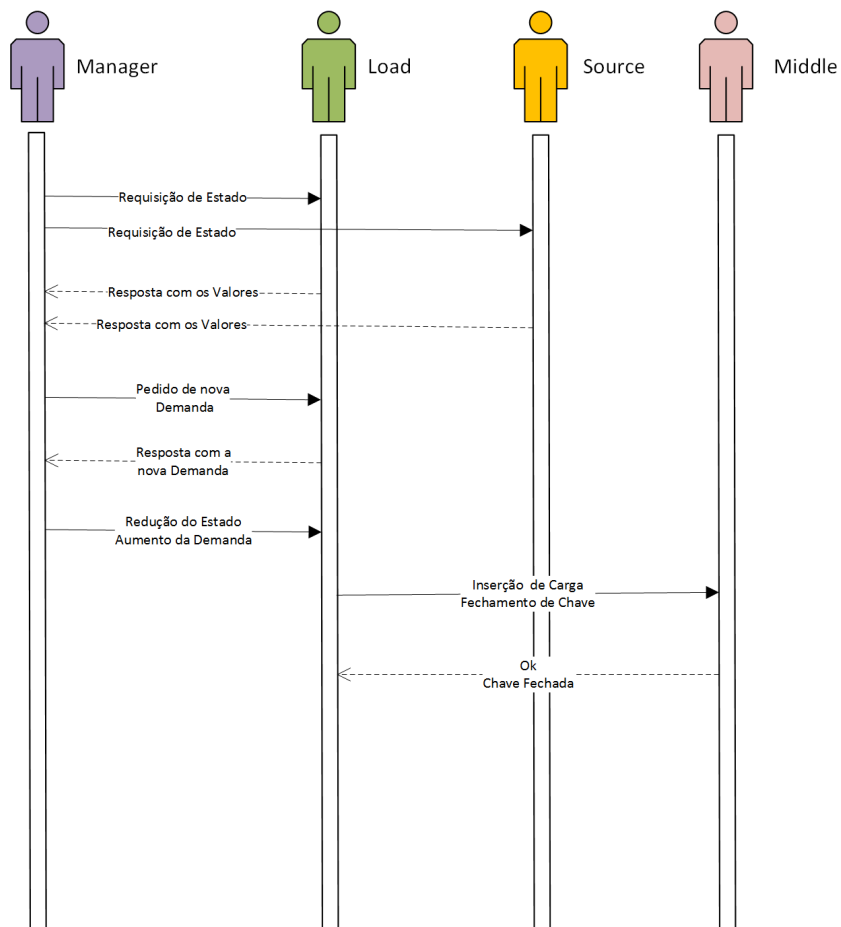


Figura 29 – Interação entre os agentes para restabelecimento de carga

uma tem uma finalidade distinta. Existe um momento em que se faz necessário uma solicitação de informação e em outro momento é uma proposta para alteração de estado. Sendo assim, as mensagens enviadas entre os agentes tinham de ser codificadas de forma diferente, segundo cada propósito, como pode ser visto na listagem 5.2.

```

1 private void messagesend (String dst, String status, String ID){
2 String des = dst;
3 AID r = new AID (des,AID.ISLOCALNAME);
4 //Definicao de uma mensagem do tipo INFORM
5 ACLMessage aclmessage = new ACLMessage(ACLMessage.INFORM);
6 aclmessage.addReceiver(r);
7 aclmessage.setConversationId(status);
8 aclmessage.setContent(ID);
9 send(aclmessage);
10 }
11 private void CFPsend (String dst, String data){
12 String des = dst;
13 AID r = new AID (des,AID.ISLOCALNAME);
14 //Definicao de uma mensagem do tipo CallForPropouse
15 ACLMessage aclmessage = new ACLMessage(ACLMessage.CFP);
16 aclmessage.addReceiver(r);
17 aclmessage.setContent(data);
18 send(aclmessage);
19 }

```

Código 5.2 – Envio de mensagens

O resultado deste modelamento utilizando o JADE, acarretou no desenvolvimento de 12 arquivos contidos em um pacote de software com mais de 2800 linhas de código, dispostos conforme Tabela 4:

Tabela 4 – Descrição dos arquivos desenvolvidos

Arquivo	Linhas de código
GridAgent	131
Load	55
LoadAgent	341
LoadTableModel	120
ManagerAgent	667
MicroGridManageCenter	540
MidAgent	297
RscadCon	247
Source	80
SourceAgent	212
decode	106
server	92

6 Simulações e Resultados

Esse capítulo discute as simulações realizadas envolvendo o sistema multiagente, sistema elétrico e o sistema de comunicação para o gerenciamento de energia em uma microrrede em modo ilhado.

6.1 Introdução

A partir da topologia definida no Capítulo anterior, simulações foram executadas buscando não só o gerenciamento de uma microrrede, mas também o desenvolvimento de um *framework* de tempo real. Tal *framework* também possibilita a troca de dados entre o sistema elétrico e o sistema de informação de forma bidirecional utilizando protocolos de comunicação como o IEC 61850 ou DNP3. Para o caso em estudo neste trabalho, utilizou-se de uma comunicação TCP/IP com mensagens em texto entre o sistema elétrico e o sistema de informação. A seguir serão apresentadas as principais simulações executadas dentro deste *framework* e os resultados obtidos.

6.2 Simulações

A simulação começa com a microrrede no modo conectado à rede, isto é, não há qualquer preocupação dos agentes para satisfazer as cargas dentro da microrrede inteligente (*Smart Microgrid* - SMG). Assim que a SMG é desconectada, ela entra no modo ilhado, e é preciso atender a demanda das cargas utilizando as fontes de geração de energia disponíveis. Para isso, o MAS seguirá o algoritmo descrito na Figura 30 para operar a microrrede no modo ilhado.

Inicia assim, a comunicação entre os agentes para determinar todas as cargas e fontes de alimentação disponíveis. Isso permite que o agente MANAGER defina o estado da SMG para garantir a alimentação de energia às cargas prioritárias. Todos os agentes se inscrevem no DF (*Directory Facilitator*), para que a identificação de todos eles possa ser possível em qualquer estado da SMG. A Figura 31 ilustra o processo.

Uma vez que o agente MIDDLE é conectado ao sistema de energia, ele precisa enviar informações para os outros agentes, LOAD e SOURCE. Ambos recebem um fluxo de informação em uma mensagem *multicast* enviada pelo agente MIDDLE. Essas mensagens do tipo ACL INFORM carregam as informações de todos os dispositivos (LOADs e SOURCEs) que estão presentes na microrrede e que são monitorados por seus respectivos agentes. Cada agente verifica a mensagem, localiza suas respectivas informações e atualiza

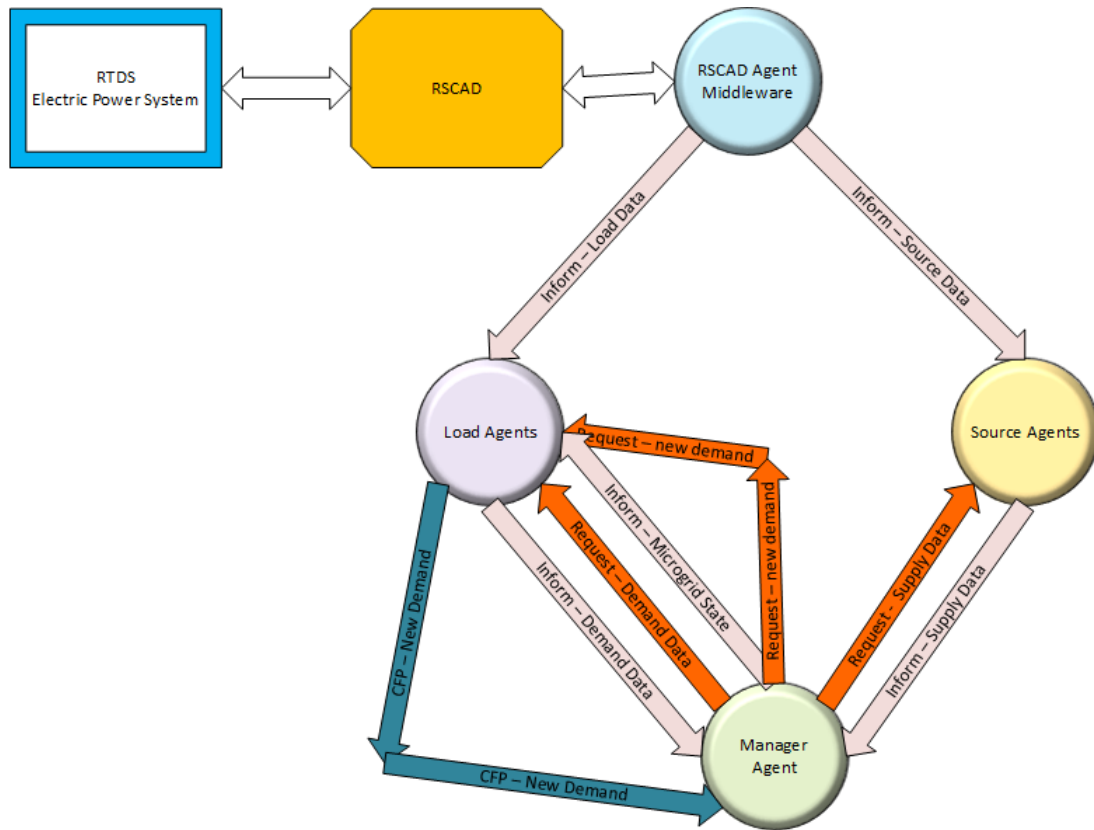


Figura 30 – Flowchart das ações do SMA

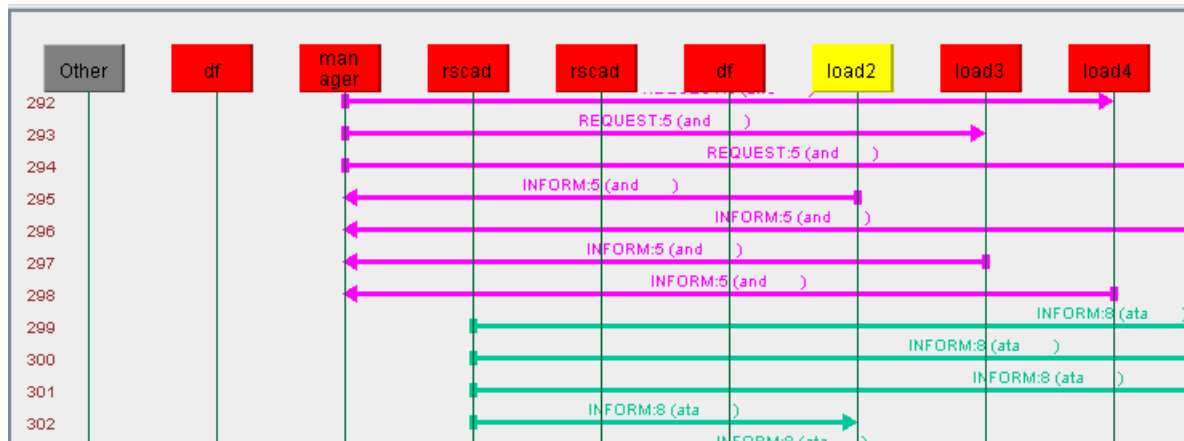


Figura 31 – Comunicação inicial dos agentes e o DF

seu status. Esse procedimento se repete em intervalos de tempo de 5s conforme [98].

De semelhante modo, o agente *MANAGER* faz uma solicitação para ambos os grupos de agentes, *LOAD* e *SOURCE*, usando uma mensagem ACL REQUEST com o "Demand" e "Supply" no campo conversa ID. A periodicidade deste procedimento é de 5s. Quando os agentes *SOURCE* e *LOAD* identificam a solicitação, enviam uma mensagem ACL INFORM com as informações de seu status para o *MANAGER*. Este processa os dados para determinar qual é o estado que a microrrede está naquele momento exato.

Posteriormente, o *MANAGER* informa todos os agentes *LOAD* sobre o status

real de microrrede (emergência, crítica ou sobrevivência) usando uma mensagem ACL INFORM com o ID "estado da microrrede". Assim, cada agente *LOAD* verifica qual é a sua prioridade para se posicionar dentro da microrrede. Quando necessário se desconectar, envia uma mensagem ACL REQUEST ao agente *MIDDLE* para rejeitar a respectiva carga. Este recebe a solicitação e envia ao RSCAD um comando de *script* para abrir a chave correspondente à carga e envia de volta ao agente de carga uma mensagem ACL INFORM com o *status* "OK". Em seguida, o agente *LOAD* muda seu estado para *OFF*. Toda essa ação é executada usando uma conexão TCP/IP entre o Agente *MIDDLE* e o RSCAD. Desta forma, a próxima atualização de todas as cargas disponíveis será diferente, e também o estado da microrrede. A Figura 32 ilustra o processo.

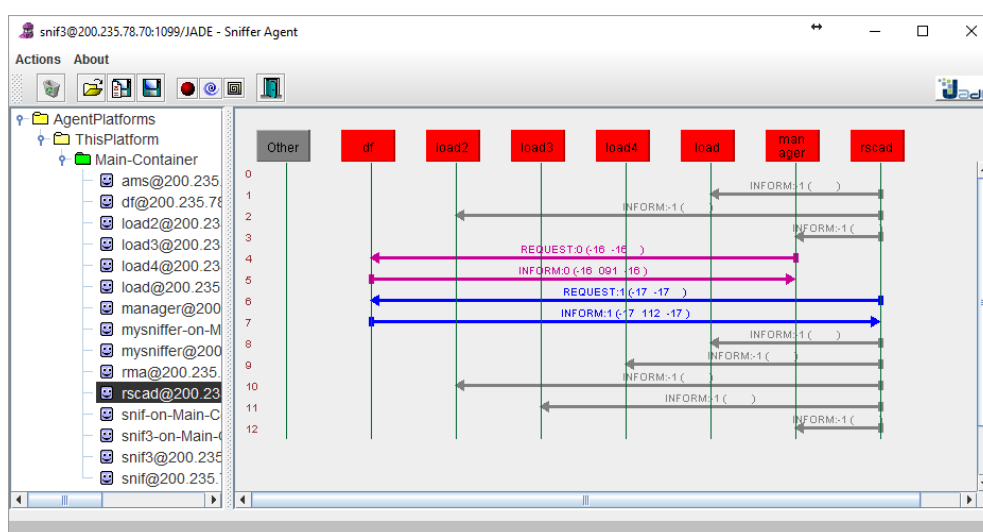


Figura 32 – Troca de Dados para Atualização no SMA

Vale ressaltar neste momento, que devido o SMA não utilizar um protocolo conhecido pelo RTDS, faz-se necessário uma tradução da informação enviada pelo agente *LOAD*. O comando enviado ao agente *MIDDLE* utiliza um protocolo dentro do padrão, porém não reconhecido pelo simulador de SEP. Assim, o agente *MIDDLE*, recebe a solicitação, verifica qual a ação deve ser executada e envia comandos compreensíveis ao RTDS. O mesmo recebe comandos agora compreensíveis e modifica o SEP de acordo com a ação solicitada.

Desta forma tem-se uma nova perspectiva de demanda e geração da microrrede, que permanece a ser monitorada pelo agente *MANAGER*. Quando o balanço entre geração e demanda desta microrrede é alterado, o agente *MANAGER*, que está monitorando, irá enviar outra mensagem para todas as cargas registradas no DF, a fim de que as mesmas executem suas próprias ações com base no estado e prioridade. Isto se repetirá até que toda a fonte de alimentação não possa suprir as cargas conectadas na microrrede no estado de sobrevivência. Quando isso ocorrer, todas as cargas serão desconectadas. Esse ciclo de ações é executado quando a geração interna está reduzindo, porém no caso da geração

umentar a metodologia de comunicação e ações dos agentes mudam.

Se o agente *MANAGER* detectar que a geração é maior do que a demanda real, ele enviará um *ACL REQUEST* para todas as cargas, informando o próximo estado da microrrede e requisitando a demanda das cargas pertencentes àquele estado. Assim, cada agente *LOAD* verifica se o pedido foi feito para ele, validando o novo estado com o qual pertence. Caso essa validação seja positiva, ele envia uma mensagem do *ACL* de *CFP* com a sua demanda; caso contrário ele enviará com o valor zero, conforme Figura 33. Esse comportamento ocorre, já que o agente *MANAGER* não deve possuir todas as informações, dentro do contexto de desenvolvimento baseado em Sistema Multiagentes, pois caso isso ocorra, ter-se-ia um sistema centralizado.

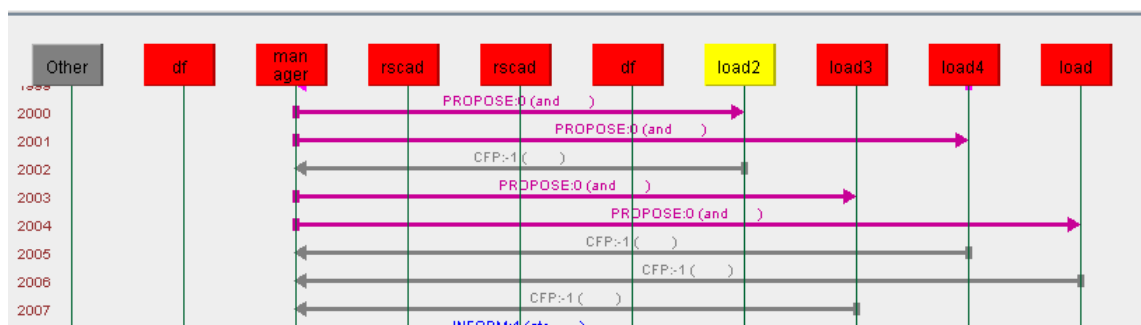


Figura 33 – Nova Requisição de Demanda e Resposta

Com base nessa metodologia, foram obtidos alguns resultados utilizando esse *Framework* os quais serão apresentados e discutidos na próxima seção.

6.3 Resultados

A simulação usou um modelo cliente-servidor, onde é definido um tempo de *polling* para os agentes de *LOAD* e *SOURCE* receberem dados do agente *MIDDLE* do sistema de energia e para os dados de solicitação do agente de gerenciamento para os agentes de *LOAD* e de *SOURCE*. Os dados do perfil de potência estão em intervalos de 15 minutos para gerar uma simulação completa, que é atualizada no RTDS a cada 15 segundos e o tempo de *polling* do agente intermediário e do agente de gerenciamento é 12s. Dessa forma, cada 12s no gráfico da GUI do gerenciador representa 15 minutos de perfil de dados. Utilizou-se 24 horas de perfil de dados de geração de energia e perfil estático de cargas para simular e verificar o comportamento do MAS. Os resultados são mostrados na Figura 34.

Como a SMG inicia no modo conectado, não há problema com a demanda ser maior que a geração interna. Quando a SMG muda para o modo para ilhado, o SMA detecta que a geração real não é capaz de atender a todas as cargas na microrrede, de modo que o *MANAGER* muda o estado MSG para crítico em sua primeira tentativa

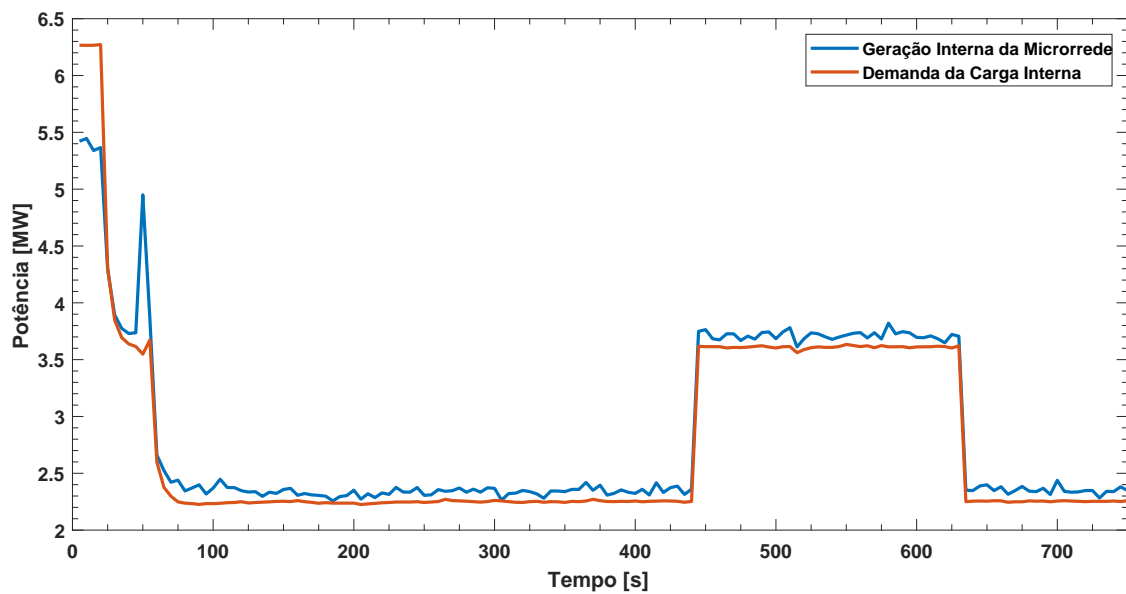


Figura 34 – Perfil de Gerenciamento de Energia

de suprir as cargas. O *MANAGER* tem um novo cenário do SMG com apenas quatro cargas e, neste momento a geração de energia dentro da microrrede é ainda menor do que a necessária para suprir todas as cargas. Novamente, o *MANAGER* muda o estado de SMG, mas agora para o estado de sobrevivência. Neste novo cenário e configuração de prioridade de carga, apenas as duas cargas de alta prioridade podem ser atendidas com a geração de energia interna.

