



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Custo Total de Propriedade para Infraestruturas de Comunicações 5G
para Smart Grid**

PAULO TÁSSIO DA LUZ MELO

DM: 03/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Custo Total de Propriedade para Infraestruturas de Comunicações 5G
para Smart Grid**

PAULO TÁSSIO DA LUZ MELO

DM: 03/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Custo Total de Propriedade para Infraestruturas de Comunicações 5G
para Smart Grid**

PAULO TÁSSIO DA LUZ MELO

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada.
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

M528c Melo, Paulo Tássio da Luz.
 Custo Total de Propriedade para Infraestruturas de Comunicações 5G para Smart Grid / Paulo Tássio da Luz Melo, . — 2019.
 vi, 66 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva
 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

 1. Smart Grid. 2. CAPEX. 3. OPEX. 4. Análise de Custo. 5. 5G. I. Título.

CDD 621.3

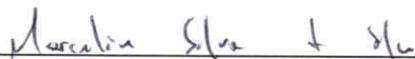
**“CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE PARA INFRAESTRUTURAS DE
COMUNICAÇÕES 5G PARA SMART GRID”**

AUTOR: PAULO TÁSSIO DA LUZ MELO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

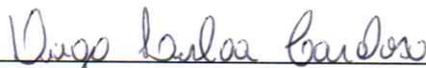
APROVADA EM: 24/01/2019

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva

(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Marcos Cesar da Rocha Seruffo
(Avaliador Externo ao Programa – FCT/UFPA)

VISTO:

Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes

(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

*“Talvez não tenha conseguido
fazer o melhor, mas lutei para que
o melhor fosse feito. Não sou o que
deveria ser, mas Graças a Deus,
não sou o que era antes.”*

(Marthin Luther King)

Agradecimentos

A Deus por ter me concedido a oportunidade de realizar o mestrado e por todas as conquistas ao longo da minha vida.

À minha família que sempre me apoiou e me deu forças, esse triunfo também é de vocês. A minha mãe Doralice por todos esses anos de ajuda incondicional, por nunca deixar de acreditar em mim, por todo o esforço para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha esposa Elaine pela fé em Deus que esse dia chegaria, pelo incentivo, por ser minha melhor amiga em quem eu sempre posso confiar.

À minha avó Odnéia, que já descansa com Deus, pelas preocupações, cuidados com minha saúde e segurança, gostaria que estivesse aqui para ver essa vitória, que mesmo com medo das minhas idas e vindas de Belém continuou me incentivando.

Ao meu orientador, Prof. Marcelino Silva, pela confiança, paciência e orientação. Aos Professores Marcos Seruffo e Diego Lisboa pelo apoio e ajuda durante essa jornada.

Aos meus amigos e amigas do LPO, Daniel e Ladislav que contribuíram para conclusão deste trabalho, Aurea, Carlos, Mariane, Igor, Rafael, Rita, Ermínio, Henrique, Vanilze, Leto, Welton e Lucivaldo, pelos momentos de descontração e ajuda.

Aos amigos dos laboratórios LPRAD, LEA e LCT pela ajuda nos trabalhos.

À UFPA por me aceitar como aluno no programa pós-graduação e PPGEE e a todos seus funcionários que contribuíram direta e indiretamente com a conclusão dessa etapa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro durante o programa.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Glossário	v
1 Introdução	1
1.1 Motivações	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização do Trabalho	3
2 Smart Grid	5
3 Redes Móveis de Quinta Geração	9
4 Trabalhos Correlatos	13
4.1 Análise de TCO	13
4.2 Análise de QoS	15
4.3 Considerações Finais	16
5 Modelagem de TCO para Redes de Dados para Smart Srid	18
5.1 Modelagem de Custo	18
5.1.1 Despesas de Capital	19
5.1.1.1 Equipamento	20
5.1.1.2 Instalação	20
5.1.1.3 Infraestrutura	20
5.1.2 Despesas Operacionais	21
5.1.2.1 Custo de Consumo de Energia	22
5.1.2.2 Custo de Manutenção	23
5.1.2.3 Gerenciamento de Falhas	23
5.1.2.4 Aluguel de Espaço Físico	24
5.1.2.5 Probabilidade de Falha na Fibra Óptica e seus Custos	25
5.2 Considerações Finais	26
6 Estudo de Caso	27
6.1 Modelo de Cenário Proposto	27
6.2 Características das Aplicações Utilizadas	28
6.3 Modo Normal e Restrito	31
6.4 Parâmetros e Componentes do Smart Grid	31

6.5	Considerações Finais	32
7	Resultados	34
7.1	Resultados de QoS	36
7.2	Resultados do 5G	42
7.3	Comparação de Resultados	45
7.4	Resultados da Falha na Rede e Fibra Óptica	51
7.5	Considerações Finais	53
8	Conclusão	55
8.1	Conclusão	55
8.2	Contribuição deste Trabalho	55
8.3	Dificuldades Encontradas	57
8.4	Trabalhos Futuros	57
	Referências	59
	Anexo	62
	ANEXO A Clusterização e SINR	63
	A.1 Método de Clusterização	63
	A.2 Cálculo de SINR	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Exemplo de modelo de Smart Grid.	7
Figura 3.1	Tecnologia 5G com Eficiência Energética.	10
Figura 3.2	Exemplo do Modelo Estudado.	11
Figura 5.1	Custo Total de Propriedade.	19
Figura 6.1	Modelo de Estrutura de Comunicação 5G Proposto.	28
Figura 6.2	8500 - Circuito de teste de alimentação (DUGAN; ARRITT, 2010).	29
Figura 7.1	5G - Posições resultantes de equipamentos de rede em relação aos 2469 IEDs. 150 Femtocells e 2 Macrocell.	35
Figura 7.2	WiMAX - Posições resultantes de equipamentos de rede em relação aos 2469 IEDs. 150 Femtocells e 2 Macrocell.	35
Figura 7.3	Custo do TCO para 5G.	42
Figura 7.4	CAPEX para a Arquitetura 5G.	44
Figura 7.5	OPEX para a Arquitetura 5G.	44
Figura 7.6	Custo do TCO por Tecnologia em 10 anos.	45
Figura 7.7	Custo do TCO por Tecnologia em 20 anos.	46
Figura 7.8	Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. NORMAL/UPLINK	47
Figura 7.9	Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. NORMAL/DOWNLINK	47
Figura 7.10	Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. RESTRITO/UPLINK	48
Figura 7.11	Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. RESTRITO/DOWNLINK	48
Figura 7.12	CAPEX para a Arquitetura WiMAX.	49
Figura 7.13	CAPEX para a Arquitetura WiFi.	49
Figura 7.14	OPEX para a Arquitetura WiMAX.	50
Figura 7.15	OPEX para a Arquitetura WiFi.	50
Figura 7.16	Custo da Penalidade por Falha de Fibra.	51
Figura 7.17	Custo da Falha por IEDs.	52
Figura 7.18	Probabilidade de Falha por Custo por IED.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comparação entre redes convencional e Smart Grid. Adaptado de (YU; YANG; CHEN, 2012)	5
Tabela 6.1	Parâmetros das mensagens usando PICOMs. Adaptado de (VRBSKÏ et al., 2018) (IEC61850, 2003)	30
Tabela 6.2	Parâmetros usados na Macrocell e Femtocell	32
Tabela 6.3	Parametros para CAPEX e OPEX	32
Tabela 7.1	5G - IEDs com QoS Suficiente.	38
Tabela 7.2	5G - IEDs com QoS Insuficiente.	39
Tabela 7.3	WIMAX - IEDs com QoS Suficiente.	40
Tabela 7.4	WIFI - IEDs com QoS Suficiente.	41
Tabela 7.5	Comprimento de fibra óptica por cenário. Femtocell/Macrocell	43

GLOSSÁRIO

5G *5th generation wireless systems*

BBU *Baseband unit*

BS *base stations*

CAPEX *Capital Expenditure*

CO *Central Office*

DRA *Distributed Radio Architecture*

Gbps *Gigabits per second*

HetNet *Heterogeneous Network*

IED *Intelligent Electronic Device*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IP *Internet Protocol*

