

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

Análise da Interoperabilidade de Sistemas de
Comunicações Móveis na Operação e
Controle Resiliente de Microrredes.

Francisco Martins Portelina Júnior

Itajubá, 19 de abril de 2018

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

Francisco Martins Portelina Júnior

**Análise da Interoperabilidade de Sistemas de
Comunicações Móveis na Operação e
Controle Resiliente de Microrredes.**

Tese 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: Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Fernando Ribeiro**

19 de abril de 2018

Itajubá

Resumo

O grau de inteligência atribuído a um sistema elétrico é diretamente proporcional à quantidade de informações coletadas através de seus sensores em tempo real, atuando através de uma integração da rede elétrica com as redes de comunicações de forma robusta, confiável e flexível. A modernização do sistema passa por várias etapas, desde a integração de sistemas de energia distribuídos, sistemas de armazenamento, à operação desconectada. Neste contexto, as microrredes, com as suas próprias unidades de geração de energia e cargas controladas, podendo trabalhar ilhadas ou conectadas à rede de energia principal, são consideradas essenciais para o desenvolvimento da próxima geração do sistema elétrico. A operação em modo ilhado, durante algum evento de falha ou desastre natural, permite que o sistema opere em cenários adversos, tais como falta de energia na rede principal, fornecimento de energia independente do sistema principal nos horários de pico devido a preços elevados de energia e, principalmente, para o fornecimento de energia em áreas remotas. No entanto, a operação de microrredes em modo ilhado requer uma maior atenção devido ao risco de interrupção, pois a capacidade de geração de energia é limitada. Consequentemente, as microrredes devem ser dotadas de sistemas capazes de gerir e controlar todas as fontes de recursos energéticos, a fim de manter o fornecimento de energia o maior tempo possível para os usuários conectados a microrredes. Essa gestão de energia é uma tarefa complicada e ambiciosa e exige a integração com um sistema de comunicação altamente robusto e confiável. Comunicações sem fio são flexíveis, escalonáveis e cobrem todos os requisitos necessários para suprir as necessidades das futuras aplicações inteligentes. A rede elétrica inteligente pode ser considerada como uma grande rede de sensores conectados, gerando um elevado número de informações, com várias máquinas trocando informações, com uma grande variedade de dispositivos conectados para controle e monitoramento do sistema. Todavia, a investigação e análise desta grande rede de sensores na operação resiliente do sistema de energia se faz necessária. Novas metodologias de controle e gestão de energia devem ser investigadas, bem como a influência e restrição de tecnologias de comunicação para prover conectividade ao sistema. Tendo em vista esta complexa integração, faz-se necessária uma análise precisa dos requisitos e parâmetros essenciais para o funcionamento de redes de comunicações aplicadas a sistemas operando em modo ilhado. Neste trabalho, são propostas metodologias para a gestão e controle de energia da microrrede com uma infraestrutura de comunicação robusta para maximizar e otimizar a operação em modo ilhado. Para amenizar a influência do consumo de cargas de comunicação durante o ilhamento, regras de controle são criadas para otimizar a resiliência, bem como fornecer energia pelo maior tempo possível. A análise do impacto do grande número de dispositivos conectados e as restrições impostas pelas diferentes tecnologias são analisadas, assim como regras de gestão de troca de mensagens

entre dispositivos com o objetivo de prover a maior robustez ao sistema. O intuito deste trabalho é contribuir com o estudo da operação otimizada de microrredes.

Palavras-chaves: eficiência energética, geração distribuída, microrredes, rede de comunicação, smartgrid.

Abstract

The intelligence attributed to a smart electrical system is dependent on the network of sensors that will play the role of control and sensing systems. The development of a smart electrical grid is only possible through the integration of robust and flexible communication network within the current electrical system. The modernization of the system goes through several stages, from the inclusion of distributed energy systems, storage systems to the islanded operation. In this context, microgrids, with their power generation units and controlled loads, able to operate isolated or connected to the main grid, are considered essential for the development of the next generation of the electrical system. Islanded mode operation allows the system to operate in adverse scenarios such as power failure in the primary network and independent power supply at peak hours due to high energy prices and mainly for the amount of energy in remote areas. However, the operation of microgrids in islanded mode requires significant attention due to the risk of interruption because the power generation capacity is limited and intermittent. Consequently, microgrids must be comprised of systems capable of managing and controlling all sources of energy resources to maintain the energy supply as long as possible for essential users connected to microgrids. This energy management is a complicated task and requires integration with a highly robust and reliable communication system. Wireless communications are flexible, scalable and cover all the requirements to meet the needs of future intelligent applications. The smart grid can be considered as an extensive network of connected sensors, generating a vast amount of information, with several machines exchanging data, with a wide variety of related devices for control and monitoring of the system. Therefore, the research and analysis of this extensive network of sensors in the resilient operation of the power system are necessary. New methodologies for control and management of energy should be investigated, as well as the influence and restriction of communication technologies to provide connectivity to the system. Given this complex integration, a precise analysis of the essential requirements and parameters for the operation of communications networks applied to systems operating in a critical environment is necessary. In this thesis, methodologies are proposed for the management and energy control of the microgrid with communication infrastructure to maximize and optimize the survival time in islanded mode operation. As a way, to decrease the influence of the consumption of communication loads during islanding, control rules are created to optimize the resilience as well as provide energy for the longest possible time. The analysis of the impact of a large number of connected devices and the restrictions imposed by the different technologies are analyzed, as well as management rules for message exchange between methods to provide the most significant robustness to the system. This thesis aims to contribute to the study of the operation of a microgrid in environments with scarce energy resources.

Keywords: communication networks, distributed generation, energy efficiency, micro-grids, smartgrids.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura geral de uma microrrede em configuração AC	27
Figura 2 – Níveis hierárquicos de controle de uma microrrede.	31
Figura 3 – Resposta do <i>droop</i> ao controle primário.	32
Figura 4 – Conectividade de uma rede de acesso celular em um sistema de distribuição [1].	42
Figura 5 – Fluxograma de dimensionamento da rede de acesso.	44
Figura 6 – Estrutura de uma estação rádio base [2].	50
Figura 7 – Modelo de confiabilidade de <i>Markov</i> para $n - 1$ estados independentes [3].	54
Figura 8 – Conectividade entre dispositivos em um sistema de distribuição [1].	56
Figura 9 – Sistema <i>IEEE</i> 13 barras modificado [1].	60
Figura 10 – Sistema <i>IEEE</i> 37 barras modificado [1].	60
Figura 11 – Variação da máxima taxa de dados máxima alcançada de acordo com a distância da estação rádio base.	62
Figura 12 – Requisitos mínimos de uma rede de comunicação para suportar <i>AMI</i> no padrão <i>eMTC</i>	63
Figura 13 – Requisitos mínimos de uma rede de comunicação para suportar <i>AMI</i> no padrão <i>NB-IoT</i> operando em toda a banda.	64
Figura 14 – Impacto da área de cobertura no número necessário de estações rádio base para os cenários simulados.	65
Figura 15 – Taxa de dados por estação rádio base.	66
Figura 16 – Probabilidade de erro de bit para diversas ordens de modulação para os cenários simulados.	67
Figura 17 – Eficiência espectral para a modulação <i>QPSK</i> para ambos padrões simulados.	67
Figura 18 – Consumo total por área para os cenários simulados.	68
Figura 19 – Eficiência em bits por joule para diferentes taxas de código e modulação <i>QPSK</i>	69
Figura 20 – Fluxograma de ações realizadas pelo <i>SGE</i> para uma dada janela de tempo.	72
Figura 21 – Sistema de distribuição de 34 barras modificado.	80
Figura 22 – Consumo de potência durante a operação da microrrede.	83
Figura 23 – Estado de carga total das baterias para o cenário simulado.	84
Figura 24 – Comparação do consumo de potência para as metodologias propostas.	85
Figura 25 – Estado de carga das baterias para as metodologias propostas.	86

Figura 26 – Consumo de potência dos consumidores prioritários para os cenários simulados.	88
Figura 27 – Eficiência energética dos cenários simulados.	88
Figura 28 – Confiabilidade do sistema de comunicação dedicada a microrrede para método híbrido.	91
Figura 29 – Interligação entre sistemas de distribuição com máquinas [4].	96
Figura 30 – Sistema de filas com prioridade [5].	101
Figura 31 – Sistema IEEE (<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>) de 13 barras adaptado.	103
Figura 32 – Tempo média de espera para sistema com preempção.	108
Figura 33 – Variação do tempo médio de espera na fila para diferentes aplicações inteligentes.	109
Figura 34 – Tempo média de espera para sistema sem prioridades.	109
Figura 35 – Tempo média de espera para sistema com e sem prioridade para a classe prioritária.	110
Figura 36 – Influência de diferentes taxas de chegada no desempenho do sistema.	111
Figura 37 – Estado de cargas das baterias do sistema para o método sem agendamento.	112
Figura 38 – Estado de cargas das baterias do sistema para diferentes agendamentos.	113

Lista de tabelas

Tabela 2 – Requisitos para aplicações em sistemas de distribuição inteligentes [6, 7].	36
Tabela 3 – Tecnologias de comunicação aplicadas a redes elétricas inteligentes [7].	38
Tabela 4 – Características dos padrões de comunicações entre máquinas [8, 9, 10, 11].	41
Tabela 5 – Requisitos de domínio para uma arquitetura de comunicação [12]. . . .	43
Tabela 6 – Volume de informação gerado por sincrofasores para diferentes taxas de amostragem [13].	58
Tabela 7 – Parâmetros de simulação	61
Tabela 8 – Regras de prioridade de consumidores na operação da microrrede. . . .	74
Tabela 9 – Modos pré-configurados de operação da microrrede.	74
Tabela 10 – Determinação dos modos de operação da microrrede.	77
Tabela 11 – Métodos de economia de energia para operação ilhada.	77
Tabela 12 – Características do modo de dormência.	78
Tabela 13 – Descrição da localização, do tipo e das características nominais das unidades de geração distribuída.	81
Tabela 14 – Parâmetros para o cálculo do sistema de comunicação.	82
Tabela 15 – Consumo de potência de dispositivos de uma estação rádio base.	82
Tabela 16 – Comparação de resultados para o cenário simulado.	84
Tabela 17 – Comparação de resultados para método rede sempre ativa e com modo de dormência suave.	85
Tabela 18 – Comparação de resultados dos cenários simulados.	87
Tabela 19 – Requisitos de comunicação para aplicações inteligentes.	99
Tabela 20 – Modelo proposto para gerenciamento de mensagens em redes inteligentes.	100
Tabela 21 – Parâmetros para o cálculo do sistema de comunicação.	105
Tabela 22 – Descrição da localização, do tipo e das características nominais das unidades de geração distribuída.	105
Tabela 23 – Parâmetros utilizados na simulação do modelo proposto com prioridades.	107

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>	18
AIR	<i>Ar Condicionado</i>	50
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>	15
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i>	35
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>	73
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>	48
BER	<i>Bit Error Rate</i>	49
BW	<i>Bandwidth</i>	48
CCM	<i>Centro de Controle da Microrrede</i>	26
CTMC	<i>Continuous-Time Markov Chain</i>	22
DTX	<i>Downlink Discontinuous Transmission</i>	19
eMTC	<i>Enhanced Machine Type Communication</i>	18
ERB	<i>Estação Rádio Base</i>	19
ERBs	<i>Estações Rádio Base</i>	19
GEN	<i>Geração de Energia Renovável</i>	75
GPS	<i>Global Positioning System</i>	57
HAN	<i>Home Area Network</i>	42
IEDs	<i>Intelligent Electronic Devices</i>	55
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	8
IoT	<i>Internet das Coisas</i>	16
ISM	<i>Industrial, Scientific & Medical Band</i>	39
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	18
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>	106
M2M	<i>Machine-to-Machine Communication</i>	16
MTC	<i>Machine Type Communication</i>	36
NAN	<i>Neighborhood Area Networks</i>	42
NB-IoT	<i>Narrowband Internet-of-Things</i>	18
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	48
PA	<i>Power Amplifier</i>	49
PDS	<i>Processador de Sinais de Banda Base</i>	50
PDU	<i>Phasor Distribution Unit</i>	57
PER	<i>Penetração de Energia Renovável</i>	75
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>	30
PMUs	<i>Phasor Measurement Units</i>	16
PU	<i>Portadora Única</i>	40

QAM	<i>Quadrature amplitude modulation</i>	66
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	41
RDA	<i>Rede de Distribuição Ativa</i>	55
REDS	<i>Recursos Energéticos Distribuídos</i>	26
REIs	<i>Redes Elétricas Inteligentes</i>	15
RF-Transceiver	<i>Small-Signal Radio Frequency Transceiver</i>	50
SAE	<i>Sistemas de Armazenamento de Energia</i>	26
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>	35
SCC	<i>Sensor de Controle de Carga</i>	26
SCE	<i>Sensor de Controle de Energia</i>	26
SGE	<i>Sistema de Gerenciamento de Energia</i>	16
SINR	<i>Relação Sinal/Ruído + Interferência</i>	45
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>	45
SOC	<i>State-of-Charge</i>	33
TCP/IP	<i>Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet</i>	41
TIC	<i>Tecnologias da Informação e da Comunicação</i>	15
VSI	<i>Inversor de Fonte de Tensão</i>	30
WAN	<i>Wide Area Network</i>	42

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Introdução	15
1.2	Revisão bibliográfica	17
1.3	Motivação e Objetivos	21
1.4	Organização do trabalho	23
2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES	25
2.1	Introdução	25
2.2	Arquitetura de uma Microrrede de Geração Distribuída	26
2.2.1	Fontes de Geração Despacháveis e Não-Despacháveis	28
2.2.1.1	Energia Eólica	28
2.2.1.2	Energia Fotovoltaica	29
2.2.2	Sistemas de Armazenamento de Energia	29
2.3	Operação de Microrredes de Geração Distribuída	30
2.4	Geração e Demanda em Microrredes	33
3	COMUNICAÇÕES APLICADAS A REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	35
3.1	Redes de Comunicação Aplicadas ao Gerenciamento e Controle	35
3.1.1	Tecnologias de Comunicação Aplicadas ao Sistema Elétrico	37
3.1.2	Redes Dedicadas a Comunicação Entre Máquinas	39
3.2	Arquitetura de uma Rede de Acesso Celular	41
3.2.1	Planejamento de Redes de Comunicação Dedicadas	42
3.2.2	Cálculo do Enlace de Propagação	43
3.2.2.1	Modelos de propagação de canal	45
3.2.2.1.1	Modelo de Okumura-Hata	46
3.2.2.1.2	Modelo COST 231 Hata	46
3.2.3	Dimensionamento da Área de Cobertura	47
3.2.4	Análise de Taxa de Dados em Sistemas de Distribuição	48
3.3	Consumo de Potência em Redes de Acesso	49
3.3.1	Consumo de Potência não-Variável	50
3.3.2	Consumo de Potência de Acordo com a Largura de Banda	51
3.3.3	Métricas de Eficiência Energética	52
3.4	Confiabilidade em Sistemas de Comunicação	53

4	ANÁLISE E DESEMPENHO DE REDES DE COMUNICAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS	55
4.1	Introdução às Redes de Distribuição Ativas	55
4.2	Infraestrutura de Comunicação Aplicada a um Sistema Ativo de Distribuição	56
4.3	Análise de Desempenho de Redes <i>M2M</i> aplicadas a Sistemas de Distribuição	59
4.3.1	Considerações Iniciais para o Desenvolvimento do Sistema	59
4.3.2	Simulação e Resultados	62
5	SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ENERGIA ENERGETICAMENTE EFICIENTE PARA MICRORREDES	70
5.1	Introdução	70
5.2	Proposta de um Método Híbrido para o de Gerenciamento de Energia	71
5.2.1	Nova regra de prioridade de consumidores	73
5.2.2	Modos de operação do sistema de gerenciamento de energia	74
5.2.3	Políticas de operação e estados da microrrede	74
5.2.3.1	Estado de cargas dos sistemas de armazenamento — C_1	75
5.2.3.2	Geração e Penetração de energia renovável — C_2 e C_3	75
5.2.3.3	Horário e Demanda — C_4 e C_5	76
5.2.4	Política Híbrida de Gerenciamento de Energia Referente as Cargas da Rede de Comunicação Implementada	76
5.2.5	Análise da Confiabilidade da Rede de Comunicação	78
5.3	Simulações e Resultados	79
5.3.1	Cenário Simulado I - A Influência de Redes de Comunicações no Controle e Monitoramento de Microrredes Autônomas	81
5.3.2	Cenário Simulado II - Análise de Desempenho do Método de Gerenciamento de Energia Híbrido	84
6	PROPOSTA DE UM MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS BASEADO EM PRIORIDADES PARA O GERENCIAMENTO DE DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS INTELIGENTES EM MICRORREDES	93
6.1	Introdução	93
6.2	Sistemas Cibernéticos Conectados a Redes Inteligentes	95
6.3	Requisitos de Tráfego para Comunicação em Redes de Distribuição Inteligentes	98
6.4	Proposta de Modelo de Tráfego para Sistemas de Distribuição de acordo com Prioridades	99
6.4.1	Sistema de Filas com Prioridade	100
6.5	Simulação e Resultados	103

6.5.1	Considerações Iniciais	103
6.5.2	Caso Simulado	105
6.5.3	Resultados Simulados	107
6.5.4	Influência do Agendamento de Tráfego na Resiliência da Microrrede	110
7	CONCLUSÕES	114
7.1	Principais contribuições	116
7.2	Trabalhos Futuros	119
	REFERÊNCIAS	120

1 Introdução

1.1 Introdução

O atual sistema elétrico se encontra ultrapassado, com pouca ou nenhuma conectividade e com um alto custo de operação. Devido a isso e à crescente demanda de energia de fontes renováveis, o aumento dos preços das fontes de energia fósseis e a necessidade de expansão da atual rede elétrica, surge o conceito das REIs (*Redes Elétricas Inteligentes*) [14]. Nesse sentido, a integração com as TIC (*Tecnologias da Informação e da Comunicação*) desempenham um papel vital na modernização do sistema elétrico [15]. Com as TIC, os sistemas de energia serão controlados e monitorados, permitindo que seus operadores detectem e reajam a mudanças internas e externas da rede em tempo real com confiabilidade [16].

Nesse contexto, a robustez, flexibilidade e confiabilidade são características essenciais para o funcionamento dessa rede inteligente [17]. A integração de fontes energéticas distribuídas, resposta à demanda, integração de veículos elétricos e outros fatores somente serão possíveis se o sistema integrado possuir características que evitem o colapso do sistema durante falhas e perturbações. Entre suas principais funções, a rede inteligente deve ser capaz de se recuperar automaticamente, integrar recursos energéticos distribuídos, melhorar a qualidade da energia, integrar consumidores e concessionárias, melhorar a eficiência da operação da rede, dar suporte a uma infraestrutura de comunicação robusta e operar em modo ilhado [14].

Todas essas ações de inteligência somente serão possíveis com a introdução de dispositivos eletrônicos inteligentes, tornando a rede capaz de antecipar, detectar e resolver problemas no sistema em tempo real de execução [18]. Os setores de geração e transmissão de energia são bastante eficientes e com uma inteligência agregada maior que os sistemas de distribuição. A grande maioria dos problemas relacionados a falhas e perturbações nas redes elétricas são concentrados no sistema de distribuição, o qual não é provido de um sistema de comunicação capaz de prevenir falhas e promover respostas rápidas para constantes mudanças no ambiente de operação.

Portanto, é na distribuição que deve acontecer a maior revolução, com a integração de energias renováveis a automatização e controle inteligentes [19]. Como forma de incorporar todos esses novos avanços tecnológicos, a AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) é apontada como o primeiro passo na modernização do sistema [14]. Esta será capaz de fornecer um sistema de comunicação bidirecional entre concessionárias e consumidores, sendo não somente responsável por realizar medições através de medidores inteligentes,

mas também responsável pela resposta à demanda, precificação e fornecimento de dados instantâneos para gerenciar o balanço do sistema. Além disso, em futuras redes de distribuição há uma enorme preocupação com problemas relacionados à estabilidade de tensão devido à alta penetração de recursos energéticos distribuídos e cargas dinâmicas [20]. Para este fim, *PMUs (Phasor Measurement Units)* serão implementados na rede de distribuição para fornecer as mesmas funcionalidades e vantagens que já fornecem para os sistemas de transmissão [21].

Assim, pode-se concluir que um sistema de distribuição inteligente será altamente dependente de uma grande quantidade de dispositivos eletrônicos inteligentes, como sensores, atuadores e disjuntores [22]. Esses dispositivos são caracterizados por trocarem informações sem ou quase nenhuma interação humana, caracterizando *M2M (Machine-to-Machine Communication)* [23]. A rede inteligente, para executar todas as suas novas funcionalidades, será também altamente dependente de uma infraestrutura de comunicação capaz de suportar uma grande quantidade de dispositivos, com alta confiabilidade, baixo custo de infraestrutura e mobilidade. Toda essa integração entre os dispositivos *TIC* formam uma grande rede de sensores que está totalmente interligada ao conceito de *IoT (Internet das Coisas)* [24].

Todos estes dispositivos inteligentes serão responsáveis pelo monitoramento e controle do sistema. Em condições normais, a rede inteligente será abastecida pela rede principal de energia elétrica. Entretanto, durante qualquer falha ou interrupção, o sistema terá inteligência o suficiente para detectar a falha e se autorrecuperar. Porém, se não for possível a reconexão automática do sistema, ele será desconectado e irá operar isoladamente, formando um pequeno sistema de distribuição, caracterizado pela formação de uma microrrede [25].

Microrredes são pequenos sistemas de distribuição com seus próprios recursos de energia distribuídos, cargas e unidades de armazenamento [26]. Elas podem operar conectadas ou desconectadas da rede principal. Durante a operação desconectada, diferentes níveis de controle descrevem a operação da rede [27]. Uma vez que não é possível determinar a duração da indisponibilidade da rede na operação ilhada, é de suma importância fornecer energia às cargas durante o maior tempo possível. Este objetivo é alcançado aplicando a abordagem de gerenciamento de energia para maximizar o tempo de fornecimento de energia com o menor custo possível [28]. O *SGE (Sistema de Gerenciamento de Energia)* é modelado para determinar o melhor modo de operação da rede de acordo com as informações coletadas do sistema e organizado em diferentes variáveis de controle usadas para a tomada de decisões. Esses modos de operação possuem ações predefinidas, incluindo o desligamento de carga de clientes de baixa e média prioridade e etapas de resposta à demanda para garantir a operação mais segura do sistema.

Essas ações de gerenciamento da microrrede dependem de uma infraestrutura de

comunicação robusta que suporte rigorosos requisitos de aplicações inteligentes [29]. A comunicação em tempo real dará suporte ao aumento de inteligência da microrrede, porém com um alto consumo de energia [30]. Em situações críticas, como a operação em modo ilhado, esta situação pode ser um problema, uma vez que a disponibilidade de energia é limitada no tempo. Neste contexto, este trabalho visa a estudar o conceito de sistemas de gerenciamento de energia para maximizar o tempo de sobrevivência de cargas essenciais, analisando o impacto de uma rede de comunicação sem fio de banda larga robusta com conexão massiva de dispositivos no tempo útil de sobrevivência de uma microrrede. Todas as ações de controle têm o objetivo de aumentar a resiliência da microrrede, porém comprova-se que essas ações de resiliência possuem uma relação de compromisso com a confiabilidade da rede de comunicação.

Durante o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia, considera-se que as ações de controle para diferentes modos de operação dependem de uma mínima conectividade da rede de comunicação. Isto é, em ambientes críticos, com pouca disponibilidade de energia, diversos dispositivos eletrônicos trocam informações para determinar o estado atual da microrrede, porém devido à falta de recursos de energéticos, o controle sobre a infraestrutura de comunicação e a troca de mensagens pode ser perdida. Assim, foi elaborado um esquema de prioridade de mensagens que variam de acordo com o tipo de aplicação inteligente e o estado atual da microrrede. Esta metodologia permite um controle maior sobre a rede de comunicação, com regras de prioridade que visam a maximizar o controle inteligente da microrrede. E com o intuito de otimizar o tempo de sobrevivência da microrrede, regras de tráfego de mensagens foram criadas como solução à resiliência da microrrede.

1.2 Revisão bibliográfica

A modernização da rede elétrica inteligente aumenta proporcionalmente ao número de dispositivos conectados, o que ocasiona uma maior dependência de uma infraestrutura de comunicação. Esses dispositivos eletrônicos precisam se intercomunicar e tomar ações de controle com diferentes e rigorosos requisitos. Portanto, a rede de comunicação deve se adaptar a esses novos desafios.

Várias tecnologias podem ser usadas para atender aos rigorosos requisitos da rede de comunicação [7]. No entanto, muitas delas não são adequadas para resolver os desafios de uma rede de comunicação totalmente caracterizada pela comunicação entre máquinas [31], que será o futuro cenário das redes elétricas inteligentes. A comunicação sem fio é uma solução proeminente e econômica para suportar comunicações de dispositivos inteligentes [32]. Esses sistemas são classificados principalmente pelo seu alcance de cobertura, taxa de dados, flexibilidade e robustez. Para comunicações de curto alcance e baixas taxas

de dados, *Bluetooth* [33] e *ZigBee* [34] são as soluções mais adequadas, principalmente para monitoramento de área local, como casas ou edifícios. A tecnologia Wi-Fi de baixa potência (802.11ah) também é adequada para comunicações de pequeno e médio alcance, suportando altas taxas de dados [35]. Porém, todas as tecnologias citadas operam na faixa do espectro não-licenciado, mais susceptíveis a ruído e interferências.

Sistemas de comunicação móveis de banda larga são potenciais candidatos para aplicações em redes elétricas inteligentes [36]. São caracterizados pela robustez, confiabilidade e requerem baixo investimento em infraestrutura de rede para obter a cobertura e taxa de dados exigidas em diferentes áreas geográficas [37]. A tecnologia celular é uma solução interessante, pois satisfaz os requisitos necessários para aplicações voltadas para REIs, como baixa latência, alta/média/baixa taxa de dados, alta confiabilidade e flexibilidade [38].

Entretanto, as atuais tecnologias celulares possuem algumas restrições e características diferentes das necessidades de aplicações para redes elétricas inteligentes [39]. Os serviços de banda larga celulares são baseadas principalmente no tráfego de voz e dados, diferentemente dos atuais requisitos que exigem que a rede suporte diferentes tipos de serviços e usuários. Devido ao grande número de sensores que são distribuídos ao longo da rede, as redes de comunicação devem ser capazes de suportar a conexão em massa de máquinas [40]. Questões relacionadas à capacidade de usuários conectados à rede, por exemplo, requerem que medidores enviem mensagens de pequeno tamanho, exigindo uma baixa vazão de dados do sistema, enquanto funções de alarme e proteção para subestações requerem uma vazão elevada de dados, com mensagens em torno de megabits por segundo. Um outro quesito é a latência, principalmente em ambientes de controle e supervisão. Em redes celulares baseadas em tecnologia da quarta geração, é limitada a 10 milissegundos. Entretanto, existem funções de autorrecuperação que demandam latências menores que 1 milissegundo, exigindo mais das futuras redes móveis [41].

Para aplicações voltadas para redes elétricas inteligentes, as tecnologias móveis baseadas em padrões M2M emergem como solução viável [42]. A comunicação móvel M2M opera no espectro licenciado e estabelece uma conectividade confiável, que é muito importante para muitas aplicações inteligentes, especialmente no controle da rede inteligente e no gerenciamento de falhas [43]. As redes de comunicação entre máquinas baseadas em serviços de banda larga móvel geram um fluxo massivo de dados, diferentemente de uma rede convencional móvel de comunicação [44]. A interconectividade entre uma rede móvel e uma rede de tipo de máquina foi padronizada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), com base na tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) [45]. Dois padrões foram propostos para suportar a comunicação entre máquinas. Primeiramente, foi proposto o padrão eMTC (*Enhanced Machine Type Communication*) [46] e, em seguida, o padrão NB-IoT (*Narrowband Internet-of-Things*) [11].

Vários trabalhos propuseram sistemas **M2M** aplicados ao cenário de redes inteligentes [47]. O trabalho [48] propõe uma análise de cobertura e capacidade baseada em tecnologia móvel convencional, enquanto em [49], uma arquitetura de rede inteligente visa analisar a influência de problemas de propagação de sinal. O trabalho em [50] avalia a capacidade necessária para vários dispositivos em um cenário de comunicação entre máquinas e [51] avalia a capacidade necessária para vários dispositivos em uma rede **M2M**. No entanto, nenhum dos trabalhos citados consideram todos os requisitos necessários para o projeto da camada física voltado para aplicações inteligentes, tais como o consumo energético e a eficiência energética da rede de comunicação e a sua influência na confiabilidade do sistema.

Em uma rede de acesso celular, a questão chave é o consumo energético necessário para manter a rede ativa, confiável e robusta. O consumo mundial de energia das **TIC** é de cerca de 7% e será de aproximadamente 14,57% em 2020 [52]. À medida que mais dispositivos forem conectados à rede, maior será o consumo e emissões de carbono.

A maior parte do consumo de energia numa rede de acesso de celular está associada ao consumo de **ERBs** (*Estações Rádio Base*), que são responsáveis por cerca de 60–80% do consumo total de energia da rede de acesso móvel [53], tendo a maior participação no consumo de energia. Vários modelos de consumo de energia de **ERBs** foram investigados em [54]. O modelo proposto em [55] é um modelo de ERB com parâmetros que consideram a largura de banda e o número de antenas. Em [56], um modelo que leva em consideração a variação do tráfego de usuários ao longo do período de um dia é analisado. Em [2] é investigada a influência de diferentes componentes de uma estação base e a sua dependência em relação à variação de tráfego de usuários ao longo do tempo.

Com o intuito de tornar a **ERB** (*Estação Rádio Base*) mais sustentável, diminuindo o seu consumo e emissão de gases, modos de dormência com diferentes profundidades podem ser aplicados, e foram primeiramente investigados em [57, 58]. Os modos de dormência são uma técnica onde as **ERBs** podem ser totalmente desligadas durante períodos de tempo ou componentes de hardware de sua estrutura são colocadas em modo de baixo consumo. Por exemplo, o modo de dormência mais utilizado desliga o amplificador de potência para a redução do consumo de energia [59]. Um modo de economia potencial que leva em conta a variação do tráfego de usuários na rede foi investigado em [60]. Em [61], os autores estudaram a baixa eficiência das **ERBs** em horas de pico de tráfego e propõem uma abordagem de *small breathing* para categorizar os modos de dormência de acordo com o nível da rede, colocando a ERB para dormir por pequenos instantes de tempo.

Outra técnica de economia de energia para **ERBs** é a **DTX** (*Downlink Discontinuous Transmission*), proposta em [62], que tem um enorme potencial, como aplicação de modos de dormência, como citado em [63]. Isso é possível porque, durante os modos de dormência, vários componentes de hardware são colocados para dormir e seus eventos de

ativação e desativação são programados de acordo com mudanças no sistema. Um ponto interessante é que a desativação de componentes e modos de dormência são utilizados em conjunto para otimizar a redução do consumo de energia [64]. No entanto, a desativação de componentes de hardware e modos de dormência apresentam algumas desvantagens na confiabilidade de um sistema de comunicações. A profundidade do modo de dormência pode ser projetada para ser da ordem de microssegundos ou até horas. Este período afeta diretamente o tempo de religamento dos equipamentos e a reconexão do enlace de comunicação [65, 66] com impacto direto na latência de comunicação e confiabilidade do sistema de operação.

Outras iniciativas foram tomadas para diminuir o consumo de estações rádio base devido à necessidade de aproveitamento de fontes menos poluidoras [67]. Operadores em todo o mundo têm buscado novas formas de diminuir o impacto do consumo de energia de comunicação com a utilização de estações rádio base autônomas ou híbridas para reduzir as emissões de CO_2 e maximizar a eficiência energética [68].

Como pode ser observado, muita atenção foi dada ao efeito de sistemas de comunicação em ambientes normais de operação [38] focados em ambientes urbanos [47]. Porém, poucas pesquisas analisam o impacto da integração de inteligência em ambientes críticos, como em microrredes. Adicionando mais inteligência à microrrede, os sistemas multiagentes devem ser integrados à rede de distribuição para melhorar o controle da microrrede durante a interrupção de energia [15]. Em [69], mostra-se a importância de sistemas de energia autônomos inteligentes para gerenciar microrredes durante a falta de energia. No entanto, o trabalho proposto em [70] apresenta um projeto alternativo do trabalho anterior, onde foi proposta uma arquitetura totalmente integrada entre todos os agentes do sistema para aumentar a inteligência da rede, adicionando recursos para todo o sistema.

A operação resiliente de microrredes é investigada em [71] utilizando uma abordagem distribuída baseada em sistemas multiagentes, em vez da abordagem de controle centralizado, proporcionando uma maior flexibilidade ao ambiente de sistemas elétricos inteligentes. Neste trabalho, os agentes propostos operam conjuntamente para detectar e isolar a falha, restaurando o serviço para a maior quantidade de consumidores possível.

Em [72] é proposta uma abordagem de operação resiliente em sistemas de distribuição que busca seccionar a porção defeituosa da rede em microrredes menores de acordo com a capacidade de geração de energia elétrica disponível em cada uma. Em [73], é proposto um sistema de gerenciamento de energia com o objetivo de aumentar o tempo de fornecimento de eletricidade durante um evento de interrupção através de regras de prioridade de cargas. De acordo com os resultados mostrados, o método se mostrou resiliente. Porém, neste trabalho pouca atenção foi dada ao consumo de energia da infraestrutura de comunicação em operação na microrrede e as cargas referentes à rede de comunicação

são sempre consideradas ativas e prioritárias no cálculo do balanço, o que pode levar a valores de estimativa de tempo de sobrevivência errados.

Todos os trabalhos analisados abordam a importância do sistema de gerenciamento de energia integrado sem uma rede de comunicação eficiente para controle e gerenciamento de recursos energéticos em operação isolada, onde as fontes funcionam em conjunto com sistemas de armazenamento de energia para aumentar a resiliência da rede. Em cenários onde o sistema de energia opera desconectado, uma infraestrutura de comunicação confiável torna-se essencial e o projeto e a implementação da rede não devem se basear unicamente em demandas de cobertura e capacidade, mas, também, englobar todo o consumo de energia do sistema de comunicação e como o sistema de gerenciamento de energia irá operar com a ausência de comunicação.

Um outro grande desafio dentro de uma rede elétrica inteligente é a gestão dos milhares de dispositivos conectados à rede e o gerenciamento dessa grande quantidade de tráfego de dados gerada na rede de comunicações. Alguns modelos de tráfego foram propostos na literatura. Em [74, 75] foram combinadas as diferentes características de tráfego de dispositivos inteligentes para determinar o tempo médio na fila em um modelo analítico. Em [76], um estudo de um sistema de filas com prioridade aplicado a um sistema de medição inteligente foi realizado, porém neste trabalho não foi levada em conta a relevância de cada mensagem transmitida, nem a influência de diferentes tipos de tráfego.

Em [77], um sistema de filas sem prioridade para diferentes classes de serviço foi considerado. Neste trabalho, a ordem de serviço é priorizada de acordo com a ordem de chegada no servidor, o que pode diminuir a confiabilidade da rede, pois o tempo de serviço no servidor pode ser alto, ocasionando perdas de pacote. O trabalho [78] determina de maneira eficiente o volume de dados gerado e a ser enviado pelos medidores inteligentes a seus pontos de acesso. Em [79] foi computado o tráfego gerado para diferentes serviços inteligentes de acordo com a frequência de transmissão e tamanho do pacote a ser transmitido. A análise da intensidade de tráfego de medidores inteligentes em situações críticas e operação normal foram analisados em [80].

Entretanto, nenhum destes modelos leva em consideração a operação de diversos serviços inteligentes simultaneamente, com ordem de prioridade no servidor e diferentes requisitos e como a gestão destas mensagens afeta o funcionamento da microrrede de acordo com seu tempo de sobrevivência e como o agendamento destas aplicações irá influenciar e otimizar o tempo de sobrevivência da microrrede.

1.3 Motivação e Objetivos

A constante necessidade de modernização do sistema propõe novos desafios, ainda mais em cenários de operação crítica. A integração com uma infraestrutura de comuni-

cação robusta se faz necessária para o controle e gerenciamento de todos os agentes no sistema. Em operação ilhada, o cenário se torna ainda mais complexo devido à pouca disponibilidade energética. Portanto, estudar o impacto e novas ações de controle para maximizar e otimizar o tempo de sobrevivência da rede se torna essencial. Sabendo disso, o presente trabalho tem como objetivos:

- Modelar, dimensionar e avaliar o desempenho de uma rede de comunicação eficiente baseada em padrões de comunicação entre máquinas para suportar aplicações de futuros sistemas ativos de distribuição considerando requisitos de operação em cenários críticos. Com relação a este objetivo, este trabalho propõe uma análise precisa sobre o desempenho da camada física a partir dos atuais padrões propostos;
- Analisar a relação de compromisso entre cobertura, capacidade e consumo de energia e como influenciam a operação do sistema considerando as demandas atuais da rede e as limitações dos padrões entre máquinas.
- Considerando a existência de recursos de geração distribuída no sistema elétrico de potência, investigar o impacto do consumo de potência de cargas de telecomunicações e como elas influenciam a confiabilidade de operação do sistema.
- Propor uma nova abordagem de um sistema de gerenciamento de energia com o intuito de otimizar e maximizar a vida da microrrede e alcançar a máxima eficiência energética. Uma metodologia híbrida é proposta para o gerenciamento e controle de cargas. As cargas referentes à infraestrutura de comunicação não são mais consideradas cargas de alta prioridade, mas, sim, cargas autoadaptáveis de acordo com o estado de operação da microrrede. Diferentes profundidades de modos de dormência são aplicadas. Durante a operação em modo ilhado, todo o sistema de comunicação pode ser desligado, ou apenas alguns dispositivos da estação base podem ser desativados, diminuindo o consumo de energia e alcançando a máxima eficiência energética. Esta estratégia estabelece uma relação de compromisso entre máxima resiliência e operabilidade de sistemas de comunicação. Desta maneira, faz-se necessária a análise destas ações através de *CTMC (Continuous-Time Markov Chain)*.
- Modelar e conceber um sistema de gerenciamento e controle de tráfego de mensagens através de um sistema de fila com prioridades. O modelo de tráfego proposto é baseado em três classes através de um sistema de fila com preempção. As três classes de tráfego correspondem à prioridade de cada aplicação inteligente no sistema, podendo agregar mais de uma aplicação com a mesma prioridade. Esta suposição garante que a mensagem de maior prioridade será tratada de maneira preferencial no centro de controle, evitando atrasos e perda na qualidade de serviço. Neste modelo será também analisada a influência da gestão destas mensagens no gerenciamento

de energia eficiente para controlar e monitorar a operação da microrrede, com o intuito de maximizar a resiliência da rede.

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir com o estudo da operação de microrredes. Num primeiro instante, com o correto dimensionamento de uma rede de comunicação apropriado levando em conta requisitos que não são usualmente empregados na análise de uma rede de comunicação. Conseqüentemente, este trabalho estuda e avalia o impacto dessa infraestrutura de comunicação em ambientes com poucos recursos energéticos disponíveis. Devido à avaliação deste impacto, metodologias são propostas para a operação eficiente do sistema, com ou sem a integração de uma rede robusta de comunicações integradas ao sistema elétrico.

1.4 Organização do trabalho

O presente trabalho se organiza da seguinte maneira. O capítulo 1 mostrou uma breve introdução sobre o tema tratado e as considerações iniciais. Posteriormente, apresentou a revisão bibliográfica dos temas a serem investigados, mostrando o estado da arte atual da pesquisa e identificando a motivação e os objetivos que se pretendem atingir ao final dele.

O capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos sobre os temas tratados neste trabalho e relacionados ao sistema elétrico de potência. São apresentados os temas de fundamentos de microrredes, controle de *droop* e a relação entre geração e demanda para a operação do sistema em ilha.

O capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos de redes de comunicações aplicadas a sistemas de distribuição. São apresentados os requisitos essenciais para o dimensionamento da infraestrutura de comunicação focados em capacidade de transmissão de dados, cobertura e consumo de potência. Neste capítulo também são apresentadas as características de padrões de comunicação entre máquinas e sua aplicabilidade em sistemas que demandam grande conectividade de dispositivos.

O capítulo 4 apresenta o dimensionamento e a análise de uma infraestrutura de acesso celular baseada em padrões de comunicação entre máquinas aplicada a sistemas de distribuição. Através desse estudo, analisa-se a relação de compromisso entre os requisitos de cobertura, capacidade e consumo de energia da rede de comunicação. A pesquisa engloba fatores como a necessidade de a rede suportar uma conexão massiva de dispositivos e como isso influencia a operação do sistema, considerando as demandas atuais e futuras do sistema elétrico e as limitações dos atuais padrões de comunicação entre máquinas.

O capítulo 5 apresenta uma nova metodologia para o sistema de gerenciamento de energia para a maximização do tempo de fornecimento de energia elétrica em uma

microrrede operando em modo isolado. Esta nova metodologia tem como objetivo reduzir o impacto dos sistemas de comunicações na sobrevivência da rede. Também se estuda como ações de controle em relação à carga da infraestrutura de comunicação devem ser tomadas para aumentar a eficiência energética do sistema. Neste capítulo, ainda, é apresentada a relação de compromisso entre otimização do tempo de fornecimento de energia de uma microrrede e o drástico impacto na confiabilidade do sistema de comunicação.

O capítulo 6 apresenta uma metodologia para gerenciamento e controle de tráfego de diversos dispositivos conectados à microrrede autônoma. Esta metodologia irá auxiliar o sistema de gerenciamento de energia para a maximização do tempo de fornecimento de energia elétrica em uma microrrede operando em modo isolado. Neste capítulo, é descrita a operação dos dispositivos eletrônicos dentro da microrrede quando se encontra em operação crítica de funcionamento.