O *MANAGER* ainda procura manter o equilíbrio de geração de energia dentro da SMG, uma vez que o a microrrede ainda está ilhada. Quando o mesmo observa que há mais possibilidade de se ter geração do que a demanda atual, ele pergunta às cargas da próxima prioridade, qual é sua demanda máxima. Este requerimento deve ser feito baseado na demanda máxima da carga, pois se utilizar a atual, a resposta será zero, pois a mesma se encontra desligada. E com base nessa informação, o *MANAGER* nunca iria reduzir a prioridade, mesmo que fosse possível atender todas as cargas, pois dentro da visão do *MANAGER*, não existe mais demanda a ser suprida.

Ainda dentro do contexto de modelamento de sistemas multiagentes, as ações tomadas pelo *MANAGER* devem ser baseadas no ambiente em que ele se encontra. Por isso, não se optou por utilizar o último valor conhecido para tomada de decisão. Isso faz com que ele requisite informações a todo momento para se posicionar frente o objetivo traçado. Além disso, em um ambiente dinâmico tanto de geração como de demanda, esta última, poderia não ser igual ao último valor conhecido, o que levaria o gerente a tomar uma decisão baseada em informações incorretas. Se a potência neste momento for maior do que a demanda real mais a nova demanda da carga de prioridade seguinte, então

o *MANAGER* muda o estado para crítico e as cargas do novo estado são conectadas novamente à SMG conforme Figura 35 que é o detalhe da simulação completa.

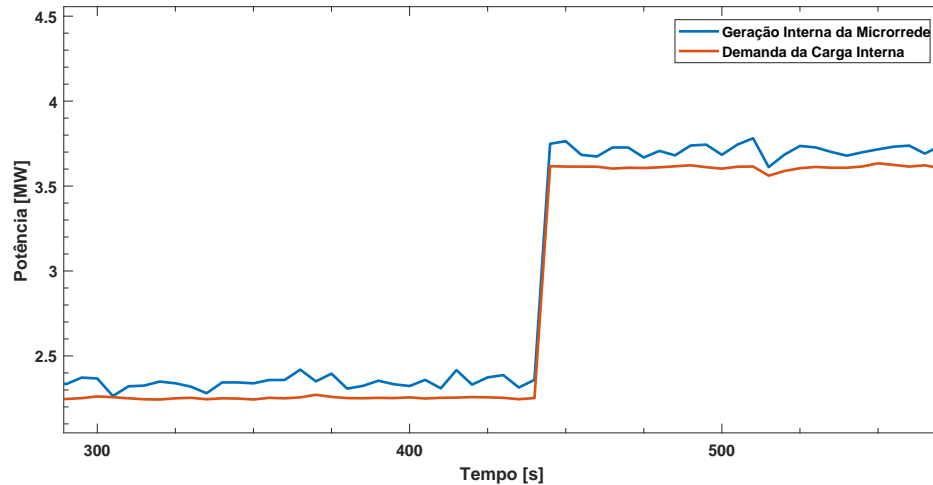


Figura 35 – Gerenciamento de Energia para Aumento de Geração

Quando a geração de energia está diminuindo, como mostrado em detalhe na Figura 36, o *MANAGER* continua a verificação do balanceamento de potência dentro da SMG e no momento em que se torna insuficiente para suprir as cargas, ele altera o estado da SMG novamente para sobrevivência. Assim, somente as cargas de alta prioridade podem permanecer conectadas. No cenário de geração e carga, mesmo quando apenas o gerador a diesel está fornecendo energia, somente as cargas de alta prioridade podem ser conectadas de acordo com suas demandas. No primeiro método, é possível ver um momento em que a demanda é maior do que a oferta. Mesmo ocorrendo em alguns segundos, isso não é desejável, pois pode resultar em problemas de queda de tensão e frequência.

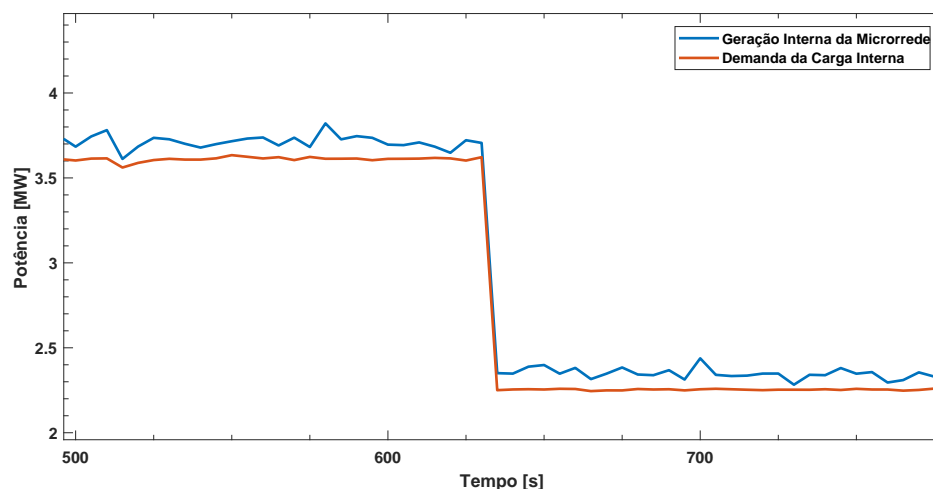


Figura 36 – Gerenciamento de Energia para Redução de Geração

Uma vez que a metodologia aplicada ao MAS se baseia apenas no tempo de *pooling*, mesmo quando o *MANAGER* reconhece que existe uma situação desequilibrada, apenas no próximo *pooling* isto será percebido. Porque a troca de informação somente ocorre durante os períodos predeterminados, mesmo o *MANAGER* obtendo uma visão de desbalanceamento antecipadamente, a informação de mudança de estado só será enviado no tempo de *pooling*.

Portanto, para otimizar a operação e obter um melhor gerenciamento de energia, foi desenvolvida uma solução orientada a eventos com o mecanismo de *pooling*. Assim, quando o *MANAGER* detecta que a energia está desequilibrada, envia a mensagem para alteração de estado e solicita uma atualização.

Ao receber a informação de mudança de estado, os agentes *LOAD*, verificam o novo estado, analisam qual é a prioridade, e assim definem se deve permanecer ou se desconectar da SMG. Quando não houver energia suficiente para suprir as cargas no estado de sobrevivência, todas as cargas serão desconectadas.

À vista disso, o comportamento do agente *MANAGER* teve de mudar, pois ele também não pode se basear somente na potência gerada instantaneamente. Este deve conhecer os tipo de geradores, as suas potências máximas e o modo em que a geração está trabalhando. Tudo isso para poder direcionar o gerador diesel para uma potência adequada à demanda e assim prover energia elétrica a um número maior de cargas. Ao analisar o documento IEC 61850 Part 7-420 que é responsável pela definição das características e informações a serem trocadas pelos sistemas de geração distribuída, observa-se que para o gerador diesel há o modo *load-following*, que é exatamente o comportamento do gerador deste modelo. Isso direciona para o desenvolvimento de uma ontologia baseada na IEC 61850 para um controle melhor e mais preciso da microrrede.

Na Figura 37 é possível observar o comportamento da tensão em alguns barramentos durante o estado ilhado e como o modelo do RTDS responde a situação.

Na Figura 38 têm-se o comportamento da frequência durante o modo ilhado da microrrede, a qual se manteve dentro dos limites.

No Apêndice B é possível ver em detalhe o comportamento da tensão e frequência no ponto de acoplamento, para os eventos de entrada no modo ilhado e retorno ao modo conectado.

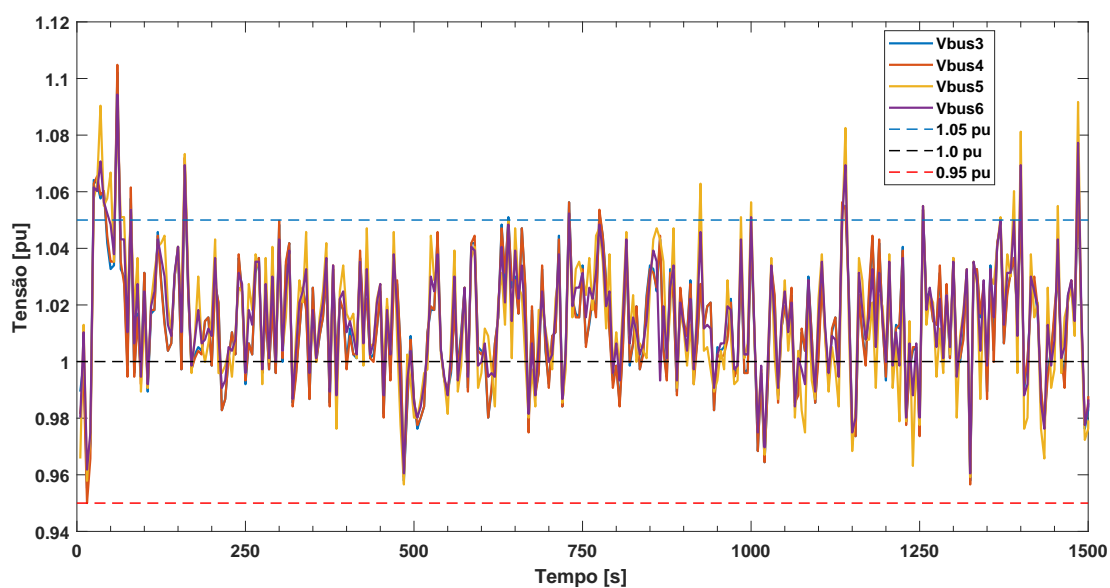


Figura 37 – Perfil da Tensão durante o modo ilhado

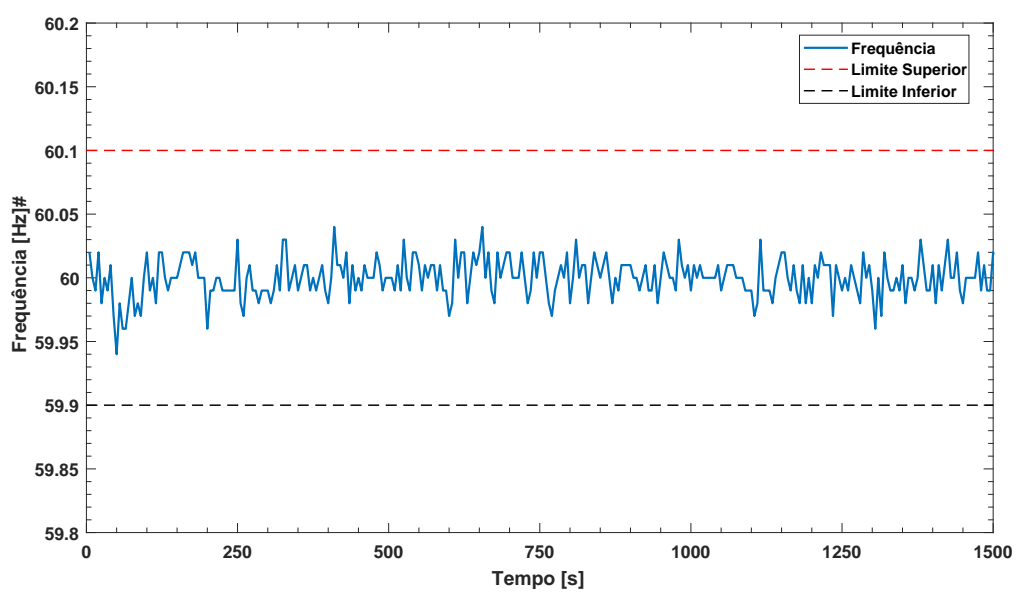


Figura 38 – Frequência durante o modo ilhado

6.4 Sistema Ampliado

Como visto anteriormente, o SMA conseguiu cumprir o seu objetivo através de uma comunicação simples, onde, cada agente toma uma decisão visando manter a microrrede balanceada. Desta forma, decidiu-se ampliar o comportamento dos agentes, para que seja possível verificar a flexibilidade de sua implementação, permitindo que cargas (ou agentes *LOADS*) fossem adicionados durante qualquer estado da microrrede além do retorno ao modo conectado. Vale salientar que não foi implementado nenhum mecanismo para esse desafio, apenas foi adicionado o comportamento ao agentes quando os mesmos recebem a notificação que a microrrede está conectada novamente.

Na Figura 39 tem-se o comportamento dinâmico e flexível possibilitado pelo *framework* utilizando simulação em tempo real e também SMA. Ainda em modo conectado, cargas são inseridas sem a necessidade de notificação direta a um sistema central. Essa informação está disponível no DF do SMA.

Quando o agente *LOAD* ou carga entra na microrrede, o estado inicial é desconectado, em seguida o *MANAGER* detecta que existe mais membros na microrrede através da sua consulta ao DF, e envia a notificação do modo e estado atual da microrrede. Com base nessa informação, este novo agente toma a decisão apropriada ao momento e a sua prioridade.

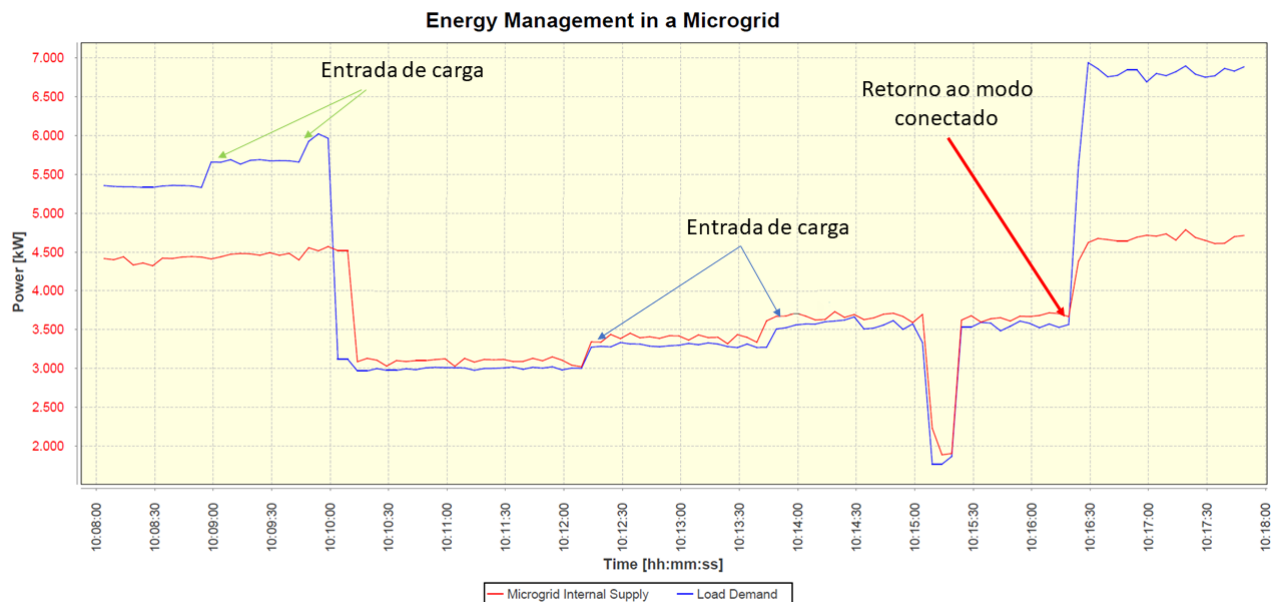


Figura 39 – Inserção de volta ao modo conectado

Esse mesmo comportamento ocorre quando a microrrede está em modo ilhado, porém dependendo do estado, somente a carga com a prioridade adequada ao momento

será conectada, como pode ser visto na Figura 40, que no caso demonstrado pode ser prioridade 2 e 3 (Crítico e Sobrevivência). Percebe-se que devido a uma flutuação na geração (no caso originada pelo gerado fotovoltaico) a microrrede entra em modo de sobrevivência, porém ao restabelecer a potência necessária, torna ao estado crítico.

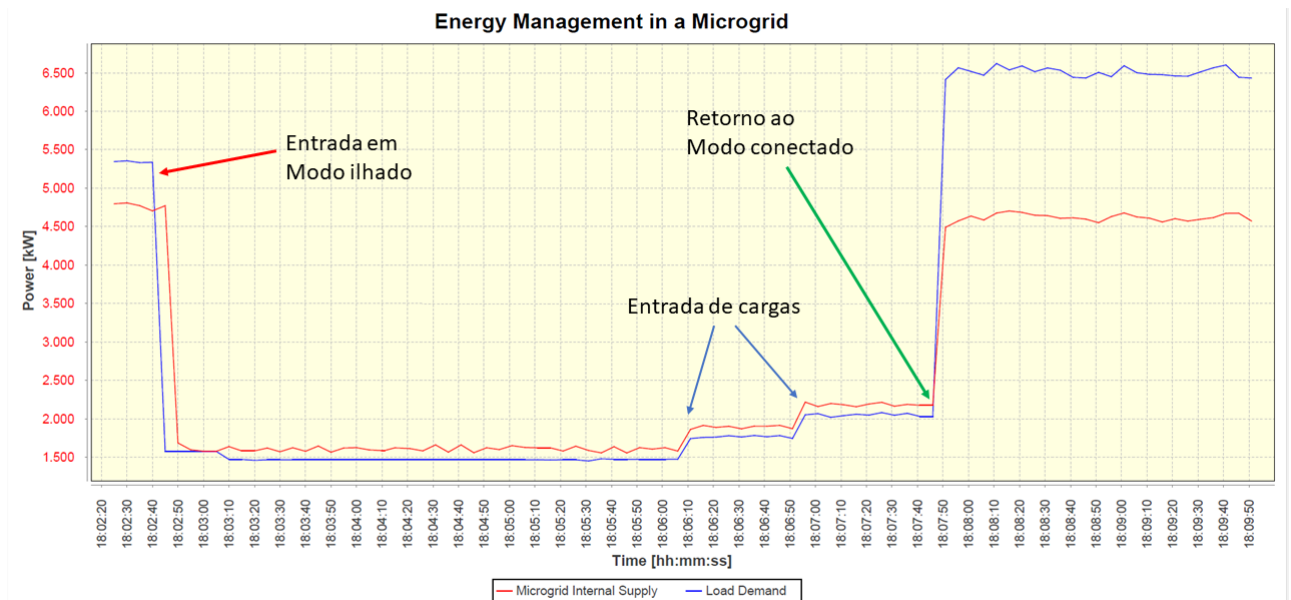


Figura 40 – Entrada de cargas na microrrede

6.5 Discussão dos Resultados

Uma vez que a metodologia aplicada ao SMA se baseia em tempo de *pooling*, observa-se que, mesmo quando o *MANAGER* reconhece que existe uma situação desequilibrada, apenas no próximo *pooling* isto será percebido pelas cargas. Portanto, para otimizar a operação e obter um melhor gerenciamento de energia, foi desenvolvida uma solução orientada a eventos com o mecanismo de *pooling*. Assim, quando o *MANAGER* detecta que a energia está desequilibrada, envia a mensagem para a alteração de estado e solicita uma atualização.

Desta forma, o agente *MANAGER* apresenta um comportamento proativo, pois assim que detecta o desbalanceamento, prontamente altera o estado da microrrede e solicita aos demais agentes envolvidos a se posicionarem frente a esse novo cenário. Obtém-se então uma resposta imediata ao desbalanceamento. Entretanto, ainda dependente do tempo de *pooling* ou tempo de leitura da informação para se posicionar. Para este projeto este tempo foi de 5s. Esse valor se mostrou satisfatório devido ao fato de não ter-se encontrado, em nenhum momento, uma demanda maior que a geração.

Durante a composição da comunicação entre os agentes, notou-se uma dificuldade de desenvolvimento das ações devido à falta de um protocolo para os dados a serem enviados. Algumas informações tiveram de ser inseridas na concepção desta comunicação, para que fosse possível o completo entendimento da situação pelos agentes. Isso ocorreu principalmente quando havia a necessidade de alterar o estado da microrrede quando a geração estava maior que a demanda atual. Inicialmente os dados enviados eram somente de consumo instantâneo. Entretanto foi necessário inserir o consumo máximo. Assim, essa informação teve de ser adicionada ao objeto carga com o propósito de viabilizar ao agente *MANAGER* uma visão completa do ambiente ao que pertence.

Em outras simulações, foi observado o comportamento do gerador diesel frente à demanda das cargas conectadas à microrrede. Quando a demanda reduziu, devido à rejeição de cargas, o mesmo reduziu a geração automaticamente. Isso acarretou um problema para o modelo em questão, a fim de alterar o estado da microrrede. Mesmo com a geração solar chegando ao seu pico máximo, pelo cenário que os agentes enxergavam, não era possível alterar o estado da microrrede, já que o gerador diesel não estava gerando potência suficiente para mudança de estado.

Através da utilização do RTDS também é possível analisar os transitórios de entrada e saída de uma microrrede conforme pode ser visto no Anexo B. Esse não é o foco deste trabalho, mas o *framework* desenvolvido pelo mesmo, possibilita tal análise abrindo novas fretes de estudo para trabalhos futuros.