Km *Quilômetro*

LTE *Long Term Evolution*

NIST *National Institute of Standards and Technology*

OLT *Optical Line Termination*

ONU *Optical Network Unit*

OPEX *Operational Expenditure*

PEMS *Prosumers based Energy Management and Sharing*

PICOM *Piece of Information for Communication*

PLE *Path Loss Exponent*

PON *Passive Optical Network*

QoS *Quality of Service*

RRH *Remote Radio Head*

RTP *Real-time Transport Protocol*

SINR *Signal-to-interference-plus-noise ratio*

SLA *Service Level Agreement*

TCO *Total Cost of Ownership*

TDD *Time Division Duplex*

TDIC *Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação*

UDP *User Datagram Protocol (UDP)*

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

Resumo

As redes de comunicações *Smart Grid* são consideravelmente diferentes dos sistemas tradicionais de comunicação utilizados para acessar a Internet quando se considera usuários, aplicações, Qualidade de Serviço e, principalmente, os impactos decorrentes de falhas. Tais redes de dados são geralmente de propriedade e usadas exclusivamente por operadores de sistemas elétricos e exigem alto investimento financeiro. Portanto, este trabalho apresenta uma análise econômica para comparar diferentes possibilidades de implantação de redes de dados para o *Smart Grid*. Os resultados demonstraram que, para o cenário proposto o 5G em comparação com outras tecnologias, obteve a melhor avaliação para implantação da comunicação de uma rede de dados aplicada ao *Smart Grid*, pois os dados de Qualidade de Serviço e os resultados obtidos no Custo Total de Propriedade, mostraram que em médio e longo prazo o 5G tem seu custo inferior quando confrontado com dispêndios de outras tecnologias de comunicação, apresentand 100% e 99.02% de IEDs com Qualidade de Serviço para *uplink* e *downlink* máximo, e a média de IEDs atendidos, é de 100% para *uplink* e 99.4% para *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVES: *Smart Grid*; CAPEX; OPEX; Qualidade de Serviço; Análise de Custo; HetNet; 5G.

Abstract

Smart Grid communications networks are considerably different from the traditional communication systems used to access the Internet when considering users, applications, Quality of Service and, especially, the impacts/losses due to malfunctions. Such data networks are generally owned and used exclusively by electrical system operators and require a high financial investment. Therefore, this paper presents an economic analysis to compare different possibilities of data network deployment for the Smart Grid. The results showed that for the proposed scenario, 5G compared to other technologies, obtained the best evaluation for the implementation of the communication of a network of data applied to the Smart Grid, since the data of Quality of Service and the results obtained in the Total Cost of Property, showed that in the medium and long term the 5G has its lower cost when faced with expenditures of other communication technologies, presenting 100% and 99.02% of IEDs with Quality of Service for uplink and downlink maximum, and the average IEDs served, is 100% for uplink and 99.4% for downlink in NORMAL and STRIP mode, respectively.

KEYWORDS: Smart Grid; CAPEX; OPEX; Quality of Service; Cost Analysis; HetNet; 5G.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivações

A crescente demanda do consumo de energia elétrica e crises ambientais tem motivado pesquisas por energia renovável e eficiência energética, em diversos países, estratégias para o desenvolvimento de técnica eficiente de resposta à demanda que venham a suprir essas necessidades, são pesquisadas para maximizar os benefícios para os consumidores e empresas de serviços públicos. Nesse contexto, o *Smart Grid* surge com o objetivo de proporcionar uma maior eficácia energética, integrando fontes de energias renováveis e limpas, fornecendo, também, um controle mais eficaz da geração e consumo de energia, contribuindo não somente com a responsabilidade ambiental, mas também por fatores financeiros (SRINIVASAN et al., 2017) (BERA; MISRA; OBAIDAT, 2014).

Nos Estados Unidos por exemplo, as políticas energéticas adotadas pelo governo visam pontos estratégicos como: fornecimento de energia estável e seguro, baixo custo, proteção do meio ambiente, aumentar a eficiência energética, aumentar a produção interna de energia por fontes convencionais e desenvolver fontes de energias renováveis e combustíveis renováveis, modernizando toda sua infraestrutura de geração e distribuição energética (BEHRENS, 2013).

Já na Coreia do Sul, incentivada por questões de segurança nacional e a busca pelo crescimento econômico, desenvolveu-se uma eficiente e vasta matriz energética, a qual estabeleceu uma meta de redução de emissões de CO₂ em 30% até 2020, contribuindo com a redução de emissões de gases de efeito estufa (FEDERATION, 2012).

A camada de comunicação é um dos elementos mais críticos que permite o uso de aplicativos de *Smart Grid*. No ambiente de *Smart Grid*, uma rede de comunicação pode ser representada por uma arquitetura hierárquica multicamada. Como as tecnologias sem fio oferecem menor custo de instalação, implantação mais rápida, maior mobilidade e flexibilidade do que suas contrapartes com fio, as tecnologias sem fio são recomendadas na maioria das aplicações de *Smart Grid* (KUZLU; PIPATTANASOMPORN; RAHMAN, 2014).

De acordo com (CISCO, 2017), o tráfego de dados multimídia em 2016 foi de, aproximadamente 73% do volume total de dados transmitidos na Internet, principalmente em redes wireless. A estimativa é que até 2021 esta taxa de dados ultrapasse os 82%. Esse crescente

volume de serviços e aplicativos, dá-se devido ao rápido crescimento da diversificação de dispositivos e aplicativos conectados a rede, gerando uma grande demanda de dados. O número de dispositivos conectados a redes IP será mais de três vezes a população global até 2022. Haverá 3,6 dispositivos de rede per capita até 2022, em comparação com 2,4 dispositivos de rede per capita em 2017. Haverá 28,5 bilhões de dispositivos em rede até 2022, de 18 bilhões em 2017. As conexões *Machine-to-Machine* (M2M) serão mais da metade dos dispositivos e conexões globais conectados até 2022. A participação das conexões M2M crescerá de 34% em 2017 para 51% até 2022. Haverá 14,6 bilhões de conexões M2M até 2022.

Para atender essa demanda de dados, as operadoras de redes móveis têm que enfrentar uma grande atualização de infraestrutura exigindo, em muitos casos, instalação de novos equipamentos ou reformulação da rede de dados para instalação de novas *Macrocells*, *Femtocell*, *Picocells*, entre outros, podendo gerar uma alta taxa de consumo de energia caso a rede não seja bem planejada.

Com os avanços da Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC), o *Smart Grid* fomenta uma rede avançada de distribuição de energia com uma vasta gama de sensores e aplicativos, que monitoram a geração e consumo de energia em toda a rede em tempo real, tornando-a auto recuperável em caso de falhas na distribuição de energia (EROL-KANTARCI; MOUFTAH, 2015). É importante lembrar que a grande quantidade de sensores e aplicativos em operação no *Smart Grid* geram um grande volume de dados, exigindo uma ótima QoS na comunicação, garantido o funcionamento pleno do *Smart Grid*.

A evolução e densificação de dados móveis e a *Internet of Things* (IoT), são pontos que a rede móvel de quinta geração (5G) busca abordar com uma conexão eficiente. Portanto, é necessária uma distribuição da energia fundamentada em uma moderna infraestrutura de *Smart Grid* com conexão baseada em 5G, levando em consideração todos esses conceitos, citados acima, promovendo uma maior eficiência energética. Entretanto, a comunicação da rede *Smart Grid* deve ser separada da rede de dados móveis e IoT dentro da rede 5G, para garantir a confiabilidade e segurança dos dados transmitidos e controle da rede elétrica.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo abordar aspectos financeiros, considerando questões como o custo de implantação e operação de uma infraestrutura de comunicação fornecendo

uma análise de custo de implantação, CAPEX (*Capital Expenditure*), custo de operação, OPEX (*Operational Expenditure*) e Custo Total de Propriedade, a fim de atingir o menor *Total Cost of Ownership* (TCO) para a implantação de uma infraestrutura de comunicação 5G que possa ser aplicado a um cenário *Smart Grid*.