O capítulo 7 apresenta as conclusões decorrentes do trabalho realizado, apontando caminhos possíveis para futuros trabalhos que podem resultar em contribuições significativas para o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes.

2 Sistemas de Distribuição Inteligentes

Devido à enorme preocupação com a alta emissão de gases, o efeito estufa e a atual forma de geração de energia, principalmente baseada em combustíveis fósseis e com custos elevados, a implantação de sistemas de distribuição ativos, com fornecimento de energia aplicando fontes renováveis como meio de geração de energia, torna-se essencial para a modernização do sistema elétrico na busca de energias de fontes limpas. Usando técnicas apropriadas de controle juntamente com tecnologias avançadas de comunicação, os sistemas de distribuição poderão trabalhar de maneira independente do sistema central, de forma isolada, em microrredes, permitindo uma participação mais ativa de todos os agentes do sistema de potência. Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos essenciais para o controle e gerenciamento destas pequenas ilhas de geração distribuída.

2.1 Introdução

O sistema elétrico atual é unidirecional e dividido em três grandes blocos interligados [7]. A geração concentra as plantas onde grandes blocos de energia são gerados, englobando hidrelétricas, termelétricas e grandes parques eólicos. O sistema de transmissão é responsável pela interligação entre a geração e o sistema de distribuição de energia, permitindo que o sistema elétrico possa operar de forma otimizada do ponto de vista técnico e econômico. Finalmente, o último estágio é a distribuição, onde é realizada a transferência de energia para o consumidor final.

Os sistemas de distribuição são considerados passivos e radiais, em que a potência flui em apenas uma direção: da transmissão ao sistema de distribuição [17]. Estes sistemas não são dotados de inteligência suficiente para operações de controle e monitoramento ou autorrecuperação [19]. Assim, atualmente, a distribuição de energia é responsável por aproximadamente 90% das falhas no setor elétrico [14]. Entretanto, nos últimos anos, o formato destas redes vem mudando com a penetração massiva de geração distribuída no sistema [81].

A integração dessas novas fontes intermitentes traz mudanças consideráveis para o planejamento e operação do sistema de energia, introduzindo uma complexidade considerável. Porém, se operada de forma adequada pode trazer muitos benefícios [26].

A operação em microrredes de geração distribuída é a principal característica destes novos sistemas de distribuição com alta inserção de energias e fontes intermitentes. Porém, sua operação não é uma tarefa trivial e pode ser realizada de maneira descentralizada ou centralizada [82]. De maneira descentralizada, as decisões são tomadas de forma

autônoma, independentes, por meio da configuração dos sensores de controle de cargas e de fontes de energia, ou por meio de entidades inteligentes que formam sistemas multiagentes, os quais são organizados em diferentes níveis visando à otimização do sistema. Na operação centralizada, a informação é enviada para um centro de controle que irá reunir os dados e tomar decisões de acordo com as mensagens recebidas de todos os dispositivos na rede. As decisões são enviadas de volta aos diferentes dispositivos inteligentes para que a ação correta seja tomada. Embora seja a ideal para a operação do sistema, essa abordagem é muito dependente de um sistema de comunicação robusto e necessita de alto poder computacional para determinar soluções em tempo hábil.

Para que seja possível analisar corretamente o planejamento e controle do sistema autônomo, deve-se entender sua arquitetura e seus modos de operação, que serão descritos nas próximas seções.

2.2 Arquitetura de uma Microrrede de Geração Distribuída

As pequenas ilhas de geração distribuída podem apresentar diversas estruturas. As principais diferenças entre elas são o tipo da rede (alternada ou contínua), a topologia e as fontes de geração disponíveis. Um exemplo típico de microrrede é apresentado na Figura 1.

Observando a Figura 1, pode-se notar que a microrrede é formada por três alimentadores conectados ao sistema principal. O lado de baixa tensão está ligado ao de alta tensão através de um transformador. É importante notar que o ponto em que a microrrede está ligada à rede elétrica principal é denominado de ponto de acoplamento comum. Um disjuntor irá permitir o desligamento, ou a separação, da microrrede da rede principal em caso de falha e/ou perturbação. A partir deste momento, esta nova rede, que foi formada através do desligamento da rede principal, estará operando no modo ilhado.

A operação e o controle da microrrede em modo de operação ilhado é feita através de agentes distribuídos na rede [84]. O CCM (*Centro de Controle da Microrrede*) recebe as informações de todos os sensores espalhados pela rede, tanto dos SCC (*Sensor de Controle de Carga*) quanto dos SCE (*Sensor de Controle de Energia*). O centro de controle é responsável por manter tensão e frequência em níveis aceitáveis, determinar conexão e desconexão de carga, coordenar fontes de energias renováveis, baterias e realizar a resposta à demanda.

Os REDs (*Recursos Energéticos Distribuídos*) são primordiais para o funcionamento e operação de microrredes. São recursos de pequena escala e modulares que podem ser interligados à rede elétrica ou conectados diretamente à instalação do usuário final para suprir a demanda local [85]. Os recursos energéticos distribuídos podem ser classificados como fontes de geração despacháveis, fontes de geração não-despacháveis e SAE

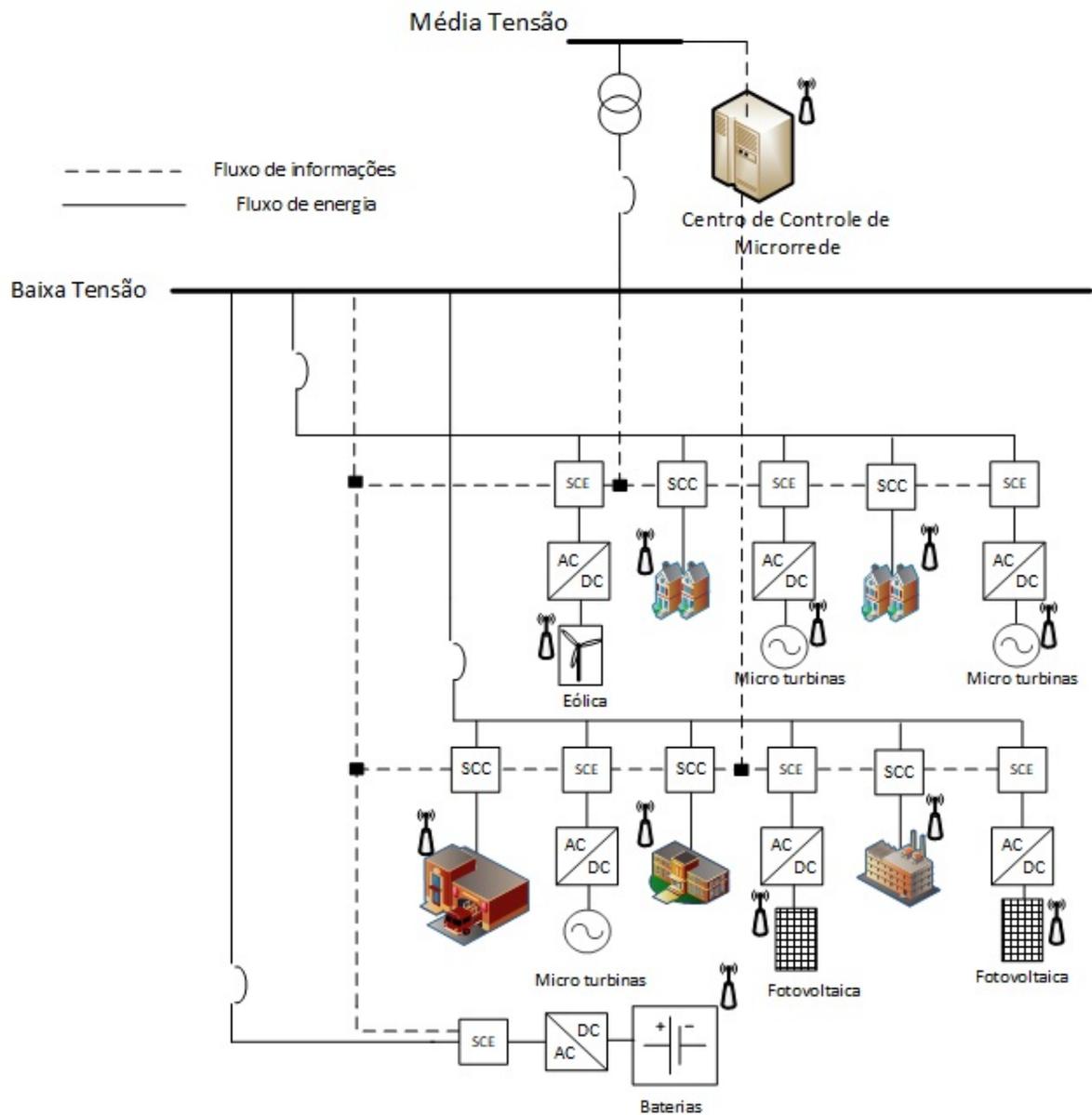


Figura 1 – Estrutura geral de uma microrrede em configuração AC adaptada de [83].

(*Sistemas de Armazenamento de Energia*). Nas fontes de tipo despacháveis, as quantidades de geração de energia podem ser controladas, isto é, o combustível primário pode ser armazenado. Em contraste, as fontes não-despacháveis geralmente são fontes renováveis, como solar com captação através de painéis fotovoltaicos ou eólica com captação através de turbinas de vento que não podem ser controladas por causa de sua característica intermitente. Essas fontes são interligadas a unidades de armazenamento de energia, que serão responsáveis por compensar o desequilíbrio entre geração e carga, a fim de garantir a frequência constante e fornecimento de energia durante um período de falha ou período de baixa geração devido à intermitência das fontes. Uma breve discussão sobre cada uma dessas categorias é realizada nas próximas seções.

2.2.1 Fontes de Geração Despacháveis e Não-Despacháveis

As fontes de energia despacháveis possuem como característica principal a saída de potência controlada pelo centro de controle da microrrede. Este tipo de geração é responsável pelo balanço de potência e controle de tensão, desde que seja possível atuar sobre as fontes disponíveis para o controle de injeção de potência e tensão na saída. Alguns exemplos de fontes de geração despacháveis são microturbinas, células combustíveis e pequenas plantas hidroelétricas [85].

Por outro lado, as fontes de geração de energias renováveis fazem parte do tipo de geração não-despachável. Em contraste com unidades despacháveis, neste tipo de geração não é possível controlar a potência como consequência da volatilidade e intermitência de condições climáticas que modificam a disponibilidade de energia ao longo do dia [85]. Neste caso, a potência injetada está relacionada com a disponibilidade da fonte primária, independentemente da tensão e da frequência de controle. Os principais exemplos de geração não-despachável são as fontes de geração solar e eólica, que serão brevemente discutidas nas próximas subseções.

2.2.1.1 Energia Eólica

As fontes de energia através da captação do vento são abundantes e possuem grande potencial. A produção deste tipo de energia se baseia no movimento das massas de ar causado pelas diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, uma vez que a radiação solar recebida na terra é maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares [86]. Os ventos mais fortes e constantes ocorrem nas camadas mais altas da atmosfera terrestre e, à medida que se diminui a altitude, os efeitos orográficos aparecem, causando turbulência e diminuição na velocidade do vento.

A turbulência atmosférica afeta a conversão de energia, principalmente devido às variações na direção do vento. Contudo, seu impacto é mais significativo nos esforços aos quais a turbina fica submetida, sendo considerado um fator determinante no projeto [86]. A variabilidade da velocidade do vento significa que a potência elétrica também é flutuante, embora em um intervalo menor, pois a turbina funciona como um filtro passa-baixa.

O caráter aleatório do vento requer o uso de processos estocásticos para determinação de sua velocidade durante o ano. As variações na velocidade são melhores descritas por funções de distribuição de probabilidades, como a distribuição de *Weibull*. O cálculo da potência produzida por meio de fonte eólica é feito pela convolução da curva de potência da turbina com a curva de probabilidade de velocidades de vento.

2.2.1.2 Energia Fotovoltaica

A produção de energia fotovoltaica tem imensas vantagens sobre outras fontes não-renováveis, como a disponibilidade abundante de recursos, ausência de emissões, baixo custo de operação, confiabilidade e modularidade, entre outros [87].

Teoricamente o potencial fotovoltaico mundial é alto, porém a incidência de radiação depende da localização geográfica, do clima e da latitude [88]. Entretanto, como os picos de geração e de carga não coincidem no tempo, a capacidade de geração é limitada. Através de técnicas de predição, é possível calcular o comportamento de uma planta fotovoltaica em várias condições de radiação, temperatura e carga, o que se torna muito importante para seu dimensionamento e de seus conversores, bem como para o projeto do controlador de máxima potência.

Os módulos fotovoltaicos são normalmente representados por um modelo exponencial simples ou exponencial duplo [89]. A tensão da célula é determinada através dos pontos de curto circuito e circuito aberto, determinando então a potência entregue na saída de cada módulo fotovoltaico.

2.2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia

Os SAE podem funcionar como carga ou gerador, dependendo do equilíbrio entre geração e carga. Se a frequência é inferior à nominal, o sistema injeta energia no sistema até que sua capacidade se esgote. Se a frequência é maior do que a nominal, o SAE absorve a potência excedente da rede. Esses dispositivos agem como fontes controláveis de saída com rápida resposta para enfrentarem mudanças repentinas do sistema, principalmente em situações de monitoramento de carga. Desta maneira, estes dispositivos são considerados os primeiros a atuarem numa ação corretiva para restauração da frequência da microrrede [82].

O emprego de sistemas de armazenamento possibilita estocar energia das fontes renováveis em momentos de grande geração, corrigindo a baixa correlação com a demanda [90]. As fontes de energia distribuídas são conectadas através de uma interface eletrônica aos sistemas de armazenamento de energia, isto é, através de conversores eletrônicos. Esses conversores atuam com estratégias definidas para controlar a largura do pulso nas pontes semicondutoras e, conseqüentemente, na saída de tensão e frequência do conversor.

As baterias são a principal opção em SAE para aplicação em microrredes, com foco na integração das fontes renováveis e principalmente corte durante o pico da demanda de fornecimento de energia. Estes sistemas exercem função fundamental dentro do contexto de microrredes de geração distribuída. Diferentes tecnologias de armazenamento podem ser utilizadas, tendo em vista a relação entre a potência e energia necessária. Porém, o alto custo e a ineficiência ainda são um empecilho para sua utilização em larga escala.

2.3 Operação de Microrredes de Geração Distribuída

Os sistemas de distribuição do futuro devem ser dotados de inteligência suficiente para operar conectados à rede principal de energia e isoladas da rede, em modo de operação ilhado. A operação nesse modo não é uma tarefa trivial e difere bastante da operação e controle de sistemas de distribuição atuais devido à presença da geração distribuída e sistemas de armazenamento de energia.

Durante o ilhamento, a microrrede deve suprir o máximo número de consumidores com requisitos aceitáveis de segurança e qualidade, ou seja, os níveis de tensão e frequência devem estar dentro dos limites nominais estabelecidos para que ocorra a mínima desconexão de cargas devido a desvios de tensão e frequência. Desta maneira, o centro de controle da microrrede exerce um papel fundamental no gerenciamento e controle de todos os agentes dentro deste sistema de distribuição ilhado. Algumas das principais funções do CCM são [7, 82]:

- Restauração dos níveis de frequência e tensão;
- Determinação de políticas de conexão e desconexão de cargas;
- Otimização da interação do consumidor com as concessionárias e mercado;
- Reconexão dos sistemas após ilhamento.

Todo o controle e operação da nova rede de distribuição inteligente é baseada em uma rede de comunicação robusta, flexível e segura. O CCM também é responsável por receber os dados enviados, medidas de PMU (*Phasor Measurement Unit*) da rede de distribuição, de medidores inteligentes e dos sensores de carga e energia espalhados pelo sistema. Este sistema complexo de controle é baseado em níveis hierárquicos como proposto em [27] e ilustrado na Figura 2.

É possível observar na Figura 2 que os níveis hierárquicos de controle são organizados de acordo com a estrutura da microrrede. O controle primário atua de maneira descentralizada e tem a função de realizar o *droop*.

A ideia atrás do controle baseado em *droop* é reproduzir o comportamento da geração devido a variações de tensão e frequência [27]. O método é implementado no VSI (*Inversor de Fonte de Tensão*) considerando o acoplamento P/f e Q/V (embora os acoplamentos P/V e Q/f possam ser observados em sistemas de distribuição), dados por [27, 91],

$$f = f_{ref} - m(P - P_{ref}) \quad (2.1)$$

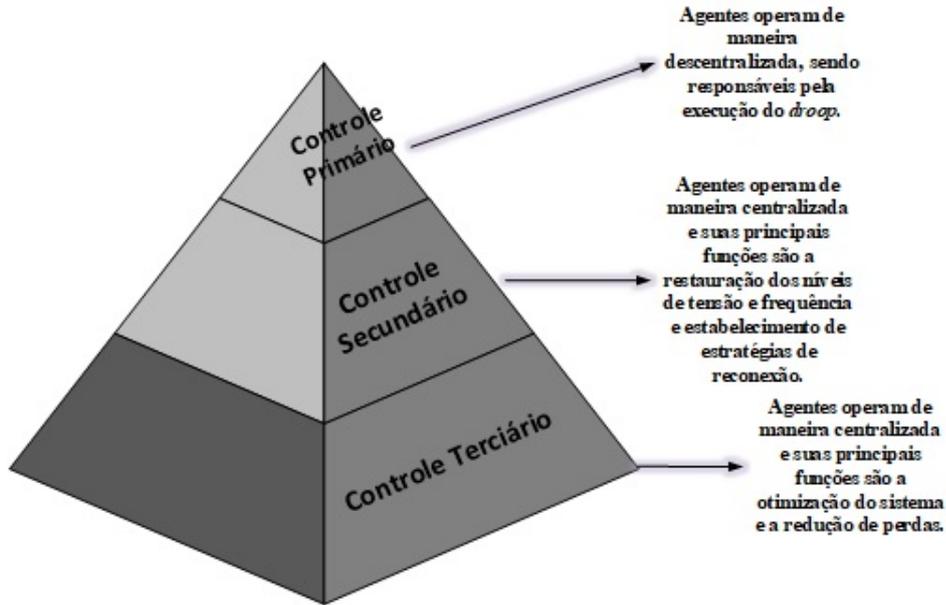


Figura 2 – Níveis hierárquicos de controle de uma microrrede adaptada de [83].

$$V = V_{ref} - n(Q - Q_{ref}) \quad (2.2)$$

Na Eq. (2.1) e na Eq. (2.2), os coeficientes m e n representam os coeficientes ativos e reativos do *droop*, f e V são as saídas de frequência e tensão, f_{ref} e V_{ref} representam os valores de referência de tensão e frequência, P e Q representam a potência ativa e reativa demandada e P_{ref} e Q_{ref} são os valores de referência da potência ativa e reativa.

Se houver um aumento na demanda da energia ativa, a frequência do sistema elétrico irá ser reduzida na proporção da variação do coeficiente m . Se houver uma demanda menor de energia ativa, ocorrerá um aumento na frequência do sistema. Em contraste, a saída de tensão dos conversores eletrônicos é controlada de acordo com a variação do coeficiente n . As relações entre os coeficientes e a variação da tensão e frequência podem ser visualizadas na Figura 3.

Na Figura 3, as linhas contínuas representam a faixa de operação do *droop* e os pontos em forma de círculo, os pontos de operação da rede. O controle primário permite que as fontes de geração despacháveis operem de acordo com suas medições locais. Desta maneira, projetam a necessidade de injeção de potência ativa e reativa através do método *droop*. Durante o controle de operação neste nível hierárquico, não é necessário o uso de redes de comunicações, pois é baseado em decisão local, sendo a principal vantagem desse método.

O segundo nível de controle, denominado controle secundário, em contraste com o controle primário, necessita de uma rede de comunicação robusta e confiável para troca de dados entre os sensores e o centro de controle da microrrede. O objetivo principal

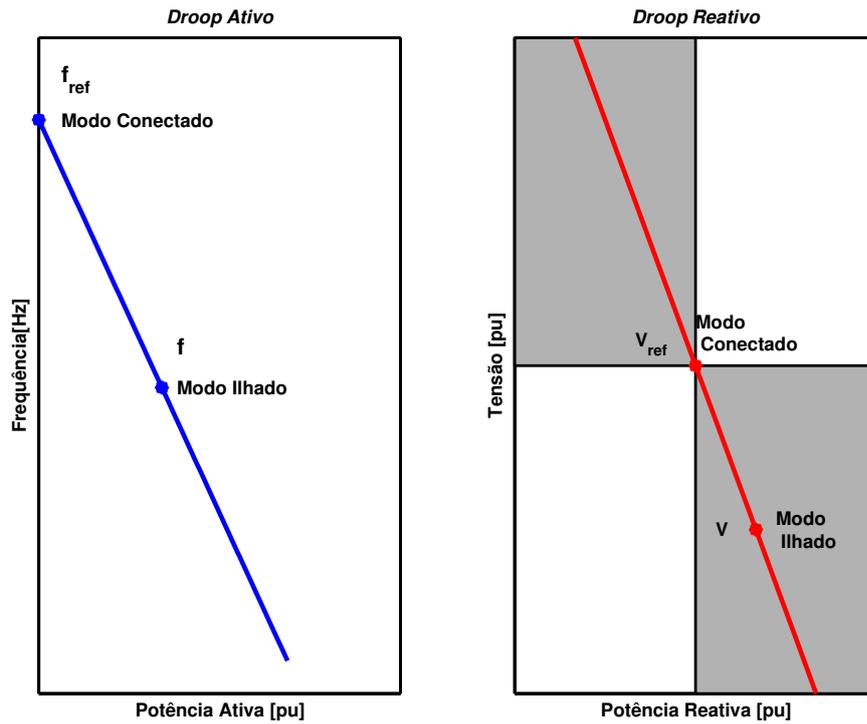


Figura 3 – Resposta do *droop* ao controle primário, adaptada de [7].

do controle secundário é restaurar os níveis de tensão e frequência de acordo com os valores determinados no cálculo do *droop*. Controladores do tipo proporcional-integral são utilizados para corrigir o erro entre o ponto de operação e o nível de referência. Neste nível de controle, o ponto de operação é movido sobre uma linha vertical. Desta maneira, a frequência é alterada somente quando a potência é mantida constante de acordo com a demanda das cargas. Este controle é facilmente entendido através da Eq. (2.1) e da Eq. (2.2), quando o valor de referência da frequência f_{ref} e tensão V_{ref} tendem para f_{ref}^* e V_{ref}^* .

Por último, há o controle terciário, onde todos dispositivos distribuídos na rede atuam de maneira centralizada, enviando informações para o CCM. O controle atua de maneira a mudar a referência de potências da Eq. (2.1) e da Eq. (2.2), assumindo que a tensão e frequência da rede são controladas pelo sistema. Neste modelo de controle, apenas a frequência é mantida constante durante variações de potência já que é uma variável global ao sistema.

Pelas descrições das funcionalidades de cada nível de controle e pela Figura 2, infere-se que a dependência de técnicas avançadas de comunicação e a banda necessária para comunicações de dados aumenta na direção da base da pirâmide ilustrada.

2.4 Geração e Demanda em Microrredes

A relação entre geração e carga em microrredes é um problema essencial para a determinação do mínimo custo de operação do sistema [92], ou seja, o atendimento de todas as cargas a custo mínimo. Este é um problema conhecido como *unit commitment*, sendo uma operação matemática que envolve variáveis inteiras e reais, caracterizando um problema de programação não-linear inteira mista.

Várias pesquisas têm estudado a aplicabilidade da técnica em redes de geração ilhada, como em [88, 93, 94, 95, 96]. O modelo aplicado a este trabalho é o descrito em [88] devido à sua fácil integração com sistema e a possibilidade de uso sem alterações no sistema.

Assume-se que existem K unidades de geração com capacidade nominal conhecida. Deve-se, então, determinar o conjunto de unidades geradoras que satisfaçam a demanda com o mínimo custo de operação. Também assumem-se as seguintes probabilidades. Se a unidade i está desligada, tem-se $U_i^t = 0$ e, se estiver ligada, $U_i^t = 1$. Levando em conta estas considerações, pode-se determinar a função objetivo do problema da relação de compromisso entre geração e carga, onde o objetivo principal é minimizar a variável custo (C), que é descrita como em [92]

$$C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^K [F_i P_i^t + S u_i^t + S d_i^t] U_i^t \quad (2.3)$$

Sujeito a:

$$P_l^t + P_{loss}^t - \sum_{n=1}^K P_n^t u_n^t = 0 \quad (2.4)$$

$$P_{i,min} \leq P_i^t \leq P_{i,max} \quad (2.5)$$

As equações (2.4) e (2.5) demonstram, respectivamente, as restrições de balanço e de limites de potência de cada unidade. A Eq. (2.3) também está sujeita a restrições das unidades térmicas e aos limites máximo e mínimo de *SOC (State-of-Charge)* de cada unidade de armazenamento, dado o estado de carga atual da unidade de armazenamento k . Os limites de (SOC_k^t) são

$$SOC_{k,min} \leq SOC_k^t \leq SOC_{k,max} \quad (2.6)$$

Na Eq. (2.3), na Eq. (2.4) e na Eq. (2.5), i representa a unidade geradora, t é o intervalo de tempo, K é o número total de unidades geradoras, T é o intervalo de tempo total, P_i^t é a potência entregue pela unidade i no respectivo intervalo de tempo t , F_i é a função custo da unidade i , $S u_i^t$ e $S d_i^t$ representam o custo de ligação e desligamento,

respectivamente, da unidade de geração i e $SOC_{k,min/max}$ é o estado de carga mínimo e máximo da unidade de armazenamento k .

Toda a teoria descrita neste capítulo 2 será aplicada na metodologia de desenvolvimento e concepção para o gerenciamento e controle eficiente de microrredes. O próximo capítulo foca o dimensionamento de redes de comunicações energeticamente eficientes aplicadas ao sistema elétrico de potência.

3 Comunicações Aplicadas a Redes Elétricas Inteligentes

As redes elétricas inteligentes serão integradas com tecnologias avançadas de comunicação e informação para o monitoramento, controle e proteção do sistema elétrico. A integração entre geração, transmissão, distribuição e o cliente final é uma das principais funcionalidades das REIs. Para isto, uma rede de comunicação robusta é o elemento principal para a formação de uma rede de troca de informações complexa, sem ou com o mínimo de interação humana e em tempo real.

Na atualidade, a maioria das aplicações em sistemas de distribuição é limitada à medição inteligente. Para atingir o grau de inteligência desejado é preciso dimensionar uma rede de comunicações que satisfaça as necessidades atuais e futuras dessas novas redes inteligentes, com vários dispositivos inteligentes provendo as informações necessárias para o controle da rede.

Este capítulo tem como objetivo enumerar os desafios para o dimensionamento de uma rede de comunicações aplicada ao contexto de redes elétricas inteligentes, focadas em aplicações com um grande número de dispositivos conectados, alta confiabilidade com diferentes requisitos de cobertura, taxa de dados e latência para os sistemas de distribuição.

3.1 Redes de Comunicação Aplicadas ao Gerenciamento e Controle

Integrada, de alto desempenho, altamente confiável, robusta e flexível são as características de uma rede de comunicação aplicada ao sistema de distribuição inteligente. A rede de comunicação será responsável pela geração, coleta, interpretação de dados e monitoramento de todos os dispositivos conectados à rede [19]. Portanto, se faz necessário compreender os requisitos de comunicação essenciais entre estes dispositivos para seu planejamento.

O projeto de uma rede de comunicação é crucial na integração das REIs. Existem diversas aplicações com diferentes requisitos de qualidade de serviço, principalmente em relação à cobertura, capacidade, latência e confiabilidade. Atualmente, sistemas como o SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e o AMR (*Automatic Meter Reading*) são utilizados para monitorar as redes de distribuição de energia [32]. Estes sistemas não possuem capacidade de atuar em tempo real e possuem alto tempo de resposta, o que impossibilita ações rápidas de autorrecuperação da rede. A Tabela 2 ilustra os princi-

país requisitos de latência e confiabilidade para aplicações em sistemas de distribuição inteligentes [6].

Tabela 2 – Requisitos para aplicações em sistemas de distribuição inteligentes [6, 7].

Requisitos de Comunicação	Latência (tempo)	Confiabilidade (%)
Automação da Distribuição	20ms–200ms	99–99,99
Resposta à Demanda (RD)	500ms–horas	99–99,99
Monitoramento de WANs	20ms–200ms	99,999–99,99999
AMI	2000ms	99–99,99
Automação de Subestações	15ms–200ms	99–99,99
Monitoramento de Medidores	2000ms	99
Gerenciamento de Distribuição	100ms–2s	99–99,99
Veículos Conectados	2s–5min	99–99,9
REDs	300ms–2s	99–99,99
Controle de Distúrbios	200ms	99
Gerenciamento de Usuários	300ms–2000ms	99–99,99

Em um sistema de distribuição inteligente, a infraestrutura de medição avançada é apontada como o primeiro passo para a modernização da rede [29]. Esta infraestrutura deve ser responsável por monitorar, controlar e gerenciar cargas através do uso de medidores inteligentes [97]. Além disso, em aplicações como redes de distribuição ativas há uma enorme preocupação com os problemas relacionados à estabilidade de tensão devido à alta penetração de recursos energéticos distribuídos e cargas dinâmicas [20]. Para este fim, o uso de unidades de PMU em sistemas de distribuição pode garantir níveis seguros de operação e controle [98].

O uso de tecnologias avançadas de comunicação também exerce um papel fundamental no gerenciamento de microrredes [99]. Além disso, a rede depende dessas tecnologias proporcionalmente à inteligência da rede devido ao número de dispositivos conectados. Esses aparelhos precisam se comunicar entre si para trocar dados e relatar o estado da microrrede instantaneamente ao centro de controle. Por sua vez, o centro deve agir e reagir conforme a ocorrência de adversidades [100]. Desta maneira, uma infraestrutura de comunicação flexível será necessária para suportar o grande número de dispositivos conectados [39].

A estrutura de um sistema de distribuição inteligente é dependente de uma grande quantidade de dispositivos, como sensores, atuadores e disjuntores [22]. Esses dispositivos trocam informações sem interação ou com mínima interação humana [39], caracterizando a MTC (*Machine Type Communication*) [101]. As aplicações de MTC servem de base a vários serviços para redes inteligentes, particularmente quando a infraestrutura de comunicação deve suportar uma grande quantidade de dispositivos, com diferentes tipos de transmissões de dados, alta confiabilidade, baixo custo de infraestrutura e alta mobilidade.

3.1.1 Tecnologias de Comunicação Aplicadas ao Sistema Elétrico

Além de todos os requisitos citados na seção anterior, uma infraestrutura de comunicação deve obedecer aspectos como disponibilidade, robustez, flexibilidade, segurança e apresentar um pequeno custo de infraestrutura. Com a crescente demanda de comunicações em redes elétricas, a escolha de uma tecnologia que forneça flexibilidade para abranger diversas aplicações se faz necessária.

As comunicações com fio, baseadas em telefonia fixa e fibra óptica, são normalmente utilizadas em aplicações de largura de banda estreita, como em subestações e centros de controle. No entanto, este tipo de tecnologia é inviável para aplicações que precisam de largura de faixa suficiente para suportar um grande número de dispositivos, com diferentes requisitos de tráfego, que ofereçam cobertura para vastas áreas geográficas e com baixo custo de infraestrutura. Várias tecnologias podem ser utilizadas como solução em redes elétricas inteligentes, cujas principais características são descritas na Tabela 3 [29, 7].

Mais de uma tecnologia cumpre os requisitos necessários para ser adotada como solução para uma rede de comunicação aplicada a REIs. Porém, as redes móveis são uma solução proeminente e econômica para suportar comunicações de um número massivo de dispositivos inteligentes [36]. Os sistemas de comunicação celular são um potencial candidato para atender aos requisitos rigorosos para aplicações inteligentes [102] uma vez que são robustos, seguros, suportam conexão massiva de dispositivos e exigem baixos investimentos em infraestrutura.

Entre as tecnologias atuais existentes, o LTE tem se destacado como uma tecnologia promissora como solução para as redes elétricas inteligentes devido a suas características como grande área de cobertura, alta capacidade, baixa latência, escalabilidade e flexibilidade [45].

A quarta geração celular foi desenvolvida pelo 3GPP e está sempre em evolução de acordo com as características exigidas para atender novas demandas [102]. Uma das grandes vantagens de se utilizar a quarta geração celular para as redes inteligentes é o fato que os medidores inteligentes estão integrados com este padrão de tecnologia, oferecendo assim algumas facilidades para sua utilização. Entre as características principais do LTE pode-se citar a autoconfigurabilidade da rede (*plug and play*), baixa latência, alta capacidade de comunicação em banda larga, robustez da rede, maior área de cobertura, alta confiabilidade, segurança robusta e interoperabilidade. O 3GPP também tem se destacado na padronização de tecnologias dedicadas à comunicação entre máquinas compatíveis com o LTE [44].

Tabela 3 – Tecnologias de comunicação aplicadas a redes elétricas inteligentes [7].

Tecnologia	Taxa de Dados	Área de Cobertura	Vantagens	Desvantagens
PLC	NB-PLC 1: 500 kbps	150 km	Baixo custo de infraestrutura.	Sofre com a Atenuação do Sinal.
	Home Plug: 200 Mbps	até 3 km	Baixo custo de infraestrutura.	Sofre com a Atenuação do Sinal.
Fibras Óticas	PON até 1 Gbps	EPON até 20 km	Robusto contra ruído.	Alto Custo de Infraestrutura.
	SONET/SDH 40 Gbps WDM 40 Gbps	até 100 km até 100 km		
WiFi	até 600 Mbps	até 1 km	Baixo custo de infraestrutura e de fácil implementação.	Interferência, opera na faixa não licenciada.
Zig Bee	até 250 kbps	até 100 m	Baixo custo de infraestrutura e de fácil implementação.	Baixa Taxas de Dados e pequeno alcance.
Bluetooth	até 720 kbps	até 100 m	Baixo custo de infraestrutura e de fácil implementação.	Baixa Taxas de Dados e pequeno alcance.
WiMax	até 1 Gbps	até 10 km	Longas distâncias.	Custo de Infraestrutura.
Satélite	até 450 kbps	Vastas áreas geográficas	Longas distância e, alta confiabilidade.	Alto custo de infraestrutura e alta latência.
2G/3G/4G	até 150 Mbps	até 100 km	Baixo custo de infraestrutura, suporte milhões de usuários.	Múltiplos percursos e atenuação.

3.1.2 Redes Dedicadas a Comunicação Entre Máquinas

Um sistema de distribuição inteligente é dependente de uma grande quantidade de dispositivos inteligentes como sensores, atuadores e disjuntores [22]. Esses dispositivos trocam informações sem ou com mínima interação humana [39], caracterizando a comunicação entre máquinas [23]. As aplicações de **MTC** servem de base a vários serviços aplicados a redes inteligentes, particularmente quando a infraestrutura de comunicação deve suportar uma grande quantidade de dispositivos, com diferentes tipos de transmissões de dados, alta confiabilidade, baixo custo de infraestrutura e alta mobilidade.

Esses sistemas são caracterizados principalmente pelo seu alcance, taxa de dados, flexibilidade e robustez. Para comunicações de curto alcance e baixas taxas de dados, Bluetooth [33] e ZigBee [34] são as soluções mais adequadas, principalmente para monitoramento de área local como casas ou edifícios. A tecnologia Wi-Fi de baixa potência (802.11ah) também é adequada para comunicações de curta e média distâncias, suportando altas taxas de dados, e opera no espectro de frequência não-licenciado [35].

Para comunicações de longo alcance com requisitos rigorosos de taxas de dados, cobertura e latência, as tecnologias móveis para **M2M** são a solução mais viável [42]. A comunicação móvel **M2M** opera no espectro de frequência licenciado e estabelece uma conectividade confiável, que é muito importante para muitas aplicações inteligentes, especialmente no controle e no gerenciamento de interrupções de energia [43]. A operação nas frequências não-licenciadas, como na banda **ISM** (*Industrial, Scientific & Medical Band*), traz incertezas devido à qualidade do canal, por exemplo, por causa da interferência mútua. Portanto, as tecnologias móveis para comunicação baseada em **M2M** que operam em frequências licenciadas fornecem a confiabilidade, escalabilidade e efetividade de custo necessárias para redes inteligentes.

A comunicação inteligente entre máquinas que utilizam tecnologias celulares é baseada somente em um fluxo massivo de dados, diferentemente de uma rede celular convencional [44], que se baseia principalmente no tráfego de voz e dados. A interconectividade entre uma rede móvel e uma rede de comunicação entre máquinas foi padronizada pelo **3GPP** com base na tecnologia **LTE** [45]. O padrão descreve os novos recursos desenvolvidos para se adaptar e melhorar a rede focando dispositivos para comunicação entre máquinas. As principais características acrescentadas são a melhoria na cobertura, menor consumo de energia, maior vida útil das baterias de dispositivos, suporte a diferentes larguras de banda, redução de latência e sistemas baseados em múltiplas antenas [40]. Dois padrões móveis para suportar a comunicação entre máquinas atualmente estão recebendo uma maior atenção: **eMTC** [46] e **NB-IoT** [11].

As tecnologias móveis aplicadas ao **M2M** foram propostas para suportar a comunicação entre máquinas, oferecendo mais eficiência de energia, menores custos de operação

e flexibilidade [24]. Esses novos padrões emergem como uma solução para viabilizar o uso de dispositivos inteligentes dentro de uma comunicação móvel de banda larga no espectro licenciado. As principais características das comunicações entre máquinas estão listadas a seguir [46], [10]:

- Dispositivos de baixo custo: Os dispositivos da futura rede devem ter baixa complexidade e baixo custo;
- Maior eficiência energética: Muitos dispositivos dependerão de baterias que durem um longo período em locais onde a eletricidade não será fornecida. A duração estimada da bateria necessária é de cerca de dez anos;
- Melhoria na cobertura: É necessário diminuir o consumo de energia e melhorar a cobertura, pois os dispositivos podem ser instalados em qualquer lugar;
- Conexão massiva de dispositivos: Prevê-se que uma grande quantidade de dispositivos remotos esteja conectada. Cada um deles gerará uma pequena quantidade de dados que será transmitida com baixas taxas de dados;
- Flexibilidade/Escalabilidade: A rede deve ser capaz de suportar uma grande variedade de dispositivos com diferentes requisitos. Qualquer sistema escolhido deve ser capaz de se comunicar com esses dispositivos.

Esses padrões seguem as principais funcionalidades já existentes no padrão [LTE](#) e devem satisfazer requisitos rigorosos das aplicações [M2M](#). As redes [eMTC](#) fazem parte da versão 13 do [3GPP](#) [103]. Nesta versão, foram introduzidas várias funcionalidades, com foco nas aplicações de comunicação entre máquinas, como utilização eficiente do espectro, melhoria da cobertura, dispositivos de baixo custo e alta capacidade. A comunicação [NB-IoT](#) foi introduzida inicialmente na versão 13, mas foi desenvolvida na versão 14 [44] com um maior foco em aumento de cobertura [10].

Ambas as tecnologias são flexíveis para trabalhar na mesma banda que o [LTE](#) [8]. O padrão [eMTC](#) opera na banda dentro do sistema [LTE](#) e o [NB-IoT](#) pode ser implantado juntamente com [LTE](#) convencional em três modos de operação diferentes: autônomo, operando sobre toda a banda; dentro da banda atuando juntamente com o [LTE](#); e na banda de guarda do [LTE](#). A Tabela 4 ilustra algumas das principais características do [eMTC](#) e do [NB-IoT](#) operando como [PU \(Portadora Única\)](#) e juntamente na banda com o [LTE](#) [8, 9, 10, 11].

Para que as estações rádio base alcancem a máxima cobertura, o fator de perda de acoplamento é aumentado. No entanto, para melhorar a eficiência energética e reduzir a emissão espectral fora da faixa, uma modulação de baixa ordem é utilizada [43]. Além disso, usuários desejam que a vida útil dos dispositivos seja melhorada. Para atender a

Tabela 4 – Características dos padrões de comunicações entre máquinas [8, 9, 10, 11].

Parâmetros	eMTC	NB-IoT (PU)	NB-IoT na banda
Largura de banda	1,4 MHz	180 kHz	10 MHz
Taxa da dados	1 Mbps	100 kbps	100 kbps
Potência de transmissão da ERB [dBm]	46	43	46
Ganho da antena receptora [dBi]	23	23	23
Densidade espectral de ruído [dBm/Hz]	-174	-174	-174
Figura de ruído do receptor [dB]	5	3	3
Ganho de processamento do receptor [dB]	0	0	0
Perda de acoplamento máxima [dB]	156	164	164
Sinal-ruído + interferência requerida [dB]	-1,14	-5	-12,8

esse requisito, ambos os padrões adotaram o tipo de modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) para reduzir o consumo de energia [8].

Todos os requisitos listados anteriormente devem ser respeitados para o desenvolvimento de uma rede de distribuição inteligente controlada por um número enorme de máquinas. A alta taxa de dados não é a característica principal neste novo cenário. Assim, o projeto da infraestrutura de comunicações deve proporcionar uma boa relação custo/benefício entre cobertura, capacidade e eficiência energética. As próximas seções irão descrever as etapas de construção de uma rede de comunicação, porém, primeiramente, deve-se entender a arquitetura de uma rede de acesso móvel.

3.2 Arquitetura de uma Rede de Acesso Celular

A infraestrutura da rede de acesso sem fio tem uma importância primordial. O projeto correto do sistema e a análise de desempenho da camada física deve fornecer cobertura onipresente em todo o sistema e suportar conexões TCP/IP (*Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet*) [104]. A Figura 4 ilustra a conectividade entre dispositivos dentro de um cenário de uma rede elétrica inteligente aplicada ao sistema de distribuição.