7 Desempenho de Rede de Dados

7.1 Considerações Iniciais

Esse capítulo discute o impacto da rede de dados no desempenho do gerenciamento de energia de uma microrrede. Dentro desse novo contexto, onde TIC é parte fundamental, variações de desempenho podem acarretar em uma visualização errada do real cenário do SEP e assim levar o SGE/SMA a tomar decisões erradas. Além disso, por ser um sistema bidirecional, ou seja, a informação originada do SEP é processada pelo SGE e depois existe a possibilidade deste enviar informações de volta ao SEP, pode ocorrer da informação de volta não chegar, ou chegar em um tempo posterior.

7.2 Introdução

Na Tabela 1 proposta pela literatura, é possível verificar alguns requerimentos de redes de comunicação para seis aplicações de REI. A proposta deste capítulo, é subdividir a aplicação de "Gerenciamento de Redes de Distribuição" em dois subitens, sendo o primeiro para o monitoramento da mesma e o segundo subitem para o gerenciamento com fluxo bidirecional.

Para avaliar o impacto da qualidade da comunicação de dados ao sistema de gerenciamento de energia, inseriu-se o emulador de WAN (WANem) entre o sistemas SCADA (RSCAD) e o sistema multiagentes. Através do uso do WANem, foi inserido valores de *delay*, *jitter*, reordenamento de pacotes, percentual de perda e corrupção de pacotes para que fosse possível variar alguns requisitos de rede de forma transparente, sem inserir roteamento ou outra forma de encaminhamento de pacotes que poderiam alterar o tempo de tráfego bidirecional.

7.3 Testes de Desempenho

O primeiro "setup" para análise do desempenho da rede de dados pode ser visualizado na Figura 41 onde WANem é inserido entre o SEP e o sistema SCADA. Para a leitura de pacotes SV foi utilizado o programa SVScout da OMICRON, em uma versão de teste, limitando uma análise mais profunda dos dados recebidos. Para o DNP foi usado o supervisor Elipse. Isso permite avaliar um primeiro nível de monitoramento através de dois protocolos regularmente empregados para este fim e de que forma os requisitos de rede impactam nessa etapa.

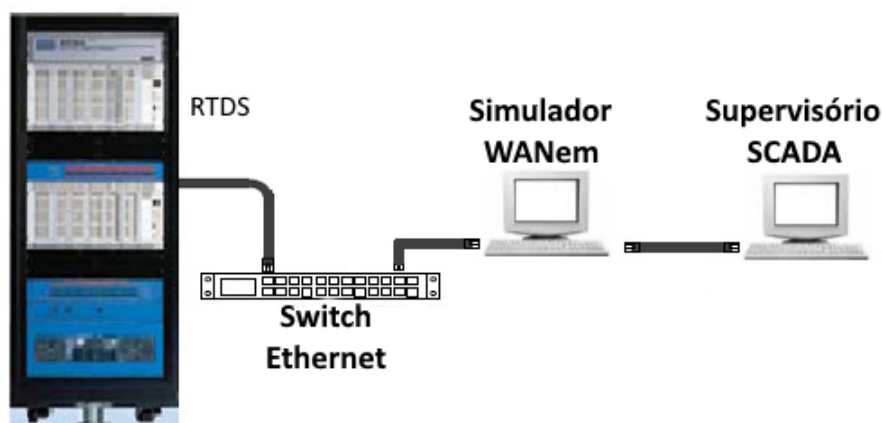


Figura 41 – Setup para verificação do desempenho de rede

Os testes foram executados alterando os parâmetros de forma individual, ou seja, primeiro avaliou-se o *delay* e o *jitter* (variação do *delay*), depois a corrupção, desordenamento, perda e limite de largura de banda.

7.3.1 IEC61850 - SV (*Sampled Values*)

Conforme descrito no Capítulo 3, o pacote de protocolos IEC 61850, entre eles o *Sampled Values-SV*, faz uso do Ethernet para envio e recebimentos de informações. Ao fazer uso da camada 2 tem-se uma maior susceptibilidade às intempéries do sistema de comunicação de dados, conforme pode ser visto nas (Figuras 42-47).

Qualquer variação no fluxo, seja por reordenamento, perda ou mesmo corrupção, acarreta na degradação da informação transportada. Por ser um protocolo de alta amostragem do sinal, demanda uma largura de banda maior que 2 Mbps, pois conforme é visto na Figura 47 a informação obtida é bem diferente da esperada (Figura 42).

7.3.2 DNP3

No caso do protocolo DNP3 (Figuras 48-53), por ser um protocolo que opera sobre o TCP/IP, o torna mais resistente a alguns problemas de desempenho do sistema de comunicação de dados. Os parâmetros *delay*, *jitter*, reordenamento de pacotes afetam de forma relativamente branda, a ponto de possibilitar a visualização de informações importantes transportadas por este protocolo.

Porém, tanto a corrupção e perda de dados resultam na perda de informações, as quais, mesmo com o mecanismo de controle do TCP, não são capazes de reproduzir o cenário transportado em seus pacotes. Outro fator preponderante no uso do mesmo é a baixa largura de banda necessária para que a maior parte da informação possa chegar ao seu destino (SCADA).