1.2.1 Objetivos Específicos

Esta dissertação tem os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver modelos econômicos constituídos por fórmulas de custo de implantação e operação para análise, planejamento e otimização de infraestrutura de rede de dados para *Smart Grids*;
- Organizar as células de redes heterogêneas, realizando vários testes de agrupamento, otimizando o posicionamento das implantações das antenas, utilizando a técnica de *K-means*;
- Apresentar um estudo de caso, com o objetivo de validar modelo de TCO, utilizando o cenário do *The IEEE 8500-node test feeder*, com 2469 nós primários de média tensão;
- Analisar os resultados obtidos pela modelagem, indicar em qual cenário cada topologia de rede obteve o melhor desempenho de QoS em 5G e comparar aos resultados de QoS das tecnologias WiMAX e WiFi;
- Demonstrar em qual cenário a implantação do 5G é mais viável monetariamente para *Smart Grids* e para efeito de comparação, contrapor os resultados obtidos em 5G com os resultados de TCO das tecnologias WiMAX e WiFi.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos, incluindo este capítulo introdutório. Os capítulos são os seguintes:

Capítulo 2: São apresentados os conceitos e aplicações do *Smart Grid*.

Capítulo 3: São discutidos os conceitos, topologia da rede 5G.

Capítulo 4: Documenta os trabalhos com linhas de pesquisa similares à desta dissertação, abordando possíveis pontos em aberto.

Capítulo 5: Demonstra a formulação matemática do Custo Total de Propriedade e demais formulas aplicadas neste trabalho.

Capítulo 6: Neste capítulo, é explanada a última etapa da metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho, onde a modelagem do Custo Total de Propriedade, discutida nos capítulos anteriores, serão aplicadas nos cenários propostos.

Capítulo 7: Expõe os resultados financeiros obtidos para cada cenário, comparando com a qualidade de serviço oferecido por cada tecnologia estudada.

Capítulo 8: Discorre acerca das conclusões, principais contribuições e trabalhos futuros gerados a partir desta pesquisa.

2 SMART GRID

Neste capítulo, discute-se sobre *Smart Grid*, abordando de uma perspectiva ampla seus conceitos e características, fornecendo um levantamento de informações da literatura que contribua como suporte e validação à proposta desta dissertação.

O *Smart Grids* surgiu devido à necessidade de modernizar a rede elétrica, tornando-a ecologicamente correta e otimizar a entrega de energia. Como *Smart Grids*, os recursos de energia renovável podem ser conectados com segurança à rede, complementando o fornecimento de energia com a energia gerada por todos os clientes conectados a rede.

Segundo (TUBALLA; ABUNDO, 2016), o *Smart Grid* não tem uma definição que é universalmente aceita, pode ser descrito em termos simples ou de maneiras mais complexas. Sendo um dos tópicos mais comentados no sistema elétrico moderno, simplificando, o *Smart Grid* é uma rede inteligente. A rede tradicional só pode transmitir ou distribuir energia elétrica, por outro lado, essa rede moderna é capaz de armazenar, comunicar e tomar decisões, transformando a rede atual em uma que funciona de forma mais cooperativa, responsiva e orgânica.

Para melhor compreensão do *Smart Grid*, os autores de (YU; YANG; CHEN, 2012), demonstram as diferenças entre uma rede elétrica convencional e um *Smart Grid*, comparando os principais pontos de cada um. A tabela 2.1, apresenta a comparação entre a rede tradicional e a inteligente.

Redes Elétricas Tradicionais	Smart Grid
Mecanização	Digitalização
Comunicação Unidirecional	Comunicação Bidirecional
Geração de Energia Centralizada	Geração de Energia Distribuída
Topologia Radial	Topologia de Rede Dispersa
Pequeno Número de Sensores	Sensores e Monitores Suficientes
Sem Monitoramento Automático	Monitoramento Automático
Recuperação Manual	Recuperação Semi-automática e Automática
Preste Atenção às Falhas e Interrupções	Medidas de Proteção Adaptativa
Equipamento de Verificação Manual	Equipamento de Controle Remoto de Supervisão
Lidar com Emergências Através de Funcionários e Telefone	Sistema de Apoio à Decisão e Previsão Confiável
Controle Finito	Sistema de Controle Pervasivo e Intensivo
Informações sobre Preços Limitadas	Informações Completas sobre Preços
Menos Opções de Usuário	Mais Opções de Usuário

Tabela 2.1 – Comparação entre redes convencional e Smart Grid. Adaptado de (YU; YANG; CHEN, 2012)

O *Smart Grid* integra uma vasta gama de tecnologias e dispositivos, como veículos elétricos (ZHANG et al., 2018), dispositivos inteligentes (AMINI et al., 2015) e engloba metodologias como gestão descentralizada de energia de recursos renováveis (BAGHAEE et al., 2018). Em (CUCCHIELLA; D'ADAMO; GASTALDI, 2016), são apresentados exemplo da aplicação de *Smart Grid* na contribuição para a redução da emissão de CO₂. A priori, foi desenvolvido como alternativa ao esgotamento dos combustíveis fósseis, hoje, é visto como uma solução ótima no planejamento de sistemas elétricos sustentáveis.

Um ponto importante a ser considerado é a posse da rede e padrões de comunicação para *Smart Grid*, bem como a sua interoperabilidade. Os principais pontos discutidos são: a) redes de comunicação devem ser de propriedade privada ou gerenciadas por serviços públicos?; b) usar serviços de redes fixa ou móveis? Por isso, o 5G baseado em LTE-A, é a principal proposta de solução, pois é o futuro padrão de rede de comunicação e possui as configurações necessárias para suportar a demanda da IoT, *Smart Grid*, *Smart Cities*, dentre outros.

Em (SILVA, 2014), as TDIC, são usadas na integração dos dispositivos e serviços oferecidos pelos sistemas de energia elétrica, incluindo a integração de todos os tipos de sistemas geradores de energia, em especial, aqueles baseados em soluções limpas e renováveis, a fim de aumentar a eficiência, confiabilidade e qualidade de seu produto.

Para realizar a integração dos dispositivos, a troca de dados na rede é fundamental entre as concessionárias de energia, consumidores de energia e dispositivos de monitoramento da rede, incluindo sensores, medidores de energia, armazenamento de energia e IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) que neste estudo, fazem parte da extremidade da rede de comunicação, cada um instalado no local de um alimentador elétrico. Na Fig 2.1 é apresentado exemplo de um modelo de *Smart Grid*.

Em (ALOUL et al., 2012), os autores dizem que, a segurança do *Smart Grid* é um desdobramento de redes complexas, composto de milhões de dispositivos e entidades que se conectam entre si. Por isso, falhas de segurança em *Smart Grid* são mais comuns em medidores inteligentes, dispositivos inteligentes no fornecimento e demanda de eletricidade, componentes em locais físicos inseguros, equipamentos desatualizados que podem ser incompatíveis com dispositivos atuais, comunicação dispositivo a dispositivo e Componentes baseados em IP que são propensos à ataques.

De acordo como (STATES, 2007), O *Smart Grid* deve conter as seguintes características,



Figura 2.1 – Exemplo de modelo de Smart Grid.

para promover respostas e soluções para as questões de adequação da oferta de eletricidade, como define a Lei de Independência e Segurança Energética de 2007, estabelecendo um cenário para a modernização da rede elétrica.

- Confiabilidade, segurança e eficiência do fornecimento de energia da rede elétrica;
- Implantação e integração de recursos distribuídos e geração;
- Resposta de demanda e recursos do lado da demanda;
- Implantação de tecnologias inteligentes para a automação da medição e da distribuição;
- Integração de dispositivos inteligentes e dispositivos de consumo;
- Tecnologias avançadas de estabilidade de eletricidade e de redução de ruído, incluindo veículos elétricos de ligação rápida e climatização térmica;
- Informação oportuna e controle;
- Interoperabilidade dos aparelhos e equipamentos ligados aos rede elétrica, incluindo as infraestruturas que as servem.

De acordo com (TUBALLA; ABUNDO, 2016), projetos de implantação prática de *Smart Grid*, estão em andamento em diversos países, dentre os quais pode-se destacar: implantação de *Smart Grid* na área urbana de Milão, *Smart Grids* na China, modelo matemático para a operação ideal da *microgrid* de poligeração Inteligente da Universidade de Gênova, pavimentando a estrada para *Smart Grids* através de infraestruturas de medição avançada em larga escala, *Smart Grid* em aplicação de campo italiano, oportunidades de *Smart Grid* e aplicações na Turquia,

critérios para implantação de *Smart Grid* no Brasil através da aplicação do método *Delphi*, métodos experimentais e de coleta de dados para implantação de *Smart Grid* em escala, Os projetos-piloto italianos de *Smart Grid*: seleção e avaliação dos bancos de interesse para a regulamentação distribuição inteligente de energia elétrica e estimular a implantação de *Smart Grids* com instrumentos regulatórios eficazes.