A partir da Figura 4, é possível notar o fluxo bidirecional de informações dentro do sistema e a interação entre cada camada de comunicação sem fio. A infraestrutura de comunicação é composta por três camadas: o núcleo, a rede de acesso e a camada de última milha [12]. A camada de acesso é responsável por fornecer conectividade entre usuários (última milha) e a estação rádio base. Esta camada exige uma infraestrutura de baixo custo que suporte uma conexão massiva de dispositivos. A rede de acesso também é responsável por interagir e se comunicar com o núcleo principal, que se conecta ao servidor de Internet através de um enlace chamado *backhaul*. Em um futuro próximo, a rede de

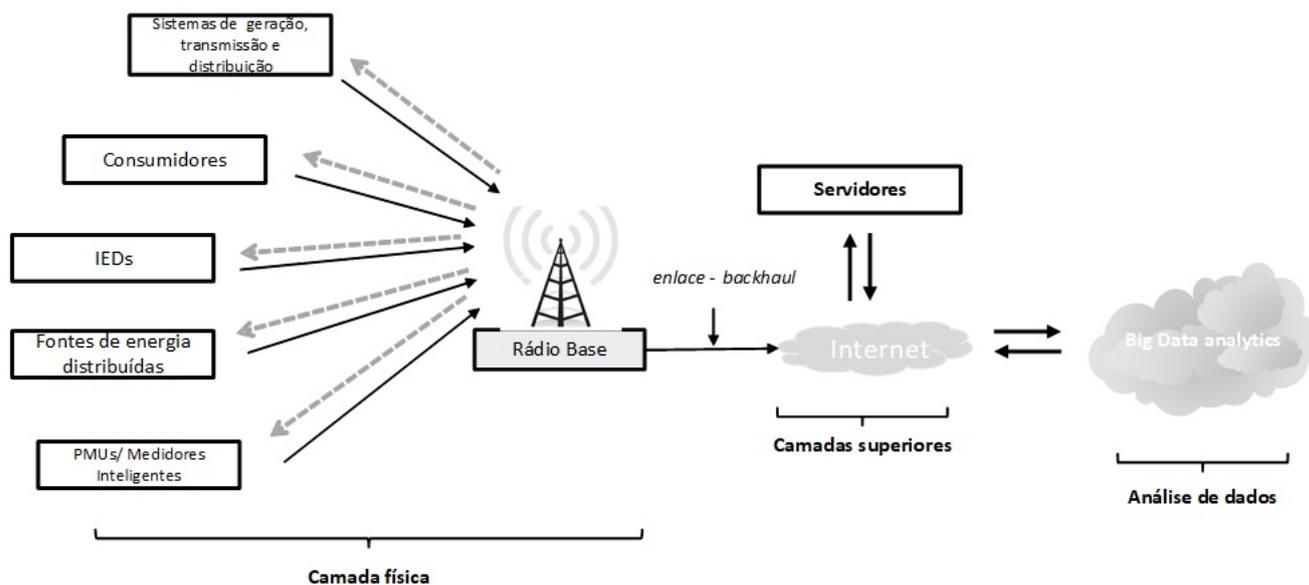


Figura 4 – Conectividade de uma rede de acesso celular em um sistema de distribuição [1].

acesso também será conectada a servidores de armazenamento e processamento de dados para obter vantagens de aplicações avançadas de processamento de dados como o *Big data* [105].

A infraestrutura de rede sem fio é formada por diferentes domínios [12], relacionados principalmente ao tamanho de sua área geográfica e capacidade de transmissão de dados. O objetivo principal de cada domínio é suportar requisitos rigorosos e fornecer conectividade à rede [106]. Entre os principais domínios podemos citar as redes **WAN** (*Wide Area Network*), que fornecerão a infraestrutura necessária para comunicação entre os subsistemas de geração, transmissão e distribuição, abrangendo uma extensa área geográfica.

As redes do tipo **NAN** (*Neighborhood Area Networks*) fornecem a comunicação entre os dispositivos conectados à rede, que podem ser sensores, transformadores de corrente e tensão, atuadores, chaves atuando na comunicação com a subestação e o elo de comunicação entre subestação e consumidores. Por último, há redes do tipo **HAN** (*Home Area Network*) que provêm a comunicação entre os dispositivos dentro de uma residência com os medidores de energia. As principais características de cada domínio são ilustradas na Tabela 5 [12].

3.2.1 Planejamento de Redes de Comunicação Dedicadas

A concepção e implementação de uma rede de acesso são de suma importância em um ambiente de comunicação crítico. Há necessidade de se investigarem todos os aspectos que influenciam a qualidade de serviço prestada pela rede móvel. A Figura 5 explica o

Tabela 5 – Requisitos de domínio para uma arquitetura de comunicação [12].

Domínio	Aplicações	Alcance	Taxa
HAN	Redes Residenciais	Dezenas de metros	Baixa
NAN	Medidores de energia, Redes de Distribuição e Geração Distribuída	Centenas de metros	Média
WAN	Subestações, Redes de Distribuição, Transmissão e Geração	Dezenas de quilômetros	Alta

dimensionamento passo-a-passo de uma rede de acesso sem fio [104].

A etapa do cálculo do enlace de propagação no dimensionamento do sistema é a principal tarefa no dimensionamento da rede celular. Nesta, a máxima perda de propagação permitida é calculada para que os usuários na borda deste sistema tenham condições de receber o sinal. Ainda nesta etapa, deve-se fazer uma análise detalhada do local onde a rede será instalada, levando em conta características do ambiente, o local onde serão instaladas as estações rádio base, informações topográficas, objetivo de cobertura, sensibilidade, identificação do tipo de cobertura — para ambientes fechados ou ambientes abertos —, potência de transmissão, ganho das antenas transmissoras e receptoras e as perdas no sistema. São fatores que irão influenciar a propagação do sinal.

Após o dimensionamento do enlace de propagação, é possível determinar a área de cobertura e o raio da célula de uma estação rádio base, permitindo estimar a quantidade de estações necessárias para cobrir a região onde se pretende estabelecer a conexão. Com o número estimado de estações rádio base é possível estimar a potência total consumida pela rede planejada.

3.2.2 Cálculo do Enlace de Propagação

Sinais para comunicação sem fio são probabilísticos por natureza, uma vez que o seu ambiente tem um nível de confiança incerto [107]. O cálculo do enlace de propagação móvel é o primeiro estágio para o projeto de uma rede móvel. Neste ponto, a perda máxima de sinal é avaliada de tal forma que todos os usuários possam detectar o sinal. Como uma regra de dimensionamento, os parâmetros do sistema como área de cobertura, largura de banda e potência de transmissão são definidos de acordo com os requisitos do sistema [104]. A perda de propagação máxima proposta em [104] é descrita como

$$M_L = L - L_p - B_L - M \quad (3.1)$$

em que, L é a máxima perda para enlaces de recepção e transmissão, em dB, L_p é a perda devido à obstrução por um edifício em dB, B_L é a perda por penetração no corpo, em dB, e M é a margem de desvanecimento, que é a variação do sinal recebido devido a

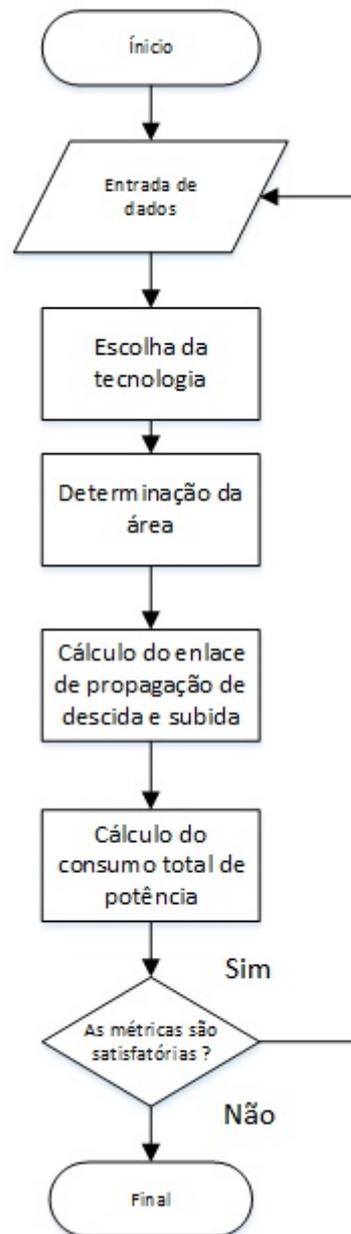


Figura 5 – Fluxograma de dimensionamento da rede de acesso.

mudanças no ambiente de propagação. Com isto, pode-se determinar a máxima perda do enlace através da equação proposta em [104], em dB

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{requerida} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} \quad (3.2)$$

em que P_{tx} é a potência de transmissão em dBm, G_{tx} é o ganho da antena transmissora expressa em dBi, L_{tx} representa as perdas na transmissão em dB, $SNR_{requerida}$ é a relação sinal/ruído requerida em dB, S_{rx} é a sensibilidade requerida na recepção em dB, G_{rx} é o ganho da antena receptora dBi, L_{rx} representa as perdas na recepção expressas em dB e G_{dv} é o ganho de diversidade em dBi.

A margem de desvanecimento M é a margem a ser considerada a fim de garantir que o usuário móvel consiga operar na borda das células, onde a **SINR (Relação Sinal/Ruído + Interferência)** é baixa. Devido a efeitos causados principalmente pelos múltiplos percursos deve-se considerar este parâmetro cuidadosamente.

Para se minimizarem os efeitos dos múltiplos percursos, técnicas como a diversidade são empregadas para influenciar o ganho do sinal no sistema. A **SNR (Signal-to-Noise Ratio)** é dependente da modulação e da taxa de código adotada, ou seja, depende da taxa de transferência de dados. Portanto, a mínima relação sinal/ruído pode ser calculada da seguinte forma, como proposta em [10]

$$SNR = P_{tx} + 174 - NF - 10\log_{10}(BW) - L \quad (3.3)$$

Da mesma maneira que se calcula o enlace de propagação para o enlace de descida (*downlink*), deve-se calcular o enlace de subida (*uplink*). Para tal, pode-se adotar o pior valor de sensibilidade para cálculo. Desta maneira, ao se operar com larguras de banda menores, não haverá impacto na cobertura do sistema.

Após o cálculo do enlace, deve-se prever o modelo de canal pelo qual a informação será transmitida. Os modelos de canal são essenciais para a análise e implementação dos sistemas de telefonia móvel para obter uma transmissão confiável de informações entre as duas respectivas partes. Dentre os modelos de propagação existentes, destacam-se o modelo de Okumura-Hata e o COST-231, [108, 109], apresentados a seguir.

3.2.2.1 Modelos de propagação de canal

Para o dimensionamento de sistemas de comunicações sem fio, devem-se escolher modelos de propagação adequados. Estes modelos têm como objetivo fornecer estimativas de perdas de propagação considerando a distância entre transmissor e receptor, fatores de terreno, altura das antenas transmissoras e receptoras e as frequências utilizadas.

O modelo de propagação visa proporcionar a estimativa da perda de propagação considerando a distância entre receptor e transmissor, a altura da antena, entre outros. [104]. É uma tarefa difícil escolher o modelo de propagação mais propício para o ambiente desejado. Para isso, é preciso levar em conta fatores como obstáculos, sombreamento, desvanecimento e atenuação do sinal. A perda por propagação em um percurso é uma medida da atenuação do sinal provocada por diversos fatores e é dependente da potência de transmissão e da potência recebida. A perda no espaço livre é descrita pela equação de Friss da propagação no espaço livre, descrita como em [104]

$$P_{friss} = \frac{P_{tx}G_{tx}G_{rx}\lambda^2}{4\pi d^2L} \quad (3.4)$$

em que λ é o comprimento de onda do sinal em metros e L é o fator de perda do sistema.

3.2.2.1.1 Modelo de Okumura-Hata

Para caracterizar ambientes mais realistas, a perda de propagação do sinal pode ser descrita pelo modelo de propagação como o Okumura Hata e o COST-231 [108]. Neles, características como a distância entre transmissor e receptor, frequência da portadora central e perdas devido a obstáculos também são consideradas para um projeto preciso. O modelo proposto em [108] é dado por

$$L_{hata} = 69,55 + 26,26 \log_{10}(f_c) - [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_{erb})] \log_{10}(d) - 13,82 \log_{10}(h_b) - a(h_{user}) \quad (3.5)$$

em que L_{hata} é a perda por propagação em um ambiente urbano, f_c é a frequência da portadora central desejada para o cálculo, h_{erb} é a altura da antena da estação radio base, h_{user} é a altura da antena do usuário móvel e d é a distância entre a estação rádio base e o usuário. A função $a(h_{user})$ é o fator para a correção da altura da antena do usuário móvel. Se a frequência escolhida para o cálculo for maior que 700 MHz, para ambientes tipicamente urbanos, o fator de correção é dado por

$$a(h_{user}) = [1,1 \log_{10}(f_c) - 0,7] h_{user} - [1,56 \log_{10}(f_c) - 9,8]. \quad (3.6)$$

Para o cálculo do raio teórico, pode-se substituir a Eq. (3.5) em Eq. (3.6), resultando no raio em km descrito por

$$d = \log_{10}^{-1} \left(\frac{L_{hata} - 69,55 - 26,26 \log_{10}(f_c) + 13,82 \log_{10}(h_b) + a(h_{user})}{[44,9 - 6,55 \log_{10}(h_{erb})]} \right) \quad (3.7)$$

em que d é a distância da célula em km.

3.2.2.1.2 Modelo COST 231 Hata

O modelo COST-231 Hata [108, 109] é uma extensão do modelo Okumura-Hata, cobrindo a faixa de 1,5 GHz a 2 GHz. No entanto, um fator de correção é usado para a predição de sinais na faixa de 2,5 GHz. No modelo original, a perda por propagação na escala logarítmica do modelo em questão é calculada por

$$P_L = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + C_m \quad (3.8)$$

em que C_m é o fator de correção para áreas urbanas em dB. Para áreas metropolitanas, $C_m=3$ e para áreas suburbanas, $C_m=0$. Os demais termos da equação (3.8) seguem as mesmas descrições do modelo de Okumura-Hata.

Para a faixa de frequência de 2,5 GHz, é necessário o cálculo de um fator de correção de frequência, que é descrito por

$$\delta L(f_1, f_2) = 10n_f \log_{10} \frac{f_2}{f_1} \quad (3.9)$$

em que δL é o fator de correção de frequência e

$$PL_{f_2} = PL_{f_1} + \delta L(f_1, f_2) \quad (3.10)$$

em que PL_{f_2} é a perda calculada sem fator de correção, PL_{f_1} é a perda calculada com fator de correção, $\delta L(f_1, f_2)$ é o fator de correção, n_f é o fator de difração (2,6 para áreas urbanas e suburbanas, e 2 para área aberta), f_2 é a nova frequência de interesse e f_1 é a frequência utilizada inicialmente.

3.2.3 Dimensionamento da Área de Cobertura

A área de cobertura de uma ERB é chamada de célula. Cada uma é dividida em um número de setores, cobertos por uma antena cada, que pode ser do modelo direcional, com padrões de radiação de acordo com a setorização [108]. A área de cobertura dessa célula pode ter diferentes tamanhos. Há estações que formam macrocélulas, microcélulas, pico e femtocélulas, todas dependentes da área de cobertura que se deseja abranger.

Através da Eq. (3.5) e da Eq. (3.8), pode-se determinar a distância mínima de cobertura de uma estação rádio base, isolando a variável d . Além disso, de posse de d , é também possível estimar o número necessário de medidores inteligentes para cobrir uma determinada área alvo. Do fator de cobertura d para uma configuração de cobertura tri-setorizada é possível determinar a área de cobertura de uma célula em km através de [110]

$$A_{tri} = 5.07d^2 \quad (3.11)$$

E para uma área circular, a área de cobertura de uma célula em km é descrita como

$$A_{cir} = \pi d^2 \quad (3.12)$$

Portanto, o número total de estações rádio base para uma determinada área pode ser descrita como

$$N_{ERB} = \frac{A}{\text{Área de Cobertura Calculada}} \quad (3.13)$$

onde A é a área de cobertura desejada. Desta maneira, o número total de medidores inteligentes, conforme proposto em [97], e de acordo com área calculada de uma estação rádio base, é escrita como

$$N_{sm} = \rho \pi d^2 \quad (3.14)$$

em que ρ é a densidade de medidores inteligentes.

3.2.4 Análise de Taxa de Dados em Sistemas de Distribuição

A análise da taxa de dados identifica a máxima capacidade de transmissão de um determinado canal. A BW (*Bandwidth*) afeta diretamente a capacidade do sistema, assim como a relação entre a energia do sinal transmitido e o ruído recebido em um determinado canal. A fórmula de capacidade de Shannon, proposta em [111], determina a máxima taxa alcançada para um canal $AWGN$ (*Additive White Gaussian Noise*), que é descrita pela equação

$$C = BW \log_2(1 + SNR) \quad (3.15)$$

Existe uma relação custo/benefício entre aumentar a largura de banda e a SNR , o que influencia a robustez do sistema contra incertezas, como o ruído. Para uma avaliação precisa da taxa de dados máxima, é necessário definir a máxima vazão atingível por uma única estação rádio base. Uma vez que o enlace de descida de uma estação rádio base LTE faz utilização de técnicas de modulação multiportadora como o $OFDM$ (*Orthogonal Frequency Divison Multiplexing*) para melhorar a robustez do sistema, a vazão total de um enlace é influenciada conforme proposto em [112]

$$R = \frac{N_{sf}}{T_{sf}} N_s N_{bs} \quad (3.16)$$

em que N_{sf} é o número símbolos OFDM em um quadro, T_{sf} é um período de sub-quadro, N_s é o número de subportadoras e N_{bs} é o número de bits de dada ordem de modulação.

O desempenho de um esquema de modulação geralmente é medido em termos de eficiência espectral. A eficiência descreve a capacidade de um esquema de modulação acomodar dados dentro de uma largura de banda limitada. Em geral, aumentar a taxa de

dados implica reduzir a largura de pulso de um símbolo digital, o que aumenta a largura de banda do sinal. Assim, existe uma relação direta entre a taxa de dados e a ocupação da largura de banda. No entanto, alguns esquemas de modulação funcionam melhor do que outros ao fazer esta escolha. A eficiência espectral reflete a eficiência com que a largura de banda alocada é usada, definida como a taxa de fluxo de dados por Hertz em uma determinada largura de banda. Se R é a taxa de dados em bits por segundo e BW é a largura de banda ocupada pelo sinal modulado, então a eficiência espectral ξ é expressa em bps/Hz conforme proposto em [113]

$$\xi = \frac{R}{BW} \quad (3.17)$$

Outra métrica importante para analisar a confiabilidade de um enlace de comunicação é a probabilidade de erro de bit. Esta métrica mede a porcentagem de bits transmitidos com erros no receptor. Este trabalho foca a aplicação de padrões de comunicação entre máquinas em sistemas elétricos, portanto apenas a probabilidade de erro da modulação QPSK será abordada, uma vez que é a adotada para os padrões de comunicação entre máquinas [8]. Desta maneira, como proposto em [113], a BER (*Bit Error Rate*) é descrita como

$$P_e = Q\sqrt{2\text{SNR}} \quad (3.18)$$

em que Q é a função erro definida por $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$.

3.3 Consumo de Potência em Redes de Acesso

Com o aumento do número de dispositivos conectados, aumenta-se a preocupação com o consumo de energia das redes de acesso de comunicações móveis [114]. Devido a isso, há um esforço da comunidade acadêmica, por exemplo, através do projeto EARTH [54], para propor uma série de padrões para o aumento da sustentabilidade de redes de acesso de comunicações móvel.

O consumo de potência de uma estação rádio base pode ser modelado em duas partes distintas [56]. A primeira descreve a parte estática do consumo de potência, isto é, o consumo que irá existir mesmo na ausência de usuário ativo. A segunda refere-se aos equipamentos que são dinâmicos e dependentes da variação do número de usuários acessando a rede de comunicação. Consideram-se usuários todos os dispositivos inteligentes conectados à rede. A Figura 6 ilustra os componentes que fazem parte de uma estação rádio base.

Os itens com maior impacto no consumo de potência de uma estação rádio base são [2] o PA (*Power Amplifier*), em que se leva em conta a perda dos seus alimentadores; o

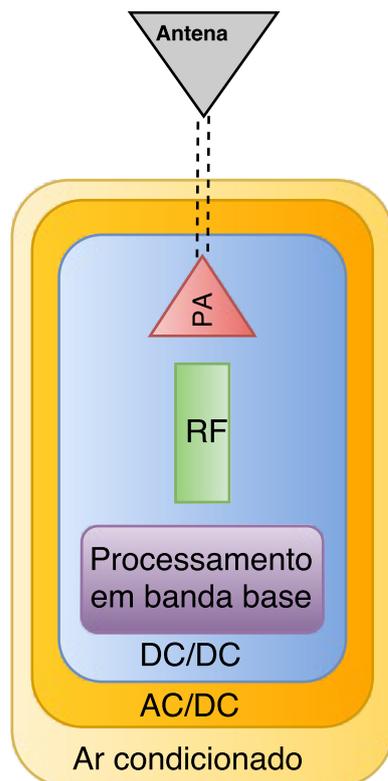


Figura 6 – Estrutura de uma estação rádio base [2].

sistema de *AIR (Ar Condicionado)*; seguido pelo sistema do *RF-Transceiver (Small-Signal Radio Frequency Transceiver)*; e o dispositivo de *PDS (Processador de Sinais de Banda Base)*.

Alguns dos equipamentos são utilizados por setor de irradiação, tais como: o processador digital de sinais, responsável pelo sistema de processamento e codificação; o amplificador de potência; e o transceptor de rádio frequência, responsável pela geração de sinais e a troca de envio e recebimento de mensagens entre os enlaces de descida e subida.

O consumo de potência destes equipamentos deve ser analisado de acordo com o número de setores de uma estação rádio base. Equipamentos como o ar condicionado e o enlace de micro-ondas, responsável pela comunicação com a rede de *backhaul*, são comuns a todos os setores de irradiação.

3.3.1 Consumo de Potência não-Variável

Nesta primeira análise, o comportamento do consumo de potência em uma estação rádio base será estudado de acordo com a variação de consumo de seus componentes, sem levar em consideração a variação de tráfego dos usuários.

Em [2] é proposto o modelo que leva em consideração o consumo tanto de sua parte dependente da carga quanto da independente da carga. Primeiramente, o consumo de energia do amplificador de potência será modelado através de sua eficiência (η). Assume-

se que a temperatura ambiente à qual o amplificador de potência ficará exposto será de -25°C e η é a relação entre a potência de radiofrequência entregue na saída do amplificador. Portanto, a relação entre a potência entregue na entrada e saída do amplificador é descrita da seguinte maneira, como em [2]

$$\eta = \frac{P_{out/amp}}{P_{pa}} \quad (3.19)$$

em que $P_{out/amp}$ é a potência de saída do amplificador e $P_{in/amp}$, a potência de entrada do amplificador. Para se determinar a potência consumida pelo amplificador de potência, deve-se levar em consideração a potência de transmissão de cada antena (P_{TX}). Esta relação pode ser descrita como

$$P_{in/amp} = \frac{P_{Tx}}{\eta} \quad (3.20)$$

Após as relações entre potência de entrada e saída serem determinadas, a potência total consumida por uma estação rádio base, independente da variação da carga, pode ser descrita como em [2]

$$P_{erb} = \eta_{setor}(\eta_{nTX}(P_{pa} + P_{tx}) + P_{pds} + P_{rf}) + P_{micro} + P_{air} \quad (3.21)$$

em que η_{setor} é o número de setores em uma célula, η_{nTX} é o número de antenas transmissoras. P_{pa} , P_{tx} , P_{pds} , P_{rf} , P_{micro} e P_{air} são respectivamente a potência do amplificador, do transceptor, do processador digital de sinais, do retificador, do link de micro-ondas e do ar condicionado.

3.3.2 Consumo de Potência de Acordo com a Largura de Banda

O trabalho realizado em [56] é uma extensão da análise de consumo de potência realizada anteriormente em [55]. O modelo mais recente é representado pela combinação dos componentes de consumo estático e dinâmico. Além dessa consideração, este modelo representa a variação do consumo de energia de uma estação rádio base, de acordo com a variação do número de antenas transmissoras T , com o tamanho da largura de banda disponível BW e com o fator τ que indica a variação do tráfego de acordo com número de usuários ativos na rede.

Neste modelo, a potência total consumida por uma estação rádio base, de acordo com o modelo proposto em [55], é descrita como

$$P_{TX} = \eta_{nTX}(P_{setor} + \delta P_{max}(\tau - 1)) \quad (3.22)$$

em que P_{setor} é a potência transmitida por um único setor da estação, P_{max} é a máxima potência transmitida e τ é o parâmetro que indica se durante um certo período de tempo toda a largura de faixa está sendo utilizada, que significa a variação de dispositivos inteligentes acessando a rede. Desta maneira, pode-se descrever P_{setor} como

$$P_{setor} = \frac{P_{pds}(P_{rf} + P_{pa})}{(1 - \sigma_{DC/DC})(1 - \sigma_{AC/DC})(1 - \sigma_{air})} \quad (3.23)$$

em que $\sigma_{DC/DC}$ e $\sigma_{AC/DC}$ são, respectivamente, as perdas devido às conversões DC/DC e AC/DC e σ_{air} é a perda devido ao ar condicionado.

Este modelo considera a influência do número de antenas e da largura de faixa escolhida no consumo total de potência. Portanto, deve-se levar em consideração, no cálculo da equação (3.23), que o consumo de potência do processador de sinais e do conversor de radiofrequência variam de acordo com o número de antenas T e com a BW. E, como proposto em [55], são descritas como

$$P_{rf} = A \frac{BW}{10MHz} P_{prf}, P_{pds} = A \frac{BW}{10MHz} P_{pdsp}. \quad (3.24)$$

De acordo com [55], para se observar a variação do consumo de potência devido à largura de banda disponível e o número de antenas, podem-se considerar os parâmetros $\sigma_{DC/DC}$, $\sigma_{AC/DC}$, σ_{air} e a potência de transmissão constantes.

3.3.3 Métricas de Eficiência Energética

Um método eficiente para o cálculo da eficiência energética do sistema foi proposto em [115] e é uma ferramenta útil para medir a eficiência da rede sob restrições de projeto de um sistema de comunicação. A proposta leva em consideração parâmetros como capacidade, área de cobertura e consumo de energia para calcular o consumo por quilômetro quadrado e a energia para transmitir um único bit. A eficiência energética por área em W/km^2 , conforme proposto em [115], é descrita por

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{A} \quad (3.25)$$

em que P_i é a potência total calculada para todas as estações rádio base instaladas na área de cobertura desejada.

Outra métrica de desempenho energético é o bit por joule de uma rede de acesso sem fio. Esta métrica mede a relação entre a taxa de dados e o consumo total de energia

do sistema e, conforme proposto em [115], é dada por

$$\Psi = \frac{R}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.26)$$

3.4 Confiabilidade em Sistemas de Comunicação

A confiabilidade é a métrica que determina se um sistema está funcionando adequadamente, em conformidade com as especificações, por um período de tempo determinado [3]. Em outras palavras, a confiabilidade é a probabilidade de que um sistema trabalhe de forma ininterrupta e corretamente por um tempo específico. Modelos de *Markov* têm sido amplamente utilizados na investigação da confiabilidade [116]. Um modelo de *Markov* considera as probabilidades de diferentes estados n de um sistema em função de um tempo específico t . Tem-se, portanto, duas variáveis: estado e tempo.

Uma abordagem para estimar as probabilidades para determinação da confiabilidade é assumir tempos de falha exponenciais e usar a teoria de sistemas paralelos e/ou em série, denominados de cadeias de *Markov* contínuas, para calcular a probabilidade de transições entre estados diferentes ao longo do tempo [116].

O estado atual de um sistema é limitado por conjunto de estados finitos. As transições no sistema podem ser para frente, isto é, a partir do estado n para o estado $n + 1$, do estado $n + 1$ para o estado $n + 2$ e assim por diante. As taxas de transição são definidas pelos estados escolhidos. Em geral, é desejável escolher os estados de modo a que as taxas de transição correspondam aos estados conhecidos, tais como a taxa de falha e taxa de reparo.

Desta maneira, se um sistema tem $n + 1$ estados possíveis e a taxa de transição entre os estados adjacentes, sendo somente para frente ou para o estado atual, a propriedade principal de um processo CTMC diz que para qualquer sistema, dado o estado atual n e seu estado futuro $n + 1$, a probabilidade de estar no estado k no instante de tempo $(t + \Delta t)$, com taxa de transição $\lambda_{k-1,k}$ entre estados $k - 1$ e k , é descrito como em [117]

$$P_k(t + \Delta t) = \lambda_{k-1,k} \Delta t P_{k-1}(t) + P_k(t) - \lambda_{k,k+1} \Delta t P_k(t) \quad (3.27)$$

Existem várias distribuições estatísticas que são fundamentais na investigação de confiabilidade. A distribuição poissoniana é aplicável a situações em que um evento pode ocorrer em qualquer ponto no tempo e a sua taxa de transição λ é considerada constante de um estado para o outro, de modo que a probabilidade da taxa de transição a partir do modelo de *Markov* pode ser reescrita considerando $\Delta t \rightarrow 0$. Desta maneira a equação (3.27) pode ser reescrita como

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = \dot{P}_k(t) = \lambda_{k-1,k}P_{k-1}(t) - \lambda_{k,k+1}P_k(t) \quad (3.28)$$

Essa análise de confiabilidade assume uma taxa independente de falhas (λ). Uma vez que o número de estados é finito, a probabilidade de transição segue uma distribuição poissoniana com espaço finito $S = \{0, 1, 2, 3, \dots, M\}$. Cada espaço indica o estado de operação da carga de comunicação no tempo t . Modelos baseados em CTMC de estados finitos são utilizados a fim de se obter uma solução geral para o problema de confiabilidade.

A Figura 7 ilustra o modelo de *Markov* para n estados independentes. Falhas ocorrem a uma taxa exponencial e somente uma falha é considerada a cada transição de estado. O estado da rede de comunicação varia de acordo com a transição entre estados e sua funcionalidade é afetada de acordo com a configuração do sistema. Foi considerado um sistema trabalhando em modo ilhado, como um sistema com falhas independentes entre si, isto é, a perda de funcionalidade é progressiva entre os estados, portanto deve-se calcular as probabilidades de falha e de transição de cada estado para obter a confiabilidade total do sistema de comunicação para um determinado modo de operação [118].

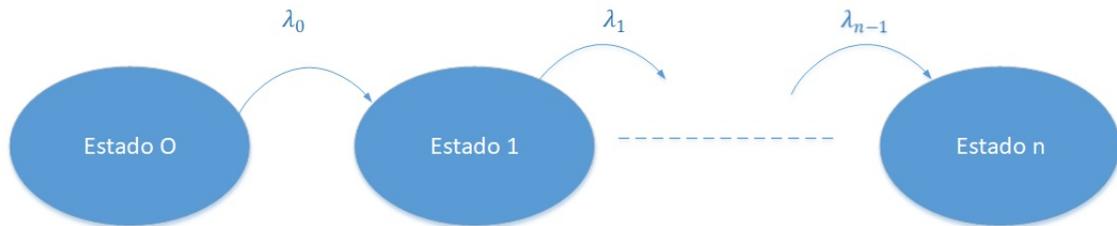


Figura 7 – Modelo de confiabilidade de *Markov* para $n - 1$ estados independentes [3].

4 Análise e Desempenho de Redes de Comunicação em Sistemas de Distribuição Ativos

Este capítulo tem como objetivos o dimensionamento e a análise de uma infraestrutura de acesso celular baseada em padrões de comunicação entre máquinas aplicada a sistemas de distribuição. Através desse estudo, analisa-se a relação de compromisso entre os requisitos de cobertura, capacidade e consumo de energia da rede de comunicação. A pesquisa engloba fatores como a necessidade de a rede suportar uma conexão massiva de dispositivos e como isso influencia a operação do sistema, considerando as demandas atuais e futuras do sistema elétrico e as limitações dos atuais padrões de comunicação entre máquinas.

4.1 Introdução às Redes de Distribuição Ativas

Uma *RDA (Rede de Distribuição Ativa)* deve ser eficiente, altamente confiável, robusta e capaz de gerenciar vários tipos de cargas e de recursos energéticos distribuídos [119]. Desta maneira, este novo sistema de distribuição deve ser inteligente o suficiente para perceber as alterações no seu ambiente e reagir rapidamente às falhas, suportar um fluxo bidirecional tanto de dados quanto de energia e monitoramento em tempo real [19].

Em um sistema de distribuição totalmente automatizado, a *AMI* é apontada como o primeiro passo para a modernização da rede [29]. Esta infraestrutura deve ser responsável por monitorar, controlar e gerenciar todos os *IEDs (Intelligent Electronic Devices)* através do uso de medidores inteligentes. Além disso, nas *RDA* existe uma enorme preocupação com problemas relacionados à estabilidade de tensão devido à alta penetração de recursos energéticos distribuídos e cargas dinâmicas [20]. Para este fim, o uso de medidores fasoriais em sistemas de distribuição pode garantir controle e operação seguros e precisos [98].

Esses dispositivos formam uma grande rede de sensores que trocam informações de forma independente ou com mínima interação humana, caracterizando uma *MTC* [23]. A rede aplicada à comunicação entre máquinas deve ser capaz de suportar uma grande quantidade de dispositivos, como medidores, dispositivos eletrônicos inteligentes, sensores, atuadores, disjuntores, com diferentes requisitos de transmissão de dados, alta confiabilidade, baixo custo de infraestrutura e mobilidade [15].

As tecnologias móveis aplicadas ao padrão *M2M* foram propostas para suportar a comunicação massiva entre máquinas, oferecendo mais eficiência energética, menores custos de operação e flexibilidade e com a grande vantagem de poder operar com as atuais

tecnologias celulares dentro de uma mesma banda. Dois padrões de comunicação aplicados à comunicação entre máquinas, o eMTC e o NB-IoT, emergem como uma solução viável para o uso de dispositivos inteligentes nas bandas do espectro licenciado com as atuais tecnologias celulares, provendo baixo custo e alta flexibilidade. Portanto, as limitações e principais características dos padrões eMTC e NB-IoT serão analisadas neste capítulo de acordo com os requisitos necessários para a operação e controle de sistemas de distribuição ativos.

4.2 Infraestrutura de Comunicação Aplicada a um Sistema Ativo de Distribuição

A infraestrutura de uma rede de comunicação aplicada a um sistema inteligente deve possuir as seguintes características: ser robusta, escalável e flexível para suportar a conexão de uma grande quantidade de diferentes tipos de dispositivos, com diferentes tipos de requisitos e que geram um enorme volume de dados [29]. O correto projeto da infraestrutura e a análise de desempenho da camada física do sistema de comunicação têm uma importância primordial no desempenho e operação do sistema. A Figura 8 ilustra como a rede de comunicação deve prover conectividade para todos dispositivos instalados em um sistema de distribuição ativo.

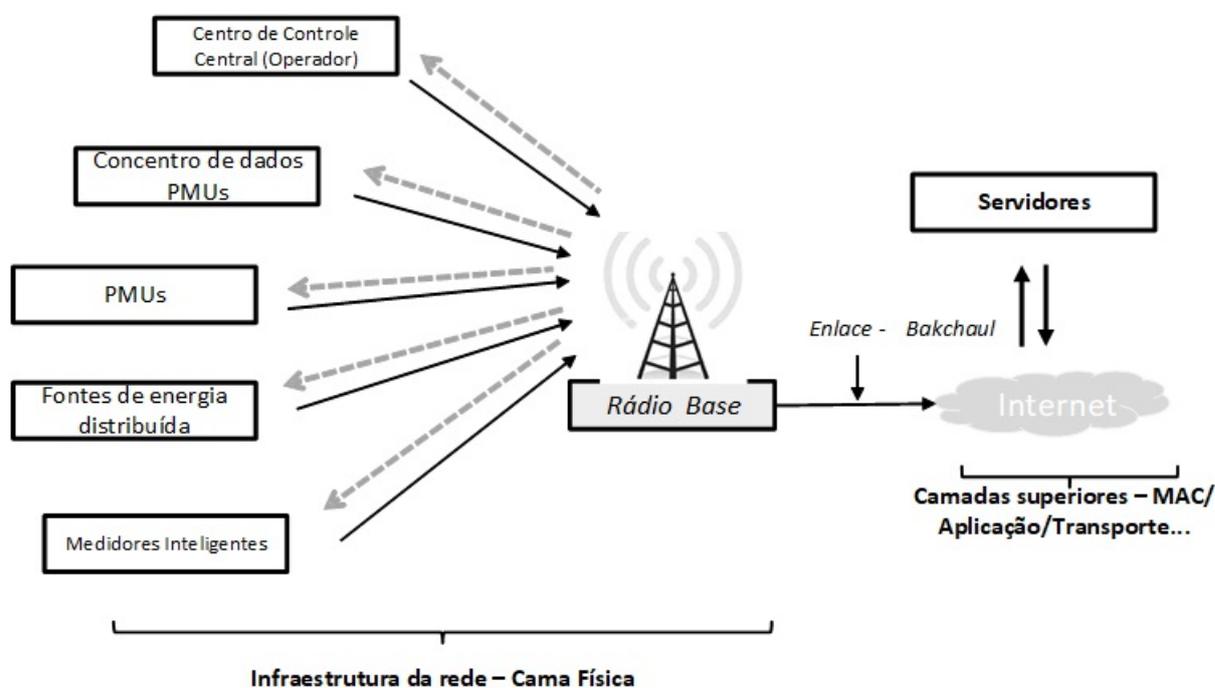


Figura 8 – Conectividade entre dispositivos em um sistema de distribuição [1].

Na Figura 8, é possível notar o fluxo bidirecional de informação dentro do sistema e a interação entre as camadas de comunicação. A infraestrutura de comunicação é composta

principalmente por três camadas: o núcleo, a camada de acesso e a última milha (os usuários) [12]. A camada de acesso é responsável por fornecer conectividade para todos os usuários através do enlace de comunicação por estações rádio base.

Esta camada deve suportar a conexão massiva de dispositivos com um baixo investimento em infraestrutura e flexível o suficiente para suportar diversos tipos de dispositivos inteligentes. A rede de acesso também é responsável por interagir e se comunicar com a rede do núcleo principal, que provê o acesso à Internet e aos servidores na nuvem, através de um enlace de *backhaul*, que pode ser um enlace de micro-ondas ou fibra ótica.

Os requisitos da camada física irão divergir de acordo com a capacidade de transmissão de dados necessária, a latência, a sensibilidade a ruído e a prioridade de comunicação de cada usuário. Nas RDA, a infraestrutura de medição avançada e os PMUs irão trabalhar em conjunto para atingir níveis aceitáveis de confiabilidade e robustez para a operação do sistema de distribuição inteligente.

A infraestrutura de medição inteligente irá fornecer aos consumidores informações de consumo e cobrança necessárias para habilitá-los a participar mais efetivamente na redução de carga em horários de pico, permitindo o fluxo de comunicação bidirecional entre os medidores de energia e as distribuidoras de energia elétrica [16]. Além disso, os programas de resposta à demanda fornecem incentivos adicionais para redução do nível de consumo residencial, tal como o acompanhamento da conta em tempo real. Nas redes inteligentes, esta funcionalidade estará incorporada aos aparelhos domésticos, permitindo a análise do comportamento do usuário na utilização deles.

O medidor eletrônico inteligente é o elemento-chave nesse novo contexto. Através dele, em associação com a infraestrutura de comunicação adequada, será possível suportar outras funcionalidades como suspender e restabelecer remotamente o fornecimento de energia, obter informações relativas à qualidade do fornecimento de energia, auxiliar o consumidor a estabelecer e alcançar metas de consumo, reduzir o tempo de reparos em casos de mau funcionamento ou de falhas que levem à interrupção do fornecimento de energia elétrica [120].

Além disso, medidores fasoriais são instalados em locais estratégicos com o intuito de realizar medidas precisas da magnitude e do ângulo de fase das ondas elétricas, associando-as a informações de localização do medidor, já que está interligado ao GPS (*Global Positioning System*) [121]. A correta aquisição das medidas fasoriais permite ao operador estimar com precisão o atual estado do sistema elétrico.

Os diversos PMUs se comunicam com a PDU (*Phasor Distribution Unit*), que é responsável por analisar todas as medições feitas. Este enlace de comunicação deve ser seguro e confiável. Devido à alta velocidade de aquisição de dados, os sistemas monitorados pelos PMUs poderão operar em tempo real [21]. Requisitos como latência e a taxa de

amostragem de dados de cada aplicação irão influenciar significativamente a taxa de dados total necessária da rede de comunicação, bem como a largura de faixa necessária para transmitir estes dados.