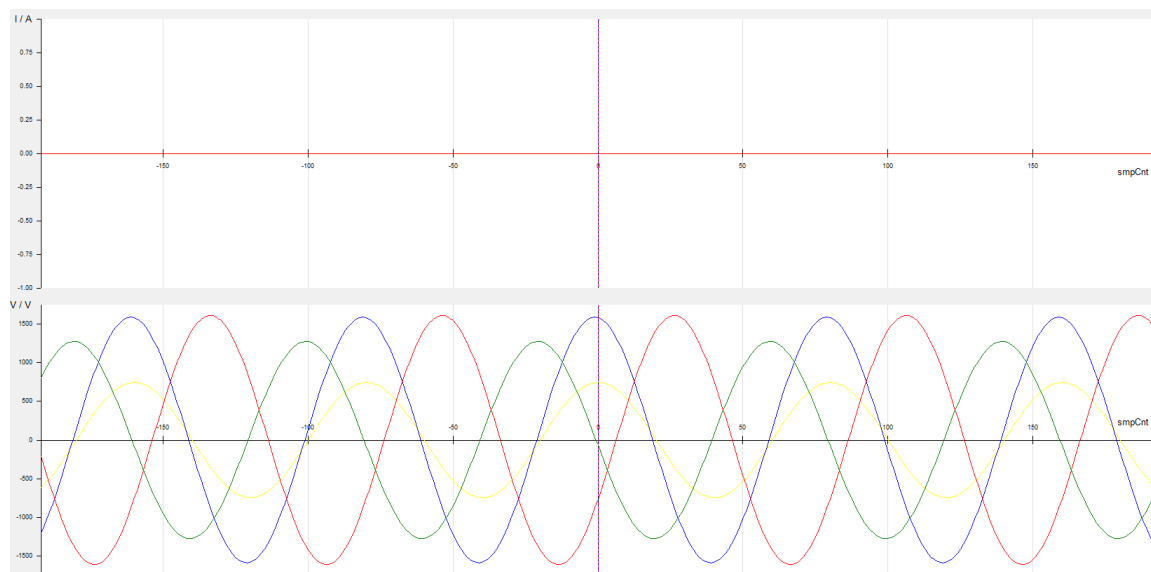


Figura 42 – Caso Base

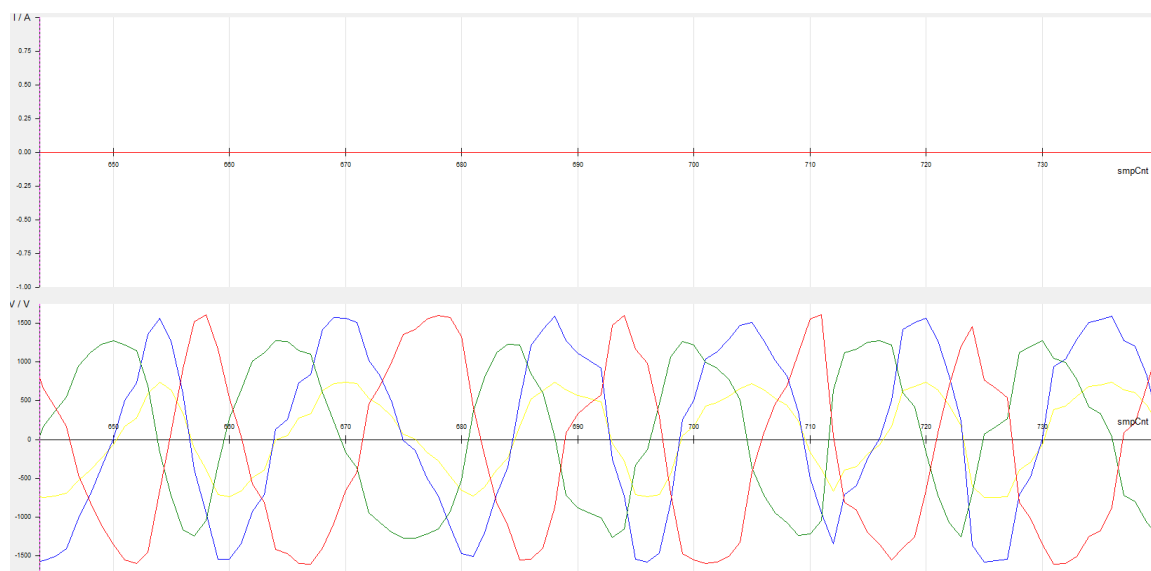


Figura 43 – Perda de 80%

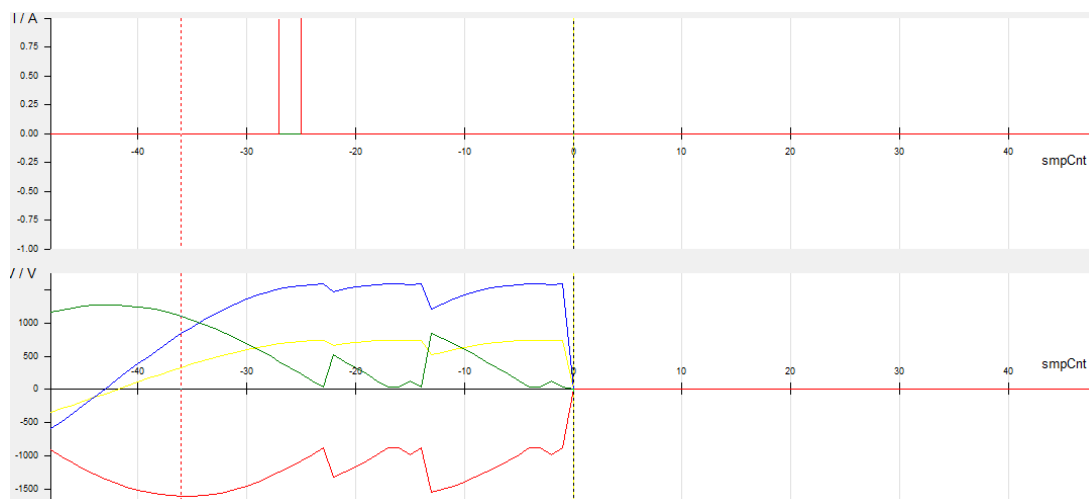


Figura 44 – Corrupção de 1%

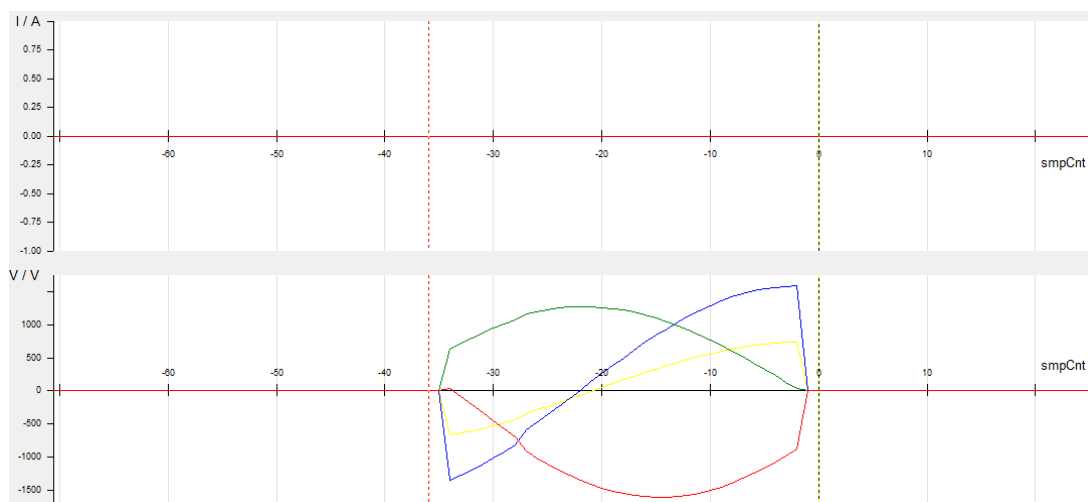


Figura 45 – Reordenamento de 3%

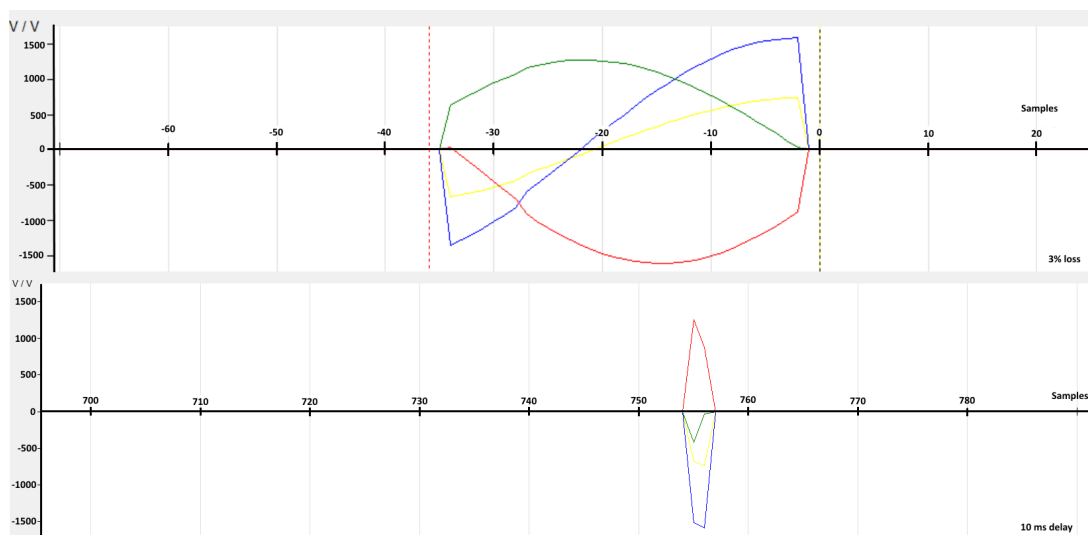


Figura 46 – Delay de 10ms

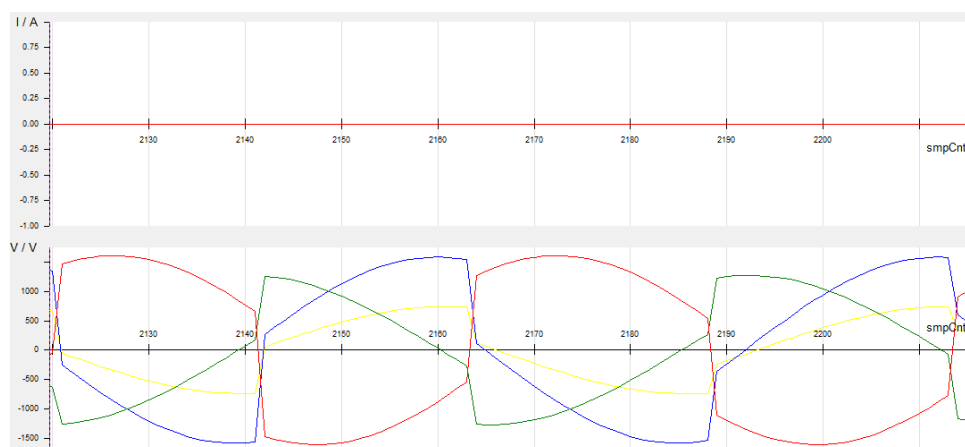


Figura 47 – Largura de banda de 3Mbps

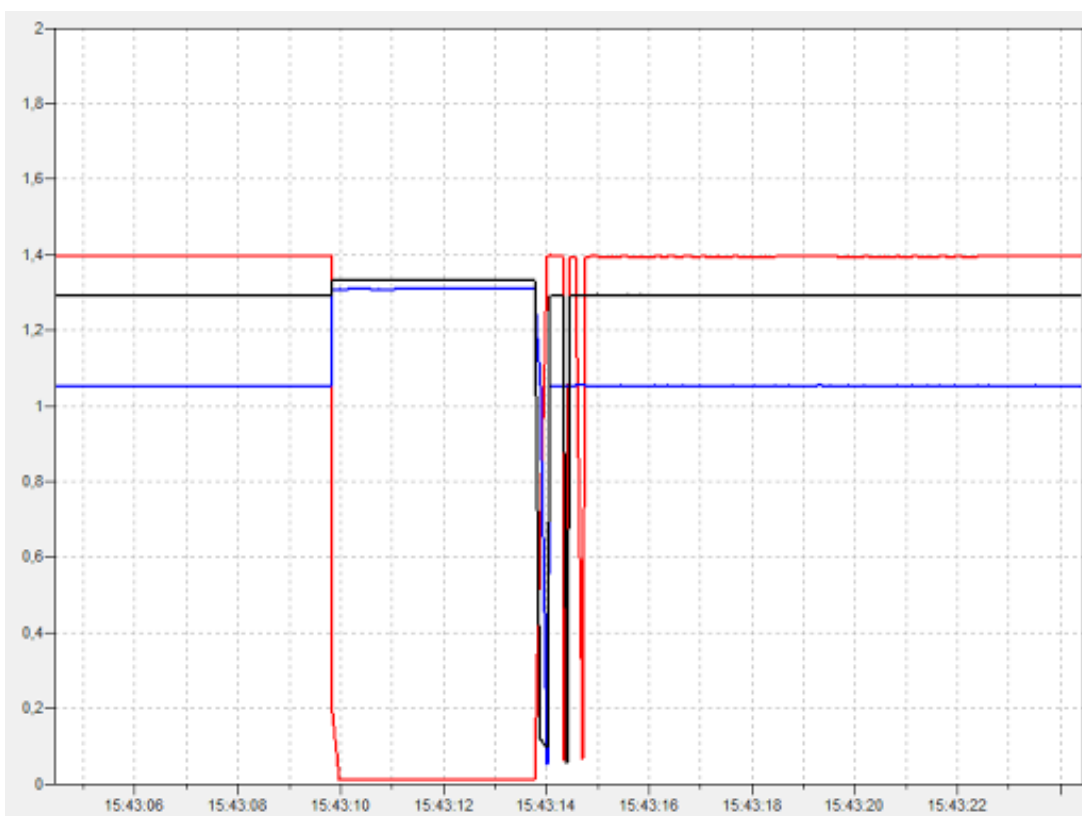


Figura 48 – Caso Base

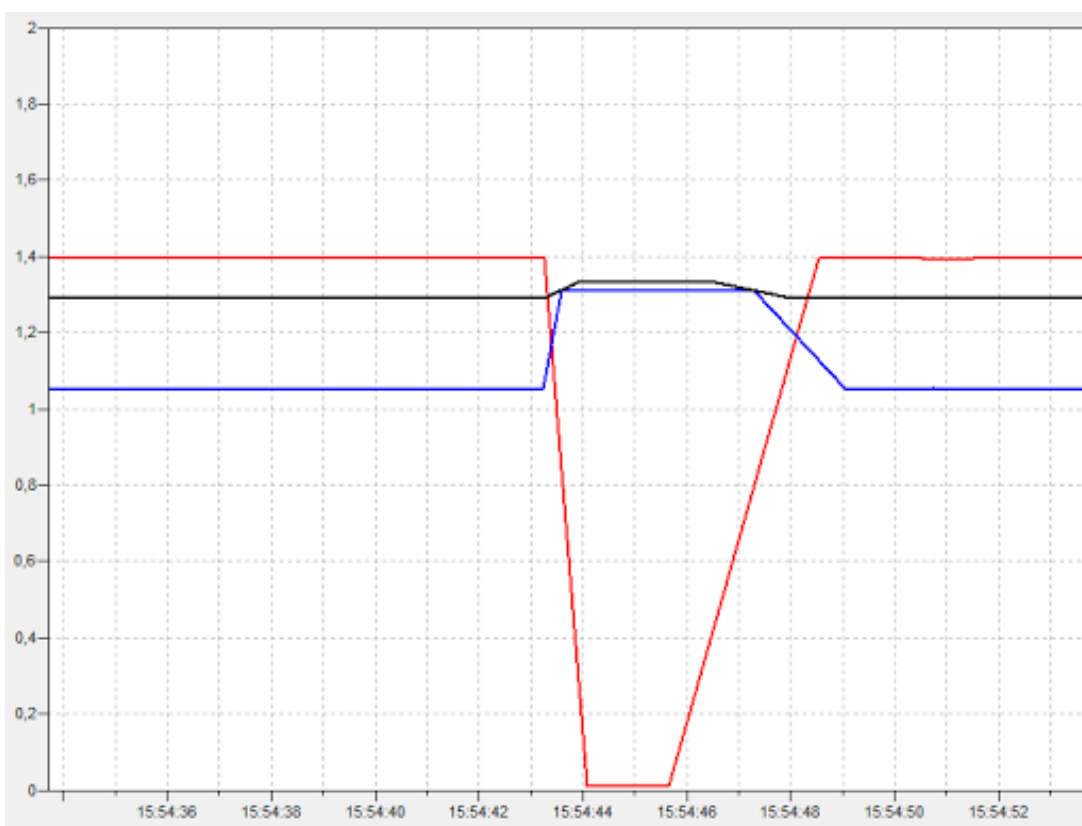


Figura 49 – Delay de 10ms e Jitter de 500ms

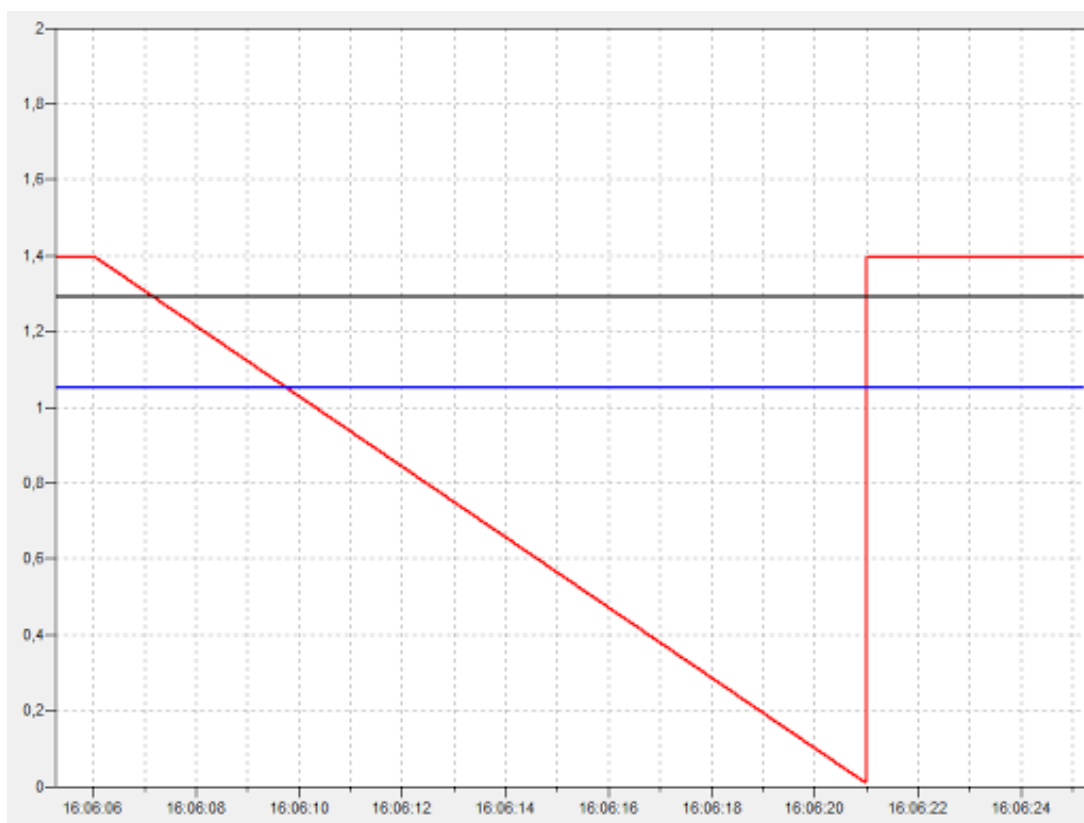


Figura 50 – Corrupção de 40%

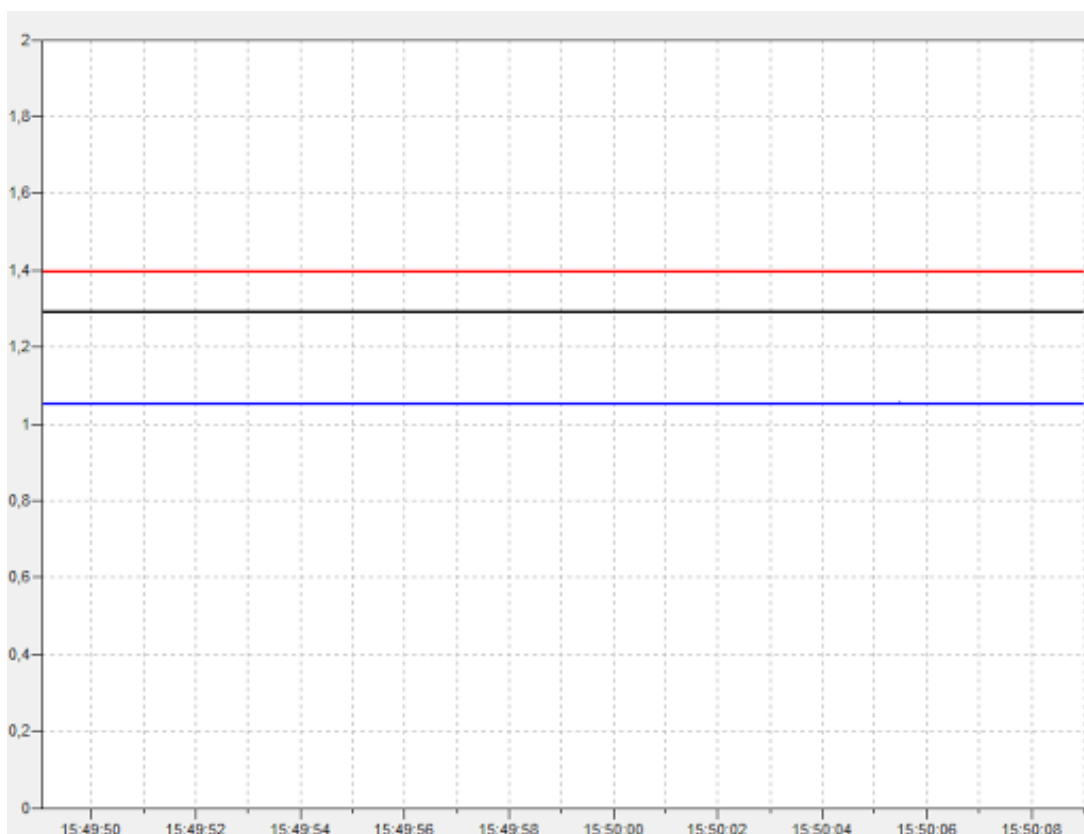


Figura 51 – Perda de 40%

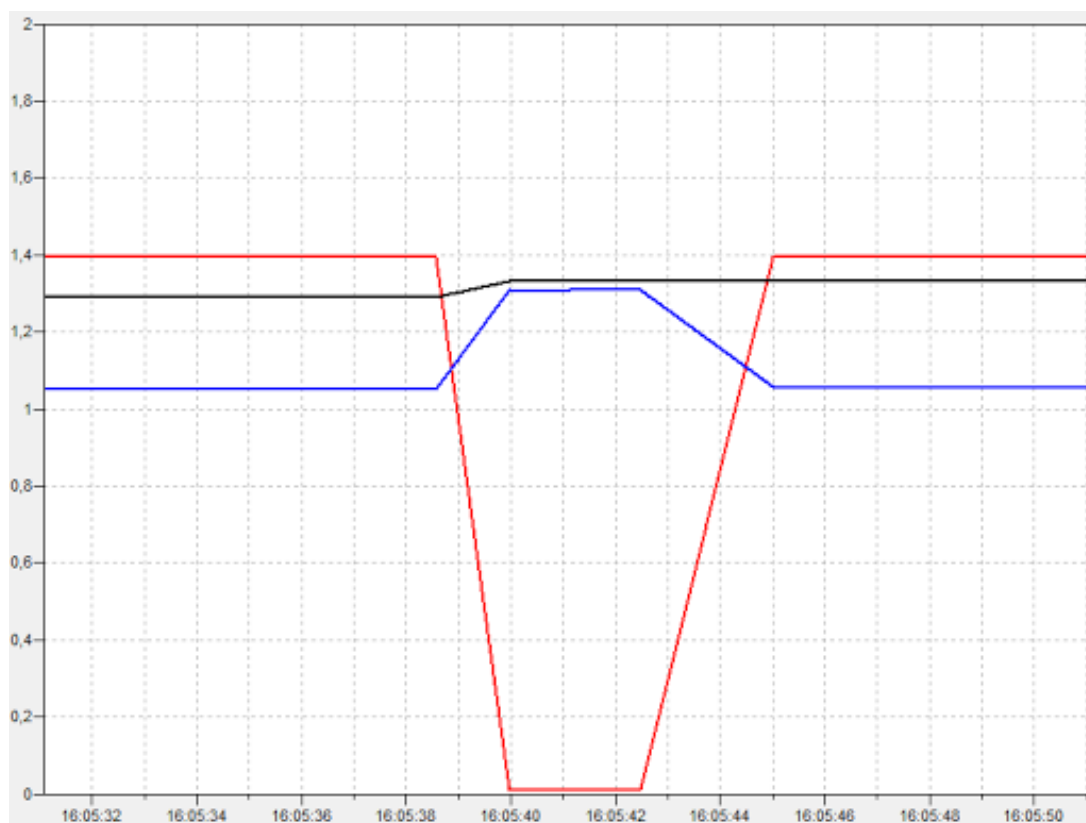


Figura 52 – Reordenamento de 20%

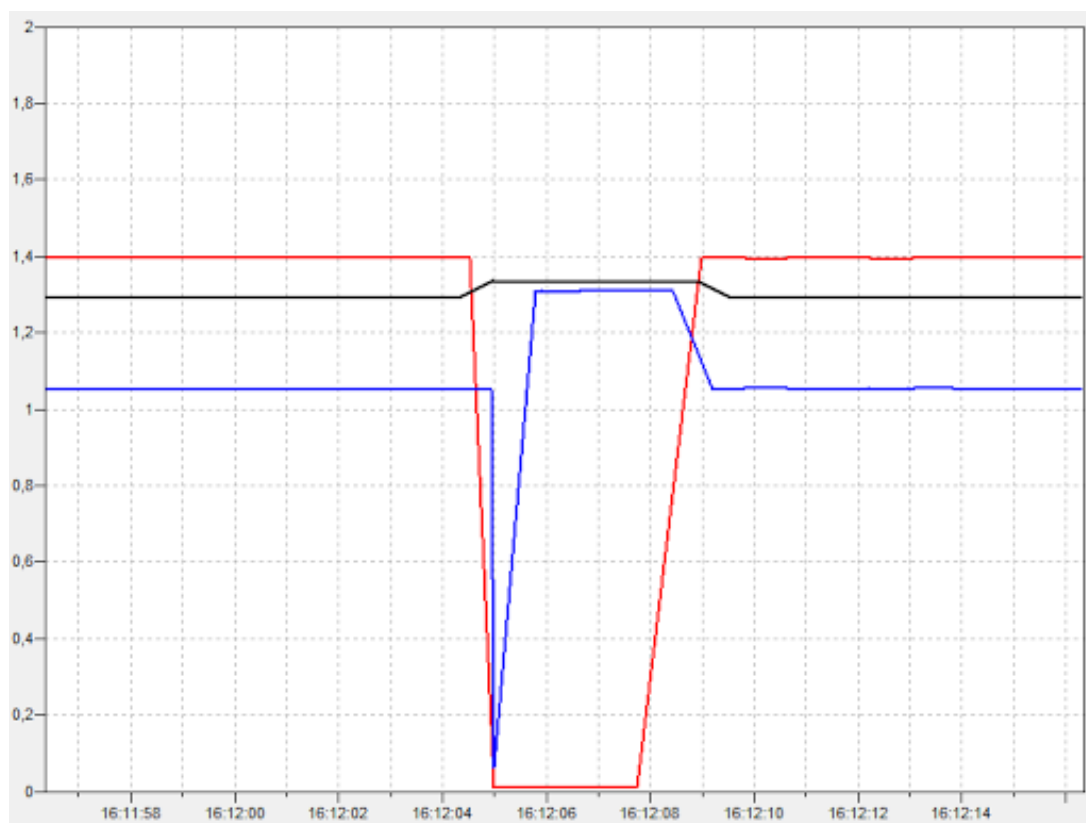


Figura 53 – Largura de banda de 256kbps

7.3.3 Comunicação Bidirecional

Dentro do *framework* desenvolvido nesta tese, executou-se os mesmos testes, porém, o contexto é diferente, pois a informação deve sair da SMG, chegar ao SMA e depois retornar ao SEP em forma de comando. Assim, ajustou-se a topologia anterior para refletir as variações de desempenho de rede entre o SGE e o SCADA. Essa topologia pode ser vista na Figura 54

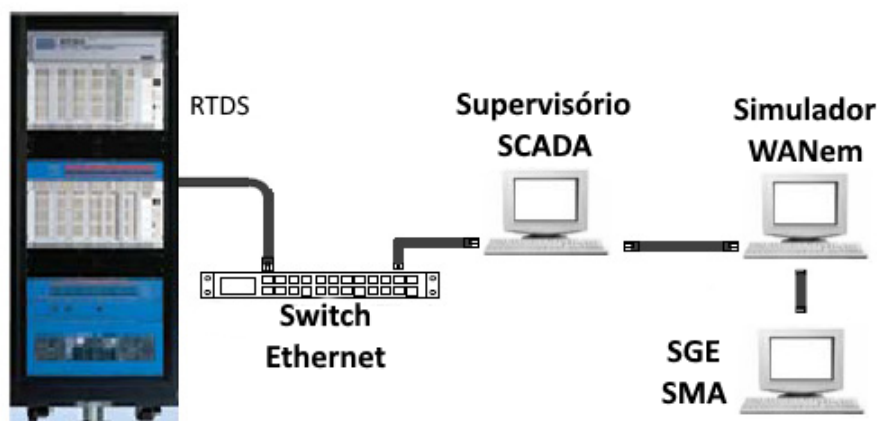


Figura 54 – Topologia de teste de desempenho de rede de comunicação bidirecional

A sequência de testes individuais foi a mesma utilizada para a comunicação unidirecional e dessa forma, obteve-se os seguintes resultados no SMA: como a informação chegou a ele e de que forma ele estava visualizando a situação do SEP para assim se orientar e tomar as ações necessárias.

Como é possível observar nas Figuras 55-58, a informação do SEP é fundamental para que o SMA tome a ação necessária e assim definir qual o estado que a microrrede deve operar. Também é possível verificar o impacto que os requisitos de rede possuem sobre o SGE, principalmente quanto à perda e corrupção de pacotes, fazendo com que a imagem formada pela informação recebida seja totalmente incompatível com a real situação da microrrede.

Nas Figuras 59-62 pode-se verificar o impacto no SEP. Na Figura 62 tem-se um delay no chaveamento de estado devido à perda de pacotes em virtude da corrupção dos mesmos. O estado só é alterado quando todas as informações necessárias chegam ao SGE e este envia os comandos ao SEP. Na Figura 61 a situação é tão grave que o SGE acredita que solicitou a mudança de estado, porém essa informação nunca chegou aos agentes responsáveis por essa ação.