2.1 Considerações Finais

A evolução da rede de distribuição de energia elétrica é inevitável, com o avanço tecnológico, como IoT e 5G, tanto possibilitam, como exigem um maior controle, transparência e análise de dados, tanto por parte das concessionárias de energia e telefonia, como por parte dos usuários conectados a elas.

Um ponto importante do *Smart Grid* é a busca por eficiência energética, que representa, principalmente, controle e distribuição dos recursos energéticos, como eficiência e qualidade ao consumidor, principalmente, uma economia no consumo de energia necessária para manter a rede em pleno funcionamento.

3 REDES MÓVEIS DE QUINTA GERAÇÃO

A infraestrutura de uma rede de dados é uma das maiores preocupações quando se projeta e opera um sistema de comunicação *wireless*, devido as preocupações econômicas, operacionais e ambientais. A próxima implantação de redes sem fio terá que considerar a necessidade de eficiência energética como um de seus principais objetivos. De fato, os sistemas 5G atenderão a um número sem precedentes de dispositivos, diante do rápido consumo e produção de dados multimídia, aliado, também, à evolução da IoT, tendo que promover conectividade onipresente, bem como serviços inovadores e com alta taxa de utilização.

De acordo com (SOUZA et al., 2017a), a rede 5G terá características e vantagens extraordinários em comparação com outras tecnologias, entre as quais se destacam as seguintes:

- Melhor área de cobertura e alta taxa de dados na borda da célula;
- Baixo consumo de bateria, com uso de equipamentos mais inteligentes;
- Disponibilidade de vários caminhos de transferência de dados;
- Aproximadamente 1 Gbps de taxa de transferência de dados;
- Maior segurança;
- eficiência energética e eficiência espectral.

Segundo (BUZZI et al., 2016), a busca para aumentar a eficiência de energia das redes *wireless*, pode ser agrupada em quatro grandes categorias. como segue a ilustração na Fig. 3.1 mostra as quatro categorias.

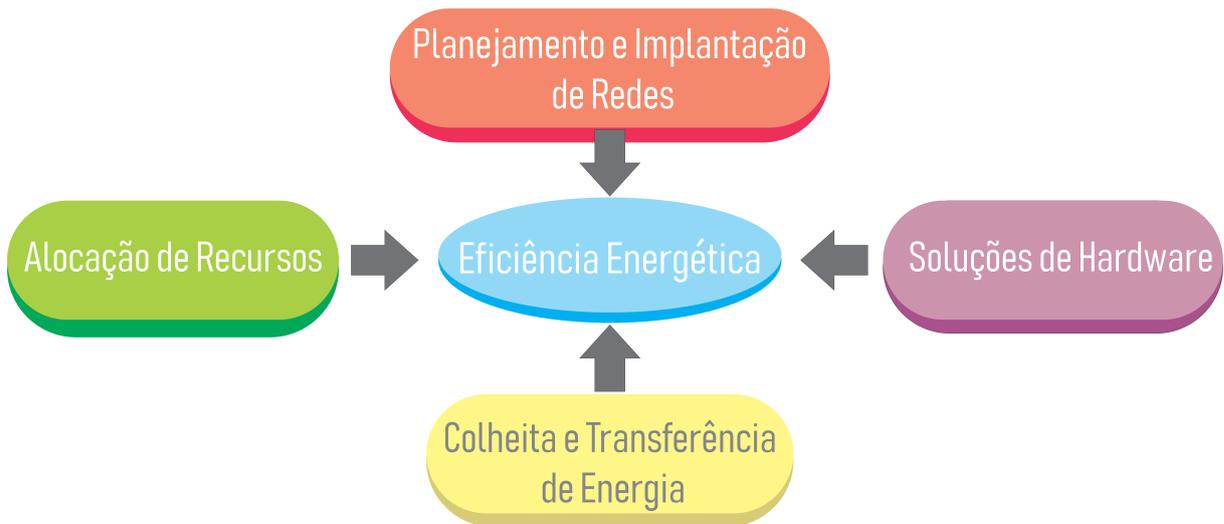


Figura 3.1 – Tecnologia 5G com Eficiência Energética.
Adaptado de (BUZZI et al., 2016).

- Alocação de recursos. A primeira técnica para aumentar a eficiência energética de um sistema de comunicação sem fio é alocar os recursos de rádio do sistema, a fim de maximizar a eficiência energética, e não a taxa de transferência. Esta abordagem demonstrou proporcionar ganhos substanciais de eficiência energética ao preço de uma redução moderada do rendimento (ZAPPONE; JORSWIECK et al., 2015).
- Planejamento e implantação de redes. A segunda técnica é implantar nós de infraestrutura para maximizar a área coberta por energia consumida, em vez de, apenas, a área coberta. Além disso, o uso de algoritmos de switchon/switch-off da estação base (BS) e técnicas de muting de antena para se adaptar às condições de tráfego, pode reduzir, ainda mais, os consumos de energia (NIU et al., 2010) (OH; SON; KRISHNAMACHARI, 2013).
- Colheita e transferência de energia. A terceira técnica é operar sistemas de comunicação captando energia do ambiente. Isso se aplica à fontes de energia renováveis e limpas, como energia solar ou eólica, e aos sinais de rádio presentes no ar.
- Soluções de *hardware*. A quarta técnica é projetar o hardware para sistemas de comunicação sem fio, explicitamente, responsável pelo seu consumo de energia (HAN et al., 2011) e adotar grandes mudanças na arquitetura, como a implementação baseada em nuvem da rede de acesso de rádio (ROST et al., 2014).

As redes 5G, poderão fornecer alta qualidade de QoS, baixo custo e possibilidade de comunicação M2M, tornam-se uma excelente opção diante do grande volume de IEDs

conectados à rede. As HetNets com 5G podem cobrir regiões estratégicas da rede, tornando o monitoramento independente, promovendo confiabilidade e segurança. Esse conceito é uma evolução das tecnologias existentes com uma diversidade de camadas de rede *wireless*, como por exemplo, *Macrocells*, *Femtocells*, *Microcells*, *Small cells*, dentro outros. Essa combinação de camadas de rede, possibilitam uma melhor cobertura em ambientes *outdoor* e *indoor*, tornando a HetNet estrategicamente indispensável a implantação do 5G, recebendo também uma maior atenção do grupo de padronização 3GPP (JABER et al., 2016) (ARAUJO et al., 2017).

Um exemplo dessa integração é encontrado em (HASSEBO et al., 2018), onde a arquitetura proposta baseada em 5G utiliza a comunicação M2M e a infraestrutura HetNet. Além disso, a proposta utilizada aproveita as instalações de fibra e potência existentes associadas à uma rede de acesso residencial de fibra óptica, baseada em *Passive Optical Networks* (PONs), oferecendo confiabilidade das redes de fibra e a flexibilidade das redes celulares públicas.

Apresenta-se na Fig. 3.2, um exemplo de arquitetura de HetNet, para atender às necessidades de transmissão de dados no *Smart Grid* e o centro de controle rede, em que a *Baseband Unit* (BBU) se conecta por link óptico com a *Macrocell*. Na topologia da rede ilustrada, cada *Femtocell* se conecta aos IEDs mais próximos, aprimorando a cobertura da rede e, em seguida cada *Femtocell* se conecta à *Macrocell*. Utilizou-se parâmetro de rede 5G em todas as antenas, de acordo com as características das mesmas.