O volume de dados gerados irá variar de acordo com o número de PMUs instalados no sistema elétrico, o tamanho do quadro de cada mensagem transmitida e a frequência de amostragem do sinal. De acordo com o padrão IEEE-Std.C37.118 [122], o tamanho do quadro é composto por uma parte de tamanho fixo mais os campos correspondentes a cada fasor medido, número de canais digitais e número de canais analógicos. A taxa de amostragem irá variar de acordo com a frequência do sistema de distribuição. No caso do padrão brasileiro, a frequência do sistema é 60 Hz. Esses dados são a base para o cálculo da largura de banda mínima exigida para transmitir os dados medidos de cada PMU ou sincrofasor. As taxas de amostragem mais utilizadas variam, podendo ser 10, 20, 30 e 60 amostras do sinal por segundo, e a taxa de aquisição dessas amostras é definida de acordo com o conversor analógico digital instalado na entrada de cada PMU. Desta maneira, a largura de banda mínima é calculada por [113],

$$BW_{PMU} = N_{quadro} \cdot f_s \cdot N_{PMU} \quad (4.1)$$

Para exemplificar a influência da frequência de amostragem e a quantidade de dados gerados por sincrofasores, a Tabela 6 foi gerada. Ela ilustra a largura de banda mínima exigida para transmitir medições por diferentes unidades de sincrofasores e diferentes taxas de amostragem do sinal. No cálculo é considerado um processador de ponto fixo com 8 canais fasoriais e 2 canais digitais. O volume de informação irá variar de acordo com o tipo de medida (se é feita com processadores de ponto fixo ou ponto flutuante), o número de canais digitais dos sincrofasores, número de transdutores e o padrão utilizado para a composição do quadro.

Tabela 6 – Volume de informação gerado por sincrofasores para diferentes taxas de amostragem [13].

N_{PMU}	Requisitos		Taxa de amostragem [Mamostras/s]		
	Quadro Fixo	Bytes/quadro	10	20	60
1	76	112	8,96	17,92	53,76
2	76	224	16,05	32,11	96,33
6	76	672	232,02	464,04	1392,14
10	76	1120	14901	29803	89411
12	76	1344	160224	320449	961348

É possível observar na Tabela 6 que o volume de dados gerados aumenta significativamente de acordo com aumento dos valores de f_s . Taxas de amostragem maiores resultam em dados mais precisos, aumentando a sensibilidade do sistema para detectar

qualquer parâmetro fora do padrão. Porém, o alto volume de dados gerados restringe a tecnologia capaz de suportar a transmissão deste imenso volume de dados.

Conseqüentemente, devido a essa necessidade de mais inteligência agregada ao sistema de distribuição, faz-se necessário quantificar e analisar o número de dispositivos que serão conectados e, dada uma certa tecnologia de comunicação, distinguir suas limitações e como irão impactar a operação da rede elétrica inteligente.

4.3 Análise de Desempenho de Redes *M2M* aplicadas a Sistemas de Distribuição

A concepção e implementação de uma infraestrutura de acesso celular são tarefas complexas. Existe uma necessidade rigorosa de investigar todos os aspectos que possam influenciar a qualidade de serviço prestada pela rede de acesso móvel. Para melhor demonstrar todo o processo de dimensionamento, as próximas seções irão demonstrar detalhadamente os passos necessários para a execução do projeto da estrutura de rede sem fio para avaliar o desempenho do sistema dada uma certa tecnologia aplicada a um dado cenário simulado.

4.3.1 Considerações Iniciais para o Desenvolvimento do Sistema

Nesta seção, o desempenho de uma rede totalmente automatizada será avaliado com base nos padrões de tecnologia de comunicação entre máquinas aplicadas a sistemas de distribuição ativos. A metodologia proposta é simulada, testada e validada em dois cenários hipotéticos baseados nos sistemas de distribuição [IEEE 13 barras \[123\]](#) e [IEEE 37 barras \[124\]](#), conforme ilustrados na Figura 9 e na Figura 10.

Foram escolhidos dois cenários distintos principalmente devido a suas diferenças de tamanho e a necessidade de conectividade de cada sistema. Este trabalho foca o dimensionamento da camada física de um sistema de comunicação. Desta maneira, como forma de garantir um enlace de comunicação confiável para todos os usuários dentro da área de cobertura desejada, o sistema almeja atingir a mínima probabilidade de erro de bit. Além disso, é considerado que o sistema irá transmitir na maior potência possível com o intuito de alcançar a máxima taxa de dados e a maior área de cobertura possível.

É importante ressaltar que, para todas as simulações, o foco é o enlace de descida (*downlink*). A área geográfica da Figura 9 e da Figura 10 foram extraídas de [\[124, 123\]](#). O sistema de comunicação é caracterizado por um cenário urbano, em que estações rádio base são aleatoriamente distribuídas dentro do sistema para atingir os requisitos mínimos de cobertura necessários para todos os usuários, mesmo os localizadas nas bordas da célula.

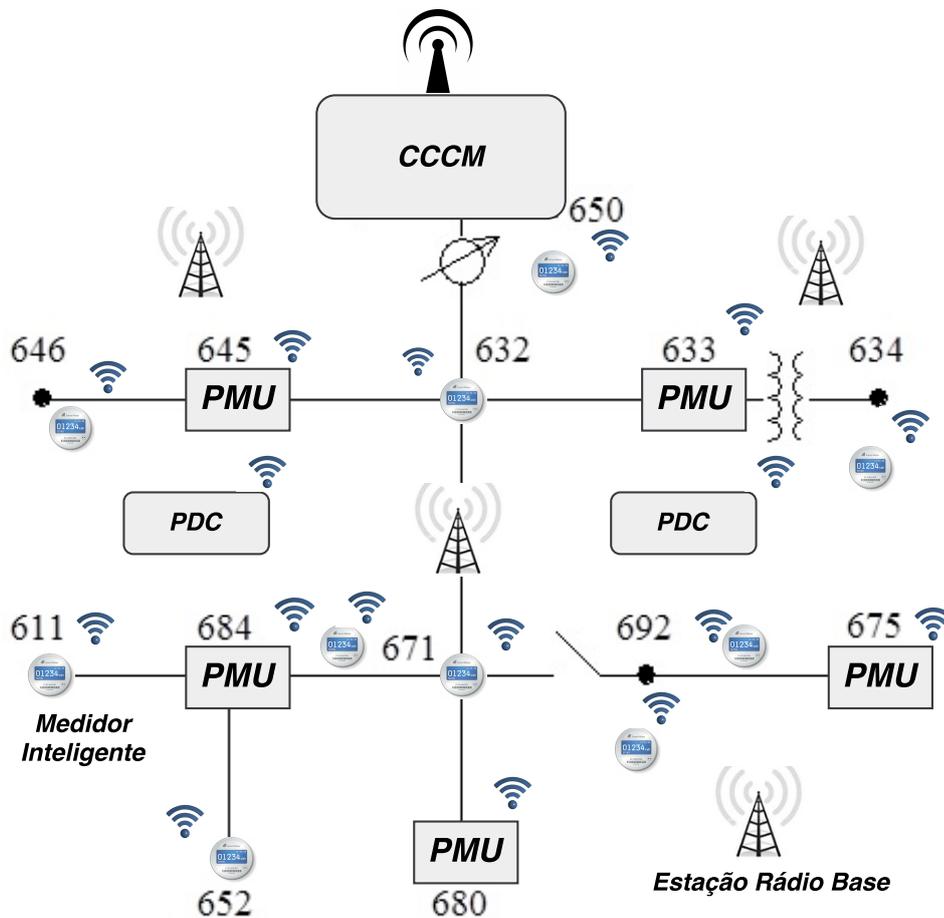


Figura 9 – Sistema *IEEE* 13 barras modificado [1].

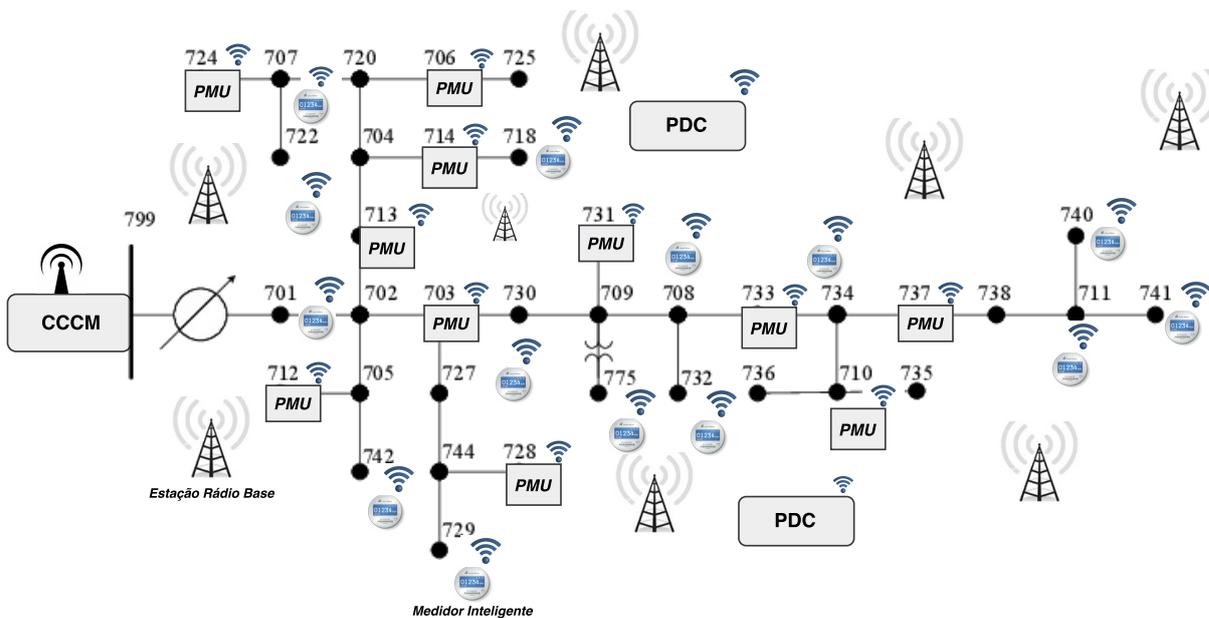


Figura 10 – Sistema *IEEE* 37 barras modificado [1].

Deve-se considerar, também, que os medidores inteligentes são distribuídos aleatoriamente dentro da área de cada sistema, e os sincrofasores são otimamente alocados. Um número fixo de 6 e 12 PMUs são, respectivamente, distribuídos conforme proposto em [125] e o cálculo do número máximo permitido de dispositivos de medição é obtido através da Eq.(3.14).

Outro fator importante no dimensionamento da rede de comunicação é avaliar o desempenho da mesma em cenários de atuação crítica, assumindo que os usuários estão sempre ativos, ou seja, que há uma troca imensa de informação dentro da rede. Portanto, na Eq. (3.22), τ é considerado 1, isto é, todos os usuários estão ativos e transmitindo. Nenhuma estratégia foi considerada para analisar o desempenho no enlace de subida (*uplink*), como por exemplo, a otimização da distribuição de usuários ou metodologias para economia de energia na transmissão de dados, uma vez que o objetivo deste capítulo é encontrar as limitações no dimensionamento da camada física focadas no enlace de descida.

Para uma comparação justa, ambas as tecnologias são projetadas para trabalhar em conjunto com a tecnologia LTE. A taxa de dados mínima permitida é calculada a partir da Eq. (3.15) e da Eq. (3.16). O volume de dados gerados pelos medidores fasoriais são apresentados na Tabela 4.1, e é considerado que para cada medidor inteligente é necessária uma taxa de dados mínima de 64 kbps, como descrito em [51], em um cenário de operação crítica. Os parâmetros utilizados nas simulações para ambos cenários são descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de simulação

Parâmetros	Valores
Modelo de propagação	COST-231
Ganho da antena transmissora (dBi)	15
Ganho da antena receptora (dBi)	5
Perda por penetração (dB)	16
Figura de Ruído (dB)	9
Potência de transmissão máxima (dBm)	46
Margem de desvanecimento (dB)	20
Ganho de diversidade (dB)	0
Perdas de transmissão	3
Esquema de modulação	QPSK
Número de subsímbolos	72/1200
Número de símbolos	14
Período de um subquadro (ms)	1
Margem de interferência (dB)	0
Número de antenas transmissoras	1
Tamanho da célula	Micro

4.3.2 Simulação e Resultados

Nesta seção, o desempenho de uma rede de comunicação baseada nos padrões eMTC e NB-IoT é analisado de acordo com os requisitos de cada cenário ilustrado na Figura 9 e na Figura 10. Primeiramente, é feita uma análise de acordo com os requisitos de cada padrão utilizado e, em seguida, uma análise dos resultados aplicados a cada cenário de distribuição.

A Figura 11 mostra uma análise da máxima taxa de dados alcançada de acordo com o raio de cobertura de uma estação rádio base para os dois padrões estudados. Este resultado é uma aplicação direta da Eq. (3.5) e da Eq. (3.16). Neste resultado, observa-se a influência da máxima taxa de dados possível para diferentes valores de raio de cobertura com diferentes larguras de banda. A máxima taxa de dados alcançada é de 8 Mbps para a tecnologia NB-IoT e cerca de 1 Mbps para eMTC. Além disso, a partir da Figura 11, é possível determinar a taxa máxima de acordo com o raio de cobertura de uma estação rádio base. O máximo raio de cobertura suportado pelo padrão eMTC é cerca de 1,6 km, porém verifica-se que o padrão é limitado a uma baixa taxa de dados.

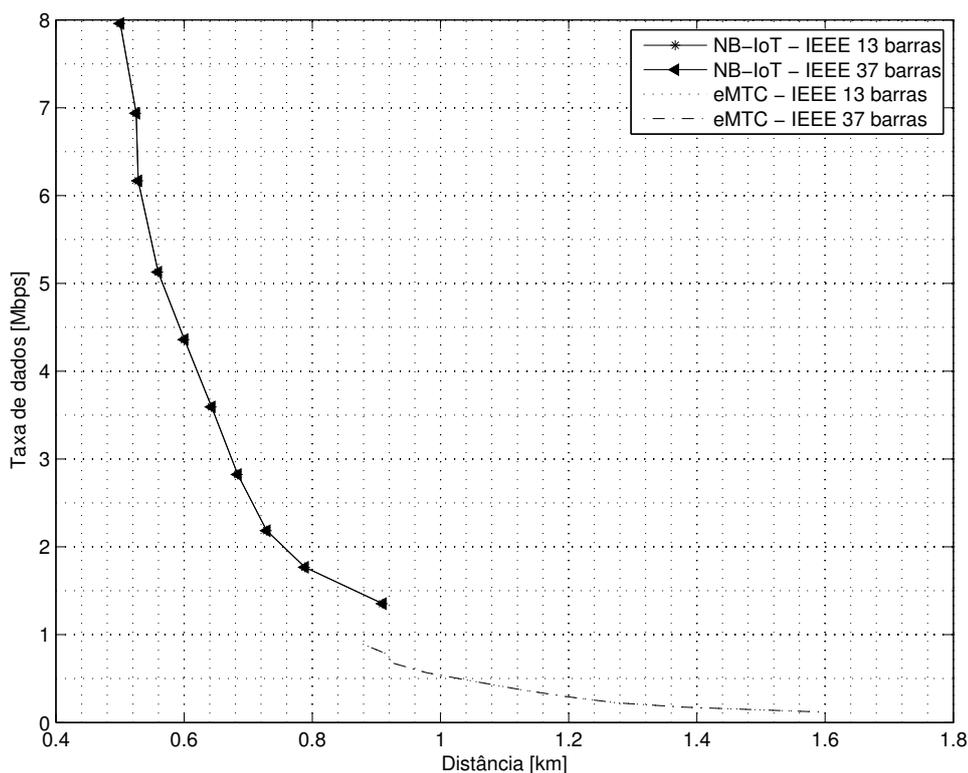


Figura 11 – Variação da máxima taxa de dados máxima alcançada de acordo com a distância da estação rádio base.

É possível observar, na Figura 11, a influência da largura de faixa de cada padrão simulado. Menores valores de largura afetam drasticamente a capacidade transmissão de dados, porém possuem efeito contrário no raio de cobertura. Por exemplo, a partir da Figura 11, para o padrão eMTC, a máxima taxa alcançada foi de 1 Mbps para uma área

de cobertura de $0,85 \text{ km}^2$. No entanto, para o padrão **NB-IoT**, em que a BW alocada é de 10 MHz, foi possível obter maiores valores de taxas de dados, porém com valores de raio de cobertura menores. O resultado ilustrado na Figura 11 mostra o impacto direto da largura de banda selecionada sobre a capacidade e como ambas as variáveis afetam diretamente as máximas taxas de transmissão do sistema.

É importante mencionar que o tamanho da área geográfica de ambos os sistemas de distribuição simulados não irá interferir na máxima taxa alcançável e na distância de cobertura de uma estação rádio base como ilustrado na Figura 11, dado que estes resultados variam de acordo com os valores pré-definidos na Tabela 7.

A Figura 12 e a Figura 13 são resultantes da aplicação direta das Equações (3.14), (3.15) e (3.16). Para ambos os cenários simulados foram calculados os valores mínimo e máximo de medidores inteligentes que a **AMI** pode agregar ao sistema. Para ambas as tecnologias, o número de dispositivos necessários varia de acordo com o raio de cobertura de uma estação rádio base, conforme esperado, e a capacidade de transmissão de dados aumenta de acordo com o número de dispositivos que poderão ser conectados à rede.

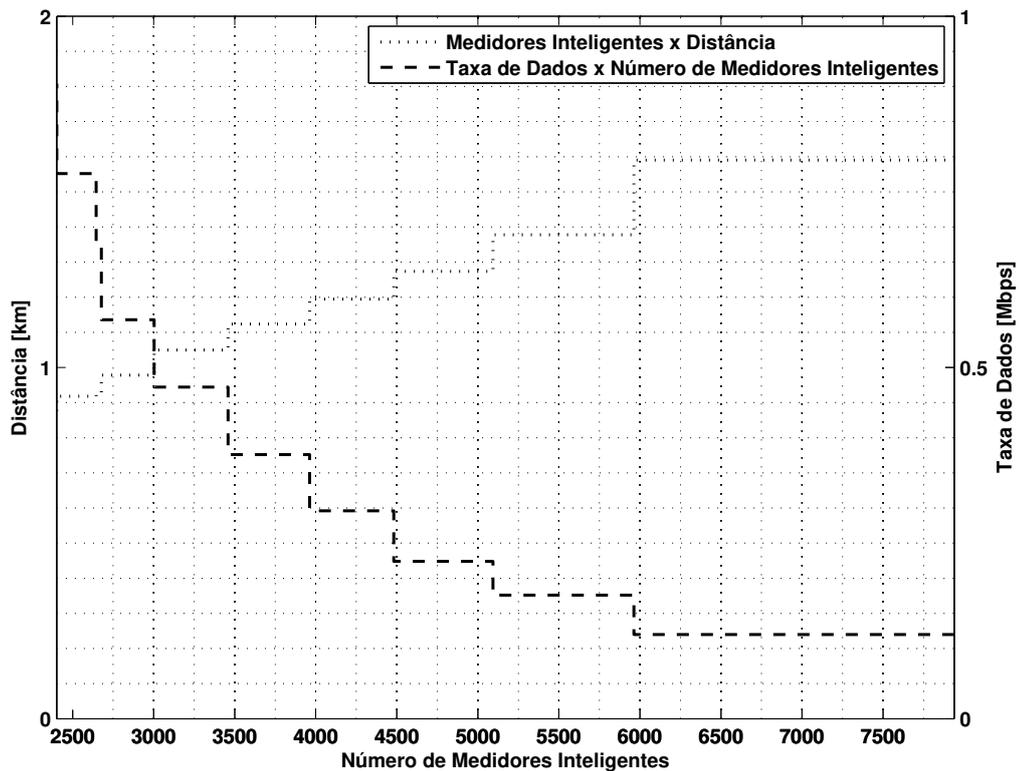


Figura 12 – Requisitos mínimos de uma rede de comunicação para suportar **AMI** no padrão **eMTC**.

Da Figura 12 e da Figura 13 fica evidente a influência da largura de banda sobre o número esperado de medidores inteligentes para cada cenário simulado. Para o padrão **eMTC**, como atinge maiores áreas de raio de cobertura, ou seja, para uma mesma estação rádio base sua área de cobertura é maior quando comparada com a área calculada para o

padrão **NB-IoT**. Assim, sua infraestrutura de medição irá permitir um número maior de dispositivos conectados. No entanto, como mencionado anteriormente, apesar de suportar maiores áreas de cobertura e permitir um número maior de medidores inteligentes, o sistema será limitado em capacidade de transmissão de dados.

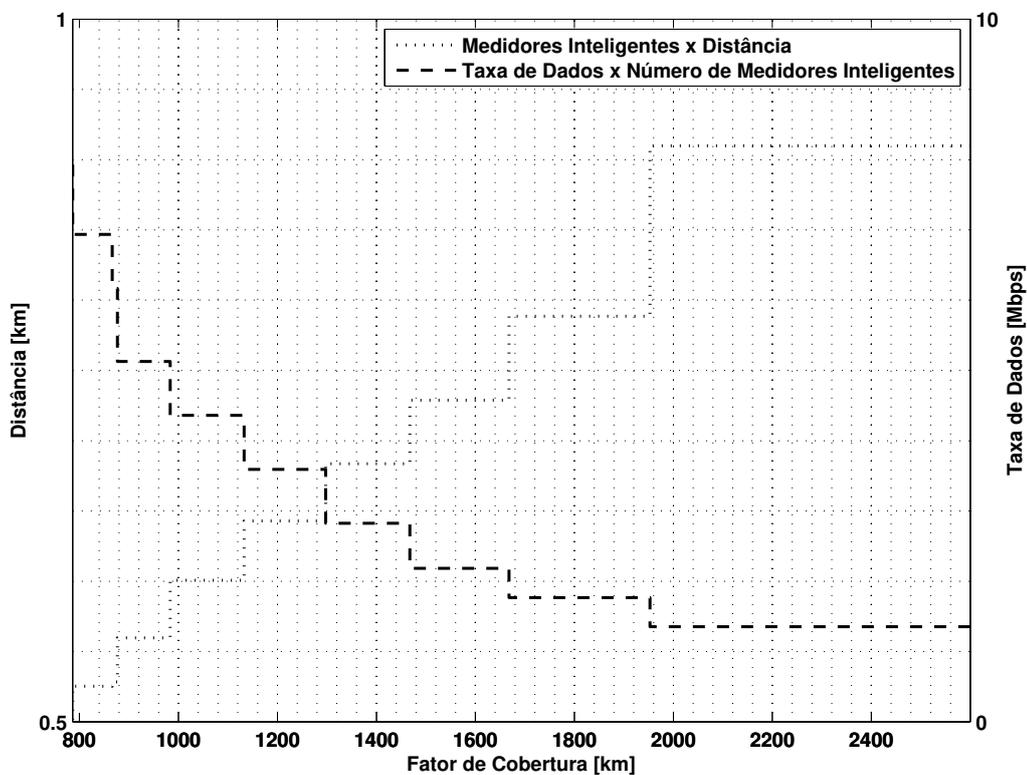


Figura 13 – Requisitos mínimos de uma rede de comunicação para suportar *AMI* no padrão *NB-IoT* operando em toda a banda.

Para melhor entender a relação de compromisso entre raio de área de cobertura, capacidade de transmissão de dados e a largura de faixa, o seguinte exemplo será analisado. Um pequeno valor de raio de cobertura (d) significa uma menor abrangência de uma área de cobertura. Em outras palavras, nos cenários propostos, somente é possível determinar o número de estações rádio base para fornecer conectividade dentro de uma dada área de acordo com o raio calculado e da área total desejada para cálculo, como descrito na Eq. (3.13). Porém, se existe a necessidade de uma maior infraestrutura de comunicação, haverá aumento no número de estações rádio base, conforme ilustrado na Figura 14, que resulta em um maior consumo de energia.

Como exemplo, os resultados obtidos para o padrão **eMTC** são considerados. Como impacto direto da Eq. (3.22), serão necessárias menos unidades de **ERBs** para cobrir uma determinada área, resultando em menor consumo de energia. Em contraste, a tecnologia **NB-IoT**, operando em uma banda maior, requer um número maior de estações rádio base para satisfazer a cobertura em uma mesma área, com um maior consumo energético, como ilustrado na Figura 14.

É importante ressaltar que, de acordo com a Figura 11, a máxima taxa alcançada para o padrão NB-IoT é de 8 Mbps. Portanto, através da Tabela 6, pode-se verificar que a rede dimensionada somente poderá suportar a transmissão de dados de 1 PMU com frequência de amostragem de 10 fasores por segundo. Em contraste, o padrão eMTC não consegue dar suporte a medições fasoriais devido a sua limitação em taxa. Porém, como ilustrado na Figura 12 e na Figura 13, os dois padrões conseguem suportar um número aceitável de medidores inteligentes.

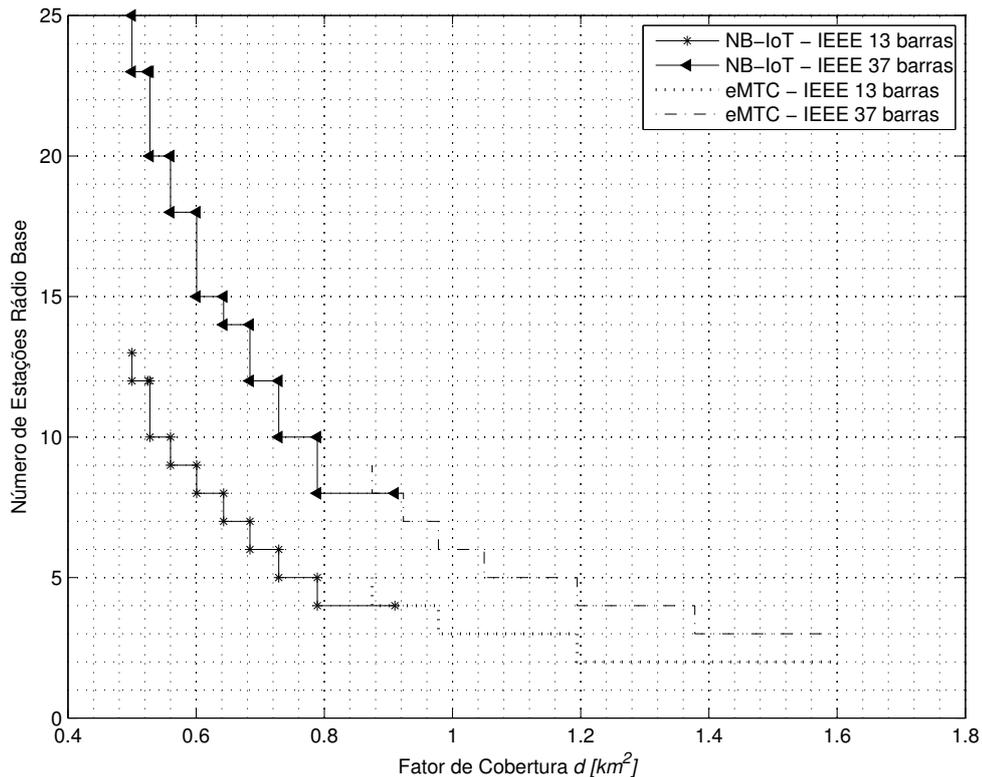


Figura 14 – Impacto da área de cobertura no número necessário de estações rádio base para os cenários simulados.

A Figura 15 mostra a máxima taxa de dados alcançada para ambos os padrões de acordo com o número de estações rádio base. Uma maior capacidade de transmissão de dados significa um aumento no número de estações requeridas, o que implica diretamente no aumento do consumo de energia. O padrão NB-IoT, de acordo com o modelo de operação considerado neste trabalho, opera em uma maior BW, portanto apresenta consumo total de energia maior que quando comparado com o padrão eMTC.

A Figura 14 e a Figura 15 mostram a influência do raio de cobertura e dos requisitos de transmissão de dados para ambos os cenários de distribuição simulados e o impacto no consumo de energia do sistema. Conforme os resultados, é evidente que existe uma relação de compromisso entre taxa de dados, área de cobertura e consumo de energia.

Para o projeto de uma infraestrutura de comunicação que forneça um enlace de comunicação confiável, é desejável atingir baixos valores de probabilidade de erro de bit.

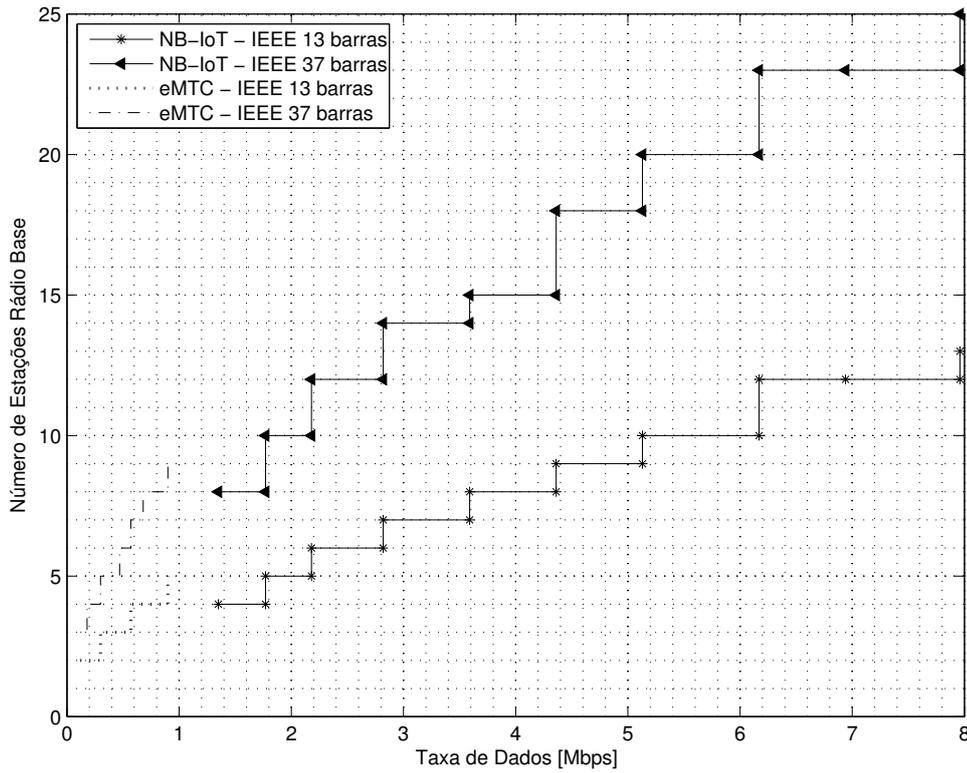


Figura 15 – Taxa de dados por estação rádio base.

É possível calcular, através da Eq. (3.15) e da Eq. (3.3), a taxa de dados mínima e a SNR mínima para estabelecer um enlace de comunicação confiável. Através da Figura 11, é possível notar a diferença na taxa de dados permitida para cada padrão de acordo com sua largura de faixa para a modulação QPSK. De posse destes dados calculados a partir da Eq. 3.18, é possível calcular a influência da variação da relação sinal-ruído no desempenho do sistema para um cenário limitado em largura de banda como ilustrado na Figura 16.

Para fins de comparação, a probabilidade de erro de bit para diferentes esquemas de modulação como o 16-QAM (*Quadrature amplitude modulation*), 64-QAM e QPSK também é ilustrada na Figura 16. Uma ordem maior de modulação aumenta a taxa útil de dados alcançável. No entanto, como mostrado nos resultados anteriores, pode ocasionar o aumento do consumo de energia do sistema. Os padrões de comunicação entre máquinas propostos pelo 3GPP não suportam maiores ordens de modulação. No entanto, uma solução conjunta com outras tecnologias pode ser viável para um cenário com maiores necessidades de taxa de transmissão de dados.

A Figura 17 ilustra a eficiência espectral para a modulação QPSK para diferentes taxas de código e os dois tamanhos de largura de banda simulados. Diferentes taxas de códigos são aplicados para aumentar a robustez contra o ruído e alcançar maiores taxas de dados, permitindo que o desempenho do cenário proposto seja avaliado, usando a Eq. (3.17), cujos resultados são ilustrados na Figura 17.

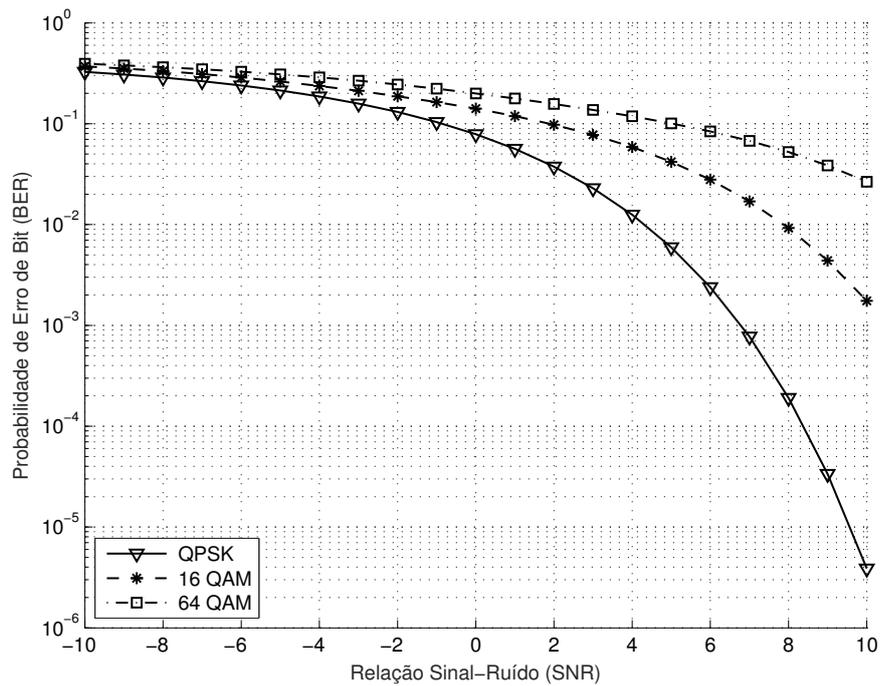


Figura 16 – Probabilidade de erro de bit para diversas ordens de modulação para os cenários simulados.

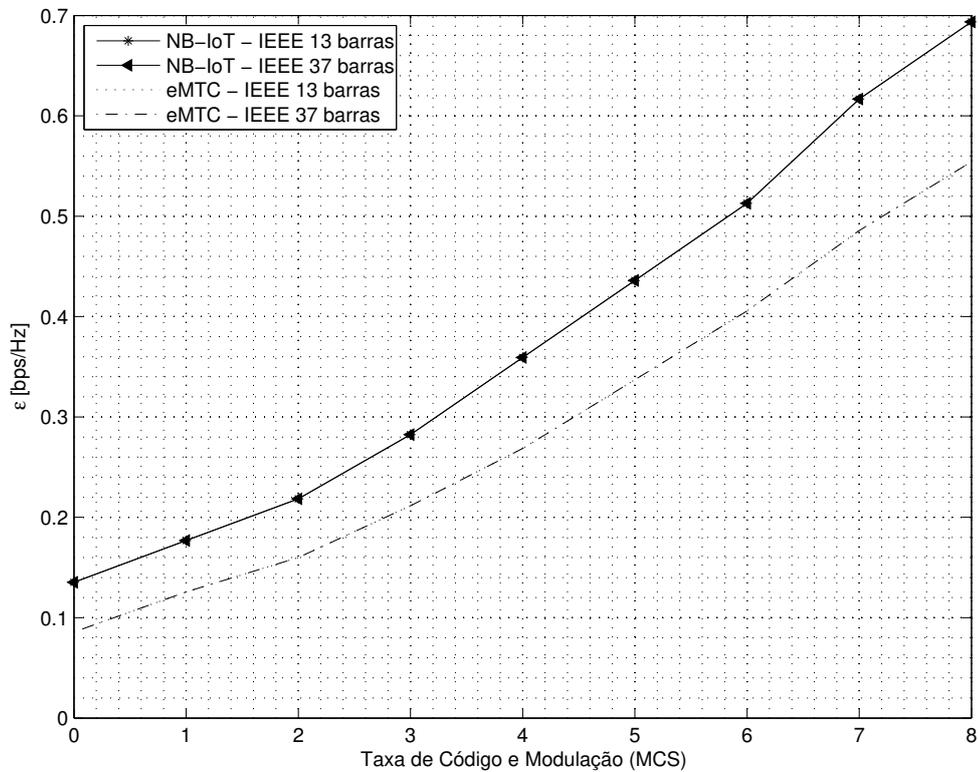


Figura 17 – Eficiência espectral para a modulação QPSK para ambos padrões simulados.

Conforme mostrado na Figura 17, uma maior taxa de código ocasiona uma melhor eficiência espectral para todos os casos apresentados. O padrão NB-IoT mostra uma me-

lhor eficiência espectral quando comparado com o padrão eMTC para diferentes tipos de códigos, uma vez que, neste padrão, devido à maior largura de banda, mais bits podem ser transmitidos dentro da mesma banda. No entanto, como ilustrado na Figura 19, maiores taxas de transmissão de dados significam uma necessidade de mais estações rádio base, o que irá diminuir a eficiência energética do sistema.

Para o correto dimensionamento de uma infraestrutura de comunicação, além dos requisitos de taxa de dados e cobertura, deve-se avaliar o sistema de acordo com o seu consumo energético, mais precisamente o consumo de acordo com cada bit transmitido e de acordo com a área de cobertura. Duas métricas foram propostas em [115] para avaliar o desempenho do sistema. O bit por joule e o potência consumida sobre a área são ferramentas úteis para medir a eficiência energética do sistema e são calculados com o auxílio da Eq. (3.26) e da Eq. (3.25). A Figura 18 e a Figura 19 ilustram a eficiência energética global para ambos os padrões e para cada cenário simulado.

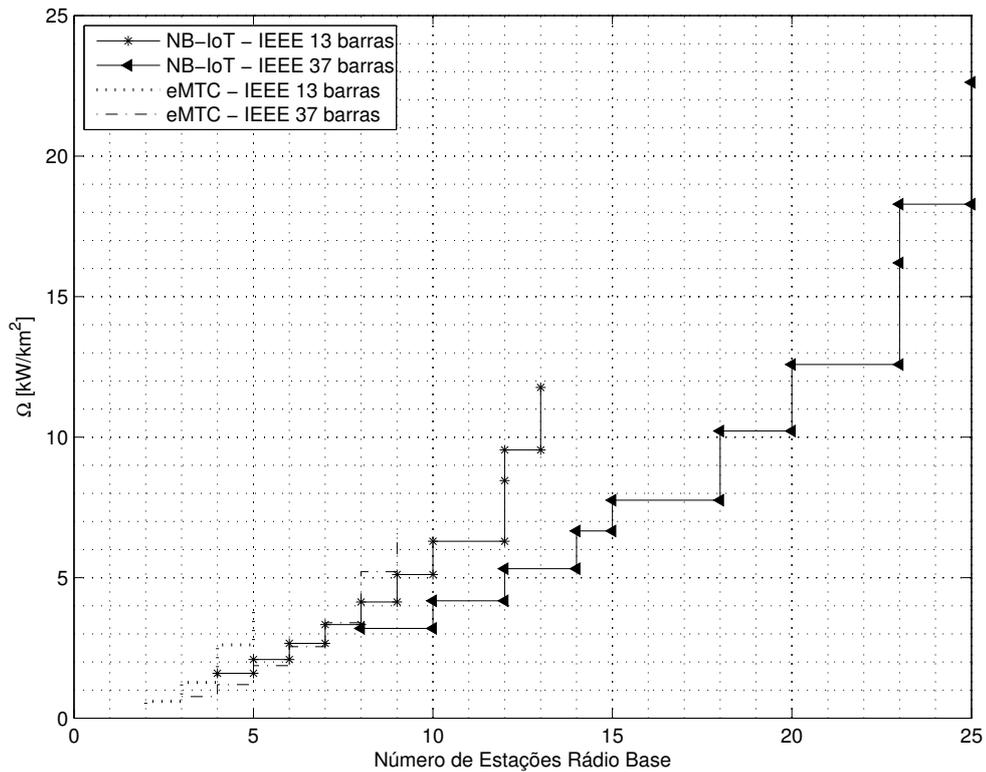


Figura 18 – Consumo total por área para os cenários simulados.

Nos dois cenários simulados é possível observar que, devido ao aumento da área geográfica de cada cenário, um número maior de ERBs é necessário dentro da área desejada, o que diminui a eficiência energética do sistema e aumenta o consumo total por área. A Figura 18 ilustra a influência da área de cada sistema simulado de acordo com o consumo de energia total para ambos os padrões de comunicação estudados. Além disso, na Figura 19, a taxa de dados agregada de acordo com a energia consumida é calculada através da Eq. (3.26). Taxas de código mais elevadas fornecem uma maior robustez ao

sistema, no entanto, possuem a desvantagem de aumentar o consumo de energético total, conforme ilustrado na Figura 19.

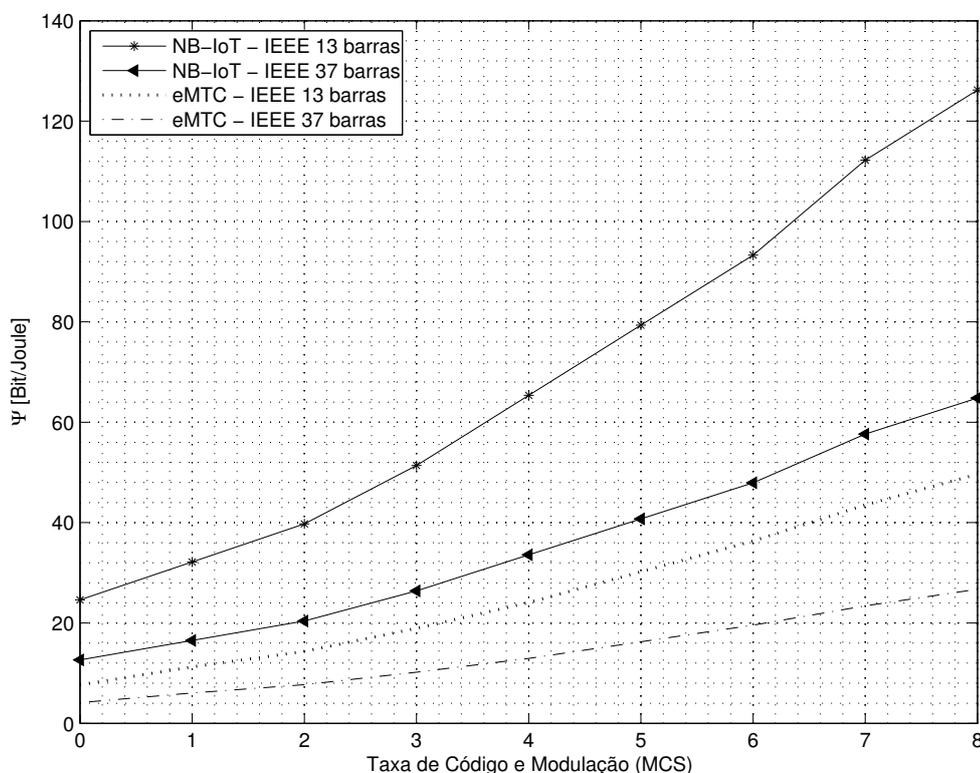


Figura 19 – Eficiência em bits por joule para diferentes taxas de código e modulação *QPSK*.