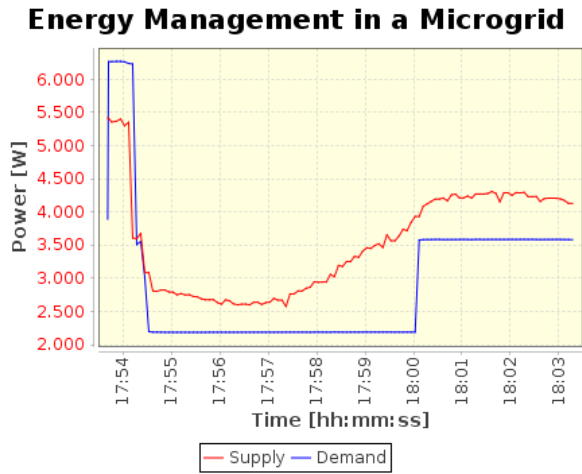


Figura 55 – Delay de 500ms e jitter de 100ms

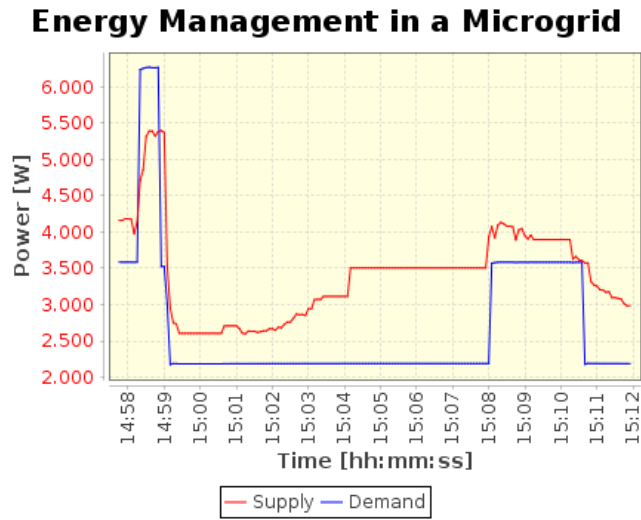


Figura 56 – Corrupção de 50%

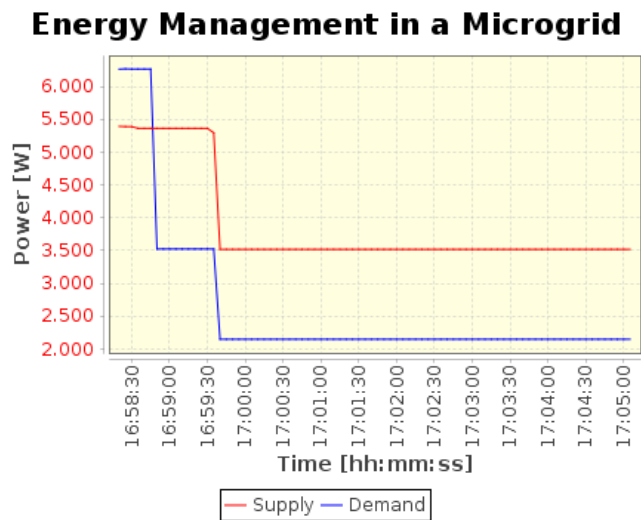


Figura 57 – Perda=60%

Energy Management in a Microgrid

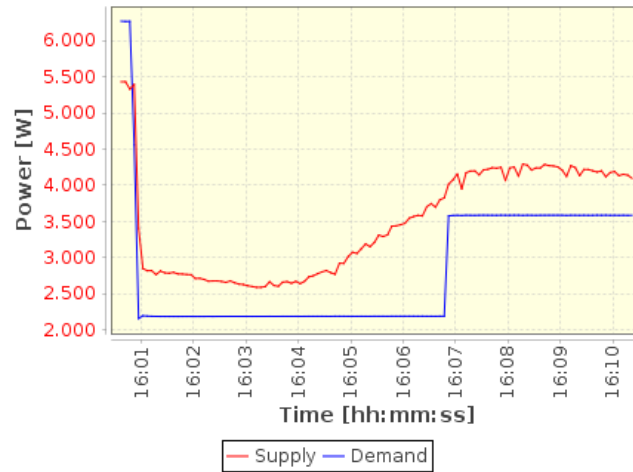


Figura 58 – Largura de Banda de 64kbps

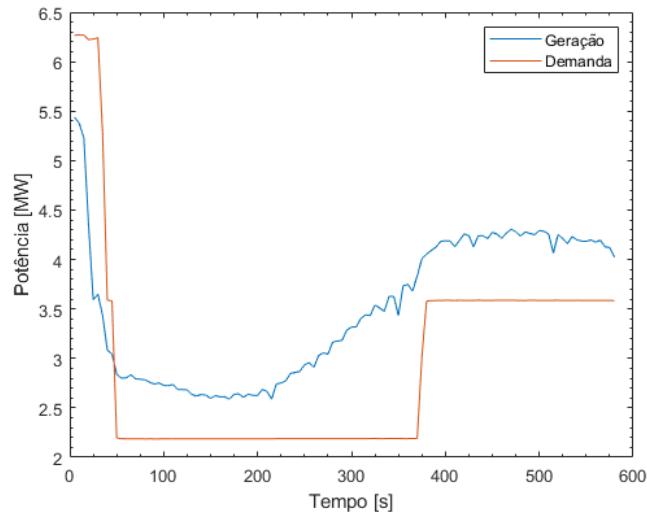


Figura 59 – Delay de 500ms e jitter de 100ms

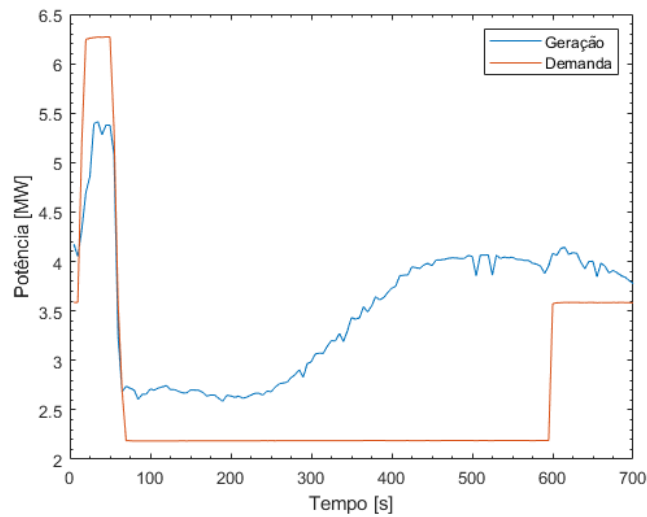


Figura 60 – Corrupção de 50%

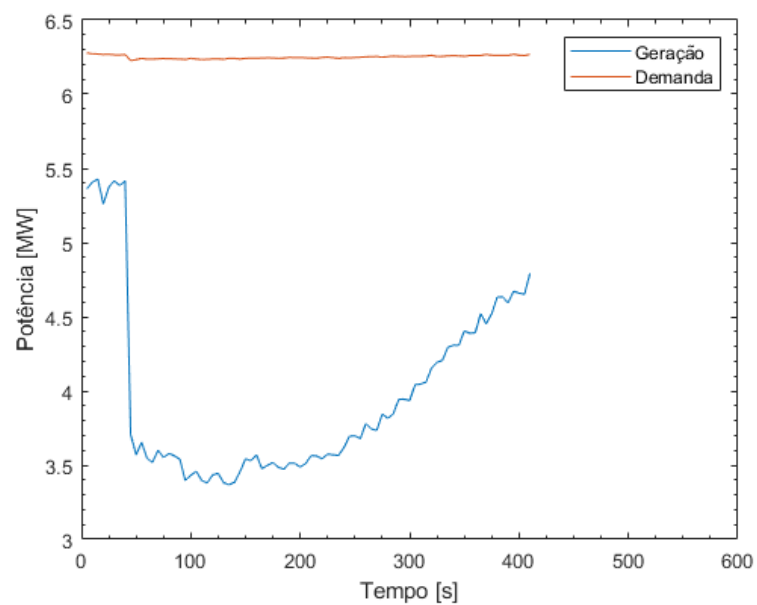


Figura 61 – Perda=60%

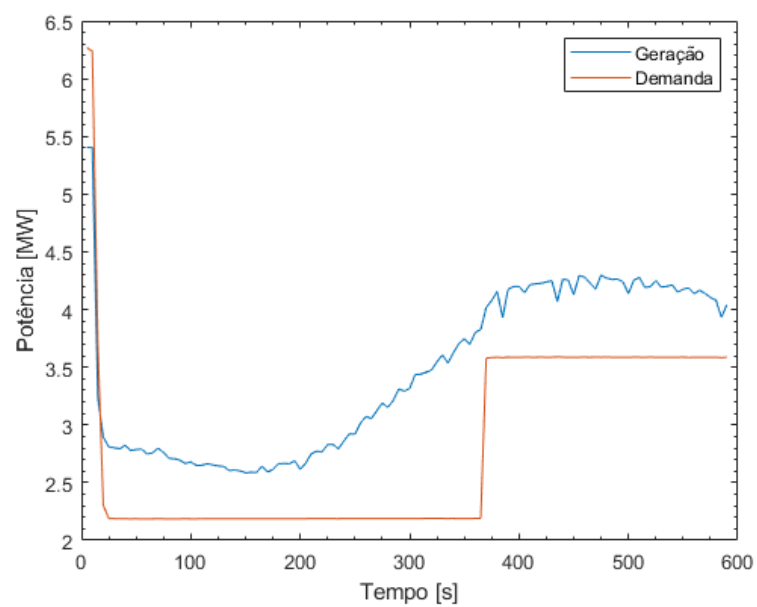


Figura 62 – Largura de Banda de 64kbps

7.4 Discussão dos Resultados

Como visto na Tabela 1, a literatura define os requisitos da comunicação de dados aplicada às REIs e divide em categorias baseadas no tipo de aplicação. Tem-se parâmetros como, latência, confiabilidade, largura de banda e segurança, que são definidas para as 6 (seis) tipos de aplicações relacionadas: AMI, Resposta à Demanda, Wide Area Situational Awareness, Transporte de Energia e Gerenciamento da Rede de Distribuição.

Neste contexto, é possível enquadrar o trabalho como uma aplicação de gerenciamento de rede de distribuição, devido as principais características das microrredes, conforme discutidas no Capítulo 2. Deste modo, deve-se segmentar novamente esta aplicação em dois grupos: um de monitoramento e outro de sistema de gerenciamento. O primeiro é baseado em um fluxo de dados unidirecional e utilizou os protocolos DNP3 e IEC 61850. O segundo foi baseado em um fluxo bidirecional utilizando um protocolo próprio para envio de dados e comandos. As características do protocolo próprio utilizado nos testes de fluxo bidirecional são bem próximas ao do DNP3. Por utilizar pacotes com pouca informação, utiliza o protocolo TCP para controle de dados e trabalha no modelo Mestre-Escravo (*Master-Slave*).

Os resultados das simulações foram obtidos em sistemas supervisórios e sistema computacionais de gerenciamento de energia. Na primeira parte, cerca do fluxo unidirecional, foi analisado o sinal visualizado pela aplicação devido a uma limitação das ferramentas disponíveis (Eclipse (SCADA) e SV Scout). Já para o caso do fluxo bidirecional, além das informações recebidas, foi avaliado também a diferença de cenário entre o SGE e a microrrede e entre os comandos enviados e recebidos. Desta forma, os impactos de cada perturbação na rede de comunicação de dados foram classificados em três formas

- Aceitável: A distorção não compromete o sinal/informação.
- Prejudicial: A distorção compromete o sinal, porém a onda e a informação ainda estão evidentes.
- Catastrófico: A forma de onda ou informação está extremamente corrompida.

É possível observar que o perfil de desempenho, mesmo em aplicações bidirecionais, seguem o padrão de aplicações de monitoramento utilizando o protocolo DNP3. Isso está mais relacionado às características do protocolo utilizado, o qual possui mecanismos para tratamento de erros, reordenamento e perda de pacotes. Tais mecanismos demonstraram que são suficientes para aplicações de monitoramento e gerenciamento de energia em microrredes.

Mesmo ao avaliar os dois cenários, o real do sistema elétrico (Figuras 59, 60, 61 e 62) e o reconhecido pelo SMA (Figuras 55, 56, 57 e 58), o impacto sobre o sistema real só

é observado a partir dos mesmos parâmetros para monitoramento utilizando o protocolo DNP3.

Como resultado desses vários testes alterando os parâmetros de desempenho de rede, pode-se resumir na Tabela 5.

Tabela 5 – Requisitos de Rede para Aplicações SCADA e SGE

		DNP3	SV	SGE
Perda de Pacote	20%	Prejudicial	Aceitável	Prejudicial
	50%	Catastrófico	Prejudicial	Catastrófico
	80%		Catastrófico	Catastrófico
Reordenamento de Pacotes	3%	Aceitável	Catastrófico	Aceitável
	20%	Aceitável		Aceitável
	80%	Aceitável		Aceitável
Corrupção de Dados	1%	Aceitável	Catastrófico	Aceitável
	20%	Prejudicial		Prejudicial
	40%	Catastrófico		Catastrófico
Jitter	1 ms	Aceitável	Catastrófico	Aceitável
	100 ms	Aceitável		Prejudicial
	500 ms	Prejudicial		Prejudicial
Largura de Banda	3 Mbps	Aceitável	Prejudicial	Aceitável
	256 kbps	Prejudicial	Catastrófico	Aceitável
	128 kbps	Catastrófico		Aceitável

8 Conclusão

Em um sistema elétrico inteligente (*Smart*) ou mais inteligente(*Smarter*), uma nova filosofia de trabalho e pesquisa está sendo criada. Está se deixando de ver o sistema elétrico como um único ator e passando a vê-lo como uma parte do todo. As soluções que se buscam para as redes elétricas inteligentes não serão alcançadas olhando apenas o SEP em si, mas também como ele interage com os outros componentes deste novo cenário, cheio de desafios.

Mudar o modo como se buscam as soluções dentro deste contexto é fundamental, para que estas possam fazer parte desse universo novo, pois além de possuírem aplicabilidade, devem ser factíveis de serem implementadas. Para alcançar este objetivo, a integração e interação entre os três sistemas deve ser observada e inserida quando possível nos trabalhos de pesquisa. Assim é possível avaliar em uma maior profundidade necessidades e modelamento da solução dentro desse novo paradigma.

Dentro desta visão, este trabalho apresentou um *framework* para o gerenciamento de energia de uma microrrede inteligente em modo ilhado. A metodologia escolhida foi o sistema multiagentes, para balancear e gerenciar o fornecimento de energia elétrica utilizando estados da microrrede e prioridade de cargas. A integração de todos os sistemas envolvidos foi possível usando a comunicação TCP/IP, mas foi necessário um middleware para trocar e traduzir informações do SMA para o sistema de energia.

O uso do SMA e sua análise de desempenho em tempo real tem se mostrado uma solução para problemas complexos, como pode-se observar em Mas2tering [100] mas o seu correto uso e modelagem demandam um grande projeto de comunicação. Este deverá fornecer o comportamento de sociabilidade esperado desse tipo de metodologia. Quando o MAS utiliza apenas o mecanismo de *pooling*, observou-se um problema relacionado com a temporização e sincronização para o controle das cargas num estado desequilibrado. Ao adicionar um mecanismo de eventos para o *pooling*, o problema foi resolvido, pois ao verificar que o estado não estava condizente com a necessidade, o agente não espera a próxima atualização para tomar uma ação, mas executa naquele instante as cabíveis.

Portanto, a simulação de sistemas multiagentes em microrredes inteligentes em tempo real e com links de comunicação reais, podem revelar alguns problemas que só ocorrem neste tipo de simulação. No caso desta tese, por exemplo, o tipo de informação que um agente deve ser capaz de relatar e que tipo de metodologia é melhor para se ajustar a uma situação real. Isso realça a relevância dos modelos e da estrutura de pesquisa apresentados neste documento.

O outro aspecto observado no trabalho foi o impacto do sistema de comunicação de

dados no ambiente de uma REI. Mesmo para uma mesma aplicação, foi possível observar que, dependendo o protocolo escolhido, os requisitos mudam. Isso impacta na determinação de requisitos de QoS aplicados ao tráfego de dados específicos de gerenciamento e monitoramento de uma microrrede. Quando analisado o fluxo bidirecional, observou-se que não somente o sinal pode ser afetado, mas também os comandos do sistema de gerenciamento que são enviados a microrrede. Isso acarretou em uma divergência entre a situação real da microrrede e a que o SGE (neste caso um SMA) possuía, devido a falta de informação originada por perda de pacotes, corrupção de dados ou mesmo limitações na largura de banda.

Assim, é possível verificar que o uso de *frameworks* de tempo real, oferecem novas perspectivas de problemas relacionados a REI e assim possibilitam uma avaliação mais ampla dos desafios que podem ser encontrados no desenvolvimento de soluções. Também foi possível avaliar a importância do sistema de comunicação de dados dentro das soluções aplicadas ao SEP, onde seu papel é fundamental para atingir novos patamares de integração e assim alcançar novos objetivos.

8.1 Tarefas Realizadas

- ✓ Revisão Bibliográfica para levantamento da estado da arte da aplicação de MAS no contexto de Microrredes, Modelamento de SMA e Microrredes e seus desafios.
- ✓ Desenvolvimento de um MAS usando o *framework* JADE;
- ✓ Implementação de interface de comunicação entre o MAS e o Matlab/Simulink;
- ✓ Publicação de um artigo dos resultados obtidos na análise de relevância e proposta da tese;
- ✓ Implementação de interface de comunicação entre MAS e o RTDS/RSCAD;
- ✓ Implementação de uma microrrede no RTDS, usando uma modelagem simplificada das fontes Renováveis.
- ✓ Design de SMA usando JADE para o gerenciamento de energia e controle de uma microrrede.
- ✓ Validação da proposta através da prova de conceito usando a modelagem simplificada da microrrede.
- ✓ Levantamento dos resultados e ajustes nas modelagens;
- ✓ Validação dos novos resultados

- ✓ Publicação do artigo para revista internacional (Qualis Capes A2).
- ✓ Teste de desempenho da rede de dados para aplicações SCADA
- ✓ Teste de desempenho de rede de dados para fluxos bidirecionais de dados
- ✓ Qualificação
- ✓ Teste de Flexibilidade do SMA simulando a entrada de carga com o sistema em funcionamento
- ✓ Reentrada de carga quando retornar ao modo conectado utilizando prioridades
- ✓ Revisão da Tese de acordo com as sugestões da banca de examinadores.
- ✓ Confecção do documento para defesa

8.2 Trabalhos Futuros

Através do desenvolvimento do *framework* é possível:

- realizar estudos levando em consideração o conhecimento do tempo de desconexão,
- realizar estudos com armazenamento e sem conhecimento do tempo de desconexão,
- realizar estudos em uma perspectiva de análise de transitórios,
- estudo em regime permanente,
- metodologias de detecção de modo ilhado/conectado utilizando SMA,
- metodologias de controle totalmente descentralizadas,
- protocolos de comunicação para controle/gerenciamento de microrredes.