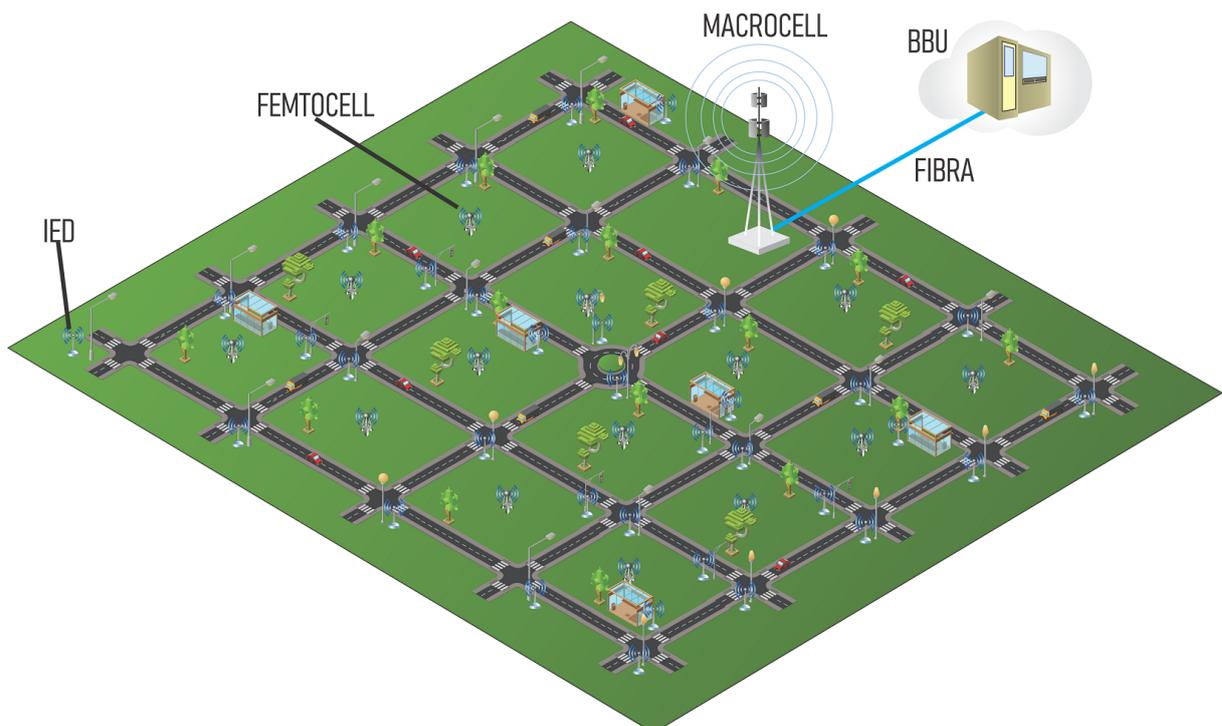


Figura 3.2 – Exemplo do Modelo Estudado.

De acordo com (LI; XU; ZHAO, 2018), O 5G ainda está no seu estágio de evolução inicial, mas a expectativa é que o 5G aumentará significativamente a capacidade e a velocidade para fornecer conectividade rápida e confiável ao futuro IoT. O atual 4G LTE pode fornecer uma velocidade de transmissão de 1Gbps, no entanto, o sinal 4G pode ser facilmente interrompido por interferências, tais como sinais WiFi, edifícios, micro-ondas, etc. As redes 5G podem fornecer aos usuários uma velocidade de até 10 Gbps, e promover uma conexão confiável para milhares de dispositivos ao mesmo tempo. O 5G será capaz de fornecer conexão em massa IoT, onde bilhões de dispositivos inteligentes podem ser conectados à Internet.

3.1 Considerações Finais

A rede móvel de quinta geração trará grandes vantagens em comparação com outras tecnologias. Apesar de ainda estar em seus primeiros passos, as pesquisas sobre 5G trazem grandes expectativas para o futuro da tecnologia e os novos recursos que o 5G poderá promover. Dentre esses recursos, está a comunicação do *Smart Grid*, que fornecerá a concessionárias de energia e consumidores um maior controle do consumo da energia elétrica, bem como, o monitoramento, controle e autocorreção de falhas, no *Smart Grid*, suportando o grande volume de dados gerados pelo monitoramento dos IEDs em tempo real.

4 TRABALHOS CORRELATOS

4.1 Análise de TCO

Trabalhos sobre o QoS e custos de implantação de rede são realizados, com afincos, para contribuição de um sistema de comunicação mais eficiente, por exemplo, em (CHARNI; MAIER, 2014), onde os autores propõem um modelo de implementação colaborativa para infraestrutura de comunicação utilizando WiMAX, aplicado à *Smart Grid*, no qual grupos de edifícios conectados entre si, fornecem energia extra gerada por painéis fotovoltaicos, conectando carros elétricos como a infraestrutura, para armazenamento da energia excedente produzida pelos painéis, como forma de garantir o abastecimento energético em caso de falhas na rede.

Também é calculado uma a probabilidade de produção de energia fotovoltaica, com base em um histórico de produção de energia solar e dados do sistema meteorológico para um melhor planejamento da distribuição de energia. O custo de implantação é calculado por um TCO flexível e genérico, que aborda o dimensionamento da rede, e os resultados mostraram que a maior parte do custo é absorvida pelos provedores de rede em uma área urbana.

No entanto, a infraestrutura passiva enfrentou custos mais altos nas áreas rurais, já nas áreas urbanas, a solução mais econômica é implementar o EPON com o esquema de proteção P1. Nas áreas rurais, para uma unidade de penalidade menor, P1 ainda é a melhor solução, enquanto para valores mais altos, P2 é o melhor esquema de proteção.

Em (SOUZA et al., 2017a), os autores propõem uma modelagem de Custo Total de Propriedade para topologias C-RAN voltada à redes móveis de 5G. A metodologia desenvolvida busca analisar, coletar e identificar os fatores de custos mais elevados nos segmentos de *backhaul* e *fronthaul* e, com isso, oferecer um modelo que facilite o planejamento da implantação e operação de redes centralizadas. Como validação da metodologia desenvolvida, é aplicado um estudo de caso comparativo entre as arquiteturas distribuída e centralizada, em abordagem *Greenfield*, a fim de destacar as vantagens da centralização. Os resultados demonstraram que, o cenário C-RAN apresenta uma economia de, aproximadamente, 28% do custo total de propriedade em relação a arquitetura distribuída.

No trabalho de (YUNAS; ANSARI; VALKAMA, 2016), é realizado uma análise e comparação tecno econômica de duas formas de implantação, sendo a primeira uma rede baseada em uma Macrocell homogênia, e a segunda, uma rede Macro-Femto heterogênia, visando a qua-

lidade do serviço interno, em que foram testados diferentes tipos de restrições de conectividade. No *backhaul* de *Femtocell*, foi considerado diferentes velocidades de conectividade de *backhaul*, variando de baixa conexão de Internet (4 Mbps) a conexão de banda larga de velocidade ultra-alta (100 Mbps). Já para *Macrocell*, uma conexão de *backhaul* de canal dedicada para cada local é assumida sem nenhum gargalo de *backhaul*.

Em seguida, é comparado a capacidade de red, a eficiência de energia e a eficiência de custo correspondentes das *Macrocells* e *Femtocells*. Os resultados concluem que, as soluções propostas para pequenas células podem oferecer maior capacidade de rede de uma maneira eficiente em termos de custo e energia, uma vez que elas têm maior conectividade de *backhaul* com a rede principal. Além disso, em vez de aumentar a largura de banda da operadora, as operadoras móveis podem, inicialmente, melhorar a capacidade de sua rede, implantando pequenas estações base e, em seguida, aumentando gradualmente a largura de banda do espectro para suas redes.

No trabalho de (SOUZA et al., 2017b), são apresentados dois cenários, em que dois tipos de *base stations* (BS) são usadas: *macrocells* e *small cells*, nos quais os usuários internos podem ser atendidos por BSs macro e pequenas internas, ao passo que usuários externos são atendidos, apenas, por macro BSs. Segundo (SOUZA et al., 2017b), em cada cenário existem duas estratégias para a instalação de pequenas células: O primeiro é baseado no conceito de *Distributed Radio Architecture* (DRA) em ambientes fechados, que é uma forma de instalação executada por operadores de rede que empregam técnicas de engenharia.

O segundo usa células *Femto*, que são caracterizadas pelo uso desordenado de pequenas BS, e geralmente, instaladas aleatoriamente, pelos usuários finais das redes móveis heterogêneas. Depois é feito uma avaliação técnico-econômica da aquisição e instalação de sistemas fotovoltaicos dentro de redes móveis heterogêneas, levando em consideração o consumo combinado de energia de redes de rádio, *fronthaul* e *backhaul*.

Nos resultados pode-se observar que, quando ultrapassam 2,5 kWh/m²/dia, os custos de aquisição e instalação do sistema fotovoltaico situam-se abaixo da faixa de R\$ 361,20 a R\$ 471,99 milhões, o que traz resultados promissores, uma vez que esta taxa de irradiação solar em um clima temperado, onde a disponibilidade solar é inferior à de regiões com clima tropical, os custos de instalação e aquisição do sistema fotovoltaico são distribuídos entre os usuários da rede móvel heterogênea. O custo de instalação por usuário tende a diminuir se a irradiação solar for mais intensa, já que uma quantidade menor de hardware é necessária para gerar a mesma

quantidade de energia.