Neste capítulo foram analisadas e validadas as restrições de tecnologias avançadas de comunicações em sistemas de distribuição. Requisitos como capacidade de transmissão de dados e cobertura de usuários são usualmente analisados no projeto e dimensionamento de uma infraestrutura de rede de acesso celular. Todavia, devido ao aumento do número de dispositivos conectados e à necessidade de se agregar uma maior inteligência à rede, se fez necessária a análise desse crescimento de inteligência e o impacto no consumo de potência da rede sem fio. Este impacto pode ser ainda maior se sistemas elétricos que irão trabalhar desconectados da rede principal de energia forem considerados, com recursos energéticos limitados, operando em situações críticas ou de desastre. Para isto, é necessária uma análise detalhada do comportamento das redes de comunicações em microrredes de geração distribuída e de como a inteligência da rede pode ser afetada devido a medidas drásticas para aumentar a resiliência do sistema. No próximo capítulo, abordam-se estes temas e propõem-se metodologias de controle para amenizar os impactos da falta de recursos energéticos na operação do sistema elétrico.

5 Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Energia Autônomo e Energeticamente Eficiente para a Operação de Microrredes

Microrredes são pequenos sistemas de distribuição de energia com uma alta penetração de recursos energéticos distribuídos e altamente automatizados. No modo de operação isolado da rede, em um cenário de energia limitado, o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento da microrrede é de suma importância e tem o objetivo de aumentar o tempo de fornecimento de energia para seus consumidores, otimizando a utilização de seus recursos energéticos.

A operação de uma microrrede é altamente dependente de uma infraestrutura de comunicação confiável e robusta para gerenciar, controlar e monitorar todas as fontes intermitentes de energia e diversos tipos de cargas. Esta dependência tende a aumentar, já que cada vez mais dispositivos eletrônicos inteligentes serão conectados, por sua vez aumentando a dependência da rede elétrica inteligente de infraestruturas de comunicação, que possuem um alto consumo energético.

Desta forma, neste capítulo é apresentada uma metodologia híbrida para o gerenciamento de energia integrada com uma infraestrutura de comunicação com o intuito de otimizar a operação da microrrede com a máxima eficiência energética.

5.1 Introdução

Para aumentar a resiliência de microrredes operando isoladas da rede principal, novas formas de controle e gerenciamento de energia devem ser implementadas com o intuito de maximizar e otimizar o tempo de abastecimento de energia da rede. Tal tarefa se torna cada vez mais complexa devido à imprevisibilidade e intermitência das fontes de energia que suprem o sistema.

Como o tempo necessário para reestabelecer o fornecimento de energia elétrica não é conhecido, um dos objetivos do [SGE](#) deve ser gerenciar a operação resiliente da microrrede, despachando as fontes em intervalos de tempo necessários e planejando a operação em regime permanente da microrrede de forma a otimizar o tempo de fornecimento de energia elétrica aos consumidores sob a condição de operação isolada. Em [\[73\]](#) foi implementado um sistema de monitoramento e controle com o objetivo de aumentar o tempo

de fornecimento de energia às cargas prioritárias. Nesta abordagem, as cargas referentes à infraestrutura da rede de comunicação instalada não foram consideradas, o que pode levar a um erro na estimativa do tempo de suprimento de energia da microrrede, devido ao seu alto consumo energético.

Para analisar o impacto do consumo energético de redes de comunicação no tempo de suprimento de uma microrrede, a abordagem [126] foi proposta. Neste trabalho, uma infraestrutura de rede sem fio é integrada à microrrede. Desta maneira, o sistema de comunicação foi devidamente considerado como carga e os resultados mostram a influência do consumo de energia da rede de acesso celular no tempo de sobrevivência da microrrede. A diferença na duração do tempo de fornecimento de energia para uma microrrede, levando em conta ou não a carga de comunicação, é notável. Porém, em [126] a rede de comunicação é considerada uma carga prioritária dando um passo além da proposta apresentada em [73], onde não se considerou o consumo da rede de comunicação existente. Também em [126], como forma de economizar energia da infraestrutura de comunicação, principalmente das estações rádio base, técnicas de dormência foram implementadas no sistema de gerenciamento de energia da microrrede. Neste trabalho, as cargas referentes à infraestrutura de comunicação estão sempre ativas por serem consideradas cargas prioritárias. Portanto, se faz necessário o desenvolvimento de uma nova metodologia de gerenciamento e controle de energia autoadaptável de acordo com o estado de operação da microrrede e os recursos energéticos distribuídos.

Simulações demonstraram que estas novas ações de controle de energia otimizam o tempo de fornecimento de energia, porém originam uma relação de compromisso com a confiabilidade do sistema de comunicação. Para isso, a confiabilidade do sistema de comunicação é avaliada analiticamente por um processo contínuo de *Markov*, que demonstra o impacto da otimização do consumo de energia na confiabilidade do sistema de comunicação e como o decréscimo desta confiabilidade afeta a operabilidade das aplicações inteligentes.

5.2 Proposta de um Método Híbrido para o de Gerenciamento de Energia

Como condição inicial do sistema, considera-se que houve um desligamento, corte ou uma interrupção no sistema de energia causado por uma falha qualquer e, a partir deste momento, o sistema atua de modo isolado do sistema principal. Para maximizar a operação do sistema durante esse tempo de insuficiência é necessário planejar adequadamente a operação da rede inteligente como ilustrado no fluxograma da Figura 20.

O fluxograma da Figura 20 ilustra intuitivamente cada passo realizado na operação do sistema de energia, num total de onze ações. Considerando que o houve ilhamento

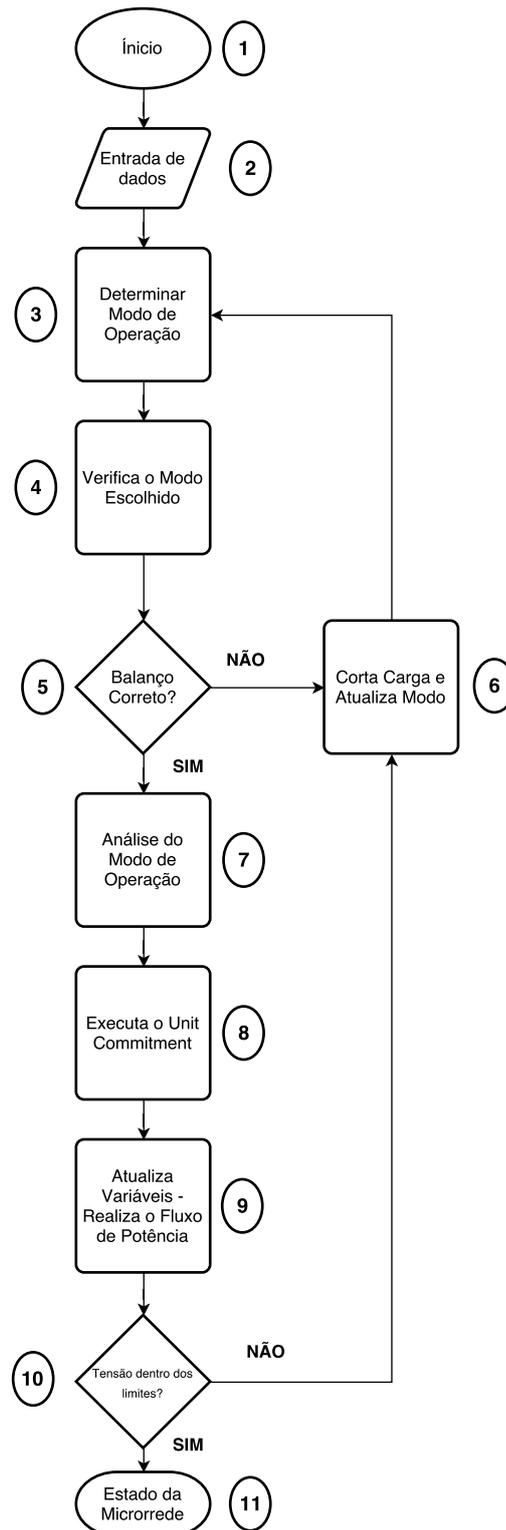


Figura 20 – Fluxograma de ações realizadas pelo *SGE* para uma dada janela de tempo.

(passo hum), o *SGE* irá receber as previsões de geração das fontes eólica e fotovoltaica, o estado das baterias (SOC_{eq}), o estado de todas as cargas e outras variáveis necessárias para determinar precisamente o estado de operação do sistema (passo dois). As previsões das fontes eólicas e solares são feitas com base em dados existentes e disponíveis, fornecidos para uma rede neural artificial para treinamento e enviado para o *SGE*. O consumo de

cargas prioritárias e os estados das baterias também são enviados ao SGE. Todas estas informações são enviadas ao sistema de gerenciamento por um sistema de comunicação robusto que, de posse destes dados, é capaz de determinar qual o melhor modo de operação a ser aplicado naquele exato momento (passo três). As informações resultantes desse passo são transferidas para o próximo bloco de processamento (passo quatro), onde as informações compostas pelo modo de operação do sistema, dados de carga atual e geração disponível são necessárias para determinar o balanço corretamente (passo cinco).

Determinado o modo de operação pelo SGE (passo sete) e conhecidas as previsões de geração e de carga, o sistema de gerenciamento executa o comissionamento de unidades para determinar a composição da geração que atende a demanda a um custo mínimo (passo oito). Caso as previsões de geração e carga resultem em um balanço não-negativo, o modo de operação proposto é aceito. Caso o balanço seja negativo, o sistema atualiza o modo de operação para o próximo nível, cortando o fornecimento dos clientes de menor prioridade para garantir a capacidade de atender aos clientes prioritários da microrrede (passo seis).

Para solucionar corretamente o problema de *unit commitment*, as funções de custo de cada uma das unidades devem ser definidas, pois elas são essenciais para uma previsão correta da composição da geração visando o menor custo. Neste caso, o custo de geração das unidades baseadas em energias renováveis é considerado baixo em relação às demais fontes. Por conseguinte, o problema de relação entre geração e demanda é solucionado. Os valores de geração encontrados são considerados para um teste do fluxo de potência do sistema (passo nove) com o objetivo de determinar se a solução encontrada é viável do ponto de vista de módulos e ângulos das tensões (passo dez). Caso a solução do passo anterior resultar em tensões fora dos limites o sistema retorna ao passo seis do fluxograma, repetindo todo processo. Senão, o estado da microrrede é determinado (passo onze).

5.2.1 Nova regra de prioridade de consumidores

As cargas conectadas à rede são classificadas de acordo com a tensão de alimentação e com critérios econômicos e sociais, determinados de acordo com a requisitos da ANEEL (*Agência Nacional de Energia Elétrica*). O ranking de prioridade de cargas é composto por cargas residenciais, rurais, comerciais e essenciais. A carga de maior prioridade é a do tipo essencial, que inclui serviços de sobrevivência. Quando ausente, pode trazer perigo para a saúde e a segurança das pessoas. No entanto, a classificação de usuários que será utilizada neste trabalho difere das abordagens anteriores [73, 126]. Neste novo modelo, a carga referente à infraestrutura de comunicação não é mais considerada uma carga essencial de classificação prioritária, pois, desta maneira, é possível aplicar recursos para economia de energia e ajuste de acordo com o estado de operação da rede. A nova classificação de consumidores de acordo com sua prioridade é ilustrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Regras de prioridade de consumidores na operação da microrrede.

Classificação	Nível de Prioridade	Tipos de Clientes
Classe 1	Alto	Hospitais Transporte Público Iluminação
Classe 2	Médio	Comercial
Classe 3	Baixo	Residencial e Rural

5.2.2 Modos de operação do sistema de gerenciamento de energia

Após determinar os níveis de prioridade de cada consumidor, o passo seguinte na proposta de gerenciamento da operação resiliente da microrrede é propor modos de operação para o sistema elétrico que possuam características que os difiram entre si de acordo com uma lista de ações de controle pré-definidas a serem tomadas pelo sistema de gerenciamento.

No momento em que o sistema de gerenciamento define o modo de operação da microrrede, as ações de controle são tomadas e os comandos são enviados aos diferentes dispositivos responsáveis conectados na rede, seja a abertura de uma chave ou o desligamento de uma carga de baixa, média ou alta prioridade. Três modos de operação foram propostos para o sistema de gerenciamento de energia proposto, os quais são descritos na Tabela 9, juntamente com suas ações de controle pré-definidas.

Tabela 9 – Modos pré-configurados de operação da microrrede.

Modos de Operação	Prioridade	Ações Controle
Crítico (C)	Alta	Corta Classe 2 e 3
Emergência (E)	Média	Corta Classe 3
Normal (N)	Baixa	Nenhuma ação é tomada

5.2.3 Políticas de operação e estados da microrrede

Conhecidas as hipóteses iniciais sobre a classificação dos consumidores de acordo com suas prioridades e os modos de operação propostos, o próximo passo é descrever como esses modos de operação são determinados. Para realizar essa tarefa, o [SGE](#) se baseia na definição e análise de algumas variáveis de controle, como a definição do estado de cargas do sistema de armazenamento, a geração e penetração de energia renovável e o horário e a demanda de cargas conectadas ao sistema.

As variáveis de controle vão determinar os modos de operação da microrrede. Cada uma dessas variáveis possui pesos diferentes determinados de acordo com o valor da informação com a qual se relacionam. São definidas cinco variáveis de controle, com

restrições de valores que variam de C_1 a C_5 , que serão brevemente discutidas nas próximas seções.

5.2.3.1 Estado de cargas dos sistemas de armazenamento — C_1

O estado de carga de um sistema de armazenamento é dado pela capacidade nominal de armazenamento disponível na bateria para utilização. Essa variável influencia a autonomia da microrrede e auxilia no gerenciamento do balanço de potência entre geração e carga. O SOC_{eq} é calculado a partir da capacidade nominal de todas as unidades de armazenamento de energia e de seus respectivos estados de carga atuais, podendo assumir valores de 0 a 1 ou, em porcentagem, de 0 a 100%, e é definido como

$$SOC_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^S E_i}{\sum_{i=1}^S E_{nomi}} \quad (5.1)$$

em que E_i é a energia disponível na unidade de armazenamento i em kWh, E_{nomi} é a capacidade nominal de armazenamento de energia da unidade i em kWh e S é o número de unidades de armazenamento. A variável C_1 é definida de acordo com estado de armazenamento das baterias, sendo de valor 0 se $SOC_{eq} \geq 75\%$, valor 1 se estiver entre 45% e 75% e assume o valor 2 se $SOC_{eq} < 45\%$.

5.2.3.2 Geração e Penetração de energia renovável — C_2 e C_3

Os níveis de geração de energia baseados em fontes intermitentes são pilares do abastecimento de energia em microrredes. O nível de **GEN** (*Geração de Energia Renovável*) é considerado como sendo a razão entre a potência que está sendo gerada em determinado momento e a potência total instalada de fontes renováveis no sistema, que pode ser descrito como

$$GEN = \frac{\sum_{i=1}^R Pg_i^t}{\sum_{i=1}^R Pg_i} \quad (5.2)$$

em que t é o intervalo de tempo considerado, i é a unidade de geração baseada em fontes renováveis, R é a quantidade total de unidade de geração da unidade i em kW, Pg_i é a capacidade nominal de geração da unidade i em kW e Pg_i^t é o montante gerado pela unidade i no intervalo de tempo t . As condições de geração de energias renováveis afetam a variável de controle C_2 e podem assumir valor 0 se **GEN** $\geq 40\%$ e valor 1 se **GEN** $< 40\%$.

A **PER** (*Penetração de Energia Renovável*) mede a quantidade da carga que é suprida pela geração da fonte de característica intermitente. Com a medida desta variável, é possível quantificar o montante de carga que pode ser suprido por fontes renováveis, dimi-

nuindo a utilização de [SAE](#) e a necessidade de despacho de fontes fósseis para atendimento da demanda. É definida como

$$PER = \frac{\sum_{i=1}^R P g_i^t}{\sum_{c=1}^C P l_c^t} \quad (5.3)$$

em que $P l_c^t$ é a potência da carga c no instante t e C representa as cargas conectadas ao sistema. A variável C_3 assume o valor 0 se for $\geq 25\%$ do estado de penetração de energias e valor 1 se $< 25\%$.

5.2.3.3 Horário e Demanda — C_4 e C_5

Para uma comparação justa nos modos de operação do sistema, o horário foi incorporado à operação do [SGE](#). O horário (H) é a variável que mede a demanda no horário de pico, ou seja, nos horários de maior demanda, devendo então haver uma distinção entre os períodos do dia. A variável C_4 é classificada como dentro ou fora do pico, assumindo os valores 0 ou 1, respectivamente.

A demanda (L) é medida de acordo com a carga atual conectada ao sistema ($P l_c^t$), durante o intervalo t . A variável C_5 assume valores de acordo com a informação conhecida sobre a média da demanda diária de acordo com a carga conectada para determinar se é maior ou menor que a média naquele momento de interesse.

De posse das cinco variáveis de controle e conhecendo todos os valores que podem assumir, é possível formar um conjunto de soluções de acordo com cada estado de cada variável de controle. Analisando todas as possibilidades, 48 diferentes tipos de soluções são propostos para a operação da microrrede. Desta maneira, três modos de operação foram agrupados de acordo com as cinco variáveis de controle, de forma que o [SGE](#) seja capaz de determinar em qual estado a microrrede deve operar pelo próximo intervalo de tempo considerado de acordo com as informações conhecidas. A Tabela 10 descreve a relação entre as variáveis de controle e os modos de operação da microrrede.

5.2.4 Política Híbrida de Gerenciamento de Energia Referente as Cargas da Rede de Comunicação Implementada

As modificações propostas referem-se a cargas correspondentes à infraestrutura da rede de comunicação com o objetivo de otimizar e maximizar o fornecimento de energia. A rede de comunicação considerada anteriormente como uma carga de alta prioridade, agora assume diferentes estados, variando de acordo com o estado de operação da microrrede. Em vez da rede estar sempre ativa, o [SGE](#) automaticamente ativa ou desativa a rede de comunicação quando for necessário, de acordo com o estado de operação de cada consumidor em um determinado momento. Essas regras de controle são baseadas em

Tabela 10 – Determinação dos modos de operação da microrrede.

		C_2/ C_3				
		C_4/C_5	00	01	10	11
Normal	00	N	N	N	E	
	01	N	E	E	E	
	10	N	E	E	E	
	11	E	E	E	E	
Emergência	00	N	E	E	E	
	01	N	E	E	E	
	10	E	E	E	C	
	11	E	E	E	C	
Crítico	00	E	C	C	C	
	01	E	C	C	C	
	10	C	C	C	C	
	11	C	C	C	C	

técnicas de dormência com diferentes profundidades aplicadas às estações rádio base para otimizar o consumo de energia. Essas políticas foram implementadas diretamente no [SGE](#) da microrrede e são descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Métodos de economia de energia para operação ilhada.

Modo de Operação da Microrrede	Prioridade de Cargas	Estado da ERB	Influência na Latência
Normal	AP	Ligada	Nenhuma
	MP	Suave	Baixa
	BP	Estendido	Média
Emergência	AP	Suave	Baixa
	MP	Estendido	Média
	BP	Desconectada	Alta
Crítico	AP	Estendido	Média
	MP	Desligada	Alta
	BP	Desconectada	Alta

A Tabela 11 ilustra como as ações de controle do [SGE](#) atuam de acordo com o estado de operação e a prioridade de cargas (AP - Alta prioridade, MP - Média Prioridade e BP - Baixa prioridade). Por exemplo, se for determinado que a rede deva operar no modo de emergência, primeiramente as cargas de baixa prioridade são desconectadas e toda a rede de comunicação responsável pela conectividade destas cargas é desativada. Já nos consumidores de prioridade média, suas respectivas [ERBs](#) entram em modo de dormência estendido e as cargas referentes aos consumidores de alta prioridade, no modo de dormência suave.

Durante o modo de dormência suave, o amplificador de potência da estação rádio

base é desligado. Por outro lado, no modo de dormência estendido, mais componentes da **ERB** são desligados. Além do **PA**, são desligados o **AIR**, o **PDS**, **RF-Transceiver**, permanecendo ativos apenas alguns componentes responsáveis pela sincronização com a rede principal. No modo desconectado, a estação rádio base é completamente desligada. Todas estas ações de desligamento de componentes da **ERBs** afetam o desempenho do sistema de comunicação, dado que após o desligamento dos equipamentos existe um tempo necessário para religá-los, se necessário. Desta maneira, é evidente que estas ações afetam a confiabilidade do sistema de comunicação ativo. A Tabela 12 ilustra a influência de cada modo de dormência no tempo de religamento da **ERB** de acordo com o número de dispositivos desconectados.

Tabela 12 – Características do modo de dormência.

Profundidade Modo de Dormência	Relação de Compromisso Latência	Tempo Religamento	Dispositivos Desconectados
Suave	Baixo	Baixo	PA
Estendido	Médio	Médio	PA/BB/DSP AIR/RF
Desligada	Alto	Alto	Todos

Na Tabela 12, são ilustradas variáveis subjetivas como o tempo de religamento necessário, dispositivos desconectados e a relação de compromisso devido às ações de controle utilizando diferentes profundidades de modos de dormência. Analisando a Tabela 12 fica evidente o aumento da latência devido ao tempo religamento da **ERB**, que impacta a operabilidade das aplicações inteligentes dependentes de um sistema de comunicação ágil com resposta em tempo real. Por exemplo, durante o modo de dormência com profundidade suave, as aplicações inteligentes que demandam baixa latência, como sistemas de proteção, serão totalmente afetados, pois o tempo de religamento da **ERB** é muito maior que o tempo necessário para tomar a devida ação de proteção.

5.2.5 Análise da Confiabilidade da Rede de Comunicação

Devido às ações de controle realizadas pelo método de gerenciamento de energia híbrido, a resiliência da microrrede aumenta, mas com um alto custo de operabilidade. O consumo de energia é diretamente proporcional à disponibilidade da rede de comunicação. A disponibilidade, por sua vez, está relacionada aos requisitos de latência e à confiabilidade, já que um ambiente mais confiável é aquele que detecta, age e reage rapidamente a mudanças em seu ambiente com requisitos rígidos de latência. Certas aplicações inteligentes possuem requisitos de baixíssima latência, que exigem um sistema com total disponibilidade. Por outro lado, aplicações com requisitos de latência menos estritos exigem uma menor disponibilidade do sistema de comunicação.

Na operação ilhada, o consumo de energia elétrica é uma variável crucial e o abastecimento de energia para o sistema possui disponibilidade limitada. Portanto, é necessário manter todas as ERBs ativas durante a operação da microrrede, com o intuito de suportar os rigorosos requisitos das aplicações inteligentes, já que todos os dispositivos eletrônicos inteligentes estão continuamente transmitindo e recebendo dados.

Além disso, quando a energia disponível é muito baixa durante situações críticas, o SGE irá desabilitar grande parte dos dispositivos das ERBs, minimizando as funcionalidades de comunicação para maximizar o fornecimento de energia para cargas essenciais. Em outras palavras, acarreta um decréscimo da inteligência da rede, pois afeta diretamente recursos de operação de cada aplicação inteligente, conforme ilustrado na Tabela 11. As funcionalidades afetadas devido à profundidade dos modos de dormência e seu tempo de religamento para cada profundidade são descritas como:

- Modo de dormência com profundidade suave:
 - Monitoramento de grandes áreas
 - Monitoramento de linhas de transmissão
 - PMUs
 - Gerenciamento de interrupção
 - Localização de falhas, isolamento e restauração de microrredes
- Modo de dormência com profundidade estendida. Além de todas as funcionalidades descritas no modo suave, as seguintes aplicações também são afetadas:
 - Gerenciamento de sistemas de distribuição
 - Recursos de medição avançada de redes
 - Automatização de subestações
 - Comunicações locais
 - Leituras de medidores inteligentes
 - Resposta à demanda
- Modo desligado/desconectado (toda ERB é desconectada):
 - Todas as funcionalidades de aplicações inteligentes irão falhar.

5.3 Simulações e Resultados

O cenário implementado foi testado em um sistema de distribuição modificado de 34 barras do IEEE com fontes de energia distribuídas. A Figura 21 ilustra o cenário da

microrrede proposta, com consumidores de maior prioridade localizados nas barras 802, 822, 830, 840, 860 e 890.

Para esta análise, foi desenvolvida e implementada uma rede de comunicação que abrange toda a área geográfica do sistema de 34 barras. A rede foi projetada e implementada com a tecnologia **LTE** de forma a garantir uma operação confiável da microrrede. As cargas de comunicação estão conectadas ao sistema juntamente com as demais cargas em suas barras equivalentes. O **SGE** irá adaptar o consumo de energia das cargas de comunicação de acordo com o estado operacional da microrrede. Desta forma, durante a operação do sistema, é garantida conectividade mínima de dispositivos mesmo que ações severas de economia de energia tenham sido tomadas. A unidade de armazenamento de energia conectada à barra 800 possui uma profundidade de descarga de 70%, enquanto que a unidade conectada à barra 838 possui profundidade de descarga de 60%. Os valores das fontes de energia distribuídas e a capacidade de cada sistema de armazenamento de energia utilizado na Figura 21 são ilustrados na Tabela 13.

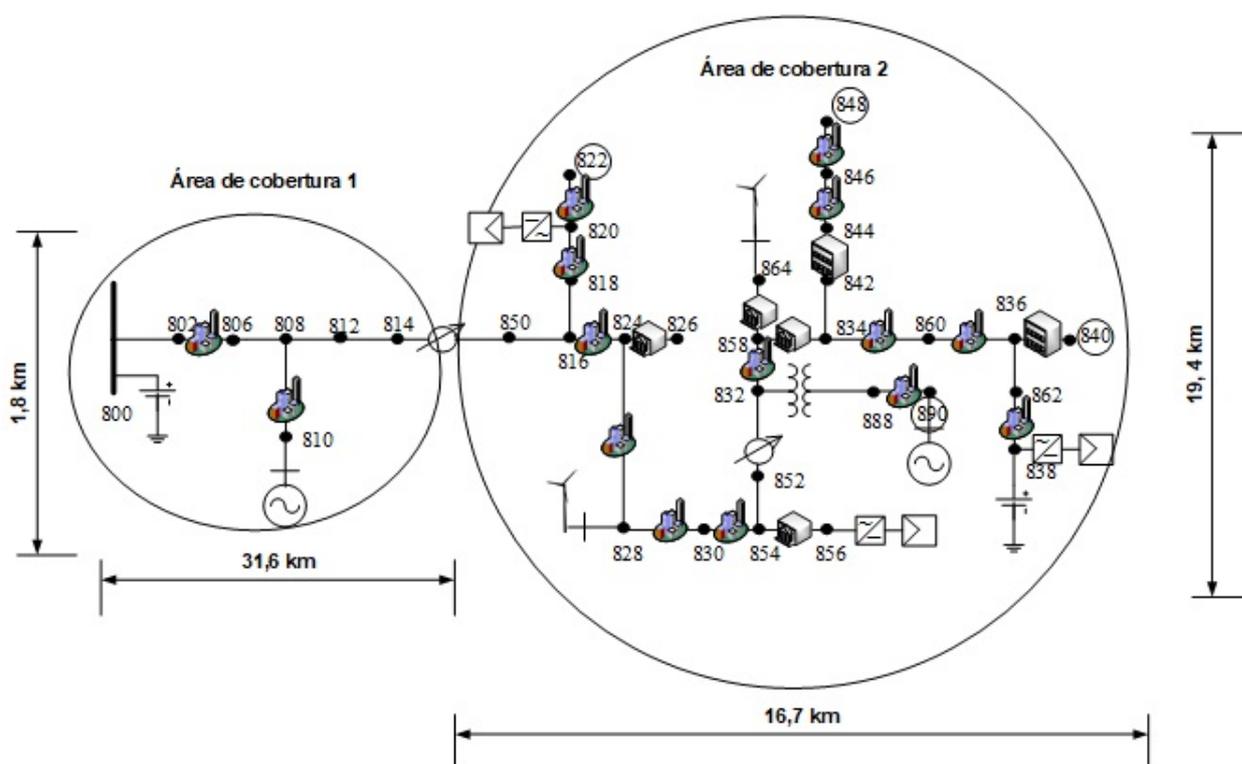


Figura 21 – Sistema de distribuição de 34 barras modificado.

Devido à grande extensão geográfica do sistema de 34 barras, ele é dividido em duas regiões [127]. Para se caracterizarem condições geográficas reais, um sistema é tido como uma área rural de baixa densidade e o outro como uma área urbana de alta densidade, o que torna esta divisão viável. A divisão de áreas é interessante, uma vez que as duas regiões possuem características diferentes, o que permite testar o potencial da metodologia proposta para diferentes densidades de dispositivos.

Tabela 13 – Descrição da localização, do tipo e das características nominais das unidades de geração distribuída.

Localização	Tipo de fonte	Potência Nominal (kW)/ Capacidade Nominal (kWh)
800	Estado de carga Bateria VRLA	1,000/3,000
810	Gerador diesel	64
820	Potência Fotovoltaica	60
828	Potência Eólica	60
856	Potência Fotovoltaica	280
864	Potência Eólica	330
890	Gerador diesel	48
838	Baterias tipo chumbo-ácido Estado de carga bateria / Potência Fotovoltaica	200/1,000 80

5.3.1 Cenário Simulado I - A Influência de Redes de Comunicações no Controle e Monitoramento de Microrredes Autônomas

Com o intuito de analisar o impacto das cargas referentes a uma infraestrutura de comunicação, simulações foram realizadas para validar a influência do tempo de sobrevivência da microrrede e como estas cargas irão afetar o tempo máximo de suprimento de energia. O fluxograma ilustrado na Figura 5 mostra a metodologia utilizada para o dimensionamento da rede de comunicação apropriada e como são fornecidas as informações ao sistema de gerenciamento de energia.

De acordo com [127], na Figura 21, a primeira região de cobertura tem uma área total de, aproximadamente, 56 km^2 , enquanto a segunda área de cobertura possui 324 km^2 . O raio de uma estação rádio base é calculado de acordo Eq. (3.6) e os valores utilizados para simulação são descritos na Tabela 14.

A fim de prover conectividade para as duas áreas de cobertura, as ERB são distribuídas aleatoriamente segundo uma distribuição uniforme em toda área de cobertura e, a partir da Eq. (3.13), é determinado o número de estações rádio base necessárias para cobrir as respectivas áreas. Na área de cobertura um, serão necessárias, aproximadamente 26 ERBs e, na área de cobertura dois, aproximadamente, 94 ERBs.

Para o cálculo do consumo de energia total da rede de comunicação é necessário levar em consideração os valores descritos na Tabela 15 juntamente com a Eq. (3.21). O consumo total de todas as estações é dado por $\sum_{i=0}^I P_i$, onde I é o número de ERBs. As estações rádio base foram distribuídas de acordo com seu respectivo raio de cobertura e conectadas à barra equivalente de seus respectivos consumidores.

Considera-se que a microrrede ilustrada na Figura 21 é desconectada da rede elétrica principal às 10h devido a qualquer evento de perturbação ou falha. O disjuntor no

Tabela 14 – Parâmetros para o cálculo do sistema de comunicação.

Parâmetros	Valores
Frequência [MHz]	700
Ganho da Antena ERB [dBi]	11
Perda nos alimentadores ERB [dB]	2
Desvanecimento [dB]	10,6
Largura de banda [MHz]	20
Subportadoras	1200
Sensibilidade Receptor [dB]	-92
Perda por penetração [dB]	18
Potência de transmissão ERB [dBm]	46
Ruído térmico [dB]	-174
Duplexação	TDD
Modulação	64-QAM
Código	2/3
Sombreamento [dB]	4,9
Modelo de propagação	Okumura-Hata
Probabilidade de Cobertura	95 %
Tamanho antena ERB [m]	30
Tamanho antena usuário [m]	2
Tipo de área	Urbana

Tabela 15 – Consumo de potência de dispositivos de uma estação rádio base.

Dispositivos da ERB	Valor
Ar Condicionado	255
Enlace de Microondas	80
Retificador	100
Processamento de Sinal	100
Amplificador de Potência	100
Transceptor	100

alimentador 800 será aberto e, a partir deste momento, o sistema começa a operar em modo ilhado com recursos energéticos distribuídos fornecendo energia ao sistema. A Figura 22 e a Figura 23 ilustram os estudos de casos descritos em [73, 126].

A comparação dos resultados obtidos permite entender o impacto de se considerar as cargas referentes à infraestrutura da rede de comunicação dimensionada. Em [73], o SGE é desenvolvido sem considerar a rede de comunicação como uma carga adequada. Portanto, os resultados (linha pontilhada em preto) estão incompletos e qualquer comparação com a metodologia proposta é injusta, uma vez que o sistema está menos carregado e erroneamente aumenta o tempo de suprimento de energia do sistema.

Comparando os resultados obtidos na Figura 22 e na Figura 23, é notável a influência do consumo de energia da rede de telecomunicações no tempo de sobrevivência

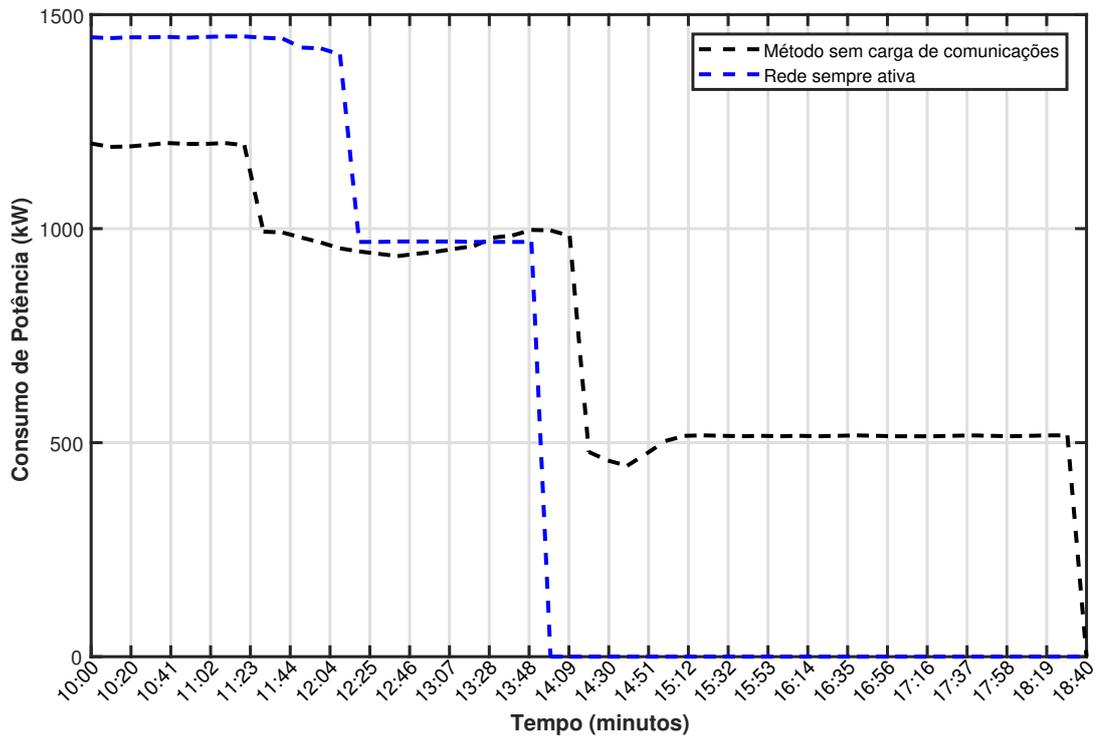


Figura 22 – Consumo de potência durante a operação da microrrede.

da rede e como elas afetam dramaticamente o desempenho do sistema (comparação entre a linha pontilhada em preto e a linha pontilhada em azul). Neste sentido, não considerar o consumo do sistema de comunicação pode levar a conclusões precipitadas e errôneas sobre o comportamento e a operação de uma microrrede ilhada quando comparado com os resultados do método sem carga de comunicações.

No cenário simulado com uma rede de acesso celular, o sistema é alimentado por aproximadamente 270 minutos a menos quando comparado com o modelo adotado em [73]. As primeiras ações de controle são empregadas às 11h44min e as cargas de prioridade baixa são desconectadas. Devido ao alto consumo das ERBs alocadas no sistema, é visível que a mudança entre os estados de emergência e crítico é feita subitamente devido à prioridade da demanda dos serviços de telecomunicações e seu alto consumo energético.

Para ilustrar a forte influência do consumo de energia de um sistema de comunicações, este sistema foi simulado em um cenário com abundância de recursos energéticos distribuídos, ou seja, em que as fontes de energia intermitentes não estão escassas, em outras palavras, em um dia com alta disponibilidade de recursos. O método relatado em [126] considera a rede de comunicação adequadamente como cargas ao longo do sistema de distribuição. Apesar de ser correta esta abordagem, esta metodologia considera que as cargas de telecomunicações estão sempre ativas e sendo consumidores de alta prioridade.

Essa abordagem não é eficiente, já que a rede de comunicação pode ser desligada

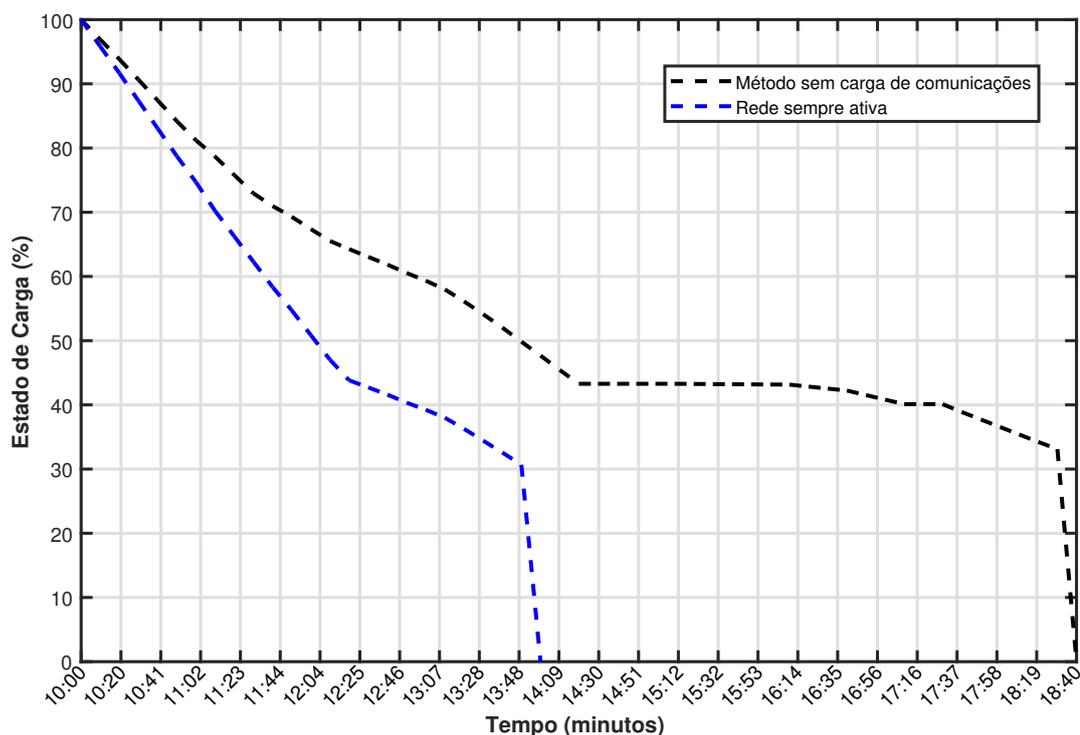


Figura 23 – Estado de carga total das baterias para o cenário simulado.

em certas áreas em que não exista mais a necessidade de conectividade devido ao corte de cargas. A Tabela 16 ilustra a diferença de fornecimento de energia para cada classe consumidora. Deve-se ter cuidado ao analisar estes resultados, pois, como mencionado anteriormente, a análise proposta em [73] é incompleta subestimando o consumo. Assim, o sistema menos carregado resulta um maior tempo de sobrevivência da microrrede.

Tabela 16 – Comparação de resultados para o cenário simulado.

Metodologia proposta em [73]	Fornecimento (tempo)	Considerando o consumo de ERBs	Fornecimento (tempo)
Consumidores AP	520 min	Consumidores AP	250 min
Consumidores MP	145 min	Consumidores MP	90 min
Consumidores BP	100 min	Consumidores BP	65 min

5.3.2 Cenário Simulado II - Análise de Desempenho do Método de Gerenciamento de Energia Híbrido

Para a análise do sistema de gerenciamento de energia híbrido, considera-se a mesma situação adotada na seção anterior. A microrrede será desconectada do sistema elétrico principal às 10h devido a alguma situação não esperada. O disjuntor no alimentador 800 será aberto e os recursos energéticos distribuídos serão responsáveis por alimentar a microrrede ilhada.