APÊNDICE A – Modelo de Microrrede no RTDS

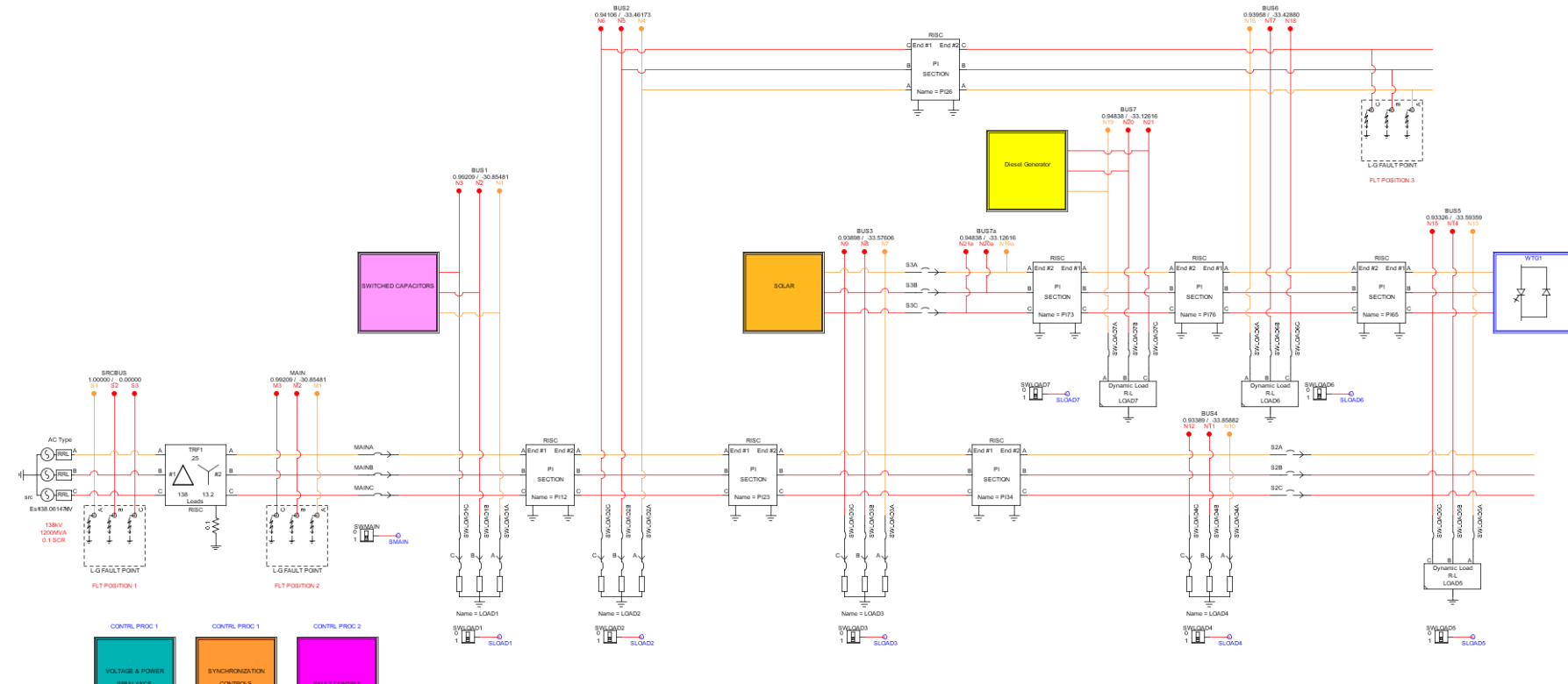


Figura 63 – Modelo de microrrede utilizada no RTDS

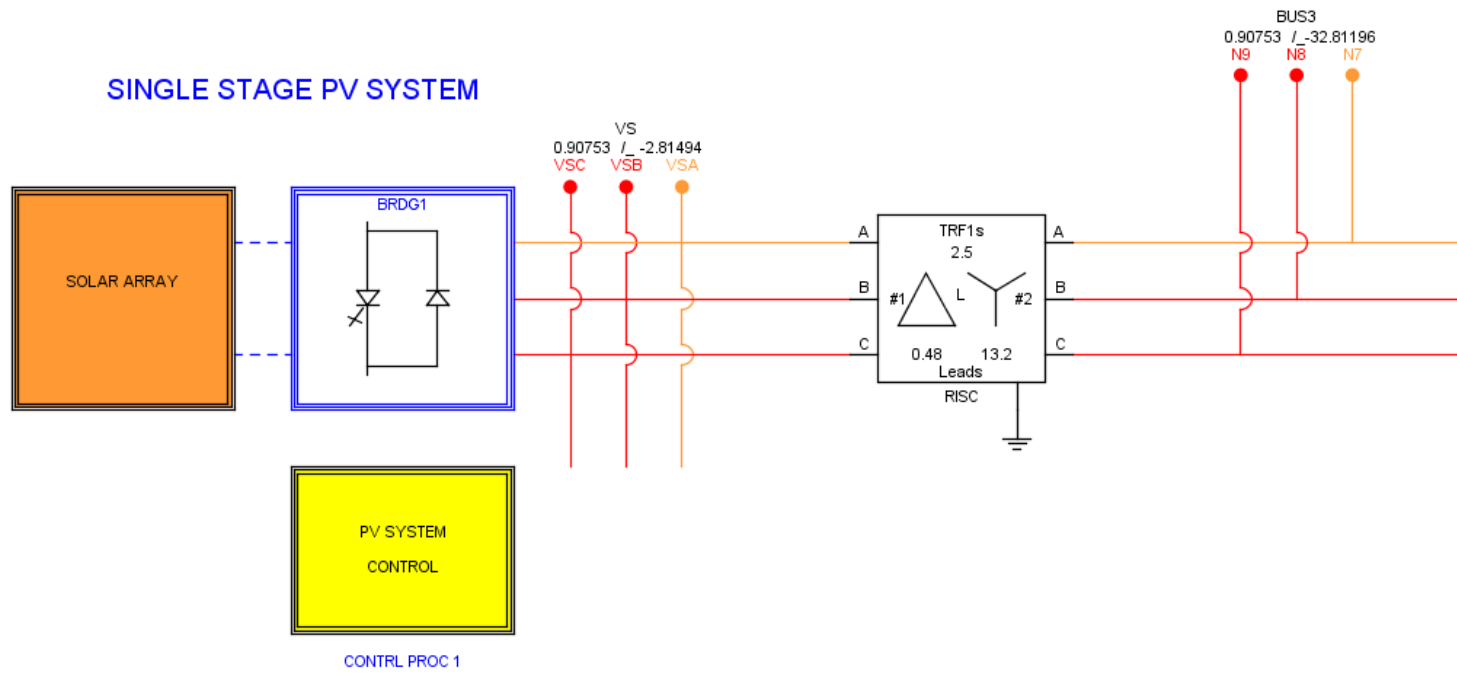


Figura 64 – Modelo do PV

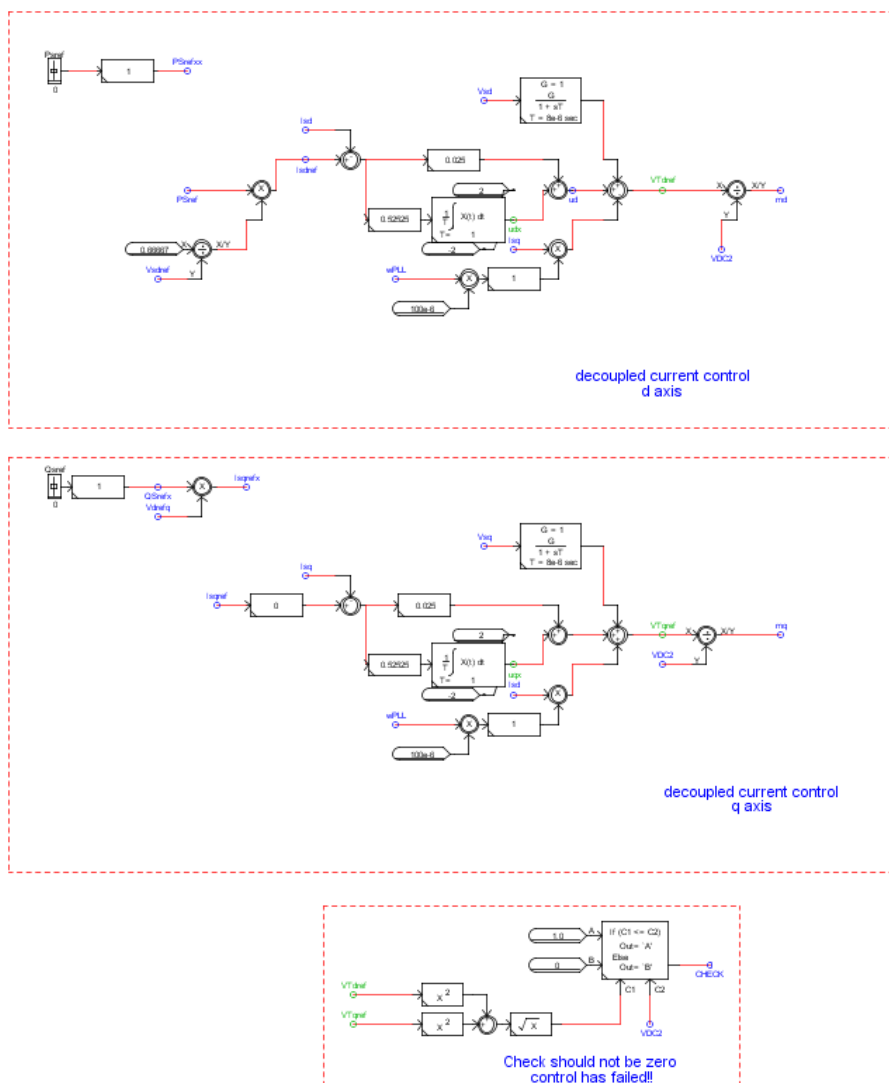


Figura 65 – Detalhe do controle do PV

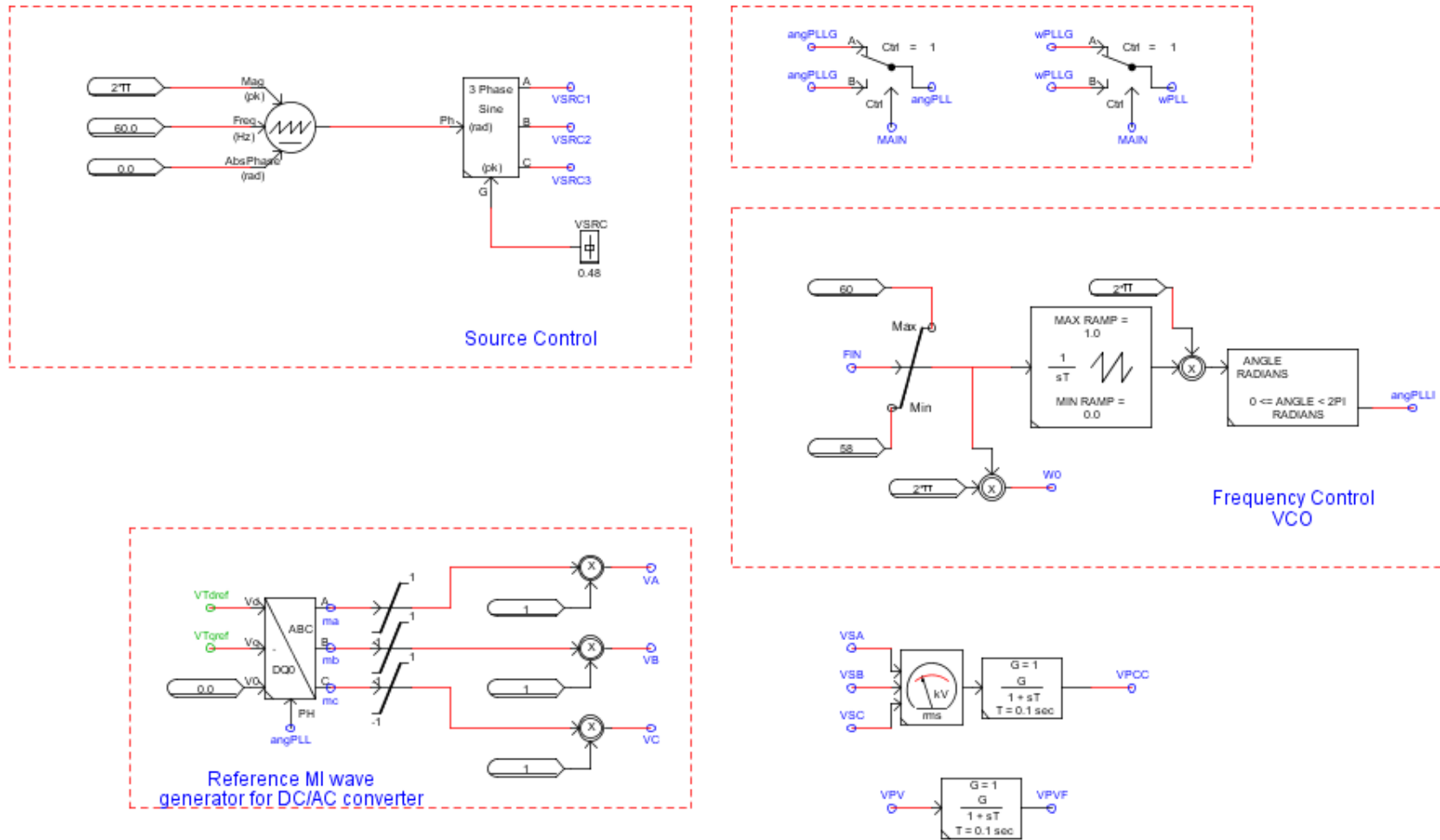


Figura 66 – Detalhe do controle de frequência do PV

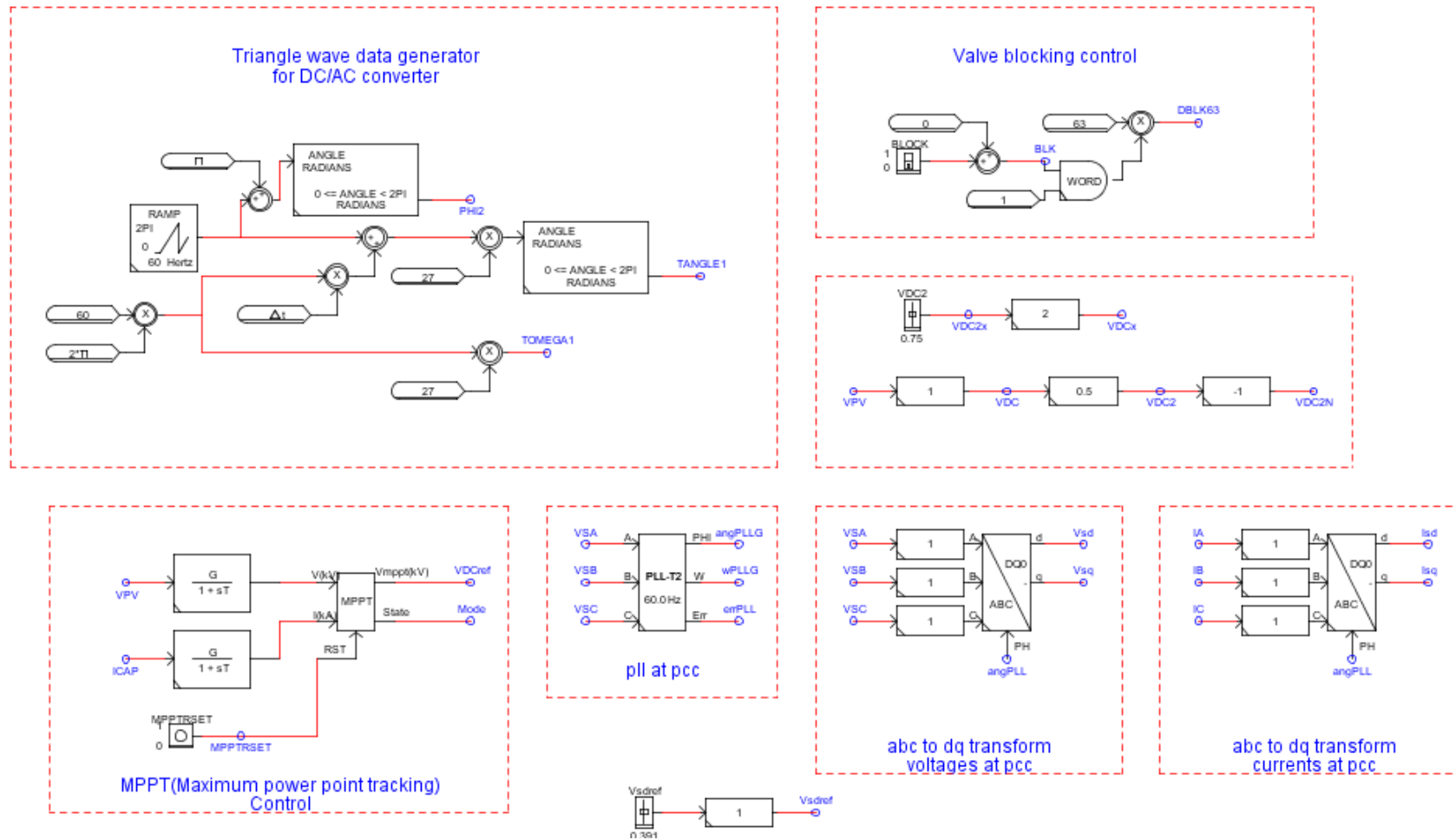


Figura 67 – Detalhe do controle MPPT do PV

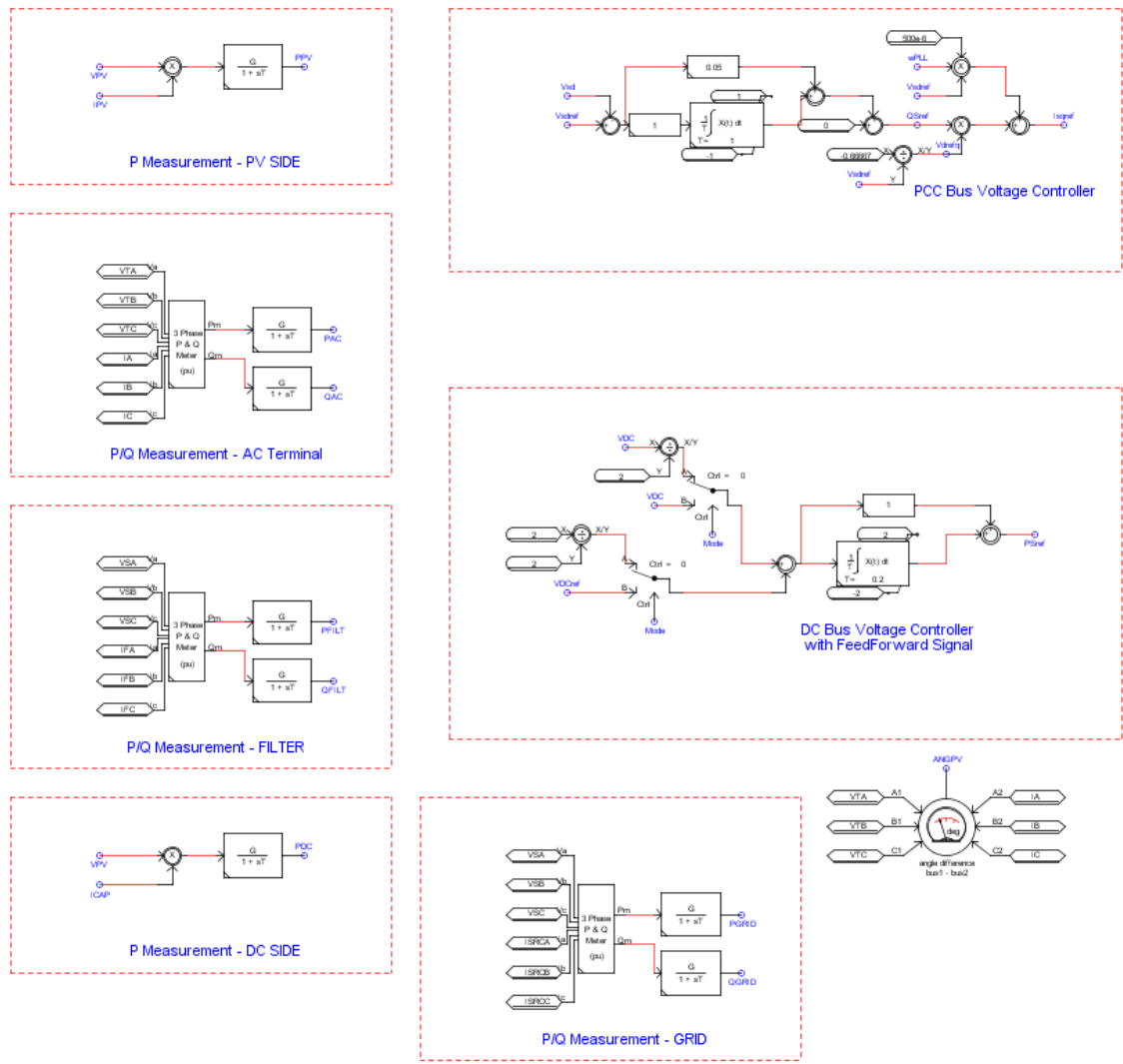


Figura 68 – Detalhe do controle do PV

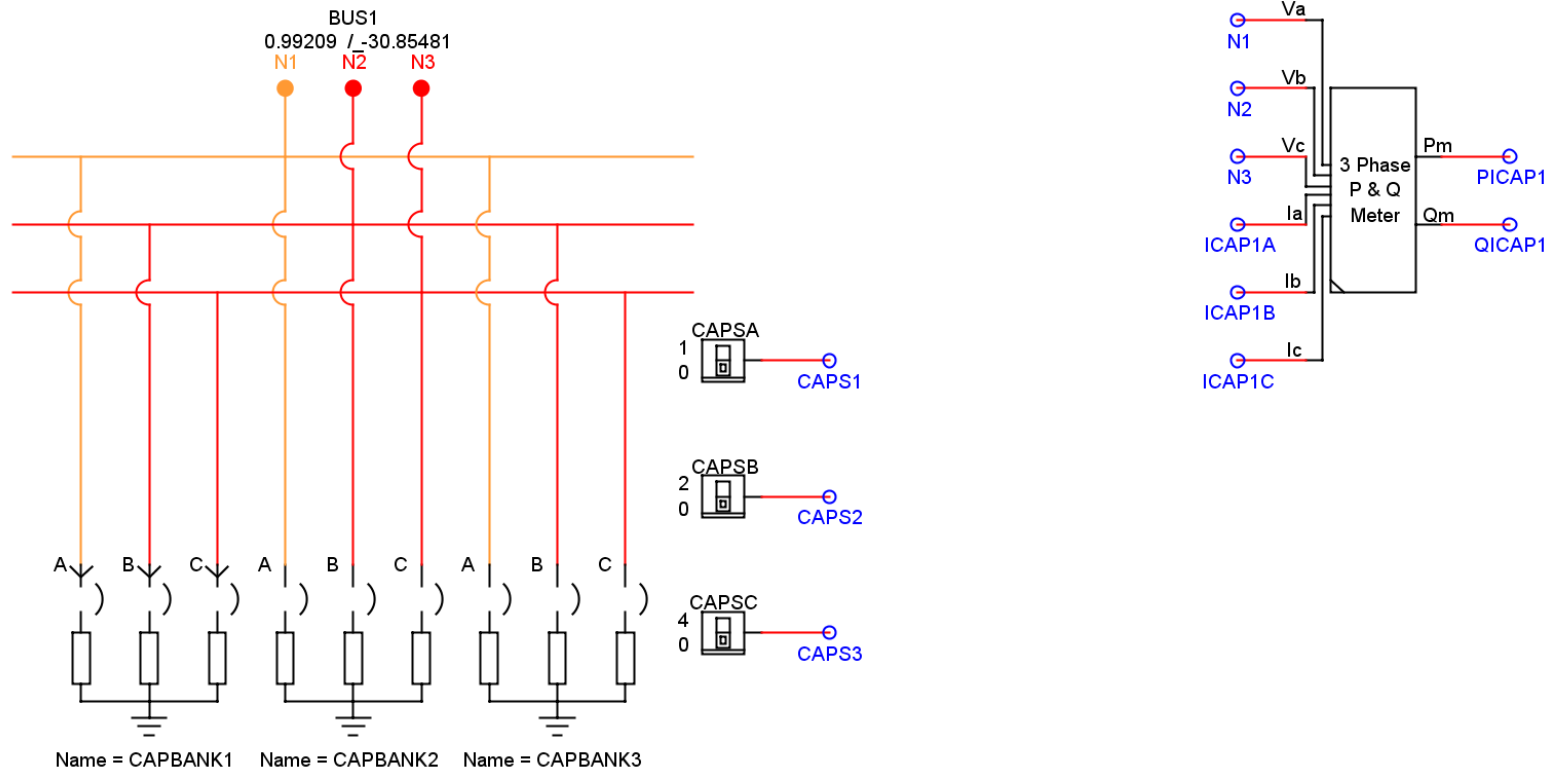


Figura 69 – Detalhe do Banco de Capacitor

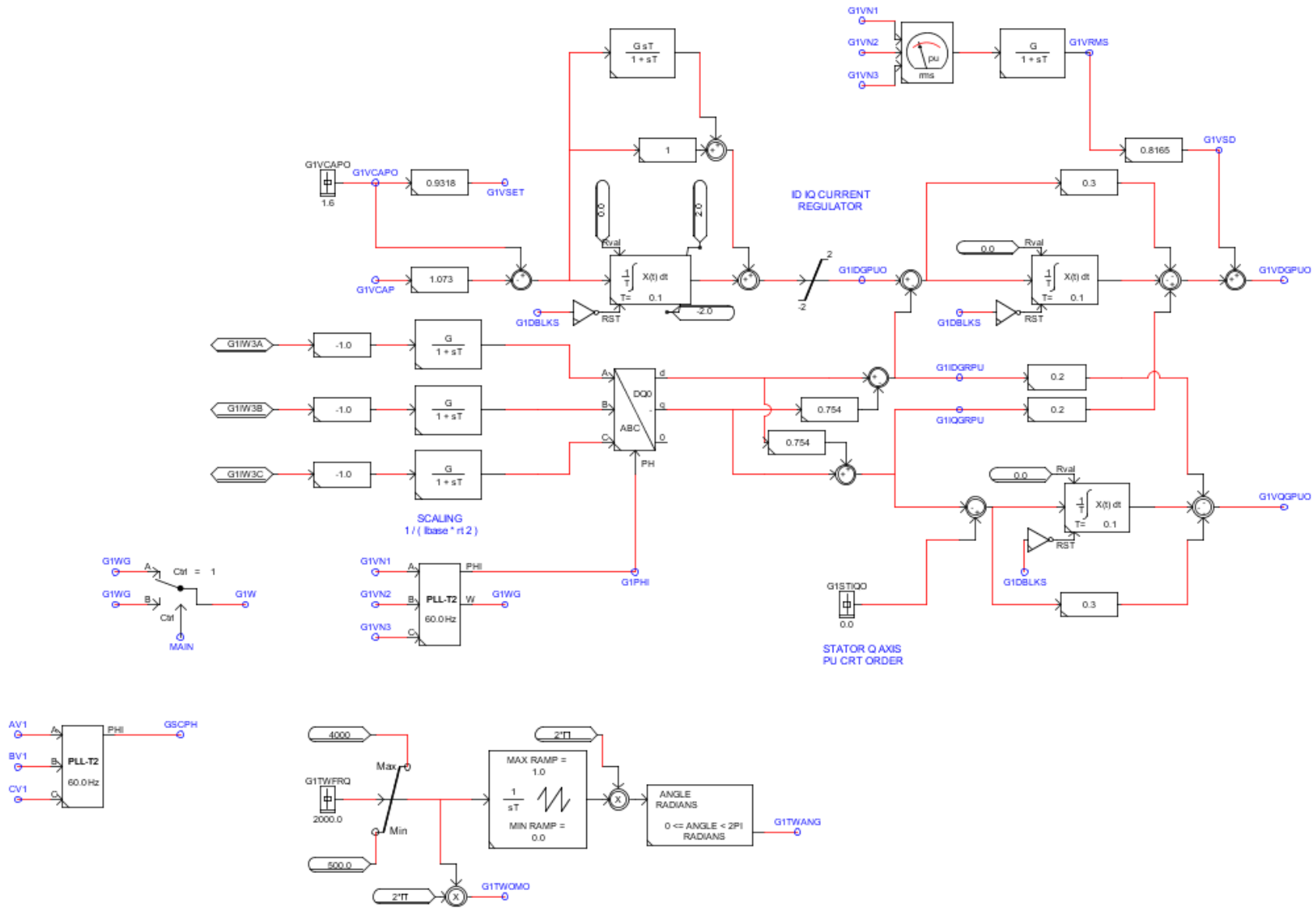


Figura 70 – Detalhe do modulador de sinais da turbina eólica

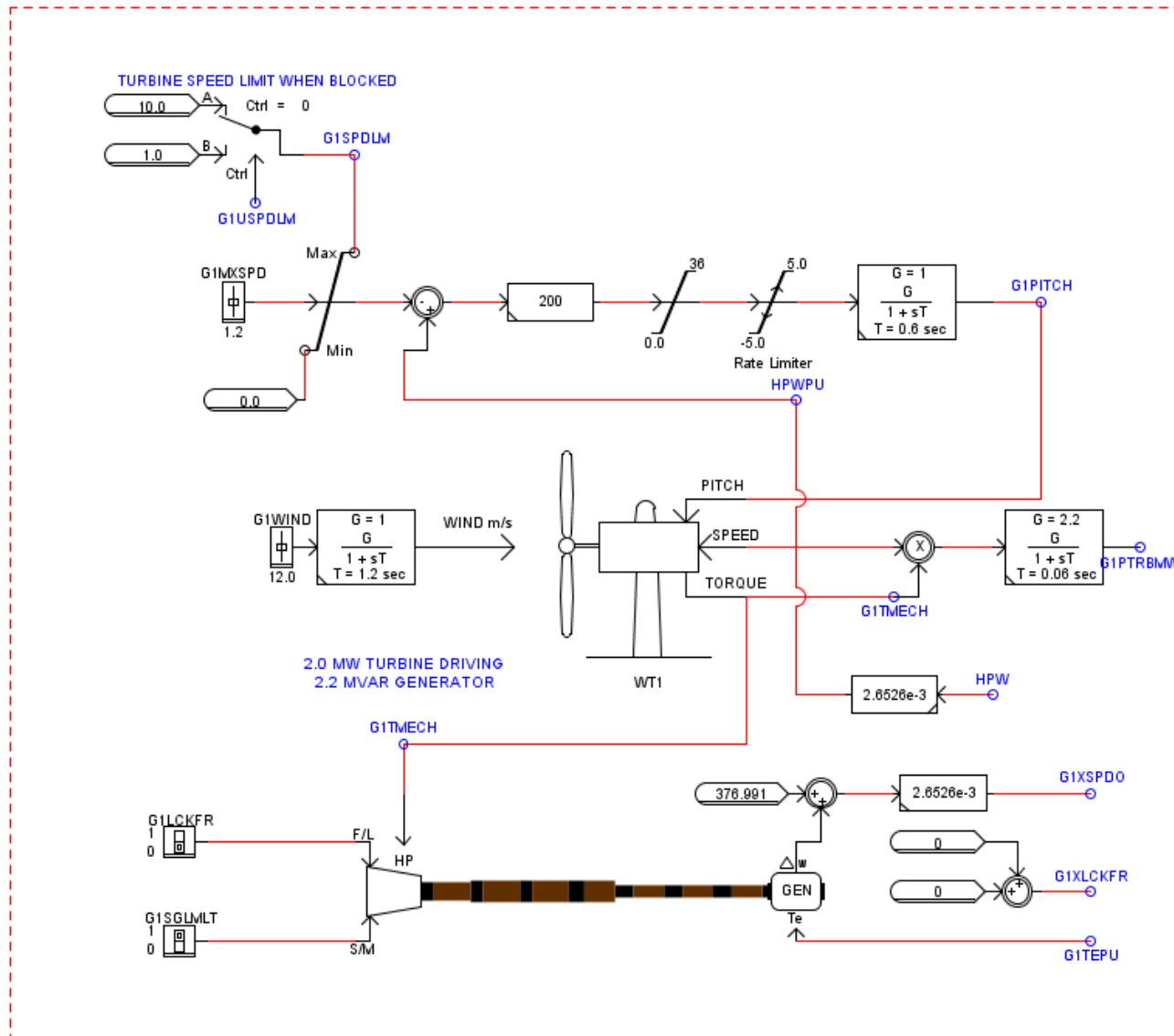


Figura 71 – Detalhe do modelamento físico da turbina eólica

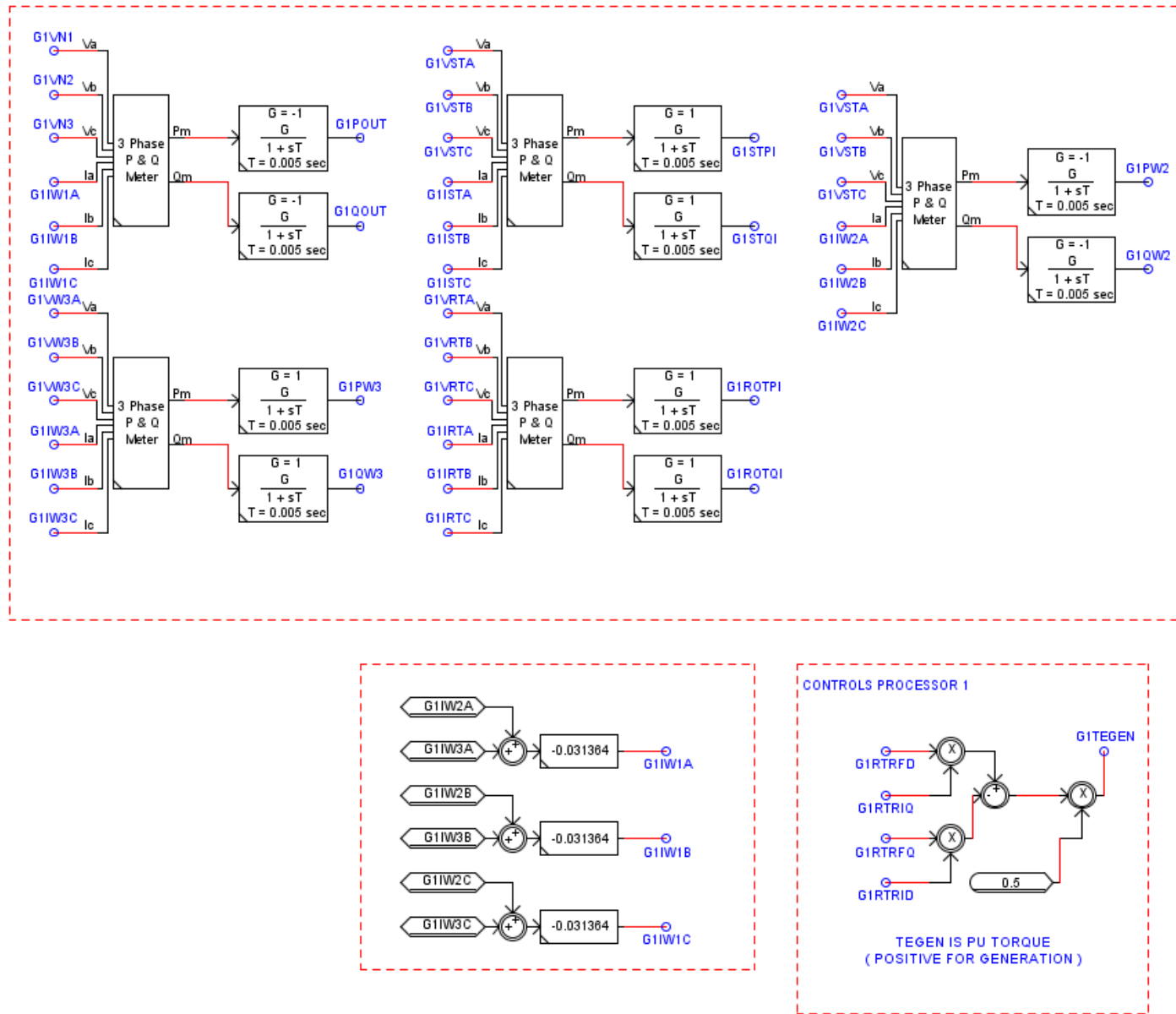


Figura 72 – Detalhe do controle da turbina eólica

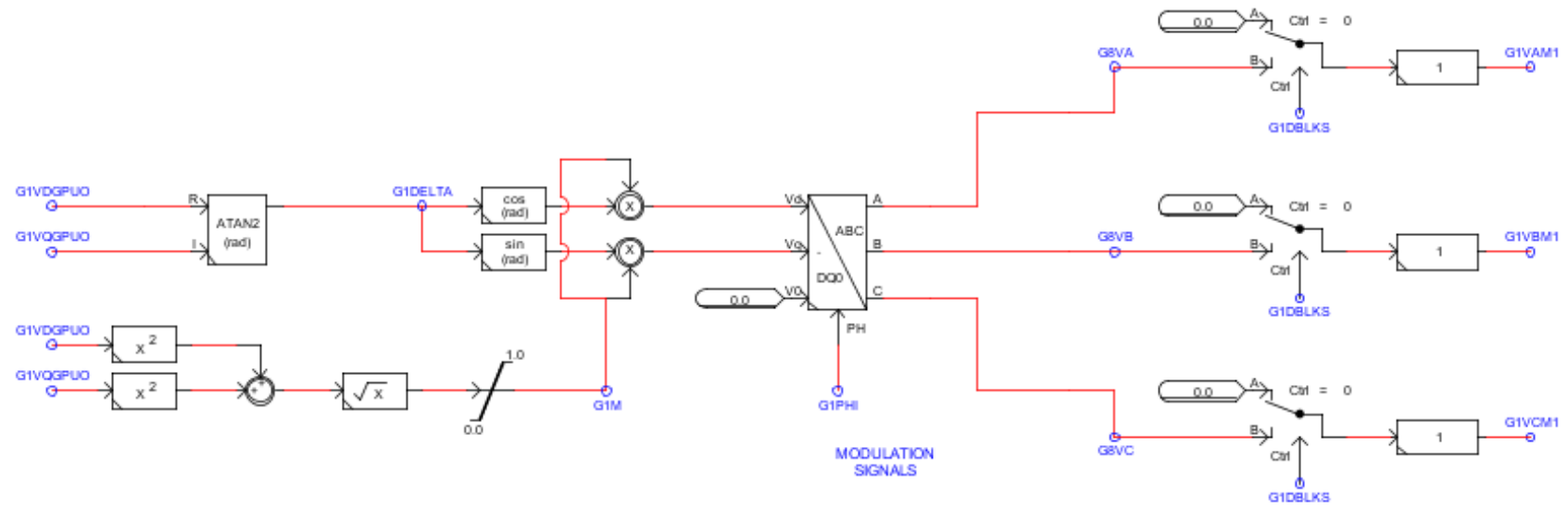


Figura 73 – Detalhe do modulador de sinais da turbina eólica

APÊNDICE B – Curvas de Tensão e Frequência da Microrrede

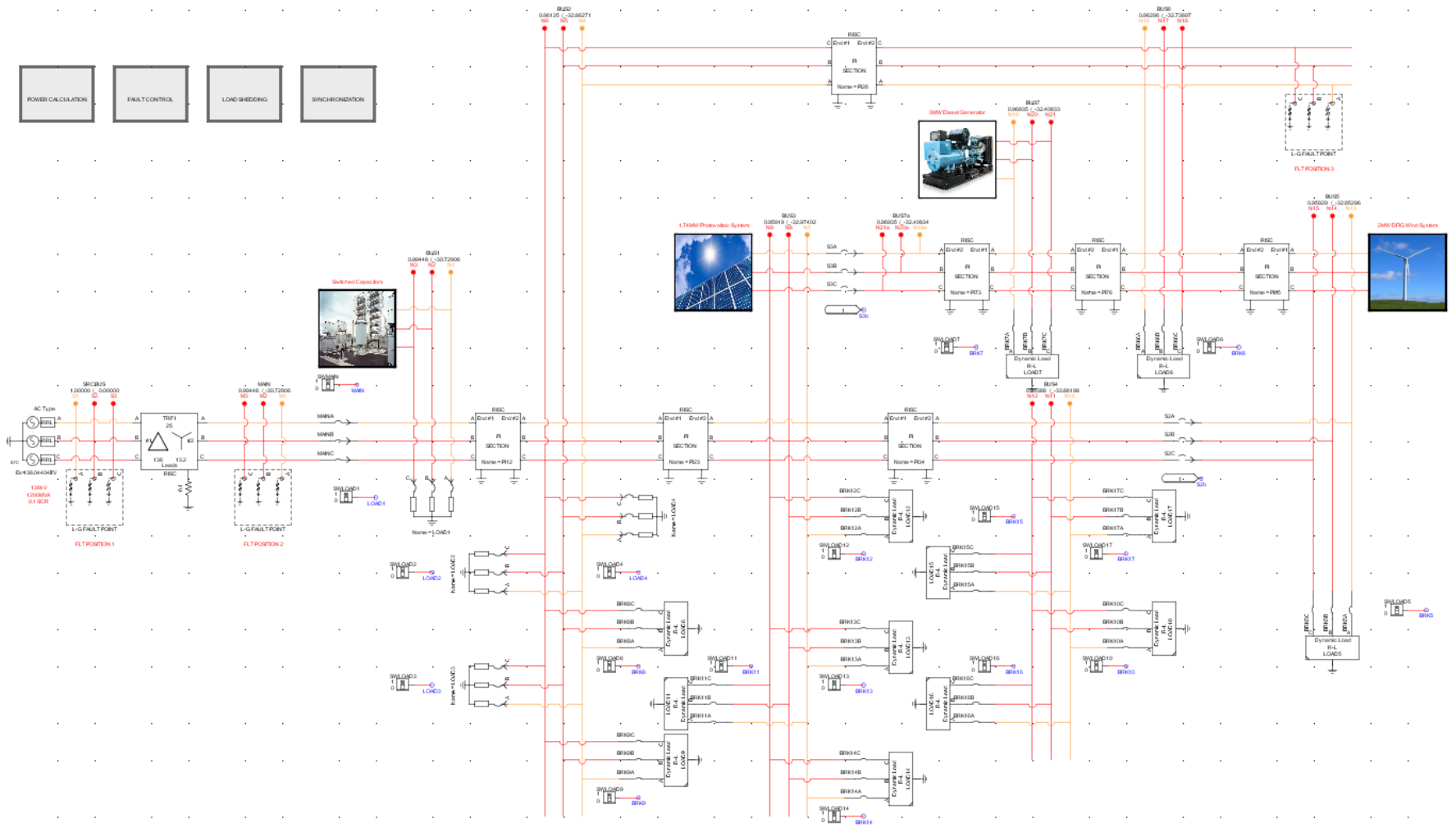


Figura 75 – Nova proposta de microrrede utilizada para teste de flexibilidade

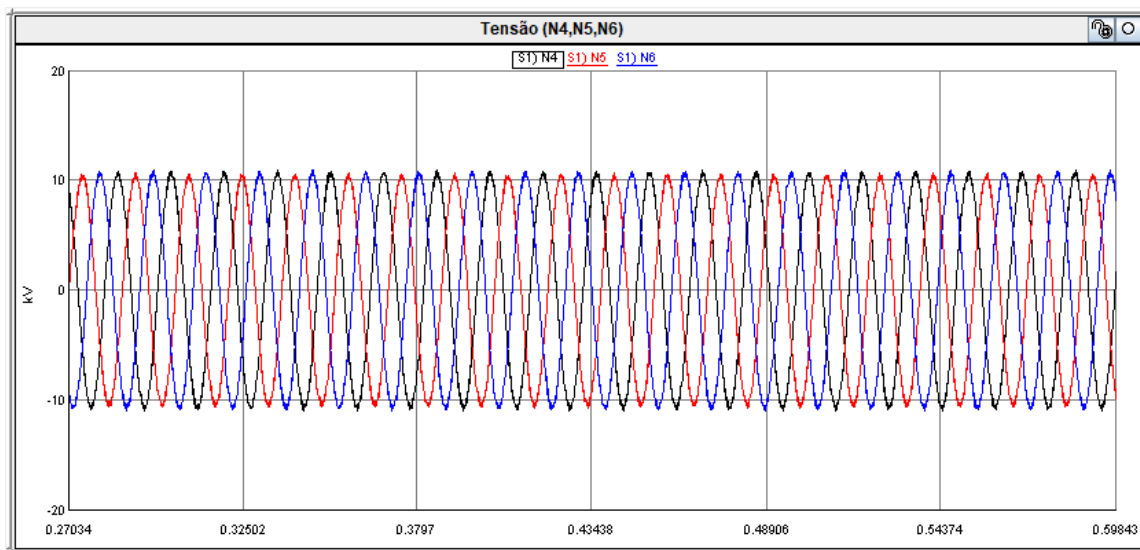


Figura 76 – Tensão no PCC em modo conectado

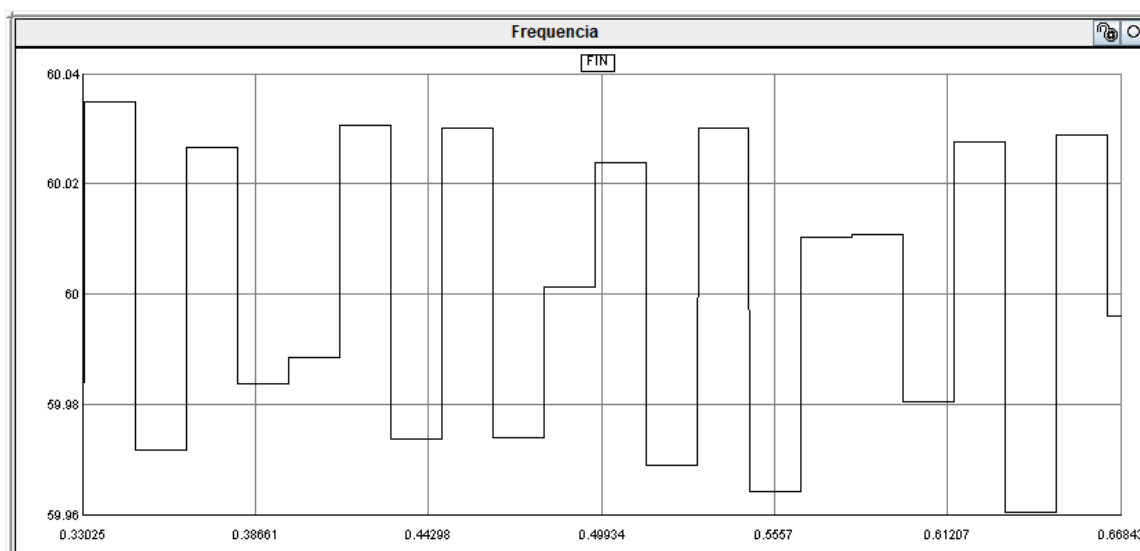


Figura 77 – Frequência no PCC em modo conectado

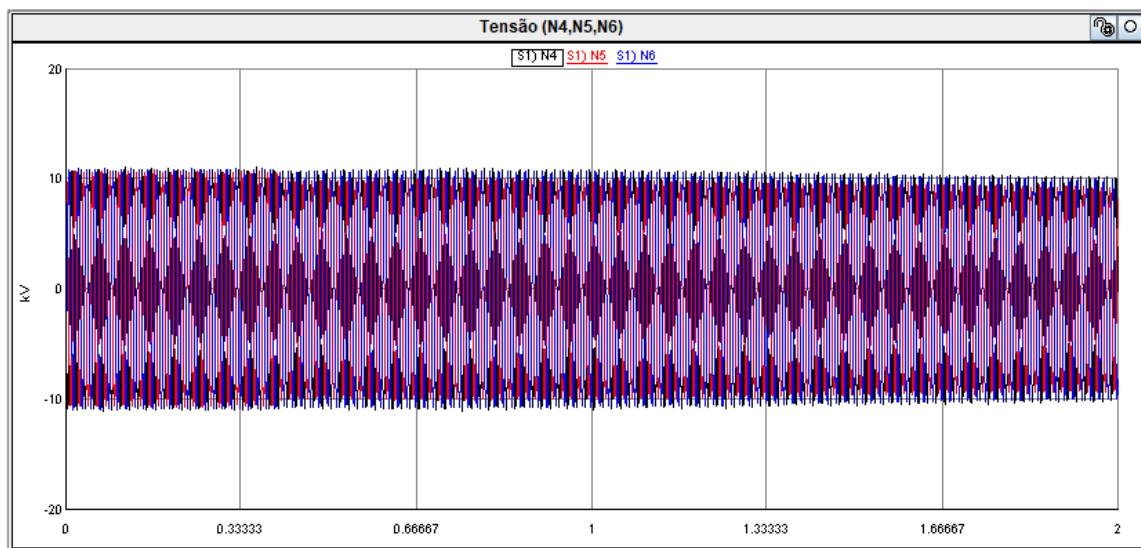


Figura 78 – Tensão no PCC em modo ilhado

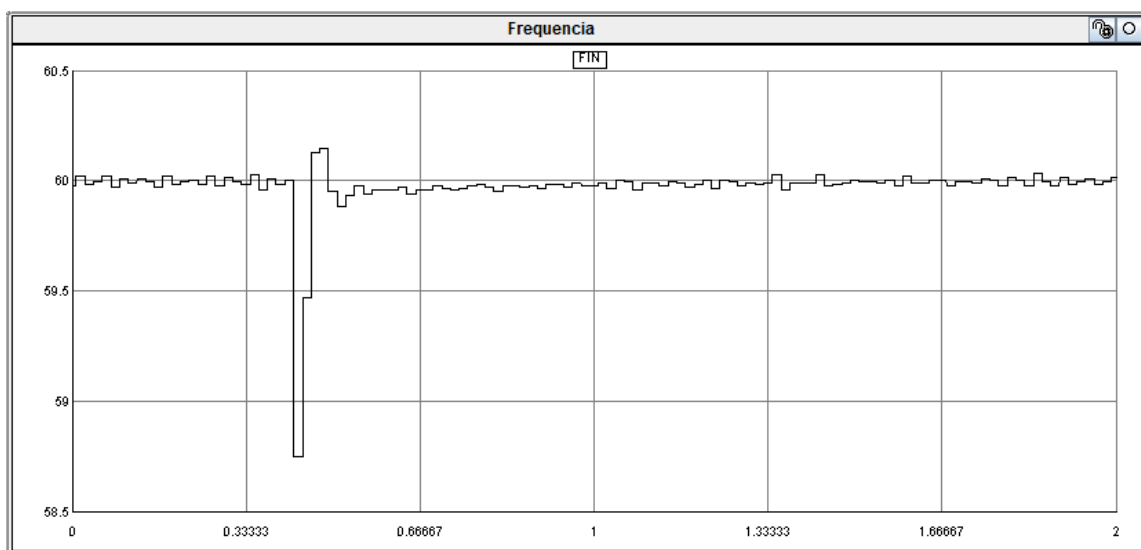


Figura 79 – Frequência no PCC em modo ilhado

Referências

- 1 NZIMAKO, O.; RAJAPAKSE, A. Real time simulation of a microgrid with multiple distributed energy resources. In: IEEE. *Cogeneration, Small Power Plants and District Energy (ICUE), International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1–6. 12, 71, 72
- 2 CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. Smart Grid Reference Architecture. n. November, p. 107, 2012. 21, 22