4.2 Análise de QoS

Em (SULYMAN et al., 2016), um estudo sobre perda de propagação em uma rede 5G para serviços de acesso e *backhaul*, bem como para comunicações M2M em um cenário denso é demonstrado, levando em consideração condições climáticas, o que auxilia o estudo de implantação de uma arquitetura 5G de acordo com a região, contribuindo com resultados que definem a melhor configuração da rede para uma melhor QoS.

Os resultados mostram que em uma área urbana montanhosa e densa, uma boa conexão pode ser estabelecida por um *link* de comunicação a 60 GHz na distância TX de até 134 m em ambientes internos, e até 77 m em ambientes externos. Esse intervalo também pode ser estendido se as antenas forem mais bem apontadas umas para as outras. Portanto, é possível implantar *links* de rádio de 60 GHz para serviços de *backhaul*/acesso de curto alcance e para comunicações M2M nas futuras redes 5G na área do golfo. O valor de *path loss exponent* (PLE) para dados de medição coletados em um céu limpo durante a noite no período de outono de 2015, com temperatura apenas a 24 °C. O *path loss exponent*, neste caso, é cerca de 18% menor do que o correspondente ao *path loss exponent* obtido em uma tarde ensolarada de verão, quando a temperatura era de 43 °C.

Os valores mais altos de PLE no céu quente e ensolarado são parcialmente devidos ao efeito de ruído de rádio solar decorrente da intensa radiação solar, o que pode causar uma diminuição na razão portadora-ruído na entrada de recebendo antenas. Também é em parte devido ao aumento do ruído térmico quando os componentes eletrônicos no dispositivo de medição ficam quentes. Essas questões, portanto, precisam ser consideradas no planejamento de orçamento/coertura de energia, ao implantar o rádio de 60 GHz em ambientes externos.

Em (ZAFAR et al., 2018), foi realizado um estudo sobre *Prosumers based Energy Management and Sharing* (PEMS), em ambiente de *Smart Grid* e o impacto associado na confiabilidade do sistema de energia e sustentabilidade energética. Analisando as tecnologias de comunicação que são adequadas para o PEMS com base em parâmetros, como taxa de dados, frequência, média, entre outros, sendo os dois pontos chave da pesquisa, as tecnologias de comunicação e métodos de otimização. Tecnologias de comunicação com fio e sem fio, de curto e longo alcance, e diferentes técnicas de otimização foram discutidos, e os resultados demonstraram

que os PEMS têm um enorme potencial para economia de custos, conservação de energia e balanceamento de pico de carga. As tecnologias apresentadas nos estudos também obtiveram bons desempenhos na comunicação da rede, entretanto, também foi observado que grande parte das pesquisas sobre *Smart Grid*, utilizam técnicas de gerenciamento de energia que não incluíram prosumidores.

Segundo o trabalho de (CHE et al., 2017), é proposto uma metodologia de planejamento ótimo de microrredes baseadas em malha, que agrupam o particionamento de grafos e o método de programação linear inteira, para endereçar a rede baseada em *loop* ideal para o planejamento de topologia de microrredes, considerando características de microrredes no projeto proposto de forma mais abrangente. A metodologia proposta integra dois estágios: um estágio de particionamento de gráficos, para identificar *loops*, onde cada fase é modificada para se adaptar ao planejamento de microrredes, e um estágio de programação inteira, para determinar a estrutura do *loop*.

O estudo de caso sugere quatro *loops* para a topologia de microrredes, e os resultados numéricos demonstraram que o planejamento de topologia de microrredes proposto é capaz de determinar eficientemente uma topologia de microrredes baseada em *loop* com base em um ótimo resultado de particionamento de gráficos. Esse método, considera a operação do agrupamento e as características de equilíbrio de geração de microrredes, bem como o procedimento ideal para a criação de sistemas de circuitos individuais.

4.3 Considerações Finais

Considerando os trabalhos apresentadas neste capítulo, observa-se que para a implantação do *Smart Grid*, é precedido de um planejamento de uma infraestrutura ótima, que seja capaz de fornecer o QoS necessário para a execução da comunicação de todos os dispositivos conectados à rede, tal como, a distribuição da energia ao atendimento da demanda de consumidores conectados. Todos estes trabalhos são encontrados na literatura, no entanto, em publicações separadas. Trabalhos que apresentam uma proposta similar e aborde todos os itens citados nesta dissertação não foram encontrados, e grande parte das publicações identificadas sobre os temas abordados neste trabalho, fazem menção à literatura clássica sobre os assuntos.

Em (CHARNI; MAIER, 2014), uma abordagem sobre TCO para tecnologia WiMAX foi realizada, entretanto, não há uma avaliação de TCO voltado ao 5G. Já em (SOUZA et al., 2017a),

(YUNAS; ANSARI; VALKAMA, 2016) e (SOUZA et al., 2017b), é realizada uma análise técnico econômica para implantação da rede de comunicação, no entanto, não é feita uma otimização do posicionamento das antenas para uma redução do custo de implantação, nem uma comparação com TCOs de outras tecnologias. Os autores de (SULYMAN et al., 2016), (ZAFAR et al., 2018) e (CHE et al., 2017), apresentam estudo sobre QoS, porém, não foi abordado questões relacionadas ao custo de CAPEX e OPEX, para análise da viabilidade de implantação de cada técnica, os resultados de QoS também não são contrapostos aos de outras tecnologias.

Diante à lacuna encontrada na literatura de estudos econômicos para *Smart Grid*, este trabalho aborda aspectos econômicos para análise, planejamento e otimização de infraestrutura de rede de dados 5G para *Smart Grid*, entre outros pontos, que ainda não foram abordados pelo conjunto de literatura.

5 MODELAGEM DE TCO PARA REDES DE DADOS PARA SMART SRID

Este capítulo apresenta a metodologia de desenvolvimento do cálculo do Custo Total de Propriedade, aplicada às tecnologias citadas anteriormente. Considerando um cenário *Smart Grid* com 2469 IEDs, procurando o melhor custo-benefício, para implantação de uma rede 5G heterogênea com *Femtocells*, *Macrocell* e os IEDs.

Sendo o objetivo desta metodologia, demonstrar os principais pontos da modelagem econômica de uma infraestrutura de 5G voltada a aplicação em um *Smart Grid*. A formulação matemática detalha todos os investimentos relacionados à implantação de rede, incluindo despesas de vieses operacionais. A Fig. 5.1 ilustra as principais despesas que constituem o TCO e serão abordadas na próxima seção.

A formulação do modelo TCO foi elaborada com base nas variáveis e equações encontradas nas literaturas científicas (SOUZA et al., 2017a), (CHARNI; MAIER, 2014), (RAHMAN; DESPINS; AFFES, 2013), (DOMINGUES; ROCHA; ANDRE, 2011), (CASTILLO et al., 2006), (BROWN, 2002) e (YAGHOUBI et al., 2017), utilizando-se dos elementos do cenário de *Smart Grid* como, equipamentos, infraestruturas, manutenção, etc. para a avaliação de custo. Considerando as metodologias de avaliação de custos, descritas neste trabalho, este cálculo pode ser implementado e avaliado com mais clareza.

5.1 Modelagem de Custo

Nesta seção a modelagem do TCO é apresentada, sendo esta, o somatório do CAPEX, que se refere a despesas iniciais de capital (equipamento, infraestrutura e instalação) e OPEX, com custos operacionais (energia, risco de falha, manutenção e espaço físico), aplicado a uma rede heterogênea, com diferentes tecnologias de acesso. Conforme já mencionado, o TCO consiste no somatório de todas as despesas relacionadas à implantação de infraestrutura, incluindo CAPEX e OPEX, conforme previsto na Equação 5.1.

$$TCO = CAPEX + OPEX \quad (5.1)$$

Segundo (SOUZA et al., 2017a), para implementação do modelo, foi utilizada uma formulação matemática já consolidada na área de modelagem de custo, responsável por avaliar a



Figura 5.1 – Custo Total de Propriedade.

aquisição de bens inerentes à produtos de softwares ou *hardware*. O TCO é relacionado, somente, à avaliação de custo de aquisição e operação de bens (equipamentos e componentes de TI), fornecendo uma base aproximada dos custos de um determinado investimento.