A Figura 24 mostra o consumo de energia ao longo do tempo, obtido usando as metodologias anteriores e o método híbrido proposto neste trabalho. São comparados todos os métodos propostos em [73, 126]. Em [126], a aplicação do modo de dormência com profundidade suave é investigada. Neste método, os amplificadores de potência são desativados por certos períodos de tempo devido ao desligamento de cargas não-prioritárias. Esta ação de economia de energia resulta em uma melhoria notável no tempo máximo de sobrevivência da microrrede (que pode ser observada comparando a linha pontilhada azul com a linha pontilhada vermelha). Contrastando com o método sem nenhuma ação de economia de energia, a microrrede é abastecida por, aproximadamente, 80 minutos a mais, uma vez que o PA é responsável pelo consumo de uma enorme quantidade de energia em uma ERB. A Tabela 17 mostra a diferença de fornecimento de energia para cada classe de usuário para o método com a rede sempre ativa e utilizando o modo de dormência com profundidade suave.

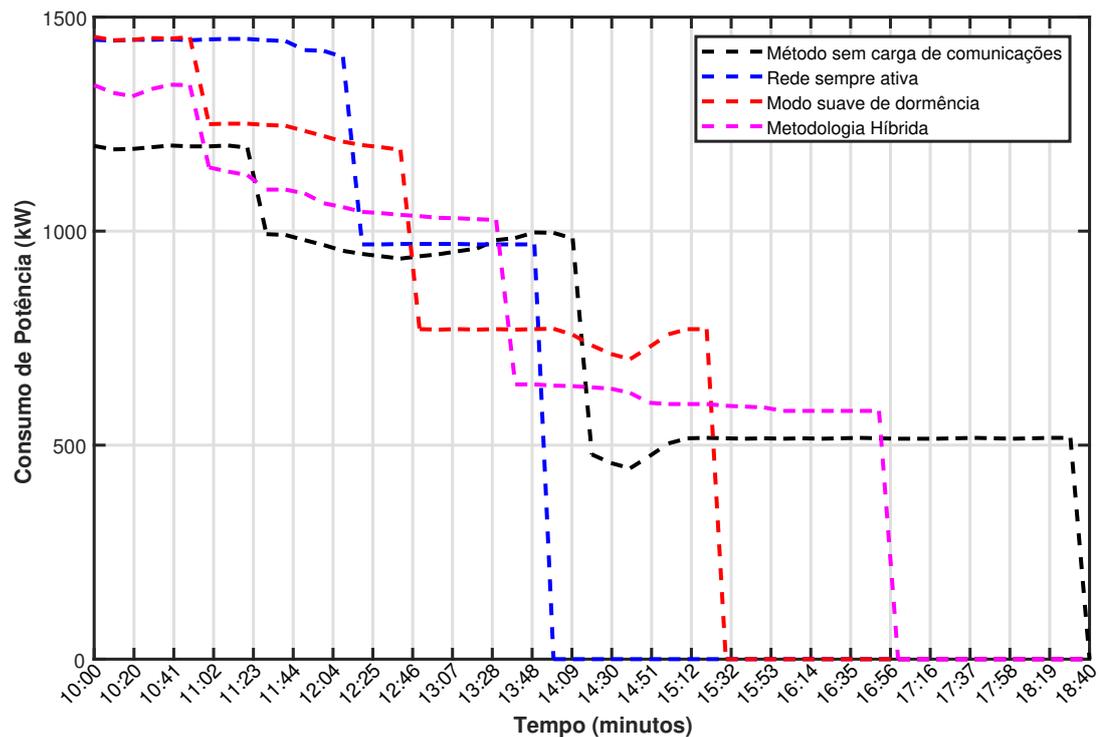


Figura 24 – Comparação do consumo de potência para as metodologias propostas.

Tabela 17 – Comparação de resultados para método rede sempre ativa e com modo de dormência suave.

Método ERBs ativas	Fornecimento (tempo)	Dormência Suave	Fornecimento (tempo)
Consumidores AP	250 min	Consumidores AP	330 min
Consumidores MP	90 min	Consumidores MP	170 min
Consumidores BP	65 min	Consumidores BP	50 min

No entanto, ambos os cenários simulados possuem uma baixa eficiência energética. Assim, uma nova abordagem para otimizar e maximizar o tempo de suprimento de energia da microrrede é proposta. A metodologia híbrida irá automaticamente adaptar as cargas de comunicações de acordo com o estado da operação da rede e com o desligamento de cargas (linha pontilhada em magenta na Figura 24 e na Figura 25). Nesta metodologia os serviços de telecomunicações não são mais considerados consumidores essenciais, como mostrado na Tabela 8, e o SGE busca alcançar a máxima eficiência energética.

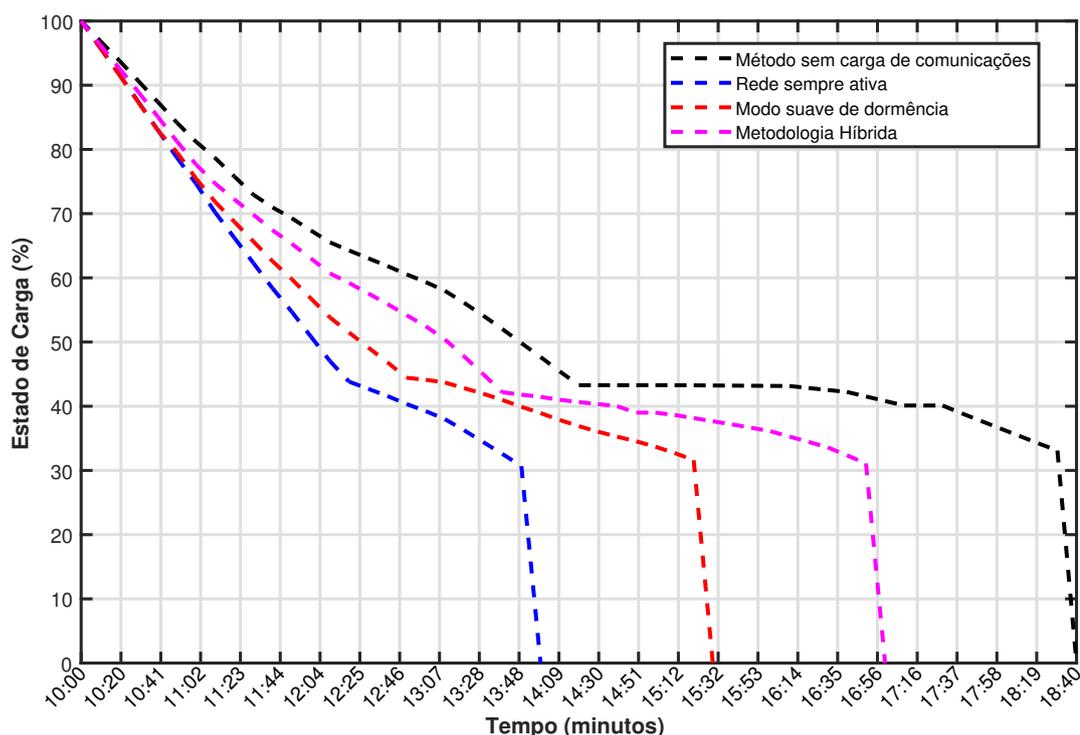


Figura 25 – Estado de carga das baterias para as metodologias propostas.

Para alcançar a máxima eficiência energética, o método híbrido proposto assume quatro diferentes estados de acordo com o modo de operação da microrrede. Após o distúrbio na barra 800, como mostrado na Figura 25, o SGE muda seu status de operação para modo normal. Quando esta mudança ocorre, as estações rádio base que proveem conectividade para as cargas de média prioridade se ajustam para o modo de dormência suave com o intuito de economizar energia, enquanto as estações que proveem conectividade para as cargas de baixa prioridade entram em modo de dormência estendido. Aproximadamente às 11h, o SGE atualiza o seu balanço e o atual estado de operação é mudado para o estado de emergência, desconectando as cargas de baixa prioridade e suas respectivas ERBs, e as fontes baseadas em combustível fóssil são ativadas para aumentar a geração de energia.

O SGE adapta seu funcionamento devido a mudanças no estado de operação do sistema, levando a ações de economia de energia. A metodologia híbrida proposta avalia

as novas condições de gerenciamento de demanda descritas na Tabela 12 e na Tabela 11, aumentando o tempo de sobrevivência da microrrede em, aproximadamente, 170 minutos em comparação com o sistema no qual todas as cargas de comunicação são sempre consideradas ativas (comparação entre a linha pontilhada magenta e a linha pontilhada azul) e, aproximadamente, 110 minutos em comparação com o método de dormência suave (comparação entre a linha pontilhada vermelha e a linha pontilhada magenta). A Tabela 18 ilustra a diferença de fornecimento de energia para o método simulado considerando as diferentes classes de usuários.

Tabela 18 – Comparação de resultados dos cenários simulados.

Método ERBs ativas	Fornecimento (tempo)	Dormência Suave	Fornecimento (tempo)	Método Híbrido	Fornecimento (tempo)
Consumidores AP	250 min	Consumidores AP	330 min	Consumidores AP	420 min
Consumidores MP	90 min	Consumidores MP	170 min	Consumidores MP	220 min
Consumidores BP	100 min	Consumidores BP	50 min	Consumidores BP	50 min

Para mostrar a importância de se tomar ações de controle em relação à carga referente à infraestrutura de comunicação, a Figura 26 ilustra o consumo de energia dos clientes prioritários para o cenário simulado. Os resultados mostram uma melhoria no desempenho geral com a utilização da metodologia do sistema híbrido, quando as cargas de comunicação não são mais consideradas como prioritárias. Fica evidente também que a adaptação do sistema devido a mudanças no modo da operação maximiza a disponibilidade total de energia.

Como forma de medir a eficiência energética da metodologia proposta, o consumo de energia por metro quadrado para cada cenário simulado é calculado a partir da Equação (3.25). A Figura 27 mostra a energia consumida para a área total do sistema de 34 barras modificado. É possível observar que um menor consumo por km^2 é alcançado com a metodologia híbrida, resultando em uma melhor eficiência energética, o que significa um menor consumo de energia por quilômetro quadrado.

Atingir esta eficiência energética é possível por causa da inteligência agregada ao sistema de gerenciamento de energia que se autoadapta de acordo com as mudanças no modo de operação da microrrede e de acordo com as medidas e previsões feitas nos respectivos períodos de tempo.

O método híbrido, em geral, apresenta uma boa eficiência e fornece mais autonomia para a operação da microrrede em comparação com as outras metodologias estudadas. Contudo, o método proposto promove ações de controle que afetam a funcionalidade do sistema de comunicação, desligando totalmente ou parcialmente as ERBs. Isto impossibilita de reagir em tempo hábil para executar qualquer função que lhe tenha sido designada, como mostrado na Tabela 12. Assim, a rede de comunicação se torna menos confiável e impedida de ser utilizada para certas aplicações inteligentes, como discutido nas seções anteriores.

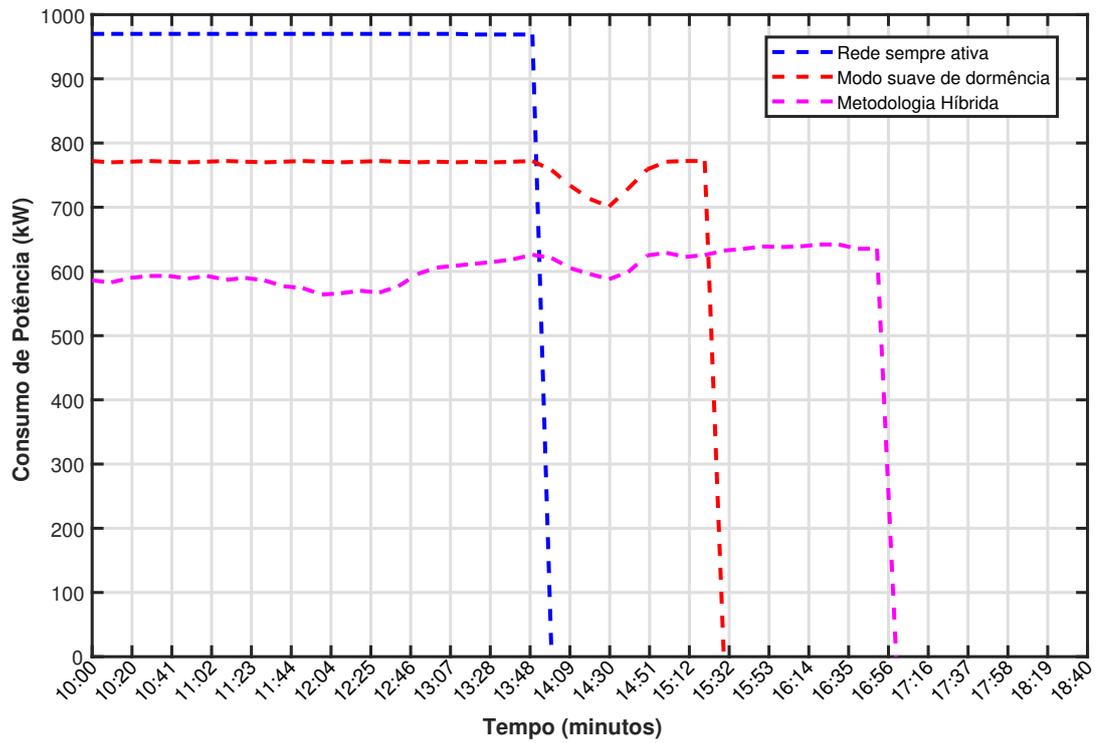


Figura 26 – Consumo de potência dos consumidores prioritários para os cenários simulados.

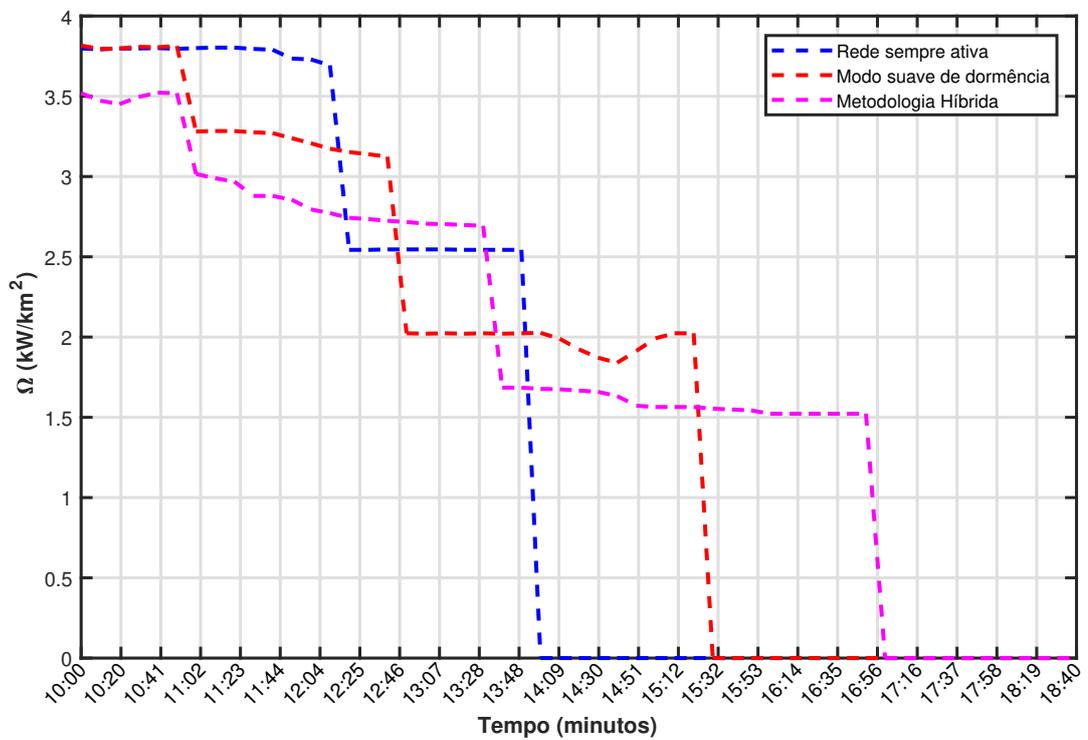


Figura 27 – Eficiência energética dos cenários simulados.

Como ilustrado na Figura 25, às 13h45min o SGE altera o estado de operação da microrrede de modo emergência para o modo crítico. Neste momento, os clientes de baixa e média prioridade são desconectados, bem como todas as estações rádio base que proveem conectividade para estes usuários. Assim, se ocorrer alguma perturbação neste período de tempo, haverá necessidade de se aguardar que as ERBs sejam religadas e tomem as devidas ações. De acordo com a Tabela 11, o sistema de comunicação não poderá realizar atividades relacionadas a aplicações inteligentes devido à incompatibilidade do tempo de resposta e do tempo de religamento da ERB. Neste ponto, a relação de compromisso entre eficiência energética e a disponibilidade de aplicações inteligentes em microrredes torna-se evidente.

Uma vez que todos os recursos de aplicações inteligentes podem ser afetados, é necessário avaliar o impacto da relação de compromisso entre eficiência energética e a inteligência da rede pela análise da confiabilidade de uma rede de comunicação devido à troca dos modos de operação da microrrede. Essa análise de confiabilidade assume uma taxa independente de falhas (λ), uma vez que o número de estados de operação da microrrede é finito. Assim, a probabilidade de transição entre estados segue uma distribuição poissoniana, com espaço finito definido como $S = \{0, 1, 2, 3\}$. Cada espaço indica um estado específico de operação das cargas relacionadas à comunicação no tempo t .

O primeiro estado ($S = 0$) significa que toda a rede de comunicação está ativa, pois existem fontes de energia suficientes para abastecer toda a infraestrutura de rede. Em $S = 1$, o SGE altera o estado de operação, e o modo de economia de energia com profundidade suave é ativado. Em $S = 2$, o estado é alterado para o modo estendido. Por último, o estado $S = 3$ é o evento mais catastrófico, onde nenhuma estação rádio base estará disponível e não existe conectividade em toda a rede. Seguindo essa abordagem, as taxas de transição entre os estados durante a operação da microrrede podem ser escritas como

- $\nabla_{0,1}$: do estado de operação normal para o modo de dormência suave (de ∇_0 para o estado ∇_1);
- $\nabla_{1,2}$: do modo de dormência suave para o modo de dormência estendido (de ∇_1 para o estado ∇_2);
- $\nabla_{2,3}$: do modo de dormência estendido para a total desconexão da ERB (de ∇_2 para o estado ∇_3)

É intuitivo observar que ao longo do tempo a energia armazenada diminui, portanto a confiabilidade da rede de comunicação também diminui. Por simplicidade, assume-se que apenas uma falha pode ocorrer durante a transição entre os estados de operação. Desta maneira, consideram-se S estados finitos, com taxas de transições entre estados dadas por

$\nabla_0, \nabla_1, \nabla_2, \nabla_3$ e um vetor linha de probabilidade dado por $p(t) = [p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)]$. Assim, com a ajuda da Eq. (3.28), as equações de Markov dos estados podem ser escritas como,

$$\dot{P}_0(t) = -\nabla_{0,1}P_0(t), \text{ para } k = 0 \quad (5.4)$$

$$\dot{P}_1(t) = \nabla_{0,1}P_0(t) - \nabla_{1,2}P_1(t), \text{ para } k = 1 \quad (5.5)$$

$$\dot{P}_2(t) = \nabla_{1,2}P_1(t) - \nabla_{2,3}P_2(t), \text{ para } k = 2 \quad (5.6)$$

$$\dot{P}_3(t) = \nabla_{2,3}P_2(t), \text{ para } k = 3. \quad (5.7)$$

Desta maneira, se as condições iniciais $P_0(0) = 1, P_k(0) = 0$ e $0 < k \leq n$ forem assumidas, as Eq. (5.4), (5.5), (5.6) e (5.7) podem ser resolvidas analiticamente através da aplicação da transformada de Laplace, definida por $\dot{p}_k(s) = Lp_k(t) = \int_0^\infty e^{-st}p_k(t) dt$. Por consequência, cada probabilidade de transição de estado pode ser reescrita como

$$P_0(s) = \frac{1}{(s + \nabla_{0,1})} \quad (5.8)$$

$$P_1(s) = \frac{\nabla_{0,1}}{(s + \nabla_{0,1})(s + \nabla_{1,2})} \quad (5.9)$$

$$P_2(s) = \frac{\nabla_{1,2}\nabla_{0,1}}{(s + \nabla_{0,1})(s + \nabla_{1,2})(s + \nabla_{2,3})} \quad (5.10)$$

$$P_3(s) = \frac{\nabla_{1,2}\nabla_{0,1}\nabla_{2,3}}{s(s + \nabla_{0,1})(s + \nabla_{1,2})(s + \nabla_{2,3})} \quad (5.11)$$

Assim, assumindo as condições iniciais pré-definidas e multiplicando-as pelas Eq. (5.8), (5.9), (5.10) e (5.11), será possível encontrar as probabilidades de transição de estado em função da variável tempo. Desta maneira, aplicando a transformada inversa de Laplace nas Equações (5.8), (5.9), (5.10) e (5.11), as probabilidades de transição de estado podem ser descritas como

$$P_0(t) = e^{-\nabla_{0,1}t} \quad (5.12)$$

$$P_1(t) = \frac{\nabla_{0,1}}{(\nabla_{1,2} - \nabla_{0,1})} e^{-\nabla_{0,1}t} - e^{-\nabla_{1,2}t} \quad (5.13)$$

$$P_2(t) = \frac{\nabla_{1,2}\nabla_{0,1}[(\nabla_{0,1} - \nabla_{1,2})e^{-\nabla_{2,3}t} + (\nabla_{2,3} - \nabla_{0,1})e^{-\nabla_{1,2}t} + (\nabla_{1,2} - \nabla_{2,3})e^{-\nabla_{0,1}t}]}{(\nabla_{1,2} - \nabla_{2,3})(\nabla_{0,1} - \nabla_{1,2})(\nabla_{2,3} - \nabla_{0,1})} \quad (5.14)$$

$$P_3(t) = 1 - P_0(t) - P_1(t) - P_2(t) \quad (5.15)$$

O sistema de comunicação permanece ativo, mesmo com baixa conectividade, ou seja, com poucas estações rádio base ativas, enquanto permanecer nos estados de operação ∇_0 , ∇_1 e ∇_2 . O sistema se torna totalmente inativo quando atinge o estado ∇_3 . Desta maneira é possível definir a confiabilidade do sistema de comunicação ao longo do tempo, que é ditada pelas funções de confiabilidade que descrevem cada estado operacional, descrita como

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) \quad (5.16)$$

A confiabilidade do sistema de comunicação é ilustrada na Figura 28. É possível verificar a confiabilidade do sistema em cada modo de operação e a cada transição de estado ao longo do tempo. É evidente a perda da confiabilidade do sistema devido às ações de economia de energia tomadas pelo sistema de gerenciamento de energia a fim de otimizar e maximizar o abastecimento de energia ao sistema.

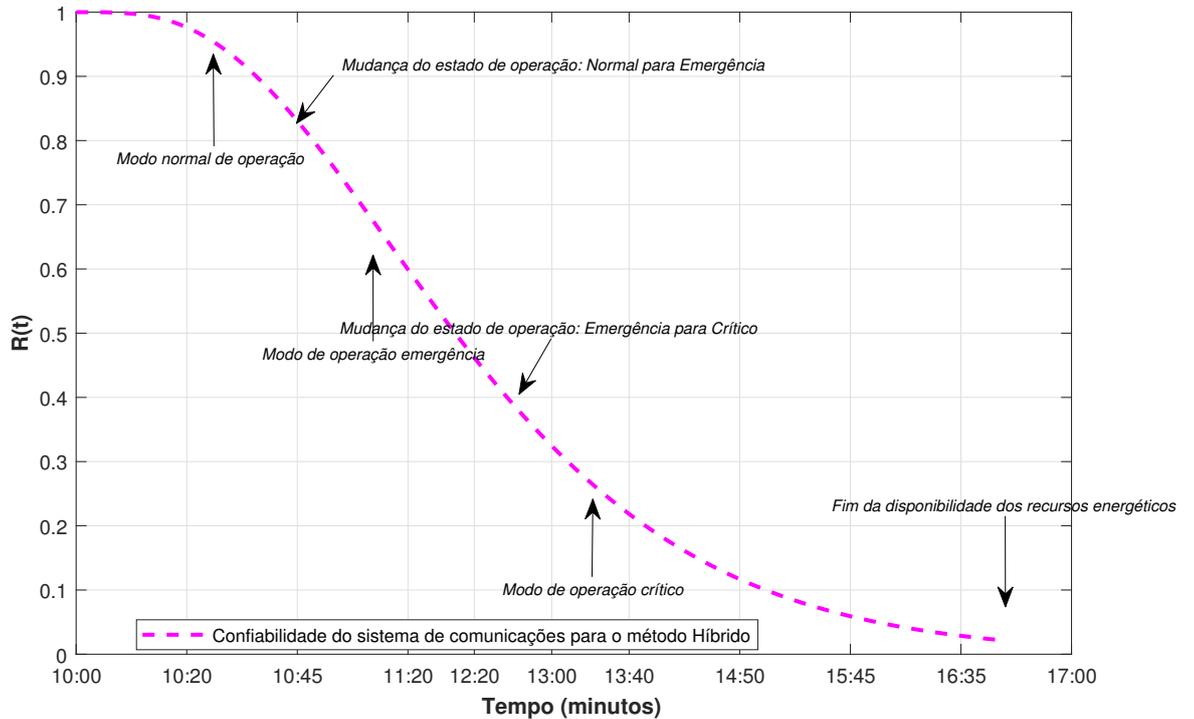


Figura 28 – Confiabilidade do sistema de comunicação dedicada a microrrede para método híbrido.

No modo de operação crítico, pode-se observar na Figura 28 que a disponibilidade do sistema é muito baixa. Desta maneira, o sistema não será capaz de realizar certas aplicações de baixa e média latências. Porém, mesmo neste estado de operação, o SGE ainda será capaz de prover o mínimo de conectividade para consumidores de perfil essencial, como serviços de saúde e instalações de transporte. Neste modo de operação, as ERBs estão ajustadas no modo de dormência estendido para garantir o suprimento de energia pelo maior tempo possível. Nesta análise fica evidente a relação de compromisso entre a máxima eficiência energética e a disponibilidade do sistema para operar em tempo real e ser auto-recuperável.

6 Proposta de um Modelo de Tráfego de Dados baseado em Prioridades para o Gerenciamento de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes em Microrredes

As redes elétricas inteligentes requerem uma infraestrutura de comunicação robusta para realizar o gerenciamento de todos os dados transmitidos e recebidos, que são gerados por uma imensa quantidade de dispositivos de medição instalados em vários locais dentro de um sistema elétrico, desde a geração até o consumidor final. A rede inteligente deve dar suporte ao gerenciamento em tempo real a diversos dispositivos, com diferentes requisitos de tráfego e parametrização. Portanto, é necessário definir os requisitos de comunicação para a transmissão e troca de mensagens entre os diferentes agentes do sistema com diferentes requisitos de fluxo, periodicidade e prioridade na transmissão de dados.

Neste capítulo, o gerenciamento do tráfego de dados dentro de uma infraestrutura de comunicação aplicada a uma rede elétrica inteligente operando conectada e isolada é analisado. No desenvolvimento deste estudo são considerados os diferentes requisitos e características de tráfego dos diversos dispositivos conectados, bem como é desenvolvida uma proposta de controle de mensagens através de sistema de filas prioritárias, que tem como objetivo caracterizar as mensagens transmitidas dentro de uma rede de acesso inteligente. Com o intuito de aumentar a robustez do sistema perante as intermitências dos recursos energéticos distribuídos, uma política de agendamento de tráfego de usuários é realizada a fim de otimizar o tempo de sobrevivência da rede elétrica operando em modo ilhado.

6.1 Introdução

A rede de comunicação inteligente será responsável pela coleta de dados, roteamento, monitoramento e gerenciamento de todos os dispositivos eletrônicos inteligentes conectados à rede [18]. Desta maneira, é crucial entender todos os requisitos necessários para a integração de inteligência ao sistema elétrico.

A rede elétrica inteligente deve ser integrada a uma infraestrutura de comunicação avançada, onde há milhares de dispositivos conectados, enviando mensagens para centenas de subestações, que se comunicam com centros de controle para tomada de decisão [16]. Esta rede pode ser caracterizada como uma rede de acesso estabelecendo a conexão entre

os milhares de dispositivos de medição, sensores e subestações com o centro de controle da concessionária. A rede é enorme e requer quase nenhuma interação humana, onde máquinas trocam mensagens entre si [39]. Cada rede é dotada de inteligência através de medidores inteligentes, PMUs e outros IEDs que variam de algumas centenas a alguns milhares de dispositivos conectados a centros de controle. Este número de dispositivos se altera de acordo com a extensão da área geográfica do sistema estudado.

Esta integração de novas aplicações inteligentes torna a implementação de redes inteligentes altamente dependente da tecnologia de informação adotada e os recursos necessários para a operação do sistema em tempo real [17]. Nesse cenário, o conceito de IoT torna-se um aliado essencial no constante desenvolvimento das redes inteligentes devido a sua alta escalabilidade de integração de novos equipamentos para detecção, gerenciamento e controle [24].

Um dos maiores desafios ligados à conexão de milhares de dispositivos é a gestão dessa grande quantidade de tráfego de dados gerado dentro da rede de comunicações. O tráfego de dados dentro da rede pode ser classificado como periódico ou aperiódico [74]. O tráfego de dados ocorre periodicamente, ou seja, é caracterizado por ocorrer em tempos definidos, como leituras de medidores inteligentes, previsões de tempo, entre outros. O tráfego que ocorre devido a alguma anomalia no sistema ou como forma de resposta a um evento é assumido como aperiódico, que ocorre em casos como falta de fornecimento de eletricidade, atuação da proteção, detecção de falhas e ilhamento.

Estes tipos de tráfego diferem por sua latência, ou seja, o tempo necessário para que o sistema elétrico reaja a algum evento ocorrido no sistema. Mensagens periódicas possuem tolerância a alta latência. Por exemplo, a leitura de medidores inteligentes pode ser agendada para cada 60 minutos. Por outro lado, a resposta a eventos aperiódicos possuem requisitos de latência em torno de milissegundos [6]. No entanto, devido à grande troca de mensagens de ambas categorias e o grande número de dispositivos conectados, o tráfego de dados dentro de uma rede inteligente é uma tarefa desafiadora. A vasta conexão de dispositivos e os diferentes requisitos de latência nas aplicações inteligentes pode ocasionar um congestionamento no acesso dos dispositivos, que deteriora significativamente a qualidade de serviço das aplicações inteligentes. Desta maneira, faz-se necessária a implementação de regras de atendimento entre estes dispositivos para que aplicações críticas tenham prioridade sobre outras aplicações não-essenciais na operação do sistema, aumentando, assim, a robustez e a confiabilidade da rede elétrica inteligente.

Alguns modelos de tráfego foram propostos na literatura. Em [74] e [75] foram combinadas as diferentes características de tráfego de dispositivos inteligentes para determinar o tempo médio na fila em um modelo analítico. Em [76], um estudo de um sistema de filas com prioridade aplicado a um sistema de medição inteligente foi realizado, porém, neste trabalho, não foi levado em conta a relevância de cada mensagem transmitida nem a

influência de diferentes tipos de tráfego. Em [77] um sistema de filas sem prioridade para diferentes classes de serviço foi realizado. Neste trabalho a ordem de serviço é priorizada de acordo com a ordem de chegada no servidor, o que pode diminuir a confiabilidade da rede, pois o tempo de serviço no servidor pode ser alto, ocasionando perdas de pacote. O trabalho realizado em [78] determina de maneira eficiente o volume de dados gerado e a ser enviado pelos medidores inteligentes a seus pontos de acesso. Em [79] foi computado o tráfego gerado para diferentes serviços inteligentes de acordo com a frequência de transmissão e tamanho do pacote a ser transmitido. A análise da intensidade de tráfego de medidores inteligentes em situações críticas e operação normal foram analisados em [80]. Entretanto, nenhum destes modelos leva em consideração a operação de diversos serviços inteligentes simultaneamente, com ordem de prioridade no servidor e diferentes requisitos em um ambiente crítico considerando o ilhamento.

Dado este desafio, neste capítulo, se desenvolve uma metodologia para controle de tráfego de mensagens através de um sistema de fila com prioridades. O modelo de tráfego proposto é baseado em três classes através de um sistema de fila com preempção. As três classes de tráfego correspondem à prioridade de cada aplicação inteligente no sistema, podendo agregar mais de uma aplicação com a mesma prioridade. Esta suposição garante que a mensagem de maior prioridade será tratada de maneira preferencial no centro de controle, não causando atrasos e perda na qualidade de serviço. Dada esta aplicação, o agendamento de tráfego de usuários é considerado com o intuito de maximizar e otimizar o tempo de sobrevivência de uma microrrede, supondo que uma eventual falha ocorre e o sistema não consegue se reconectar. Este modelo de agendamento de tráfego proposto é testado, validado e simulado num sistema de 13 barras do IEEE. Porém, a proposta é também aplicável para qualquer sistema de distribuição.

6.2 Sistemas Cibernéticos Conectados a Redes Inteligentes

Tecnologias avançadas de comunicação são essenciais para proteção, controle, monitoramento e gerenciamento da rede elétrica inteligente. Atualmente, o monitoramento do sistema elétrico é baseado em sistemas como o SCADA e o AMR, que não suportam comunicação em tempo real [128]. Devido a isso, uma infraestrutura de comunicação avançada deve ser implementada com o objetivo de dar suporte e fornecer comunicação em tempo real de forma bidirecional, proporcionando maior robustez, confiabilidade e segurança.

Os futuros sistemas de distribuição devem ser implementados com o suporte de uma infraestrutura de rede confiável, flexível e escalonável com a função de monitorar e gerenciar todos os dispositivos conectados [22]. Todos estes dispositivos devem ser capazes de perceber e reagir a qualquer mudança no sistema, prontamente atuando/reagindo a essa

mudança. Esse sistema é denominado de um sistema cibernético [4], ou seja, um sistema altamente dependente de inúmeras máquinas se comunicando entre si e tomando ações de acordo com suas percepções de acordo com o meio que estão inseridas. A Figura 29 ilustra a ideia de um sistema cibernético e sua dependência de uma rede de comunicação avançada para atuar sobre ou reagir aos requisitos de operação da rede.

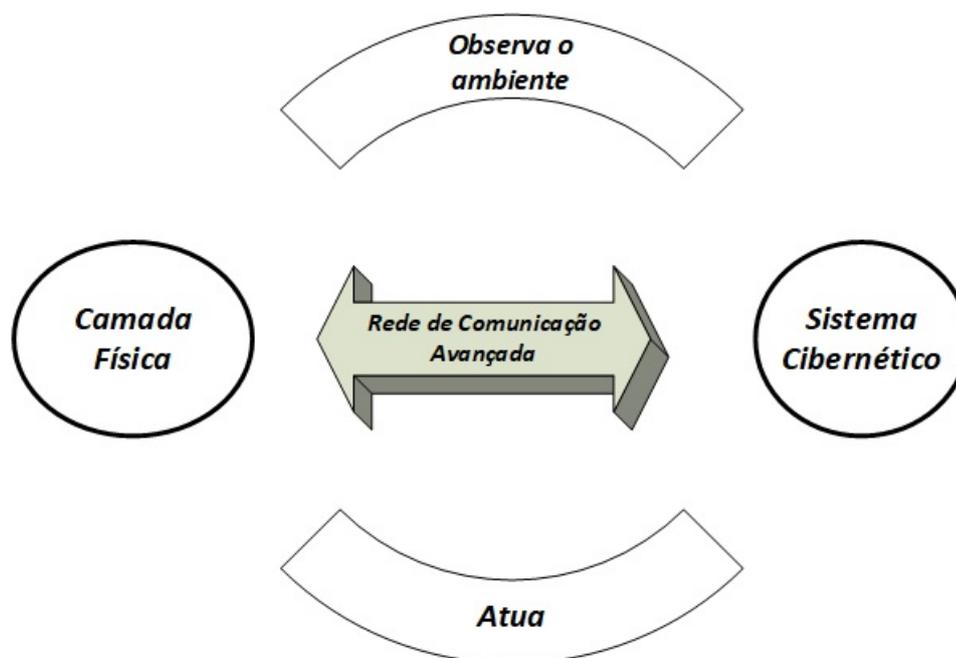


Figura 29 – Interligação entre sistemas de distribuição com máquinas [4].

Uma rede de distribuição inteligente deve ser eficiente, altamente confiável, robusta e capaz de gerenciar vários tipos de cargas e de recursos energéticos distribuídos [119]. Desta maneira, este novo sistema de distribuição deve ser inteligente o suficiente para perceber as alterações no seu ambiente e reagir rapidamente às falhas, suportar um fluxo bidirecional de dados e de energia e monitoramento em tempo real [19], caracterizando um sistema cibernético. Esta rede exige rigorosos requisitos para atender às aplicações necessárias para prover inteligência à rede, conforme os itens a seguir:

- **Controle e proteção de distribuição:** As comunicações críticas são as principais funções. Os dispositivos IEDs são responsáveis por localizar e detectar falhas e trocar mensagens de condição da rede.
- **Sistema de monitoramento de área ampla:** O sistema coleta informações de grandes áreas e subestações e toma decisões críticas.
- **Resposta à demanda:** Várias fontes de recursos energéticos distribuídos são conectadas ao sistema, o que traz mais variáveis intermitentes a serem controladas e monitoradas.

- **AMI:** Os medidores inteligentes desempenham um papel essencial nas redes de próxima geração. Além do faturamento, será responsável pela interação do consumidor, controle de carga, resposta da demanda, detecção de ilhas e outras funcionalidades.

Em um sistema de distribuição totalmente automatizado, a infraestrutura de medição avançada é apontada como o primeiro passo para a modernização da rede [19]. Esta infraestrutura deve ser responsável por monitorar, controlar e gerenciar todos os dispositivos eletrônicos através do uso de medidores inteligentes. Além disso, nestas novas redes existe uma enorme preocupação com problemas relacionados à estabilidade de tensão devido à alta penetração de recursos energéticos distribuídos e cargas dinâmicas [20]. Para este fim, o uso de medidores fasoriais ou sincrofasores em sistemas de distribuição pode garantir controle e operação seguros e precisos [98].

O número de medições realizadas pelo medidor inteligente é vasto e uma das principais preocupações é como aproveitar a enorme quantidade de dados e como gerir o congestionamento de usuários tentando se conectar à rede. Cada tipo de medição do medidor inteligente tem diferentes tamanhos e taxa de amostragem. Como forma de estimar o tamanho da mensagem gerada por um medidor inteligente, é essencial conhecer cada tipo de mensagem a ser enviada e quantos medidores inteligentes a infraestrutura de medição avançada deve suportar [129].

PMUs são instalados na rede de distribuição para fornecer as mesmas funcionalidades e vantagens que já fornecem para os sistemas de transmissão de energia elétrica [21]. Devem ser posicionados em locais estratégicos para prover uma operação confiável e segura, diminuir o tempo de análise de dados (possibilitando operação em tempo real), monitorar as variações de tensão, gerenciar cargas, localizar falhas e detectar o ilhamento [121]. A correta aquisição de medições de tensão e corrente permite ao operador estimar com precisão o estado do sistema elétrico. As medições realizadas pelos **PMUs** podem ser definidas de acordo com a sua taxa de amostragem e frequência de amostragem da medição.

Outra função de extrema importância dentro de um sistema de distribuição inteligente é a automação da distribuição [79], que é responsável pela configuração e controle de todos os dispositivos espalhados pela rede como banco de capacitores, reguladores de tensão, chaves, disjuntores e atuadores.

Todos esses dispositivos formam uma grande rede de sensores que trocam informações sem ou com mínima interação humana [23]. Seus requisitos irão divergir desde a transmissão de dados, latência e prioridade de conexão ao servidor para transmissão de dados. Nas futuras redes de distribuição, as redes de medição avançada, junto com sincrofasores e dispositivos de automação irão trabalhar em conjunto para manter a confiabilidade e a robustez do sistema elétrico. Porém, é necessária a criação de regras de

controle de tráfego para evitar o congestionamento de dispositivos e que mensagens de extrema importância se percam e o sistema entre em colapso. Devido a isto, as próximas seções focam os desafios gerados por estas numerosas conexões de usuários e como gerenciar esse problema em uma rede de distribuição inteligente operando em cenários críticos.

6.3 Requisitos de Tráfego para Comunicação em Redes de Distribuição Inteligentes

Os IEDs conectados ao sistema de distribuição possuem rigorosos requisitos de latência para suportar aplicações de proteção e controle [128]. Dentro da rede de distribuição inteligente, todos estes dispositivos geram, transmitem e recebem uma grande quantidade de dados. Por exemplo, os sistemas baseados no SCADA enviam dados a cada 2–5 segundos, enquanto os PMUs geram uma quantidade enorme de dados de acordo com o ajuste de sua taxa de amostragem. Em sistemas de medição avançados, os dados possuem uma menor periodicidade, em torno de 1–15 min ou mesmo horas [79], enquanto sistemas de automação da distribuição respondem a eventos de acordo com a necessidade, porém suas respostas devem atingir valores baixíssimos de latência. Portanto, é crucial entender os requisitos de comunicação das futuras redes de distribuição ativas e seus requisitos para executar o gerenciamento e controle de todos os dispositivos conectados.

Os requisitos de comunicação dentro de um sistema elétrico foram primeiramente classificados em [130] e um trabalho aplicado a redes elétricas inteligentes foi desenvolvido em [131]. Neste trabalho os requisitos são tratados de acordo com uma ordem de prioridade, podendo ser classificados como descrito a seguir:

- Requisitos de comunicação operacional em tempo real;
- Requisitos de comunicação operacional;
- Requisitos de comunicação administrativa.