- 3 BRACCO, S.; DELFINO, F.; PAMPARARO, F.; ROBBA, M.; ROSSI, M. A system of systems model for the control of the University of Genoa Smart Polygeneration Microgrid. *Proceedings - 2012 7th International Conference on System of Systems Engineering, SoSE 2012*, p. 7–12, 2012. ISSN 13640321. 24
- 4 HOPKINSON, K.; BIRMAN, K. EPOCHS: Integrated commercial off-the-shelf software for agent-based electric power and communication simulation. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 2003. ISSN 02750708. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{_}all.jsp?arnumber=1261>. 24
- 5 LIN, H.; VEDA, S. S.; SHUKLA, S. S.; MILI, L.; THORP, J. 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, 2012. ISSN 19493053. 24, 71
- 6 LIN, H. H.; SAMBAMOORTHY, S.; SHUKLA, S.; THORP, J.; MILI, L. Power system and communication network co-simulation for smart grid applications. In: *ISGT 2011*. IEEE, 2011. p. 1–6. ISBN 978-1-61284-218-9. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5759166>>. 24
- 7 BHOR, D.; ANGAPPAN, K.; SIVALINGAM, K. M. A co-simulation framework for Smart Grid wide-area monitoring networks. In: *2014 Sixth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*. IEEE, 2014. p. 1–8. ISBN 978-1-4799-3635-9. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6734880>>. 24
- 8 MANBACHI, M.; SADU, A.; FARHANGI, H.; MONTI, A.; PALIZBAN, A.; PONCI, F.; ARZANPOUR, S. Real Time Co-Simulation Platform for Smart Grid Volt-VAR Optimization using IEC61850. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, p. 1–1, 2016. ISSN 1551-3203. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7470528>>. 24
- 9 SALEEM, A.; HONETH, N.; WU, Y.; NORDSTRÖM, L. Integrated multi-agent test-bed for decentralized control of active distribution networks. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, p. 1–5, 2013. 24
- 10 LOGENTHIRAN, T.; SRINIVASAN, D.; KHAMBADKONE, A. M.; AUNG, H. N. Scalable Multi-Agent System (MAS) for operation of a microgrid in islanded mode. *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2010 and 2010 Power India*, 2010. 24