5.1.1 Despesas de Capital

O CAPEX representa os custos relacionados à fase de implantação da rede, abrangendo a compra ($Equip_{cost}$) e instalação de equipamentos ($Inst_{cost}$), além da implantação da infraestrutura ($Infra_{cost}$), conforme Equação 5.2.

$$CAPEX = Equip_{cost} + Inst_{cost} + Infra_{cost} \quad (5.2)$$

Diferente do OPEX, o CAPEX tem como principal característica seu dispêndio nos estágios iniciais da análise financeira, pois considera apenas despesas com a implantação dos recursos. Entretanto o OPEX considera os custos relacionados a depreciação de equipamento e demais recursos.

Na sequência, a formulação será detalhada, apresentado quais elementos estão relacionados com cada variável especificada.

5.1.1.1 Equipamento

A Equação 5.3 representa o total de despesas relacionadas à compra dos equipamentos e componentes de *backhaul* e *fronthaul* necessários para a implantação da rede.

$$Equip_{cost} = \sum_{i=1}^n N_i^{Eq} P_i^{Eq} \quad (5.3)$$

Em que n é número de equipamentos, N_i^{Eq} representa cada tipo de equipamento i e P_i^{Eq} representa seus respectivos preços. O tipo de equipamentos e sua quantidade depende, especificamente, da arquitetura escolhida para implantação e da tecnologia de acesso que servirá de *fronthaul*.

5.1.1.2 Instalação

Finalizada a fase de compra de todos os equipamentos de *fronthaul* e *backhaul*, a equipe técnica passa à fase de instalação e testes de todos os equipamentos. O custo total para a instalação de cada equipamento em suas devidas localidades é expresso na Equação 5.4.

$$Inst_{cost} = \sum_{i=1}^n (T_i^{InstallPort} N_i^{Ports}) N_i^{Eq} P_{tech} \quad (5.4)$$

Em que $T_i^{InstallPort}$, N_i^{Ports} , N_i^{Eq} e P_{tech} representam, respectivamente, o tempo em horas necessário para se instalar uma porta do equipamento i , o número de portas a serem instaladas para o equipamento, o quantitativo de equipamentos e o salário do técnico responsável. Sendo i a representação de cada tipo de equipamento, n é número de equipamentos.

5.1.1.3 Infraestrutura

Abrange os investimentos relacionados ao custo total da infraestrutura ao implantar uma nova arquitetura para *Smart Grid*. Os segmentos de fibras são colocados dentro dos dutos que estão enterradas sob o solo (tunelamento). O custo da infraestrutura de fibra inclui todas as

despesas relacionadas com a escavação de dutos, compra e implantação de cabos de fibra nos dutos. Esta despesa pode ser expressa pela Equação 5.5.

$$Infra_{cost} = L_{trench}P_{trench} + L_{fiber}P_{fiber} + L_{lease}P_{lease} \quad (5.5)$$

As variáveis L_{trench} , P_{trench} , L_{fiber} e P_{fiber} representam a distância total do tunelamento, o preço do tunelamento por quilômetro (Km), o total de fibra óptica a ser utilizado e seu preço por Km, respectivamente. As variáveis L_{lease} e P_{lease} referem-se aos gastos iniciais referentes ao aluguel da infraestrutura fibra ótica, quando necessários.

5.1.2 Despesas Operacionais

O OPEX refere-se às despesas operacionais de equipamentos, o que, para esta proposta, consiste na especificação de todos os custos incorridos da infraestrutura após o momento de instalação, sendo estes, as despesas periódicas, tais como: custo de energia, locação de fibra óptica, manutenção, gerenciamento de riscos, aluguel de espaço físico, entre outras cotações (RAHMAN; DESPINS; AFFES, 2013).

O OPEX (SOUZA et al., 2017a), calcula os ativos necessários para executar uma infraestrutura de rede, a qual geralmente é a menor parcela do TCO inicialmente, porém, tende a aumentar devido o seu crescimento ser exponencial e atualizado periodicamente. Este método de avaliação, possui fatores que variam, com o passar dos anos, apresentando altos riscos para quem o implementa, justamente pelos seus ativos operacionais estarem sujeitos a modificação de valor que pode impactar diretamente no custo de propriedade. A depreciação é outro fator que deve ser observado, visto que possui influência direta no valor de cada equipamento, que com o passar dos anos, torna-se obsoleto. Considera-se para esta pesquisa, o OPEX de um ano de operação, Equação 5.6.

$$OPEX = En_{cost} + FL_{cost} + Mt_{cost} + FM_{cost} + FS_{cost} \quad (5.6)$$

A formulação do OPEX, Equação 5.6, constitui-se da soma de En_{cost} (custo de consumo de energia), FL_{cost} (custo de locação de fibra ótica) quando houver, Mt_{cost} (custo de manutenção), FM_{cost} (custo de gerenciamento de riscos) e FS_{cost} (custo de aluguel do espaço físico).

5.1.2.1 Custo de Consumo de Energia

O custo do consumo de energia, Equação 5.7, de uma HetNet que utiliza fibra é obtida a partir da soma do dispêndio de energia de todos equipamentos nos setores de backhaul e fronthaul (*Central Office, Cell sites, BBU Pool, etc*).

$$En_{cost} = EC_{CellSite} + EC_{CO} + P_{user} \quad (5.7)$$

O consumo de energia por usuário pode ser calculado conforme a Equação 5.8.

$$P_{user} = \frac{\alpha * P_{TU}}{N_{TU}} + \frac{\beta * P_{RN}}{N_{RN}} + P_{CPE} \quad (5.8)$$

Onde α, β são definidos como 2 e 1, respectivamente. Esses dois fatores são responsáveis pela sobrecarga adicional, TU unidade terminal, P_{TU} energia consumida por TU , P_{RN} Energia consumida por (RN), P_{CPE} Energia consumida pelo equipamento das instalações do cliente (CPE), N_{RN} denota o número de assinantes que compartilham RN , N_{TU} denota o número de assinantes que compartilham TU .

O cálculo do consumo de energia de um Cell Site (EC_{CSite}) é mostrado na Equação 5.9.

$$EC_{CellSite} = \sum_{i=1}^n EC_i^{CSEquip} P_{OutdoorKwh}, \quad (5.9)$$

Em que $EC_i^{CSEquip}$ e $P_{OutdoorKwh}$ representam, respectivamente, o gasto de energia em cada célula i e o preço por unidade de energia (isto é, kWh) consumida, n é número de equipamentos

O custo do consumo de energia da *Central Office* (EC_{CO}) é mostrada pela Equação 5.10.

$$EC_{CO} = \sum_{i=1}^{N_{CO}} R \sum_{i=1}^n EC_i^{COEquip} P_{IndoorKwh}, \quad (5.10)$$

Em que $EC_i^{COEquip}$ representa o gasto de energia de cada equipamento i alocado dentro de uma *Central Office*. O coeficiente de refrigeração (R) é usado para contabilizar o resfriamento na *Central Office* e n é número de equipamentos. O *Central Office* é a localidade da rede em que estão localizados os equipamentos responsáveis para funcionamento da rede móvel, como por exemplo, a *Optical Line Terminal* (OLT) e os demais equipamentos de processamentos.

5.1.2.2 Custo de Manutenção

Os custos de manutenção representam os gastos relacionados ao monitoramento e reparo dos equipamentos do *Central Office* e dos *Cell Sites*. Inclui-se, também, os custos de taxa anual para as licenças de *software*. Os custos relacionados à manutenção são necessários para manter o *fronthaul* e *backhaul* sempre em boas situações de operação. O custo total é calculado usando-se a Equação 5.11.

$$Mt_{cost} = Mt_{CS} + Mt_{CO} + Mt_{SWL} \quad (5.11)$$

As variáveis Mt_{CS} e Mt_{CO} são os custos de manutenção dos *Cell Sites* e dos *Central Office*, respectivamente. Por fim, é contabilizado a taxa anual de licenças de software (Mt_{SWL}). A Equação 5.12, traz o cálculo de manutenção do *Cell Site*:

$$Mt_{CS} = P_{Tech}(RT_{CS} + 2T_{Travel}), \quad (5.12)$$

Em que P_{Tech} , RT_{CS} e T_{Travel} representam, respectivamente, o salário do técnico por hora, o tempo requerido para manutenção de cada *Cell Site* e o tempo de viagem para locação onde está cada *Cell Site*.