Os requisitos de comunicação em tempo real são os essenciais para manter a correta operação do sistema de energia. Esta classe de serviço engloba as aplicações inteligentes com requisitos de baixíssima latência, como sistemas de controle, proteção, sincrofasores, autorrecuperação e ilhamento. Por outro lado, a comunicação operacional é caracterizada como o apoio à descrição do evento ocorrido de pequenos e grandes distúrbios do sistema de energia. Este tipo de requisito é caracterizado por não ocorrer em tempo real, com requisitos médios de latência. Por último os requisitos de comunicação administrativos, que podem ser classificados como eventos periódicos, agendados, como a leitura de medidores

inteligentes, atualização de *firmware*, entre outros. A Tabela 19 ilustra os requisitos de cada aplicação inteligente aplicada a um sistema de distribuição totalmente automatizado de acordo com [131]. A descrição é feita de acordo com o tipo de aplicação, latência e qual a ordem de prioridade em que cada aplicação pode ser classificada.

Tabela 19 – Requisitos de comunicação para aplicações inteligentes.

Requisitos de Comunicação	Latência (tempo)	Tipo de Requisito
Resposta à Demanda (RD)	500ms–algumas horas	Administrativa
Monitoramento de grandes áreas	20ms–200ms	Operacional
AMI	2000ms	Administrativa
Automação de Subestações	15ms–200ms	Operacional
Monitoramento de Medidores	2000ms	Administrativa
Automação da Distribuição	20ms–200ms	Tempo Real/Operacional
Veículos Conectados	2s–5min	Administrativa
REDS	300ms–2s	Operacional
Controle de Distúrbios	200ms	Tempo Real
Gerenciamento de Usuários	300ms–2000ms	Administrativa
Sincrofasores	<20 ms	Tempo Real

6.4 Proposta de Modelo de Tráfego para Sistemas de Distribuição de acordo com Prioridades

A enorme quantidade de sensores e dados influenciam o dimensionamento e a interoperabilidade da rede. A largura de banda, o consumo de energia e a qualidade de serviço são afetados por esse crescimento. Em um cenário de emergência, todos os sensores enviarão informações ao centro de controle, sem nenhuma regra e com ordem de atendimento de acordo com a ordem de chegada das mensagens. Esta política de gerenciamento de mensagens pode não ser a mais apropriada para a operação de um sistema elétrico inteligente, pois mensagens de controle e supervisão podem ser descartadas devido à demora no tratamento de mensagens no servidor, aumentando, assim, a probabilidade de erro de mensagens, diminuindo a qualidade de serviço e a resiliência do sistema.

Dentro de um sistema de distribuição inteligente, diferentes dispositivos com variados requisitos de tráfego e fluxo de dados são conectados. Durante a operação da rede, várias aplicações estão sendo executadas simultaneamente. Cada aplicação é caracterizada por um tipo de tráfego com diferentes requisitos. Se diferentes níveis de prioridade forem atribuídos a cada tipo de aplicação, o centro de controle será capaz de controlar e gerenciar ativamente estes diferentes tráfegos de dispositivos com a complexa combinação de requisitos de múltiplas aplicações.

O modelo proposto neste capítulo tem como foco dar suporte a diferentes tipos de aplicação, porém são atribuídas prioridades a cada tipo de mensagem gerada por qualquer

dispositivo conectado à rede de comunicação, podendo uma mesma classe de prioridade agregar mais de uma aplicação inteligente. A Tabela 20 ilustra os diferentes níveis de prioridade atribuídos a cada tipo de aplicação inteligente. Este trabalho foca os requisitos mais severos para a operação do sistema inteligente, ou seja, considera um ambiente de operação crítica.

Tabela 20 – Modelo proposto para gerenciamento de mensagens em redes inteligentes.

Classe	Aplicação	Prioridade	Latência
1	Sincrofasores/Proteção/Controle/ Automação da Distribuição	Alta	Baixa
2	Gerenciamento de Cargas/Usuários/Automação Subestações/REDS /	Média	Média
3	Monitoramento Medidores/Veículos/Resposta à Demanda Inteligentes	Baixa	Alta

Na Tabela 20 são atribuídas classes a cada tipo de prioridade de comunicação de acordo com a sua latência e importância para a correta operação da rede inteligente. Para atividades que necessitam de suporte em tempo real, é atribuída alta prioridade. Já para aplicações com requisitos de latência média é atribuída a Classe 2. Aplicações que demandam requisitos de latência maiores são os com a menor classe e, teoricamente, menor prioridade.

Nesse modelo proposto, os tráfegos de entrada no servidor são classificados em três categorias diferentes com base em seus requisitos de latência. Este tipo de classificação fornece os requisitos necessários para o correto tratamento da informação para suportar os diferentes tipos de serviços aplicados a redes elétricas inteligentes.

O tráfego de informações é baseado em modelo de fila com prioridade, onde as mensagens são tratadas de maneira diferente de acordo com o grau de prioridade atribuído àquela aplicação. Por exemplo, se o servidor do centro de controle estiver tratando uma leitura de um medidor inteligente e, no momento em que esta mensagem estiver sendo tratada, chegar no servidor uma mensagem de dispositivo de proteção ou controle, o servidor deve parar o tratamento desta mensagem menos prioritária e colocá-la no final da fila, dando prioridade à mensagem enviada pelo dispositivo de proteção. Desta maneira, não há atraso no tratamento da mensagem prioritária. Na próxima seção, o funcionamento de filas preemptivas é discutido brevemente.

6.4.1 Sistema de Filas com Prioridade

Os sistemas de filas em que alguns clientes têm tratamento preferencial são chamados de sistema de fila com classes prioritárias [5]. Nestes sistemas, os clientes são distinguidos por classes prioritárias, que estão numeradas de 1 a i . O cliente que pertence à classe de prioridade 1 tem preferência sobre o cliente que possui prioridade de classe i ,

ou seja $1 < i$. Porém, a questão é como tratar estes clientes de menor prioridade i quando um usuário de maior prioridade chega ao servidor [132]. A Figura 30 ilustra o caso onde n clientes chegam ao servidor, sendo o cliente 1 o de maior prioridade, com taxa de chegada λ_1 e taxa média de serviço μ_1 , seguido pelos clientes com menor prioridade.

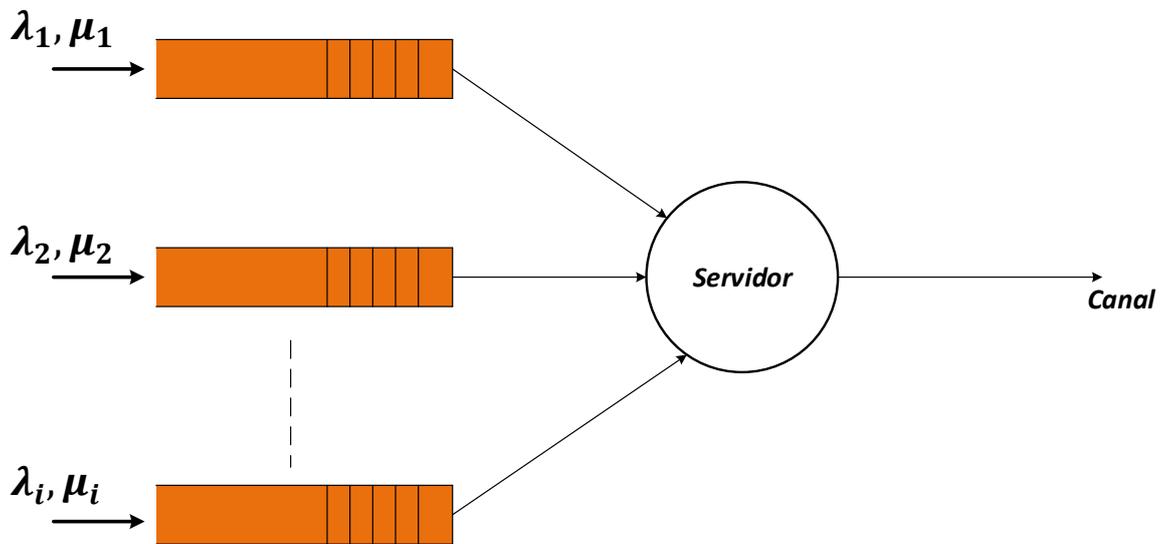


Figura 30 – Sistema de filas com prioridade [5].

Na literatura, duas políticas de tratamento de classes prioritárias são propostas e denominadas fila com prioridade preemptiva e fila sem preempção [5]. No caso com preempção, assume-se que no momento em que um cliente de maior prioridade chegar ao servidor, o serviço de menor prioridade é interrompido e o novo cliente começa a ser servido e o cliente cujo serviço foi interrompido retorna ao início da fila no servidor. A interrupção pode causar atrasos, pois o usuário tem que começar novamente todo o processo no servidor. Este caso em especial é chamado de interrupção com continuidade. Por outro lado, num cenário onde não existe nenhuma regra de prioridade, se um usuário de menor prioridade estiver sendo servido e neste momento chegar um usuário de maior prioridade, o usuário de prioridade i continua sendo atendido.

Para a análise a seguir, assume-se um sistema de filas onde os usuários da n -ésima classe chegam segundo um processo poissoniano, com taxa de chegada λ_n , de acordo com

uma variável independente X_n , que representa o serviço demandado, com média $E[X_n]$ e segundo momento $E[X_n^2]$. O sistema pode ser modelado por um sistema de filas $M/G/1$ com taxa média de chegada [132], descrita por

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_n \quad (6.1)$$

em que λ_n é a taxa média de do processo poissoniano de chegada de pacotes. O tráfego total oferecido pelo sistema é dado de acordo com a taxa de chegada de pacotes pela taxa média de serviço μ [132], e pode ser descrito como

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i = \frac{\lambda}{\mu} \quad (6.2)$$

A taxa média de serviço do sistema pode ser descrita pelo seu valor médio, ou seja, o primeiro momento de $E[X]$, dado por $E[X_n] = 1/\mu_n$, e o segundo momento descrito pela lei geral dos momentos [132], que pode ser escrita como

$$E[X^2] = \frac{\lambda_1}{\lambda} E[X_1^2] + \frac{\lambda_2}{\lambda} E[X_2^2] + \dots + \frac{\lambda_j}{\lambda} E[X_n^2] \quad (6.3)$$

Desta maneira, o tempo médio despendido por cada classe n no sistema [132], pode ser descrito como

$$\bar{T}_i = E[T_i] = \frac{1}{1 - \rho_{i-1}} \left[E[X_i] + \frac{\sum_{p=1}^i \lambda_p E[X_p^2]}{2(1 - \rho_i)} \right] \quad (6.4)$$

em que ρ é a taxa de utilização do sistema dada por $\rho_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j E[X_j]$, sendo que $\rho_0 = 0$ e $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Dadas estas restrições, pode-se encontrar o tempo médio que pacotes de cada classe de usuário ficam na fila [132], o que pode ser descrito por

$$\bar{W}_i = E[T_i] - E[X_i], \text{ para } i = 0, 1, 2, 3 \dots n. \quad (6.5)$$

Portanto, pode-se determinar o tempo médio total na fila para cada classe i através de [132],

$$\bar{W} = \frac{\lambda_1}{\lambda} E[W_1] + \frac{\lambda_2}{\lambda} E[W_2] + \dots + \frac{\lambda_i}{\lambda} E[W_i] \quad (6.6)$$

Assim, é possível validar a proposta de gerenciamento de tráfego de dados dentro de um sistema de distribuição inteligente de acordo com suas respectivas classes e requisitos.

6.5 Simulação e Resultados

Esta seção pretende analisar a quantidade de informação gerada para monitoramento, controle e gerenciamento de um sistema de distribuição inteligente. O cenário é testado, simulado e validado em um sistema de distribuição de 13 barras do IEEE [123], como mostrado na Figura 31. O foco deste estudo é gerenciar o tráfego de informação gerado por diversos dispositivos conectados ao sistema, de maneira a suportar as mais variadas aplicações inteligentes.

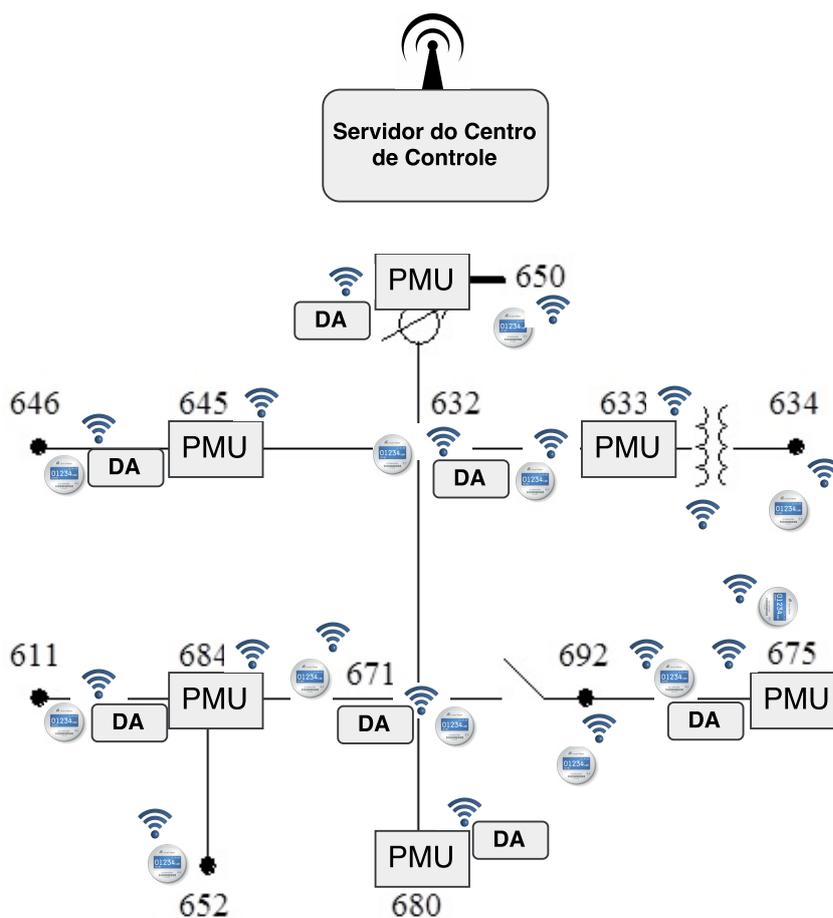


Figura 31 – Sistema IEEE de 13 barras adaptado.

6.5.1 Considerações Iniciais

Em condições normais, as aplicações inteligentes operam de acordo com seu agendamento prévio de tráfego. Por exemplo, as mensagens de medição são enviadas a cada 15 minutos e nenhuma mensagem desnecessária de controle e interrupção é enviada. Portanto, neste cenário é possível controlar o fluxo de dados pelos dispositivos. Porém, o gerenciamento de mensagens durante a operação crítica também deve ser considerada. Em situações hostis, o sistema de distribuição inteligente constantemente e simultaneamente envia mensagens para executar o fluxo de potência, balanço, resposta à demanda,

corde de cargas entre outras operações. Neste cenário, se não houver prioridade no tratamento das informações, o servidor as trata de acordo com a ordem de chegada. Assim, neste trabalho se considera o sistema de filas com prioridade de acordo como proposto na Tabela 20.

O modelo de distribuição do IEEE de 13 barras foi escolhido devido a sua densa e variada topologia de carga, ao qual deve ser conectado um número considerável de dispositivos inteligentes para a realização do seu controle e gerenciamento. Para todas as simulações se considera que vários IEDs, PMUs e medidores inteligentes estão conectados, transmitindo e recebendo mensagens para os centros de controle, onde as decisões são tomadas.

A infraestrutura de comunicação é baseada em tecnologia de banda larga móvel baseada no padrão NB-IoT [8] devido ao baixo custo de instalação de infraestrutura, alta distância de cobertura e suporte para a conexão massiva de dispositivos.

Assume-se que cada medidor inteligente gera uma mensagem de 125 bytes [129] e que, em condições normais, são enviadas 6 mensagens por hora para o centro de controle. Para os sincrofasores, assume-se que cada pacote transmitido é da ordem de 76 bytes, com frequência de amostragem de 60 amostras por segundo. Para serviços de automação de distribuição, assume-se que o tamanho da mensagem é de 150 bytes e que uma média de 12 mensagens são enviadas por hora [79].

Para a avaliação do agendamento do tráfego de mensagens na resiliência do sistema, quando estiver ilhado, o cenário é testado em um sistema de distribuição modificado de 13 barras do IEEE com fontes de energia distribuídas. Foi utilizada a mesma metodologia do capítulo 5 para o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia, distribuição de consumidores e recursos energéticos, dado isso, a Figura 31 ilustra o cenário da microrrede proposta, com consumidores de maior prioridade localizados nas barras 646 e 675.

Para esta análise, foi desenvolvida e implementada uma rede de comunicação que abrange toda a área geográfica do sistema de 13 barras. A rede foi projetada e implementada com a tecnologia de forma a garantir uma operação confiável da microrrede. E com parâmetros de simulação ilustrados na Tabela 21.

As cargas de comunicação estão conectadas ao sistema juntamente com as demais cargas em suas barras equivalentes. O SGE adapta o consumo de energia das cargas de comunicação de acordo com o estado operacional da microrrede. Desta forma, durante a operação do sistema, é garantida conectividade mínima de dispositivos mesmo que ações severas de economia de energia tenham sido tomadas. A unidade de armazenamento de energia conectada à barra 650 possui uma profundidade de descarga de 80%, enquanto a unidade conectada à barra 634 possui profundidade de descarga de 60%. Os valores das fontes de energia distribuídas e a capacidade de cada sistema de armazenamento de

Tabela 21 – Parâmetros para o cálculo do sistema de comunicação.

Parâmetros	Valores
Frequência [MHz]	2600
Ganho da Antena ERB [dBi]	4
Perda nos alimentadores ERB [dB]	2
Desvanecimento [dB]	8,1
Largura de banda [MHz]	20
Sensibilidade Receptor [dB]	-92
Perda por penetração [dB]	20
Potência de transmissão ERB [dBm]	33
Ruído térmico [dB]	-174
Duplexação	TDD
Modulação	QPSK
Sombreamento [dB]	4,9
Modelo de propagação	SUI-Erceg
Probabilidade de Cobertura	98 %
Tamanho antena ERB [m]	30
Tamanho antena usuário [m]	2
Tipo de área	Densa Urbana

energia utilizado na Figura 31 são ilustrados na Tabela 22.

Tabela 22 – Descrição da localização, do tipo e das características nominais das unidades de geração distribuída.

Localização	Tipo de Fonte	Potência Nominal (kW)/ Capacidade Nominal (kWh)
634	Baterias tipo chumbo-ácido	200/100, 60
	Estado de carga bateria	
	Potência Fotovoltaica	
646	Potência Fotovoltaica	80/80
	Gerador diesel	
671	Potência Fotovoltaica	30
680	Potência Fotovoltaica	300
650	Potência Eólica	330
675	Gerador diesel	170
650	Estado de carga Bateria VRLA	400/1500

6.5.2 Caso Simulado

O foco principal desta seção é determinar $E[W_i]$ e $E[T_i]$, respectivamente, o tempo médio de espera na fila e o tempo médio total na fila para a classe i . O caso será simulado de acordo com a ordem de chegada de usuários com base em sua prioridade.

Assume-se que existem 3 classes de usuários. A classe 1 é a classe prioritária, seguida pela Classe 2 e 3, respectivamente. Os usuários possuem taxas de chegada λ_i ,

modelados por uma distribuição poissoniana. O tempo médio de serviço de cada classe é dado por $E[K_i] = 1/\mu_i$. A taxa de serviço μ_i é sempre constante e igual ao inverso do tempo de transmissão de um pacote. Assume-se, neste estudo, o uso da modulação M-QAM (*M-ary Quadrature Amplitude Modulation*) [133], de forma que T_1 seja dado por

$$T_1 = \frac{L_p}{BW \log_2 M} \quad (6.7)$$

em que M é a ordem de modulação utilizada pelos usuários de todas as classes e L_p é o tamanho do pacote em bits.

Neste estudo, o modelo de filas preemptivo funciona de acordo com a ordem de chegada de cada usuário. Se um usuário de Classe 1 chegar quando um usuário de menor classe estiver recebendo tratamento, o servidor para o serviço atual, atende o de classe prioritária e retorna ao serviço anterior somente após tratar o de mais alta prioridade.

O sistema de filas é baseado no modelo de fila M/G/1, sendo um sistema modelado por um único servidor com sua função de distribuição modelada por $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ para $t \neq 0$, [132]. Os tempos de serviços são independentes e igualmente distribuídos de acordo com a função de distribuição poissoniana. O sistema é modelado com 3 classes prioritárias, portanto a taxa de chegada total de acordo com a Eq. (6.1) pode ser descrita como,

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (6.8)$$

À partir da Eq. (6.7), pode-se determinar a taxa de serviço de cada usuário e juntamente com a Eq. (6.8) e de posse da Eq. (6.2), determina-se a ocupação total do sistema. Desta maneira, pode-se escrever o tempo médio de cada classe na fila de acordo com a Equação (6.4). Portanto o tempo médio na fila para usuários da Classe 1 pode ser escrito como

$$\bar{T}_1 = E[T_1] = \frac{1}{1 - \rho_0} \left[E[X_1] + \frac{\lambda_1 E[X_1^2]}{2(1 - \rho_1)} \right] \quad (6.9)$$

Para usuários da Classe 2, pode-se escrever

$$\bar{T}_2 = E[T_2] = \frac{1}{1 - \rho_1} \left[E[X_2] + \frac{\lambda_1 E[X_1^2] + \lambda_2 E[X_2^2]}{2(1 - \rho_2)} \right] \quad (6.10)$$

E, por último, para classe com menor prioridade pode-se escrever

$$\bar{T}_3 = E[T_3] = \frac{1}{1 - \rho_2} \left[E[X_3] + \frac{\lambda_1 E[X_1^2] + \lambda_2 E[X_2^2] + \lambda_3 E[X_3^2]}{2(1 - \rho_3)} \right] \quad (6.11)$$

Com o resultado obtido nas Eq. (6.9), Eq. (6.10), Eq. (6.11) e pela Eq. (6.5), encontra-se o tempo de espera de cada classe

$$\bar{W}_1 = E[T_1] - E[X_1] \quad (6.12)$$

$$\bar{W}_2 = E[T_2] - E[X_2] \quad (6.13)$$

$$\bar{W}_3 = E[T_3] - E[X_3] \quad (6.14)$$

e o tempo total de espera dado pela Eq. (6.6)

$$\bar{W}_{total} = \frac{\lambda_1}{\lambda} E[W_1] + \frac{\lambda_2}{\lambda} E[W_2] + \frac{\lambda_3}{\lambda} E[W_3] \quad (6.15)$$

6.5.3 Resultados Simulados

A partir do estudo analítico, pode-se, agora, determinar o tempo médio de espera na fila para cada classe de usuário e o tempo total na fila de espera. Como apresentado, o foco desta seção é determinar $E[T_i]$ e $E[W_i]$, respectivamente, o tempo médio de espera na fila e o tempo médio total na fila para a classe i . Para as simulações, utilizam-se os parâmetros apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Parâmetros utilizados na simulação do modelo proposto com prioridades.

Parâmetros	Valores
Largura de Faixa [MHz]	1
Modulação utilizada	M-QAM
Tamanho do mensagem Classe 1 [Bytes]	50 - 76 - 200
Tamanho do mensagem, Classe 2 [Bytes]	100
Tamanho do mensagem, Classe 3 [Bytes]	125
Distribuição	Poissoniano

Primeiramente, assume-se que um usuário de Classe 3 está sendo atendido no servidor num determinado instante de tempo t . Um usuário de Classe 1 chega ao servidor, de acordo com um modelo de distribuição poissoniano. Assumem-se que os tempos de chegada de cada classe λ_i não seguem periodicidade ou agendamento para a simulação de um cenário crítico, onde todos os dispositivos inteligentes estão constantemente enviando mensagens para os centros de controle. Na Figura 32 é ilustrado tempo médio de espera na fila para todas as classes. Como se pode observar, a Classe 1 possui o menor tempo de atendimento, passando menos tempo na fila antes do processamento.

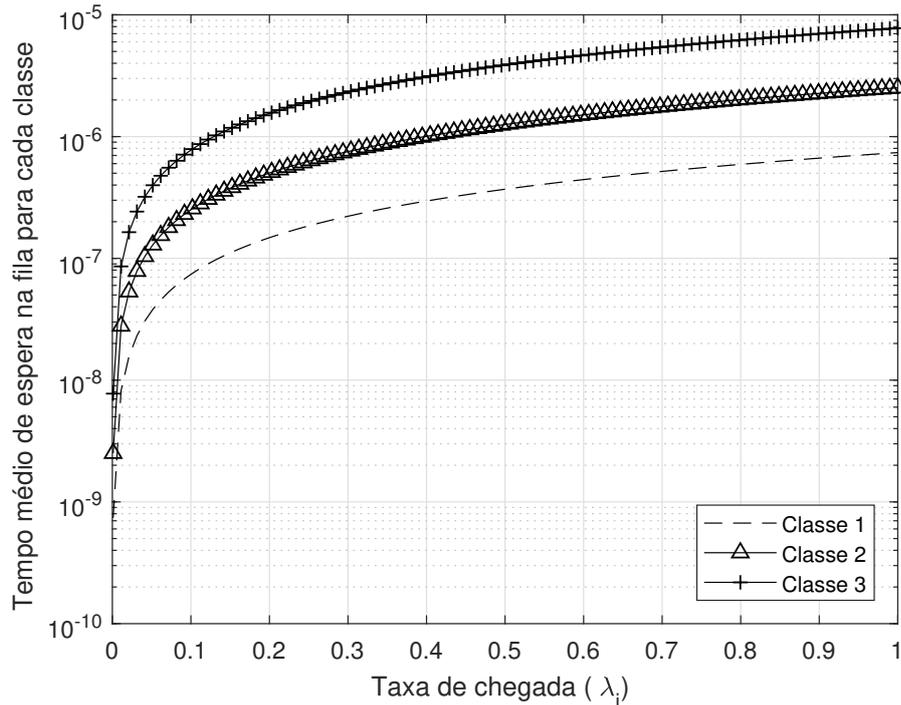


Figura 32 – Tempo média de espera para sistema com preempção.

A análise apresentada na Figura 32 demonstra que a Classe 3, de menor prioridade, é atendida com um maior atraso, porém as aplicações inteligentes atribuídas a esta classe não são vitais para o funcionamento do sistema, como por exemplo, as medições do consumo, faturamento de energia e atualização do sistema. Neste cenário, assume-se que sincrofasores estão transmitindo dados constantemente com taxa λ_1 pacotes por segundo. Porém, o tamanho da mensagem dos clientes prioritários pode variar, podendo ser uma mensagem de controle ou proteção que geram tráfegos diferentes.

A Figura 33 demonstra a influência da variação da geração da taxa de chegada de acordo com o tamanho da mensagem a ser transmitida. Pode-se observar que quanto maior o tamanho do pacote a ser transmitido, maior será o seu tempo de espera na fila, aumentando, assim, o tempo de processamento da mensagem a ser transmitida.

Deve-se ressaltar a importância de políticas de controle de tráfego de usuários devido ao grande número de usuários que estarão conectados. Em casos críticos, todos os dispositivos que antes transmitiam informações de acordo com seu agendamento agora transmitem com maior periodicidade ou, constantemente, até que a falha ou distúrbio seja descoberto e as medidas cabíveis, realizadas. Porém, num ambiente sem regras de prioridade, a mensagem transmitida chegará ao servidor e será tratada imediatamente, como ilustrado na Figura 34.

Na Figura 34, foi implementado um sistema de filas sem prioridades, onde as mensagens são tratadas de acordo com a ordem de chegada, num sistema denominado de primeiro que chega, primeiro que sai. Como pode-se observar, as mensagens de Classe 2

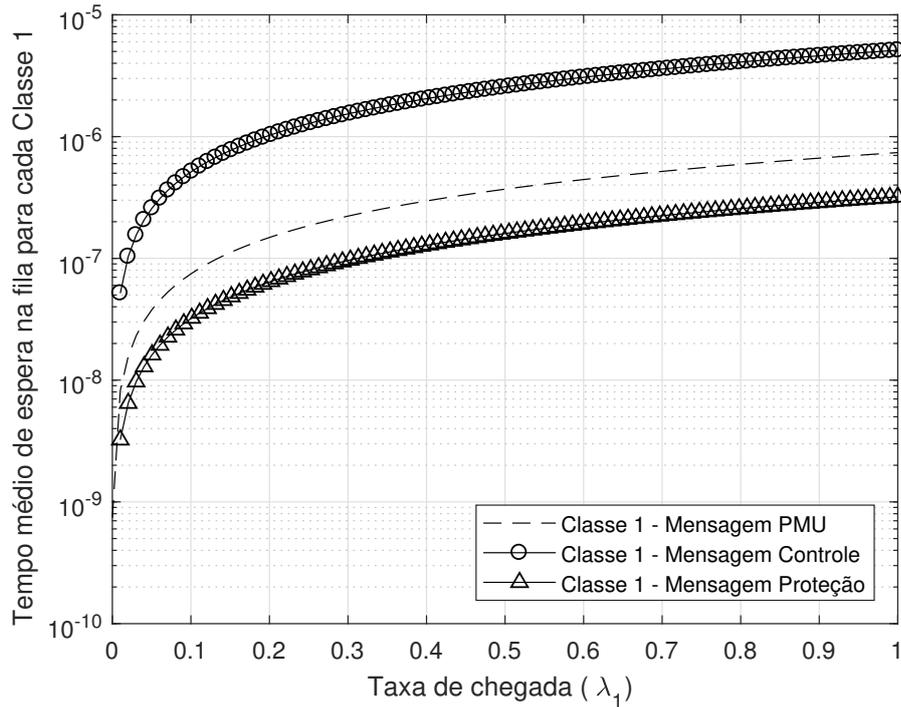


Figura 33 – Variação do tempo médio de espera na fila para diferentes aplicações inteligentes.

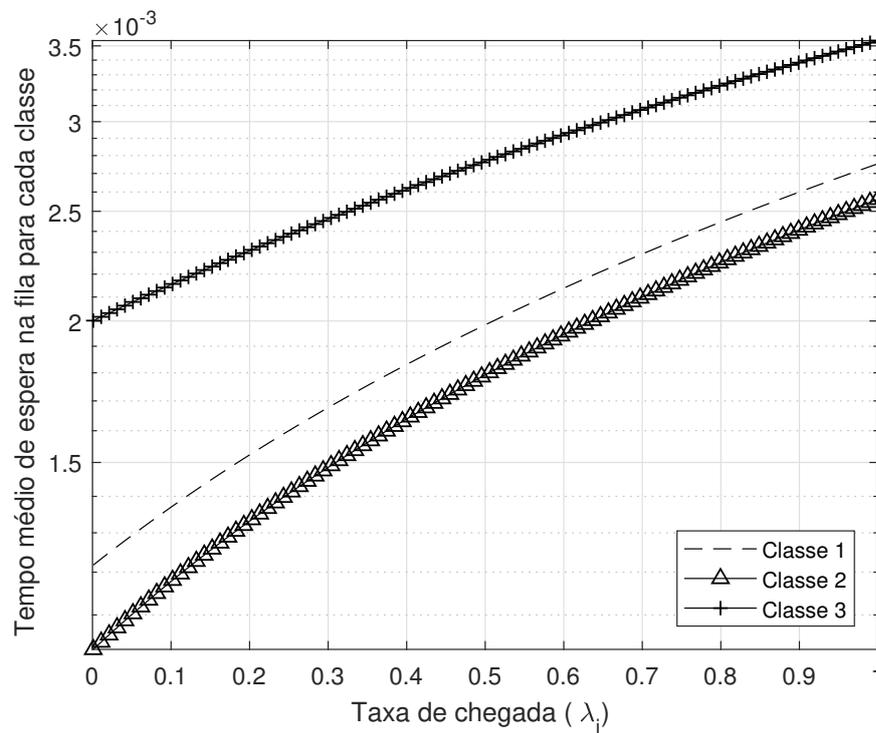


Figura 34 – Tempo média de espera para sistema sem prioridades.

possuem um menor tempo de espera que as de Classe 1, dado suas características e ordem de chegada de seus usuários.

Observando a Figura 35, aonde é ilustrado o tempo de espera somente para a classe prioritária, é possível notar que serviços inteligentes como de proteção e controle podem

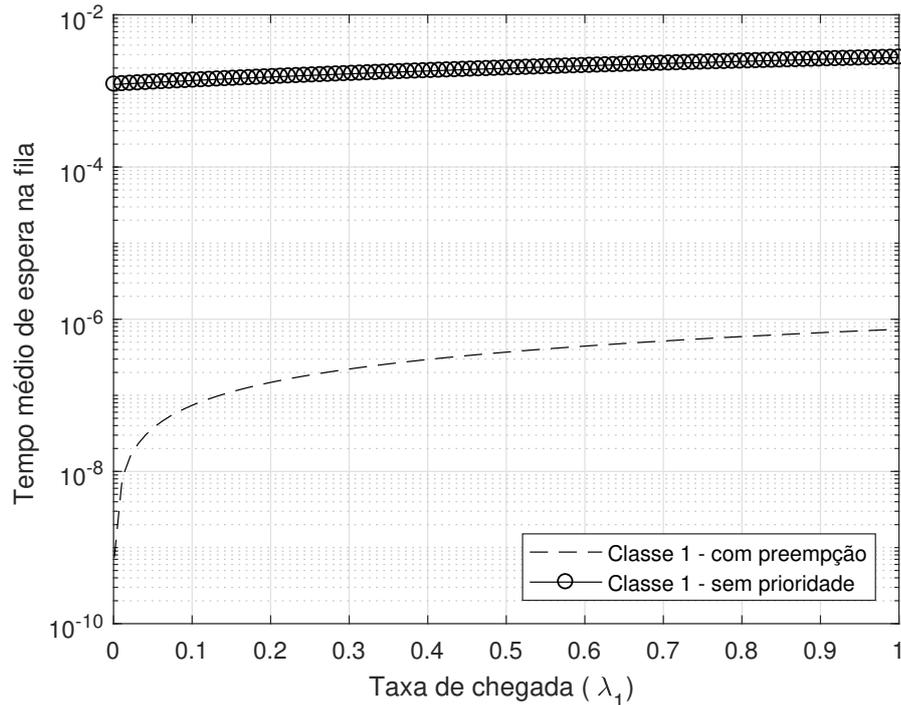


Figura 35 – Tempo média de espera para sistema com e sem prioridade para a classe prioritária.

ser afetados devido a este tratamento, que irá ocasionar um perda de confiabilidade no sistema, com o aumento da latência destes serviços.

Por último, na Figura 36 é apresentado o tempo total de espera na fila para um sistema com e sem prioridade. De acordo com a Figura 36 é possível concluir que o método de gerenciamento de tráfego de usuário é robusto. Além de permitir que mensagens de alta prioridade sejam tratadas com o devido rigor de latência, o tempo total de espera na fila de todas as classes apresenta um tempo relativamente menor, aumentando, assim, a vazão do sistema, sendo uma característica essencial durante a operação em ambientes sujeitos a falhas.

6.5.4 Influência do Agendamento de Tráfego na Resiliência da Microrrede

A metodologia proposta nas seções anteriores pode ser aplicada a qualquer cenário de operação crítico, durante um grande distúrbio ou uma eventual falha que irá ocasionar o ilhamento do sistema. Durante o ilhamento, como proposto no Capítulo 5, três estados de operação da microrrede são considerados: estado normal, emergência e crítico.

Durante a operação normal, considera-se a operação e agendamento do tráfego de mensagens proposto neste Capítulo 6, onde, quando operando em um ambiente adverso ou ilhado, todos os dispositivos inteligentes enviam e recebem mensagens constantemente, exigindo que a rede de comunicações esteja 100% ativa e dê suporte a toda aplicação inteligente, como ilustrada na Tabela 19.

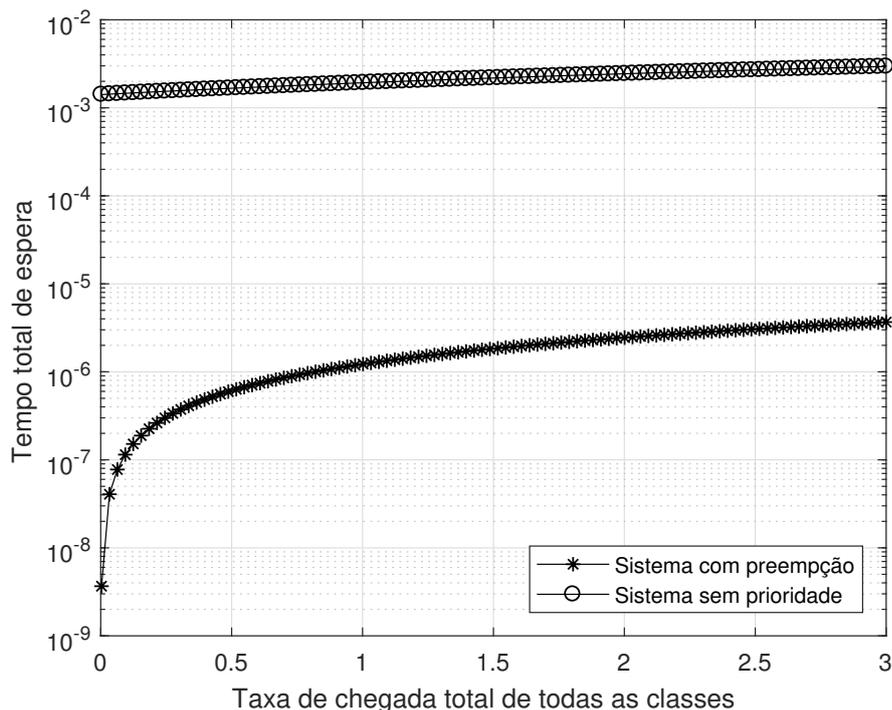


Figura 36 – Influência de diferentes taxas de chegada no desempenho do sistema.

Considera-se que a microrrede ilustrada na Figura 31 é desconectada da rede elétrica principal às 10h devido a qualquer evento de perturbação ou falha. O disjuntor no alimentador 650 é aberto e, a partir deste momento, o sistema começa a operar em modo ilhado com recursos energéticos distribuídos fornecendo energia ao sistema.

A Figura 37 mostra a resiliência da microrrede quando está operando ilhada e com todas as cargas de comunicação ativas, sem nenhuma política de agendamento ou economia de energia. Pode-se observar que às 10h, devido a algum distúrbio, o sistema se isola da conexão da rede principal, e apresenta autonomia máxima de 340 minutos.

Para o resultado simulado na Figura 37, a política de prioridade de mensagens é a mesma utilizada e ilustrada na Figura 32, onde mensagens com altas prioridades e rigorosos requisitos de latência serão atendidos primeiros. Entretanto, como ilustrado na Figura 37, às 11h40min o sistema se altera do estado normal para o estado crítico. Neste instante, como proposto no Capítulo 5, todos os usuários de baixa prioridade, predominantemente usuários residencias, são cortados com o intuito de maximizar o tempo de sobrevivência da rede.

Neste momento, é necessário tomar uma decisão sobre qual atitude é de maior prioridade para a resiliência da microrrede. Se toda a rede de comunicação continuar ativa, diminui-se drasticamente o tempo de sobrevivência da rede, como foi mostrado em [126]. Todavia, medidas de economia de energia também podem ser tomadas como em [118]. Porém, neste estudo, faz-se uma análise mais criteriosa sobre a real necessidade do suporte a todos os tipos de aplicações inteligentes.

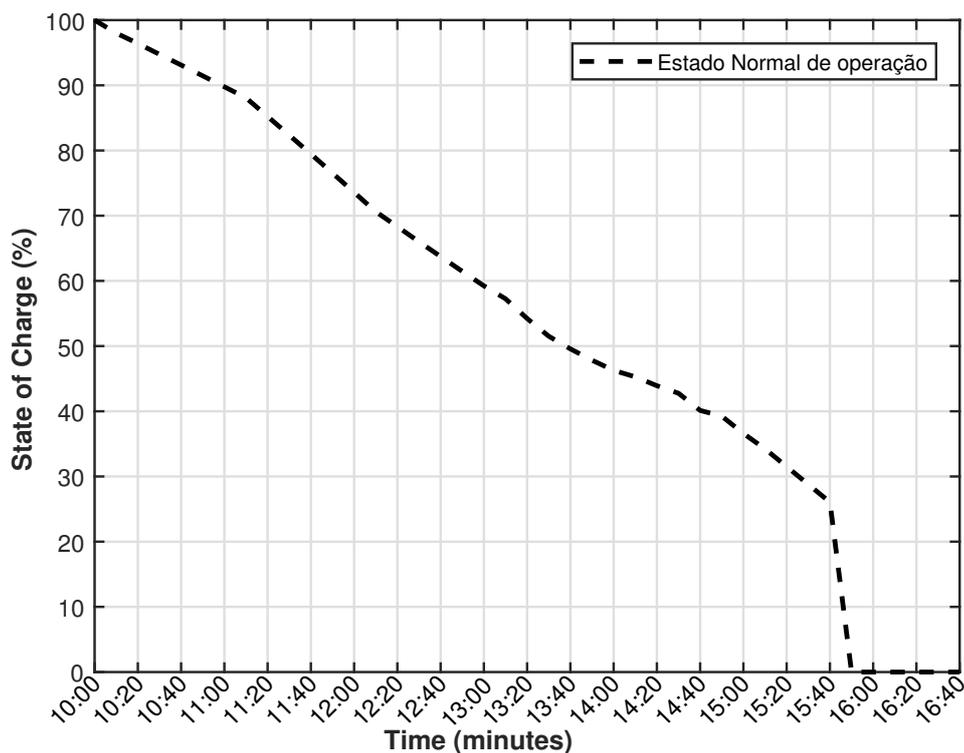


Figura 37 – Estado de cargas das baterias do sistema para o método sem agendamento.