- 11 NUNNA, H. S. V. S. K.; DOOLLA, S. Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 4, p. 1678–1687, 2013. ISSN 02780046. [24](#)
- 12 XU, Y.; LIU, W. Novel multiagent based load restoration algorithm for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 2, n. 1, p. 140–149, 2011. ISSN 19493053. [24](#)
- 13 OYARZABAL, J.; JIMENO, J.; RUELA, J.; ENGLER, A.; HARDT, C. Agent based micro grid management system. *2005 International Conference on Future Power Systems*, p. 1–6, 2005. [24](#)
- 14 LOGENTHIRAN, T.; SRINIVASAN, D.; KHAMBADKONE, A. M.; AUNG, H. N. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 2, p. 925–933, 2012. ISSN 19493053. [24](#)
- 15 DIMEAS, A. L.; HATZIARGYRIOU, N. D. Operation of a multiagent system for microgrid control. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1447–1455, 2005. ISSN 08858950. [24](#)
- 16 COLSON, C. M.; NEHRIR, M. H. Comprehensive real-time microgrid power management and control with distributed agents. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 1, p. 617–627, 2013. ISSN 19493053. [24](#)
- 17 PIPATTANASOMPORN, M.; FEROUZE, H.; RAHMAN, S. Multi-Agent Systems in a Distributed Smart Grid : Design and Implementation. p. 1–8, 2009. [24](#)
- 18 AVRAMESCU, M. High-level design of Multi-agent System based Microgrid. In: *Systems and Computer Science (ICSCS), 2012 1st International Conference on*. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–5. ISBN 1467306738. [24](#)
- 19 FEROUZE, H. Multi-Agent Systems in Microgrids : Design and Implementation. *Simulation*, p. 131, 2009. [24](#)
- 20 WOOD, M.; DELOACH, S. An Overview of the Multiagent Systems Engineering Methodology. *Agent-Oriented Software Engineering*, v. 1957, p. 1–53, 2001. [24](#)
- 21 MCARTHUR, S. D. J.; DAVIDSON, E. M.; CATTERSON, V. M.; DIMEAS, A. L.; HATZIARGYRIOU, N. D.; PONCI, F.; FUNABASHI, T. Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications-Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 4, p. 1743–1752, 2007. ISSN 0885-8950. [24](#), [26](#), [58](#), [60](#), [61](#), [62](#), [66](#), [67](#)
- 22 CATTERSON, V.; DAVIDSON, E.; MCARTHUR, S. Issues in Integrating Existing Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications. *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems*, p. 396–401, 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1599296>. [24](#)
- 23 MCARTHUR, S. D. J.; DAVIDSON, E. M.; CATTERSON, V. M.; DIMEAS, A. L.; HATZIARGYRIOU, N. D.; PONCI, F.; FUNABASHI, T. Multi-agent systems for power engineering applications - Part II: Technologies, standards, and tools for building multi-agent systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 4, p. 1753–1759, 2007. ISSN 08858950. [24](#)

- 24 PAVÓN, J.; GÓMEZ-SANZ, J. Agent Oriented Software Engineering with INGENIAS. *Multi-Agent Systems and Applications III*, p. 394–403, 2003. ISSN 03029743. 24
- 25 CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. *Microgrids and Active Distribution Networks*. [S.l.: s.n.], 2009. 320 pp. p. ISBN 9781849190145. 25, 26
- 26 INSTITUTE, M. *Microgrid Institute*. 2014. Disponível em: <<http://www.microgridinstitute.org/>>. 25, 32
- 27 HATZIARGYRIOU, N. *Microgrids: Architectures and Control*. First. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2014. 1–344 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9781118720646. 25, 26, 31, 35, 36, 37, 38, 39, 40
- 28 SHI, W.; LI, N.; CHU, C.-C.; GADH, R. Real-time energy management in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 228–238, 2017. 26
- 29 DEHGHANPOUR, K.; NEHRIR, H. Real-time multiobjective microgrid power management using distributed optimization in an agent-based bargaining framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, 2017. 26
- 30 KANELLOS, F. Real-time control based on multi-agent systems for the operation of large ports as prosumer microgrids. *IEEE Access*, IEEE, 2017. 26
- 31 BUSH, S.; GOEL, F.; SANJAY, S. et al. Ieee vision for smart grid communications: 2030 and beyond roadmap. 2013. 26
- 32 FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, 2010. 26
- 33 FRAMEWORK, N. Roadmap for smart grid interoperability standards. *National Institute of Standards and Technology*, 2010. 26
- 34 GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G. P. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 28–42, 2013. 26
- 35 CINTUGLU, M. H.; MOHAMMED, O. A.; AKKAYA, K.; ULUAGAC, A. S. A survey on smart grid cyber-physical system testbeds. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 19, n. 1, p. 446–464, 2017. 26, 71
- 36 OLIVEIRA, D. Q. Sistema de gerenciamento de energia para operação resiliente de microrredes em modo ilhado. 2015. 26, 27
- 37 JÚNIOR, F. M. P.; SOUZA, A. Carlos Zambroni de; CASTILLA, M.; OLIVEIRA, D. Q.; RIBEIRO, P. F. Control strategies for improving energy efficiency and reliability in autonomous microgrids with communication constraints. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 9, p. 1443, 2017. 27
- 38 DESEMPENHO DE TOPOLOGIAS DE REDES DE COMUNICAÇÕES APLICADO AO MONITORAMENTO DE SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA SIMULADO EM TEMPO REAL. <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/574/tese_ramalho_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Accessed on 04/23/2018). 27

- 39 MORSTYN, T.; SAVKIN, A. V.; HREDZAK, B.; TUAN, H. D. Scalable energy management for low voltage microgrids using multi-agent storage system aggregation. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 1614–1623, 2018. [27](#)
- 40 NETTO, R. S.; RAMALHO, G. R.; BONATTO, B. D.; CARPINTEIRO, O. A.; SOUZA, A. Zambroni de; OLIVEIRA, D. Q.; BRAGA, R. A. Real-time framework for energy management system of a smart microgrid using multiagent systems. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 3, p. 656, 2018. [27](#)
- 41 BAKAR, N. N. A.; HASSAN, M. Y.; SULAIMA, M. F.; NASIR, M. N. M.; KHAMIS, A. Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 71, p. 161–169, 2017. [28](#), [43](#), [70](#)
- 42 GENERATION, E. P. A Comprehensive Study on Microgrid Technology. v. 4, n. 4, 2014. ISSN 13090127. [28](#)
- 43 SATISH, B.; BHUVANESWARI, S. Control of microgrid - A review. *2014 International Conference on Advances in Green Energy, ICAGE 2014*, p. 18–25, 2014. [28](#)
- 44 OLIVARES, D. E.; MEHRIZI-SANI, A.; ETEMADI, A. H.; CAIZARES, C. A.; IRAVANI, R.; KAZERANI, M.; HAJIMIRAGHA, A. H.; GOMIS-BELLMUNT, O.; SA-EEDIFARD, M.; PALMA-BEHNKE, R.; JIMENEZ-ESTVEZ, G. A.; HATZIARGYRIOU, N. D. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014. ISSN 19493053. [28](#), [32](#), [34](#)
- 45 MORADI, M. H.; RAZINI, S.; HOSSEINIAN, S. M. State of art of multiagent systems in power engineering: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 58, p. 814–824, 2016. ISSN 13640321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115017220>. [28](#), [60](#)
- 46 GOMEZ-SANZ, J. J.; GARCIA-RODRIGUEZ, S.; CUARTERO-SOLER, N.; HERNANDEZ-CALLEJO, L. Reviewing microgrids from a multi-agent systems perspective. *Energies*, v. 7, n. 5, p. 3355–3382, 2014. ISSN 19961073. [28](#), [61](#)
- 47 KULASEKERA, A. L.; GOPURA, R. A. R. C.; HEMAPALA, K. T. M. U.; PERERA, N. A review on multi-agent systems in microgrid applications. *2011 IEEE PES International Conference on Innovative Smart Grid Technologies-India, ISGT India 2011*, p. 173–177, 2011. [28](#), [61](#)
- 48 CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, P. *Microgrids and Active Distribution Networks*. [S.l.: s.n.], 2009. 297 p. ISSN 00406090. ISBN 9781849190145. [31](#), [33](#), [34](#)
- 49 FANG, X.; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012. ISSN 1553-877X. [31](#), [32](#), [45](#), [59](#)
- 50 OSTERGAARD, J. European SmartGrids Technology Platform-Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. *Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg*, 2006. ISSN 1364-9027. [31](#), [59](#)
- 51 FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 8, n. 1, p. 18–28, 2010. ISSN 15407977. [31](#), [59](#)

- 52 HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 5, n. 4, p. 78–94, 2007. ISSN 15407977. [31](#)
- 53 KAPLAN, S. M.; SISSINE, F.; NET, T. *Smart Grid: Modernizing electric power transmission and distribution; Energy independence, Storage and security; Energy independence and security act of 2007 (EISA); Improving electrical grid efficiency, communication, reliability, and resiliency; integra*. [S.l.]: The Capitol Net Inc, 2009. ISBN 1587331624. [31](#)
- 54 LASSETER, R. H.; PAIGI, P. Microgrid: A conceptual solution. In: *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 6, p. 4285–4290. ISBN 0780383990. ISSN 02759306. [31](#), [43](#)
- 55 LASSETER, R. H. Smart distribution: Coupled microgrids. In: *Proceedings of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 99, n. 6, p. 1074–1082. ISBN 0018-9219 VO - 99. ISSN 00189219. [31](#)
- 56 LASSETER, R. MicroGrids. *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, v. 1, p. 4285–4290, 2002. ISSN 0275-9306. [32](#)
- 57 RAHMAN, S.; PIPATTANASOMPORN, M.; TEKLU, Y. Intelligent Distributed Autonomous Power Systems (IDAPS). In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*. [S.l.: s.n.], 2007. ISBN 1424412986. ISSN 1932-5517. [32](#)
- 58 LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, v. 1, n. C, p. 146–149, 2001. ISSN 1098-6596. [32](#)
- 59 GU, W.; LIU, W.; SHEN, C.; WU, Z. Multi-stage underfrequency load shedding for islanded microgrid with equivalent inertia constant analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 46, p. 36–39, 2013. [43](#)
- 60 LOPES, J. P.; MOREIRA, C.; MADUREIRA, A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 916–924, 2006. [43](#)
- 61 BARKLUND, E.; POGAKU, N.; PRODANOVIC, M.; HERNANDEZ-ARAMBURO, C.; GREEN, T. C. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters. *IEEE*, 2008. [43](#)
- 62 GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G. P. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE transactions on Industrial informatics*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 529–539, 2011. [45](#), [56](#)
- 63 EKANAYAKE, J.; JENKINS, N.; LIYANAGE, K.; WU, J.; YOKOYAMA, A. *Smart grid: technology and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 1119969093. [46](#), [49](#), [50](#), [51](#), [52](#), [53](#), [55](#)
- 64 HALSALL, F. *Data communications, computer networks and open systems*. [S.l.]: Addison-Wesley Harlow, 1996. v. 347. [46](#), [48](#)
- 65 BUDKA, K. C.; DESHPANDE, J. G.; THOTTAN, M. *Communication Networks for Smart Grids*. [s.n.], 2014. 1–21 p. ISBN 978-1-4471-6301-5. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-6302-2>. [46](#), [48](#), [51](#)

- 66 COMER, D. E. *Internetworking with TCP/IP*. [S.l.]: Pearson Italia Spa, 2006. v. 1. 47, 50
- 67 TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. *Computer networks* (ed.). ISBN: 0-12-066102-3, 1996. 47, 50, 52
- 68 HINDEN, R.; DEERING, S. *IP Version 6 Addressing Architecture*. 1998. Acessado: 07-08-2017. Disponível em: <<http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2373.txt>>. 50
- 69 DEERING, S.; HINDEN, R. *Internet Protocol, Version 6, (IPv6) Specification*. 1998. Acessado: 07-08-2017. Disponível em: <<http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2460.txt>>. 50
- 70 U.S. Department of Energy. Communications Requirements of Smart Grid Technologies. *October*, p. 1–69, 2010. 56
- 71 KHAN, R. H.; KHAN, J. Y. A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network. *Computer Networks*, v. 57, n. 3, p. 825–845, 2013. ISSN 13891286. 56
- 72 DOU, C.-X.; LIU, B. Multi-Agent Based Hierarchical Hybrid Control for Smart Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 2, p. 771–778, 2013. ISSN 1949-3053. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6416113>>. 56
- 73 WOOLDRIDGE, M. *An introduction to multiagent systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 0470519460. 57, 58
- 74 FERBER, J. *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. [S.l.]: Addison-Wesley Reading, 1999. v. 1. 57
- 75 BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. *Developing Multi-Agent with JADE Systems*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 286 p. ISBN 9780470057476. 57, 60
- 76 WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge engineering review*, Cambridge Univ Press, v. 10, n. 2, p. 115–152, 1995. ISSN 0269-8889. 58
- 77 ODELL, J. Agent technology. *OMG, Green paper produced by the OMG Agent Working Group*, 2000. 58
- 78 USCHOLD, M.; GRUNINGER, M. *Ontologies : principles , methods and applications*. v. 11, p. 93–136, 1996. 59
- 79 XIE, H.; SHEN, W. Ontology as a Mechanism for Application Integration and Knowledge Sharing in Collaborative Design: A Review. *Computer Supported Cooperative Work in Design*, p. 1–7, 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/4019031/4019032/04019250.pdf>>. 59
- 80 NOY, N. F.; MCGUINNESS, D. L. *Ontology development 101: A guide to creating your first ontology*. Stanford knowledge systems laboratory technical report KSL-01-05 and Stanford medical informatics technical report SMI-2001-0880, Stanford, CA, 2001. Disponível em: <http://protege.stanford.edu/publications/ontology{_}development/ontology101.> 59

- 81 BRAVO, M. C.; PÉREZ, J.; SOSA, V. J.; MONTES, A.; REYES, G. Ontology support for communicating agents in negotiation processes. *Proceedings - HIS 2005: Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, v. 2005, p. 482–487, 2005. 60
- 82 DILEO, J.; JACOBS, T.; DELOACH, S. Integrating Ontologies into Multiagent Systems Engineering. *Fourth International Bi-Conference Workshop on Agent-Oriented Information Systems (AOIS-2002)*, n. July, 2002. 60
- 83 GRUBER, T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Creation Diffusion Utilization*, v. 5, n. April, p. 199–220, 1993. ISSN 1042-8143. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.3273&rep=rep1&ty>>. 60
- 84 SYCARA, K. P. Multiagent systems. *AI Magazine*, v. 19, n. 2, p. 79–92, 1998. ISSN 0738-4602. 60, 61
- 85 KANTAMNENI, A.; BROWN, L. E.; PARKER, G.; WEAVER, W. W. *Survey of multi-agent systems for microgrid control*. 2015. 192–203 p. 61
- 86 DAVIDSON, E. M.; CATTERSON, V. M.; MCARTHUR, S. D. J. The role of intelligent systems in delivering the smart grid. In: *IEEE PES General Meeting, PES 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 9781424483570. ISSN 1944-9925. 61
- 87 MISRA, S.; BERA, S.; OJHA, T.; ZHOU, L. ENTICE: Agent-based energy trading with incomplete information in the smart grid. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 55, p. 202–212, 2015. ISSN 10958592. 61
- 88 KILKKI, O.; KANGASR??SI??, A.; NIKKIL??, R.; ALAH??IV??L??, A.; SEILONEN, I. Agent-based modeling and simulation of a smart grid: A case study of communication effects on frequency control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 33, p. 91–98, 2014. ISSN 09521976. 61
- 89 DAVIDSON, E. M.; MCARTHUR, S. D. J. Exploiting multi-agent system technology within an autonomous regional active network management system. In: *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP*. [S.l.: s.n.], 2007. ISBN 9860130868. 61
- 90 WITTIG, T.; JENNINGS, N. R.; MAMDANI, E. H. Archon: framework for intelligent cooperation. *Intelligent Systems Engineering*, v. 3, n. 3, p. 168–179, Autumn 1994. ISSN 0963-9640. 65
- 91 PECHOUCEK, M.; THOMPSON, S. G.; BAXTER, J. W.; HORN, G. S.; KOK, K.; WARMER, C.; KAMPHUIS, R.; MARIC, V.; VRBA, P.; HALL, K. H.; MATURANA, F. P.; DORER, K.; CALISTI, M. Agents in industry: the best from the aamas 2005 industry track. *IEEE Intelligent Systems*, v. 21, n. 2, p. 86–95, March 2006. ISSN 1541-1672. 67
- 92 LOGENTHIRAN, T.; SRINIVASAN, D.; KHAMBADKONE, A. M. Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 1, p. 138–148, 2011. ISSN 03787796. 71
- 93 DIMEAS, A. L.; HATZIARGYRIOU, N. D. Operation of a multiagent system for microgrid control. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1447–1455, 2005. ISSN 08858950. 71

- 94 MEHTA, R.; MENON, B.; SRINIVASAN, D.; PANDA, S. K.; RATHORE, A. K.; JHQW, D.; RI, R.; MEHTA, R.; MENON, B. Market based multi-agent control of micro-grid. *2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, n. April, p. 1–6, 2014. 71
- 95 BOTTURA, R.; BORGHETTI, A. Simulation of the volt/var control in distribution feeders by means of a networked multiagent system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 4, p. 2340–2353, 2014. ISSN 15513203. 71
- 96 GEORG, H.; WIETFELD, C.; MÜLLER, S. C.; REHTANZ, C. A HLA based simulator architecture for co-simulating ICT based power system control and protection systems. In: IEEE. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 264–269. 71
- 97 HOPKINSON, K.; WANG, X.; GIOVANINI, R.; THORP, J.; BIRMAN, K.; COURY, D. EPOCHS: A platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 2, p. 548–558, 2006. ISSN 08858950. 71
- 98 KANSAL, P.; BOSE, A. Bandwidth and latency requirements for smart transmission grid applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 3, p. 1344–1352, 2012. ISSN 19493053. 71, 83
- 99 WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R.; KINNY, D. The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents and multi-agent systems*, Springer, v. 3, n. 3, p. 285–312, 2000. 75, 76
- 100 HOME - MAS2TERING. <<http://www.mas2tering.eu/>>. Acessado: 04/12/2018. 106