Atividades de proteção, controle e sincrofasores, podem ser consideradas as aplicações primordiais em redes elétricas inteligentes. São aplicações com rigorosos requisitos de latência, operando em tempo real e que dão suporte à autorrecuperação do sistema.

Estas aplicações necessitam de uma rede de comunicação robusta e com disponibilidade constante. Porém, durante o ilhamento e políticas de controle da operação da microrrede, outras aplicações possuem um grau de prioridade maior, para que se possa calcular o balanço do sistema de acordo com o estado atual estados das cargas, gerações intermitentes e baterias.

De posse destes requisitos, considera-se o esquema de agendamento de mensagens, ou seja, sensores responsáveis pelo gerenciamento de toda a rede somente enviam e recebem informações em tempos predeterminados de acordo com o estado da microrrede. Estas aplicações que podem ser agendadas são, agora, caracterizadas como aplicações de alta latência, isto é, o envio e recebimento de comandos pode ser agendado de tempos em tempos para que, em casos como a operação ilhada, as cargas de comunicação possam ser desligadas e religadas para o aumento da resiliência do sistema.

Este é o caso apresentado na Figura 38. Neste modelo foi implementando o agendamento do envio de mensagens: durante um certo período de tempo, todas as ERB foram desligadas, permanecendo apenas alguns dispositivos responsáveis pelo sincronismo entre as estações e a rede. A cada 15 minutos, as estações foram programadas para religar e

restabelecer a conectividade para que aplicações como resposta à demanda, sincrofasores, estado dos recursos energéticos distribuídos, gerenciamento de cargas e monitoramento de medidores inteligentes sejam executadas.

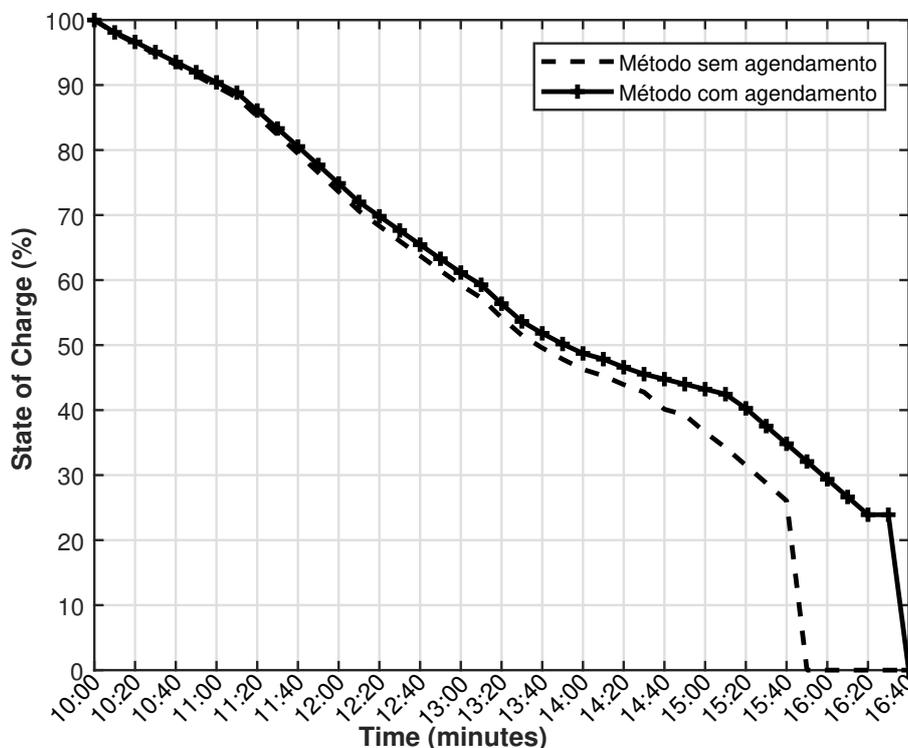


Figura 38 – Estado de cargas das baterias do sistema para diferentes agendamentos.

Na Figura 38 é observado um acréscimo na resiliência da rede de aproximadamente 50 min quando comparada com o sistema sem nenhuma política de agendamento. O tempo de agendamento pode ser aumentado, o que otimiza o tempo de sobrevivência da microrrede. Devido a esta abordagem, o sistema aumenta a sua resiliência, apresentando inteligência suficiente para coordenar certas aplicações, possibilitando, assim, a tomada de decisão de maneira centralizada e com dados reais do estado atual da microrrede.

7 Conclusões

O conceito de redes elétricas inteligentes se baseia na integração entre os conceitos de sistemas elétricos de potência, tecnologias de comunicação e técnicas avançadas de computação. As futuras redes de energia serão baseadas em técnicas que aumentarão a capacidade de decisão e a autonomia do sistema, aperfeiçoando, assim, sua operação e controle.

Devido à necessidade de se reduzir a emissão de gases poluentes e ao constante aumento nos preços de combustíveis fósseis, a integração de sistemas de energia distribuídos é um caminho sem volta. Porém, essa integração traz inúmeros desafios aos engenheiros e pesquisadores das mais diversas áreas de conhecimento.

As redes inteligentes também são valiosas na detecção e redução de danos por desastres naturais, onde áreas são totalmente afetadas e destruídas. A rápida recomposição da rede e a robustez do sistema se tornam mais do que essenciais. Microrredes exercem um papel fundamental desde os casos mais críticos até casos onde falhas no sistema ocorrem por desgaste de equipamentos. Em caso de falhas ou distúrbios, é necessária autonomia para que a operação continue normalmente.

Devido a todas essas necessidades de futuros sistemas de energia, a integração do sistema com diversos sensores espalhados pela rede é fundamental. Estes sensores captam informações do estado, prevêm falhas e atuam em tempo real. Porém, a inclusão de milhares de dispositivos às redes existentes não é trivial. Existem restrições de tecnologias, disponibilidade de espectro e custos.

O projeto de uma infraestrutura de comunicação aplicada às redes elétricas inteligentes é uma questão crítica para interconectar e tornar o sistema elétrico mais robusto e flexível. Requisitos rigorosos de taxa de dados, área de cobertura e eficiência energética devem ser seguidos e trazem novas complexidades ao sistema para que se torne mais inteligente.

Assim, a principal motivação deste trabalho foi o planejamento de um sistema elétrico inteligente considerando a operação isolada com o intuito de maximizar e otimizar o tempo de sobrevivência da microrrede. Em um ambiente com recursos energéticos escassos, faz-se necessária a otimização destes recursos de forma a suprir a demanda de usuários considerados essenciais pelo maior tempo possível.

Com esse objetivo, primeiramente foram investigadas as restrições de atuais tecnologias de comunicação sem fio aplicadas a sistemas que dependem da interação de máquinas. Uma rede de acesso celular foi projetada de acordo com padrões de comunica-

ção do tipo M2M e o seu desempenho foi validado através de cenários que demonstraram as restrições de capacidade, cobertura e consumo de energia de cada padrão, o que traz variáveis mais complexas para a operação do sistema.

À medida que o sistema se torna mais inteligente, mais dispositivos são conectados. E a fim de agregar a grande quantidade de dispositivos inteligentes e seus rigorosos requisitos de operação, é necessária uma solução conjunta com as tecnologias escolhidas e outras tecnologias de comunicação. Dessa forma, atendem-se as necessidades de uma futura rede de distribuição ativa, como forma de prover todos os requisitos da rede como taxa de dados, cobertura e consumo de energia. Além disso, o sistema deve ser otimizado com diferentes tipos de agendamento de tráfego para cada dispositivo de acordo com sua prioridade de atuação no sistema.

Num segundo momento, foi investigada a influência desta grande rede de sensores em um sistema elétrico isolado. Resultados mostraram que as atuais metodologias propostas não consideram as redes de telecomunicações como cargas no sistema, tornando, assim, os resultados questionáveis desde que foi comprovado que, em ambientes com recursos energéticos limitados, as redes que fornecem conectividade causam um forte impacto no tempo total de sobrevivência da microrrede.

Com o intuito de aprimorar estes sistemas, uma nova metodologia para gerenciamento de energia foi proposta, onde cargas referentes à infraestrutura de comunicação não são mais consideradas como prioritárias. São conectadas/desconectadas de acordo com o estado de operação da microrrede e seus recursos energéticos distribuídos, permitindo a operação do sistema com o mínimo custo através da solução do problema de *unit commitment*. O sistema proposto apresentou resultados adequados, maximizando e otimizando a resiliência da rede. As ações de controle complexas apresentaram robustez e flexibilidade de acordo com a operação do sistema. O método proposto se concentra no lado das comunicações e é um novo esquema para comunicações eficientes em energia em ambientes críticos, onde a energia é uma variável chave e deve ser controlada à medida que é consumida ao longo do tempo. Os resultados indicam uma redução do consumo de energia, mas essa redução causa uma relação de custo na operação da microrrede. No entanto, esta solução de compromisso é compensada pela maximização do tempo de sobrevivência em cenários críticos.

Outro fator de extrema importância analisado neste trabalho foi a gestão do tráfego de informações de dados em ambientes críticos. Devido à alta conectividade exigida e o alto volume de dados que trafegam dentro de um sistema inteligente, sistemas de prioridades de mensagens foram empregados. Estas prioridades têm o intuito de prover à microrrede uma maior robustez durante a operação ilhada, possibilitando, assim, que informações geradas por aplicações críticas não sejam perdidas e que ações sejam devidamente tomadas para o controle e gerenciamento da microrrede. Muitos resultados foram obtidos e aplicados a

diferentes casos com diversos níveis de restrições. A análise feita permite afirmar que a metodologia de gerenciamento de energia para operação resiliente proposta neste trabalho é robusta, flexível e escalonável, permitindo, assim, a sua aplicação nos mais variados ambientes de distribuição.

7.1 Principais contribuições

A constante necessidade de modernização do sistema propõe novos desafios, ainda mais em cenários de operação críticos. A integração com uma infraestrutura de comunicação robusta se faz necessária para o controle e gerenciamento de todos os agentes no sistema. Em operação ilhada o cenário se torna ainda mais complexo devido à pouca disponibilidade energética. Portanto, estudar o impacto e novas ações de controle para maximizar e otimizar o tempo de resiliência da rede se tornam essenciais. Sabendo disso, o presente trabalho tem como principais contribuições, tornando-o inédito:

- A modelagem, dimensionamento e avaliação do desempenho de uma rede de comunicação eficiente baseada em padrões de comunicação entre máquinas para suportar aplicações de futuros sistemas ativos de distribuição, considerando requisitos de operação em cenários críticos. O trabalho propõe uma análise precisa sobre o desempenho da camada física a partir dos atuais padrões propostos focado no estudo da relação de compromisso entre cobertura, capacidade e consumo de energia e como influenciam a operação do sistema, considerando as demandas atuais da rede e as limitações dos padrões entre máquinas.
- Considerando a existência de recursos de geração distribuída no sistema elétrico de potência, a investigação do impacto do consumo de potência de cargas de telecomunicações e a influência na confiabilidade de operação do sistema.
- Uma nova abordagem para um sistema de gerenciamento de energia que otimiza e maximiza a resiliência da microrrede para alcançar a máxima eficiência energética. A metodologia híbrida foi proposta para o gerenciamento e controle de cargas. As cargas referentes à infraestrutura de comunicação não são mais consideradas uma carga de alta prioridade e, sim, cargas autoadaptáveis de acordo com o estado de operação da microrrede. Ainda, diferentes profundidades de modos de dormência são aplicadas. Durante a operação em modo ilhado, todo o sistema de comunicação pode ser desligado, ou apenas alguns dispositivos da estação base podem ser desativados, diminuindo o consumo de energia e alcançando a máxima eficiência energética. Esta estratégia estabelece uma relação de compromisso entre máxima resiliência e operabilidade de sistemas de comunicação. Desta maneira, fez-se neces-

sária a análise destas ações de energia na confiabilidade do sistema de comunicação através de cadeias contínuas de *Markov*.

- Um modelo de gestão e controle de tráfego de mensagens através de um sistema de fila com prioridades. O modelo de tráfego proposto é baseado em três classes através de um sistema de fila com preempção. As três classes de tráfego correspondem à prioridade de cada aplicação inteligente no sistema, podendo agregar mais de uma aplicação com a mesma prioridade. Esta suposição garante que a mensagem de maior prioridade seja tratada de maneira preferencial no centro de controle, evitando atrasos e perda na qualidade de serviço. Neste modelo, também é analisada a influência da gestão de mensagens no gerenciamento de energia eficiente para controlar e monitorar a operação de microrredes com o intuito de maximizar a resiliência da rede.

Os resultados que levaram às contribuições, devidamente descritos nessa tese, foram apresentadas em diversas publicações, enumeradas a seguir:

- Periódicos:
 - Francisco Martins Portelinha Júnior; Antonio Carlos Zambroni de Souza; Denisson Queiroz Oliveira; Paulo Fernando Ribeiro. Optimal Traffic Scheduling for Islanded Microgrids, *A ser submetida para IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
 - De Nadai, N. B.; Portelinha, F. M.; de Souza, A. C. Zambroni de Souza; Costa, J. G. C.; P. F. Ribeiro;. Microgrid Outage Control due Communications Uncertainties, *A ser submetida para International journal of electrical & energy systems*.
 - Francisco Martins Portelinha Júnior; Antonio Carlos Zambroni de Souza; Paulo Fernando Ribeiro; Denisson Queiroz Oliveira; Bruno de Nadai Nascimento. Design and Performance of an Advanced Communication Network for Future Active Distribution Systems. *Journal of Energy Engineering*, 2017, *Aceito para publicação*.
 - Portelinha Júnior, Francisco; Carlos Zambroni de Souza, Antonio ; Castilla, Miguel; Queiroz Oliveira, Denisson ; Ribeiro, Paulo . Control Strategies for Improving Energy Efficiency and Reliability in Autonomous Microgrids with Communication Constraints. *Energies*, v. 10, p. 1443, 2017.
- Capítulos de livro:
 - de Souza, A. C. Zambroni; De Nadai N., B.; Portelinha, F. M.; Marujo, Diogo; OLIVEIRA, D. Q. . Microgrids Operation in Islanded Mode. *Sustainable De-*

velopment in Energy Systems. 1ed.: Springer International Publishing, 2017, v. , p. 193-215.

- de Souza, Antonio Carlos Zambroni ; Oliveira, D. Q. ; Marujo, Diogo ; Portelinha, F. M.; De Nadai N, B. . Overview on Microgrids: Technologies, Control and Communications. Sustainable Development in Energy Systems. 1ed.: Springer International Publishing, 2017, v. , p. 1-18.

- Conferências internacionais:

- De Nadai, N. B.; de Souza, A. C. Zambroni; Costa, J. G. C.; Pinheiro, C. A. M.; Portelinha, F. M. . A secondary control based on fuzzy logic to frequency and voltage adjustments in islanded microgrids scenarios. In: 2017 IEEE Manchester PowerTech, 2017, Manchester. 2017 IEEE Manchester PowerTech, 2017. p. 1.
- Portelinha, F.; D. Q. Oliveira ; Nascimento, B. N. ; Souza, A. C. Z. ; Ribeiro, P. F. . Tecnologias da Informação e Comunicação: Influências na Capacidade de Transmissão de Dados em Linhas de Alta Tensão. In: XVII - Decimoséptimo Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, 2017, Ciudad del Este. Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, 2017.
- Portelinha, F.; Queiroz Oliveira, D.; Zambroni de Souza, A.C.; Ribeiro, P.F.; De Nadai, B. ; Marujo, D. . The Impact of Electric Energy Consumption from Telecommunications Systems on Isolated Microgrids. In: 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, 2016, London. 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016. p. 50 (6 .).
- De Nadai, B.; Zambroni de Souza, A.C.; Costa, J. G. C.; Marujo, D.; Portelinha, F; Oliveira, D.Q. . A Monte Carlo Simulation Approach to Determine Critical Buses in Islanded Microgrids. In: 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, 2016, London. 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016. p.51 (6).

- Conferências nacionais:

- Portelinha, F.; D. Q. Oliveira; A. C. de Souza; Ribeiro, P. F.; Nascimento, B. N.; Marujo, D. . Design of an Efficient Wireless Communication Infrastructure to Assist Rural Distribution Networks. In: Congresso Brasileiro de Automática , 2018, João Pessoa, *a ser submetido*.
- Portelinha, F.; D. Q. Oliveira; A. C. de Souza; Ribeiro, P. F.; Nascimento, B. N.; Marujo, D. . A Influência de Sistemas de Comunicação no consumo de Energia de uma Micro Rede Ilhada. In: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2015, Natal, 2016. v. 1.

- Nascimento, B. N.; A. C. de Souza; Costa, J. G. C.; Marujo, D.; Portelinha Jr., F. M.; D. Q. Oliveira . Um Método de Corte de Carga por Subtensão em Microrredes Ilhadas. In: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2015, Natal, 2016. v. 1.
- Marujo, D.; Oliveira, D. Q.; A. C. de Souza; Lopes, B. I. L.; Nascimento, B. N.; Portelinha Jr., F. M. . Uma Proposta de Operação dos Sistemas de Transmissão considerando Redes de Distribuição Ativas via Sistemas Imunológicos Artificiais. In: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2015, Natal, 2016. v. 1

7.2 Trabalhos Futuros

Este trabalho pode ser considerado um estudo inicial da integração entre sistemas elétricos de potência e as diversas formas de se inserir inteligência e conectividade à rede elétrica. Alguns pontos merecem um maior destaque e podem ser também estudados posteriormente:

- Integração com sistemas multiagentes

A integração com tecnologias robustas de computação é o caminho natural para que se agregue uma maior inteligência ao sistema, aumentando, assim, a robustez e a interoperabilidade de operação da microrrede. A integração do atual sistema proposto com tecnologias de informação é um possível campo para continuação dos estudos.

- Análise dos dados gerados (*Big Data*)

Um vasto número de dispositivos será conectado à rede elétrica. O que fazer com as informações geradas, como tirar o melhor proveito delas e como tratar a grande quantidade de mensagens de forma que se possa aumentar a resiliência da microrrede são algumas das questões que podem ser tratadas. O estudo e mineração destes dados é um possível campo de continuação de estudos.

- Integração com a próxima geração celular (*5G*)

Tecnologias de comunicação sem fio são a solução mais viável para alcançar a flexibilidade necessária para o monitoramento e controle de redes de distribuição. Como o sistema irá suportar essa conexão em massa, novos requisitos e regras de acordo com a nova padronização trazem desafios interessantes a serem estudados. Toda nova tecnologia proposta levanta inúmeras possibilidades para contribuição futura.

Referências

- 1 JÚNIOR ANTONIO CARLOS ZAMBRONI DE SOUZA, P. F. R. D. Q. O. F. M. P.; NASCIMENTO, B. de N. Design and performance of an advanced communication network for future active distribution systems. *Journal of Energy Engineering*, v. 144, n. 3, p. 04018019, 2018. [7](#), [42](#), [56](#), [60](#)
- 2 DERUYCK, M.; JOSEPH, W.; MARTENS, L. Power consumption model for macrocell and microcell base stations. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, v. 25, n. 3, p. 320–333, 2014. ISSN 2161-3915. [7](#), [19](#), [49](#), [50](#), [51](#)
- 3 GALLAGER, R. G. *Information Theory and Reliable Communication*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1968. ISBN 0471290483. [7](#), [53](#), [54](#)
- 4 YU, X.; XUE, Y. Smart grids: A cyber physical systems perspective. *Proceedings of the IEEE*, v. 104, n. 5, p. 1058–1070, May 2016. ISSN 0018-9219. [8](#), [96](#)
- 5 ALLEN, A. O. *Probability, Statistics, and Queueing Theory with Computer Science Applications*. San Diego, CA, USA: Academic Press Professional, Inc., 1990. ISBN 0-12-051051-0. [8](#), [100](#), [101](#)
- 6 GUNGOR, V. C. et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 9, n. 1, p. 28–42, Feb 2013. ISSN 1551-3203. [9](#), [36](#), [94](#)
- 7 AZZOPARDI, B. *Sustainable Development in Energy Systems*. 1st. ed. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-54808-1. [9](#), [17](#), [25](#), [30](#), [32](#), [36](#), [37](#), [38](#)
- 8 RATASUK, R. et al. Overview of narrowband iot in lte rel-13. In: *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7. [9](#), [40](#), [41](#), [49](#), [104](#)
- 9 MANGALVEDHE, N.; RATASUK, R.; GHOSH, A. Nb-iot deployment study for low power wide area cellular iot. In: *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. [9](#), [40](#), [41](#)
- 10 ADHIKARY, A.; LIN, X.; WANG, Y. P. E. Performance evaluation of nb-iot coverage. In: *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. [9](#), [40](#), [41](#), [45](#)
- 11 RATASUK, R. et al. Nb-iot system for m2m communication. In: *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. [9](#), [18](#), [39](#), [40](#), [41](#)
- 12 KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Communication network requirements for major smart grid applications in han, {NAN} and {WAN}. *Computer Networks*, v. 67, p. 74 – 88, 2014. ISSN 1389-1286. [9](#), [41](#), [42](#), [43](#), [57](#)
- 13 PORTELINHA F., D. Q. O. N. B. N. S. A. C. Z. R. P. F. Tecnologias da informação e comunicação: Influências na capacidade de transmissão de dados em linhas de alta tensão.

- In: *2017 Decimoséptimo Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ*. [S.l.: s.n.], 2017. 9, 58
- 14 FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 8, n. 1, p. 18–28, January 2010. ISSN 1540-7977. 15, 25
- 15 AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 3, n. 5, p. 34–41, Sept 2005. ISSN 1540-7977. 15, 20, 55
- 16 MCGRANAGHAN, M. et al. Enabling the integrated grid: Leveraging data to integrate distributed resources and customers. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 14, n. 1, p. 83–93, Jan 2016. ISSN 1540-7977. 15, 57, 93
- 17 FANG, X. et al. Smart grid; the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 944–980, Fourth 2012. ISSN 1553-877X. 15, 25, 94
- 18 NEUMANN, S. et al. Everything’s talking to each other: Smart meters generate big data for utilities and customers. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 14, n. 1, p. 40–47, Jan 2016. ISSN 1540-7977. 15, 93
- 19 BOUHAFS, F.; MACKAY, M.; MERABTI, M. Links to the future: Communication requirements and challenges in the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 10, n. 1, p. 24–32, Jan 2012. ISSN 1540-7977. 15, 25, 35, 55, 96, 97
- 20 LIU, J. et al. Trade-offs in pmu deployment for state estimation in active distribution grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 2, p. 915–924, June 2012. 16, 36, 55, 97
- 21 PEGORARO, P. A. et al. Pmu and smart metering deployment for state estimation in active distribution grids. In: *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 873–878. 16, 57, 97
- 22 LI, H. et al. Communication infrastructure design in cyber physical systems with applications in smart grids: A hybrid system framework. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 16, n. 3, p. 1689–1708, Third 2014. ISSN 1553-877X. 16, 36, 39, 95
- 23 SHARIATMADARI, H. et al. Machine-type communications: current status and future perspectives toward 5g systems. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 9, p. 10–17, September 2015. ISSN 0163-6804. 16, 39, 55, 97
- 24 AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, Fourthquarter 2015. ISSN 1553-877X. 16, 40, 94
- 25 HATZIARGYRIOU, N. et al. Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 5, n. 4, p. 78–94, July 2007. ISSN 1540-7977. 16
- 26 R.LASSETER. Microgrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings*, p. 305–308, 2002. 16, 25
- 27 GUERRERO, J. M. et al. Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids; a general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 158–172, Jan 2011. ISSN 0278-0046. 16, 30

- 28 PALMA-BEHNKE, R. et al. A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 2, p. 996–1006, June 2013. ISSN 1949-3053. [16](#)
- 29 GUNGOR, V. C. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 7, n. 4, p. 529–539, Nov 2011. ISSN 1551-3203. [17](#), [36](#), [37](#), [55](#), [56](#)
- 30 FEHSKE, A. et al. The global footprint of mobile communications: The ecological and economic perspective. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 8, p. 55–62, August 2011. ISSN 0163-6804. [17](#)
- 31 WANG, H.; FAPOJUWO, A. O. A survey of enabling technologies of low power and long range machine-to-machine communications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, PP, n. 99, p. 1–1, 2017. ISSN 1553-877X. [17](#)
- 32 HO, Q. D.; GAO, Y.; LE-NGOC, T. Challenges and research opportunities in wireless communication networks for smart grid. *IEEE Wireless Communications*, v. 20, n. 3, p. 89–95, June 2013. ISSN 1536-1284. [17](#), [35](#)
- 33 STD.802.15.1, I. Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 15.1a: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for wireless personal area networks (wpan). *IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002)*, p. 1–700, June 2005. [18](#), [39](#)
- 34 STD.802.15.4, I. Ieee standard for low-rate wireless networks–amendment 4: Higher rate (2 mb/s) physical (phy) layer. *IEEE Std 802.15.4t-2017 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2015 as amended by IEEE Std 802.15.4n-2016, IEEE Std 802.15.4q-2016, and IEEE Std 802.15.4u-2016)*, p. 1–25, April 2017. [18](#), [39](#)
- 35 PARK, M. Ieee 802.11ah: sub-1-ghz license-exempt operation for the internet of things. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 9, p. 145–151, September 2015. ISSN 0163-6804. [18](#), [39](#)
- 36 ARAVINTHAN, V. et al. Wireless communication for smart grid applications at distribution level; feasibility and requirements. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8. ISSN 1932-5517. [18](#), [37](#)
- 37 KALALAS, C.; THRYBOM, L.; ALONSO-ZARATE, J. Cellular communications for smart grid neighborhood area networks: A survey. *IEEE Access*, v. 4, p. 1469–1493, 2016. ISSN 2169-3536. [18](#)
- 38 FENG, D. et al. A survey of energy-efficient wireless communications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 167–178, First 2013. ISSN 1553-877X. [18](#), [20](#)
- 39 FADLULLAH, Z. M. et al. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 4, p. 60–65, April 2011. ISSN 0163-6804. [18](#), [36](#), [39](#), [94](#)
- 40 RATASUK, R.; MANGALVEDHE, N.; GHOSH, A. M2m communications in cellular network deployments using lte. In: *2014 21st International Conference on Telecommunications (ICT)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 477–481. [18](#), [39](#)

- 41 TULLBERG, H. et al. The metis 5g system concept: Meeting the 5g requirements. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 12, p. 132–139, December 2016. ISSN 0163-6804. [18](#)
- 42 LIEN, S. Y.; CHEN, K. C.; LIN, Y. Toward ubiquitous massive accesses in 3gpp machine-to-machine communications. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 4, p. 66–74, April 2011. ISSN 0163-6804. [18](#), [39](#)
- 43 WANG, Y. P. E. et al. A primer on 3gpp narrowband internet of things. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 3, p. 117–123, March 2017. ISSN 0163-6804. [18](#), [39](#), [40](#)
- 44 HOYMANN, C. et al. Lte release 14 outlook. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 6, p. 44–49, June 2016. ISSN 0163-6804. [18](#), [37](#), [39](#), [40](#)
- 45 UNIVERSAL, E.; RADIO, T. Ts 136 401 - v9.2.0 - lte; evolved universal terrestrial radio access network (e-utran); architecture description (3gpp ts 36.401 version 9.2.0 release 9). v. 0, p. 21, 2010. [18](#), [37](#), [39](#)
- 46 RATASUK, R. et al. Narrowband lte-m system for m2m communication. In: *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 1090-3038. [18](#), [39](#), [40](#)
- 47 EROL-KANTARCI, M.; MOUFTAH, H. T. Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid: A survey on interactions and open issues. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 1, p. 179–197, Firstquarter 2015. ISSN 1553-877X. [19](#), [20](#)
- 48 SOURYAL, M. R.; GOLMIE, N. Analysis of advanced metering over a wide area cellular network. In: *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 102–107. [19](#)
- 49 HAGERLING, C.; IDE, C.; WIETFELD, C. Coverage and capacity analysis of wireless m2m technologies for smart distribution grid services. In: *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 368–373. [19](#)
- 50 PERSIA, S. et al. Wireless m2m capacity analysis for smart distribution grids. In: *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. [19](#)
- 51 PERSIA, S.; REA, L. Next generation m2m cellular networks: Lte-mtc and nb-iot capacity analysis for smart grids applications. In: *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. [19](#), [61](#)
- 52 VEREECKEN, W. et al. Overall ict footprint and green communication technologies. In: *2010 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. [19](#)
- 53 RICHTER, F.; FEHSKE, A. J.; FETTWEIS, G. P. Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks. In: *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 1090-3038. [19](#)

- 54 GRUBER, M. et al. Earth 2014; energy aware radio and network technologies. In: *2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 2166-9570. 19, 49
- 55 HOLTKAMP, H. et al. A parameterized base station power model. *IEEE Communications Letters*, v. 17, n. 11, p. 2033–2035, November 2013. ISSN 1089-7798. 19, 51, 52
- 56 AUER, G. et al. How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wireless Communications*, v. 18, n. 5, p. 40–49, October 2011. ISSN 1536-1284. 19, 49, 51
- 57 ASHRAF, I.; BOCCARDI, F.; HO, L. Sleep mode techniques for small cell deployments. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 8, p. 72–79, August 2011. ISSN 0163-6804. 19
- 58 HAN, K.; CHOI, S. Performance analysis of sleep mode operation in iee 802.16e mobile broadband wireless access systems. In: *2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 3, p. 1141–1145. ISSN 1550-2252. 19
- 59 MAHMOOD, F.; PERRINS, E.; LIU, L. Modeling and analysis of energy consumption for rf transceivers in wireless cellular systems. In: *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. 19
- 60 DERUYCK, M. et al. Characterization and optimization of the power consumption in wireless access networks by taking daily traffic variations into account. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2012, n. 1, p. 248, Aug 2012. ISSN 1687-1499. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-248>>. 19
- 61 MICALLEF, G.; MOGENSEN, P.; SCHECK, H. O. Cell size breathing and possibilities to introduce cell sleep mode. In: *2010 European Wireless Conference (EW)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 111–115. 19
- 62 FRENGER, P. et al. Reducing energy consumption in lte with cell dtx. In: *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. ISSN 1550-2252. 19
- 63 TOMBAZ, S. et al. Energy efficient network deployment with cell dtx. *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 6, p. 977–980, June 2014. ISSN 1089-7798. 19
- 64 LIU, L. et al. An energy saving solution for wireless communication equipment. In: *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–3. ISSN 0275-0473. 20
- 65 DOMENICO, A. D.; STRINATI, E. C.; CAPONE, A. Enabling green cellular networks: A survey and outlook. *Computer Communications*, v. 37, p. 5 – 24, 2014. ISSN 0140-3664. 20
- 66 DEBAILLIE, B. et al. Opportunities for energy savings in pico/femto-cell base-stations. In: *2011 Future Network Mobile Summit*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8. 20
- 67 MARSAN, M. A. et al. Towards zero grid electricity networking: Powering bss with renewable energy sources. In: *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 596–601. ISSN 2164-7038. 20

- 68 CHAMOLA, V.; SIKDAR, B. Solar powered cellular base stations: current scenario, issues and proposed solutions. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 5, p. 108–114, May 2016. ISSN 0163-6804. [20](#)
- 69 PIPATTANASOMPORN, M.; FERROZE, H.; RAHMAN, S. Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation. In: *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–8. [20](#)
- 70 GOMEZ-SANZ, J. et al. Reviewing microgrids from a multi-agent systems perspective. *Energies*, p. 3355–3382, July 2014. [20](#)
- 71 WANG, Z.; WANG, J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 6, p. 3139–3149, Nov 2015. ISSN 0885-8950. [20](#)
- 72 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, Aug 2005. ISSN 0885-8950. [20](#)
- 73 OLIVEIRA, D. Q. et al. Microgrid management in emergency scenarios for smart electrical energy usage. In: *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. [20](#), [70](#), [71](#), [73](#), [82](#), [83](#), [84](#), [85](#)
- 74 AL-KHATIB, O.; HARDJAWANA, W.; VUCETIC, B. Queuing analysis for smart grid communications in wireless access networks. In: *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 374–379. [21](#), [94](#)
- 75 AL-KHATIB, O.; HARDJAWANA, W.; VUCETIC, B. Traffic modeling and performance evaluation of wireless smart grid access networks. In: *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1876–1881. ISSN 2166-9570. [21](#), [94](#)
- 76 SHAHAB, M. B.; HUSSAIN, A.; SHOAIB, M. Smart grid traffic modeling and scheduling using 3gpp lte for efficient communication with reduced ran delays. In: *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 263–267. [21](#), [94](#)
- 77 SADEGHI, S. et al. Modeling of smart grid traffics using non-preemptive priority queues. In: *Iranian Conference on Smart Grids*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. [21](#), [95](#)
- 78 KARIMI, B.; NAMBOODIRI, V. Capacity analysis of a wireless backhaul for metering in the smart grid. In: *2012 Proceedings IEEE INFOCOM Workshops*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 61–66. [21](#), [95](#)
- 79 KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M. Assessment of communication technologies and network requirements for different smart grid applications. In: *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. [21](#), [95](#), [97](#), [98](#), [104](#)
- 80 LUAN, W.; SHARP, D.; LANCASHIRE, S. Smart grid communication network capacity planning for power utilities. In: *IEEE PES T D 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–4. ISSN 2160-8555. [21](#), [95](#)

- 81 ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, p. 195–204, 2001. 25
- 82 LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 2, p. 916–924, May 2006. ISSN 0885-8950. 25, 29, 30
- 83 NASCIMENTO, B. de N. *Uma proposta de Metodologia de Corte de Carga em Microrredes Ilhadas*. Dissertação de mestrado. 27, 31
- 84 CHOWDHURY, S. *Microgrids and Active Distribution Networks*. Institution of Engineering and Technology, 2009. (Energy Engineering). Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/books/po/pbrn006e>>. 26
- 85 PARHIZI, S. et al. State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, v. 3, p. 890–925, 2015. ISSN 2169-3536. 26, 28
- 86 ACKERMANN, T. *Wind Power in Power Systems*. 1st. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons. ISBN 0-470-85508-8. 28
- 87 GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. 1st. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-23676-4. 29
- 88 OLIVEIRA, D. Q. *Sistema de Gerenciamento de Energia para Operação Resiliente de Microrredes em Modo Ilhado*. Tese de doutorado. 29, 33
- 89 SERA, D.; TEODORESCU, R.; RODRIGUEZ, P. Pv panel model based on datasheet values. In: *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 2392–2396. ISSN 2163-5137. 29
- 90 KOTTICK, D.; BLAU, M.; EDELSTEIN, D. Battery energy storage for frequency regulation in an island power system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 8, n. 3, p. 455–459, Sep 1993. ISSN 0885-8969. 29
- 91 SOUZA, A. C. Z. de et al. Voltage security in ac microgrids: a power flow-based approach considering droop-controlled inverters. *IET Renewable Power Generation*, v. 9, n. 8, p. 954–960, 2015. 30
- 92 SPANGLER, R.; SHOULTS, R. Power generation, operation, and control [book review]. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 12, n. 4, p. 90–93, July 2014. ISSN 1540-7977. 33
- 93 KANCHEV, H.; FRANCOIS, B.; LAZAROV, V. Unit commitment by dynamic programming for microgrid operational planning optimization and emission reduction. In: *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 502–507. 33
- 94 LU, B.; SHAHIDEHPOUR, M. Short-term scheduling of battery in a grid-connected pv/battery system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 1053–1061, May 2005. ISSN 0885-8950. 33
- 95 SALANI, M. et al. Lexicographic multi-objective optimization for the unit commitment problem and economic dispatch in a microgrid. In: *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8. ISSN 2165-4816. 33

- 96 ZHAO, B. et al. Short-term operation scheduling in renewable-powered microgrids: A duality-based approach. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 5, n. 1, p. 209–217, Jan 2014. ISSN 1949-3029. [33](#)
- 97 PLAN, N. S. P. A. Guidelines for assessing wireless standards for smart grid applications, technical report. 2010. [36](#), [48](#)
- 98 WACHE, M.; MURRAY, D. C. Application of synchrophasor measurements for distribution networks. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. ISSN 1932-5517. [36](#), [55](#), [97](#)
- 99 GOMEZ-SANZ, J. et al. Reviewing microgrids from a multi-agent systems perspective. *Energies*, p. 3355–3382, July 2014. [36](#)
- 100 NOORWALI, A.; RAO, R.; SHAMI, A. Modelling and delay analysis of wireless home area networks in a smart grid. In: *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 569–574. [36](#)
- 101 TALEB, T.; KUNZ, A. Machine type communications in 3gpp networks: potential, challenges, and solutions. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 3, p. 178–184, March 2012. ISSN 0163-6804. [36](#)
- 102 HO, Q. D.; GAO, Y.; LE-NGOC, T. Challenges and research opportunities in wireless communication networks for smart grid. *IEEE Wireless Communications*, v. 20, n. 3, p. 89–95, June 2013. ISSN 1536-1284. [37](#)
- 103 RATASUK, R. et al. Recent advancements in m2m communications in 4g networks and evolution towards 5g. In: *2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 52–57. [40](#)
- 104 RAPPAPORT, T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001. ISBN 0130422320. [41](#), [43](#), [44](#), [45](#)
- 105 JIANG, H. et al. Energy big data: A survey. *IEEE Access*, v. 4, p. 3844–3861, 2016. ISSN 2169-3536. [42](#)
- 106 BUDKA, K. C. et al. Communication network architecture and design principles for smart grids. *Bell Labs Technical Journal*, v. 15, n. 2, p. 205–227, Sept 2010. ISSN 1089-7089. [42](#)
- 107 TSE, D.; VISWANATH, P. *Fundamentals of Wireless Communication*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0-5218-4527-0. [43](#)
- 108 SARKAR, T. K. et al. A survey of various propagation models for mobile communication. In: _____. *Smart Antennas*. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2003. p. 239–307. ISBN 9780471722830. [45](#), [46](#), [47](#)
- 109 ABHAYAWARDHANA, V. S. et al. Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. In: *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 73–77 Vol. 1. ISSN 1550-2252. [45](#), [46](#)

- 110 BASIT, S. A. *Dimensioning of LTE Network: Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface*. Masters Thesis, 2009. 47
- 111 SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 4, p. 623–656, Oct 1948. ISSN 0005-8580. 48
- 112 CUETO, D. Y. M.; MELLO, L. A. R. da S.; R., C. V. R. Comparison of coverage and capacity of lte-advanced networks at 700 mhz and 2.6 ghz. In: *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. 48
- 113 HAYKIN, S. *Communication Systems*. 5th. ed. [S.l.]: Wiley Publishing, 2009. ISBN 0471697907, 9780471697909. 49, 58
- 114 KOUTITAS, G.; DEMESTICHAS, P. A review of energy efficiency in telecommunication networks. *Telfor journal*, v. 2, n. 1, p. 2–7, 2010. 49
- 115 TOMBAZ, S.; SUNG, K. W.; ZANDER, J. On metrics and models for energy-efficient design of wireless access networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 3, n. 6, p. 649–652, Dec 2014. ISSN 2162-2337. 52, 53, 68
- 116 AZIZ, A. et al. Model-checking continuous-time markov chains. *ACM Trans. Comput. Logic*, ACM, New York, NY, USA, v. 1, n. 1, p. 162–170, jul. 2000. ISSN 1529-3785. 53
- 117 Dedication. In: MANNAN, S. (Ed.). *Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Third Edition)*. Third edition. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005. p. ii –. ISBN 978-0-7506-7555-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750675550502723>>. 53
- 118 JÚNIOR, F. M. P. et al. Control strategies for improving energy efficiency and reliability in autonomous microgrids with communication constraints. *Energies*, v. 10, n. 9, 2017. 54, 111
- 119 AYALA, G. S. et al. Current trends on applications of pmus in distribution systems. In: *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. 55, 96
- 120 SUN, Q. et al. A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 3, n. 4, p. 464–479, Aug 2016. ISSN 2327-4662. 57
- 121 REE, J. D. L. et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 1, n. 1, p. 20–27, June 2010. ISSN 1949-3053. 57, 97
- 122 STD.C37.118.1, I. Ieee standard for synchrophasor measurements for power systems. *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, p. 1–61, Dec 2011. 58
- 123 IEEE PES DISTRIBUTION TEST FEEDERS: available at: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>. Visited in: 21/10/2016. *IEEE PES DISTRIBUTION TEST FEEDERS*. 59, 103

- 124 FEEDERS, I. P. D. T. *IEEE 37-bus test system*. Disponível em: <<http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. 59
- 125 JAMIL, E.; RIHAN, M.; ANEES, M. A. Towards optimal placement of phasor measurement units for smart distribution systems. In: *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. 61
- 126 PORTELINHA, F. et al. The impact of electric energy consumption from telecommunications systems on isolated microgrids. In: *5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. 71, 73, 82, 83, 85, 111
- 127 FEEDERS, I. P. D. T. *IEEE 34-bus test system*. Disponível em: <<http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. 80, 81
- 128 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 1389-1286. 95, 98
- 129 KOUHDARAGH, V. et al. Smart meters density effects on the number of collectors in a smart grid. In: *2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 476–481. 97, 104
- 130 ERICSSON, G. N. Classification of power systems communications needs and requirements: experiences from case studies at swedish national grid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 2, p. 345–347, Apr 2002. ISSN 0885-8977. 98
- 131 ERICSSON, G. N. Cyber security and power system communication: Essential parts of a smart grid infrastructure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1501–1507, July 2010. ISSN 0885-8977. 98, 99
- 132 SZTRIK, J. *Basic Queueing Theory: Foundations of System Performance Modeling*. [S.l.]: GlobeEdit, 2016. ISBN 978-3639734713. 101, 102, 106
- 133 PROAKIS. *Digital Communications 5th Edition*. [S.l.]: McGraw Hill, 2007. 106