Os operadores consideram a necessidade de se ter uma sequência de procedimentos de manutenção para cada *Central Office*, dependendo do número de usuários e serviços abrangidos por cada um deles. Esse cálculo de custo de manutenção é expresso da pela Equação 5.13.

$$Mt_{CO} = RT_{COR}N_{CO}P_{Tech} + P_{U_{pgrade}}, \quad (5.13)$$

Em que RT_{COR} , N_{CO} e $P_{U_{pgrade}}$ representam, respectivamente, o tempo necessário em homens horas para reparação de cada *Central Office* em um ano, a quantidade de *Central Office* e o custo a ser pago para atualização de hardware e para substituição de componentes, por exemplo, as baterias.

5.1.2.3 Gerenciamento de Falhas

O gerenciamento de riscos, Equação 5.14, é referente às despesas de reparo no *fronthaul* e *backhaul* na ocorrência de falhas na rede. Este é um ponto de operação a ser destacado porque

existem muitos fatores que devem ser considerados no processo de reparar uma falha.

$$FM_{cost} = \sum_{i=1}^n ((RT_i + 2T_{Travel})N_{Tech}P_{Tech} + P_{rp})ANF_iN_i^{Eq} + P \quad (5.14)$$

Onde RT_i , N_{Tech} e P_{rp} representam na Equação 14, na ordem, o tempo de reparo de cada equipamento i , o número de técnicos necessários para reparar a falha e o custo da compra de um novo componente. O número médio de falhas por ano de cada tipo de componente i (ANF_i) pode ser calculado com base na taxa de falhas do componente que, quando multiplicado pelo número de equipamentos do tipo i na rede (N_i^{Eq}) e P podem ser expressos como o produto do tempo de interrupção de conexão e da unidade de penalidade de cada conexão específica, de acordo com o *Service Level Agreement* (SLA) fornecido, como demonstrado na Equação 5.15.

$$P = P_u * \sum_f (MTR_f * IC_f) \quad (5.15)$$

Onde P_u denota a penalidade por tempo de conexão interrompida, MTR é o tempo médio de reparo e IC_f número de conexões interrompidas associadas a falhas.

5.1.2.4 Aluguel de Espaço Físico

O custo de espaço (FS_{cost}) é uma taxa de aluguel anual paga pela operadora da rede para alojar seus equipamentos, como mostrado na Equação 5.16.

$$FS_{cost} = FS_{CO} + FS_{CS} \quad (5.16)$$

A variável A_{Rack} determina o espaço necessário para um rack, levando em consideração o espaço de trabalho aceitável na frente dele para que os técnicos possam atuar no rack. O número de racks dentro de um *Central Office* é medido dividindo o número de equipamentos por *Central Office* (N_{Eq}^{CO}) pelo número de equipamentos permitidos por rack (N_{Rack}^{CO}), como mostrado na Equação 5.17.

$$FS_{CO} = (A_{Rack}(N_{Eq}^{CO}/N_{Rack}^{CO}))P_{IndoorM2} \quad (5.17)$$

Tem-se agora a Equação 5.18, que calcula o custo do espaço físico para os *Cell Sites*, em que A_{CS} , N_{CS} e $P_{OutdoorM2}$ representam o espaço necessário para implantação de um *Cell Site*, a

quantidade de *Cell Sites* e o preço do aluguel anual pago pelas operadoras de telefonia.

$$FS_{CS} = A_{CS} N_{CS} P_{Outdoor} M_2 \quad (5.18)$$

5.1.2.5 Probabilidade de Falha na Fibra Óptica e seus Custos

A Equação 5.19, modela o custo de reparo por falhas na rede. Este cálculo deve ser considerado para calcular a despesa por cada correção de falha em fibra óptica e outros equipamentos.

$$FR = P_{tech} * \sum_f (MTR_f * N_{Tech}) \quad (5.19)$$

FR custo de reparo de falhas, *P_{tech}* Salário técnico, *f* falhas da rede, *MTR* tempo médio de reparo, *N_{Tech}* número de técnicos necessários para reparar uma falha.

Na Equação 5.20, apresenta o custo por falhas relacionadas a fibra, esta formula deve ser aplicada em cenários que possuem conexões por fibra óptica, aprimorando a análise de custo do OPEX.

$$FCC = FR + P \quad (5.20)$$

FR Custo de reparo de falhas, *P* é o produto do tempo de interrupção de conexão e da unidade de penalidade de cada conexão específica.

Por fim, a Equação 5.21, demonstra o cálculo da probabilidade de falhas na fibra óptica. Contribuindo para um planejamento otimizado do OPEX, pois fornece a probabilidade da existências de falhas na fibra, consequentemente, custos futuros podem ser previstos, mitigando despesas (DOMINGUES; ROCHA; ANDRE, 2011) (CASTILLO et al., 2006) (BROWN, 2002).

$$P_f(s, l) = 1 - e^{-(l/l_0)*(s/s_0)^m} \quad (5.21)$$

l Denota o comprimento da fibra (m), *l₀* Fator de normalização (m), *s* Estresse por falha (MPa), *s₀* parâmetro de localização (t), *m* expoente de Weibull.

5.2 Considerações Finais

Este capítulo analisou o modelo de avaliação utilizado na elaboração matemática que compõe esta dissertação, discorrendo sobre as principais formulações de despesas, sendo o objetivo principal orçar os custos de infraestruturas e sua operação. Assim, o conteúdo, aqui apresentado, é uma das contribuições desta proposta que terá, mais à frente, seus dados cruzados com a qualidade de serviço oferecido por cada cenário e tecnologia de acesso, fornecendo dados para toda a comunidade acadêmica.

6 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é dissertada a aplicação do Custo Total de Propriedade, que foi discutido nos capítulos anteriores, e o conjunto de dados de QoS obtidos com o método de *K-means* e suas aplicações ao cenário proposto, finalizando a metodologia desta pesquisa.

K-means é um método de agrupamento, no qual, um conjunto de pontos ou objetos, é organizado em grupos em um espaço com base na similaridade entre eles, particionando-os em grupos homogêneos com o objetivo de maximizar a similaridade de objetos no mesmo grupo e minimizar a similaridade de objetos entre os grupos distintos. Cada grupo de objetos é atribuído a um centróide mais próximo, depois a posição do centróide é recalculada até a estabilidade da média da distância entre os objetos e o centróide de cada grupo (LIKAS; VLASSIS; VERBEEK, 2003).

A definição do modelo proposto, no capítulo anterior, é, agora, cruzada com as configurações desse estudo de caso, analisando o desempenho da rede utilizada neste trabalho. O QoS desta pesquisa é baseado no atraso de mensagens que cada ciclo de execução do cluster realiza, demonstrando o número de IEDs que não conseguiram finalizar o envio dos dados dentro do limite de tempo definido para *uplink* e *downlink*.

Outro ponto relevante são os esquemas de proteção para PONs. Segundo (CHARNI; MAIER, 2014), os esquemas de proteção definidos na ITU-T g.983.1, apresentam quatro tipos de esquemas de proteção: Tipo P1, quando a fibra do alimentador é duplicada, o esquema detecta a falha da fibra e ativa a reserva, o tipo P2, duplica componentes PON compartilhados, como fibra e Terminal de Linha Óptica (OLT). No tipo P3, é aplicada 1 + 1 proteção de caminho dedicada com duplicação total de recursos PON. Finalmente, o tipo P4, que é o mais seguro de todos os esquemas, no entanto, é pouco implementado devido à sua complexidade. Neste trabalho, será levado em conta o esquema P1, no qual a fibra utilizada entre as Macrocells e a BBU é duplicada, sendo uma ativa e outra passiva para, em caso de ocorrência de falhas na fibra principal, a secundária será ativada até a resolução da falha.

6.1 Modelo de Cenário Proposto

Assume-se, para esta pesquisa, uma rede 5G dividida em quatro níveis, sendo o primeiro composto por todos os IEDs que monitoram o funcionamento do *Smart Grid*, já o segundo nível,

é formado por *Femtocells* que podem utilizar as tecnologias de 5G, WiMAX ou WiFi, de acordo com a simulação executada. O terceiro nível é constituído por *Macrocells* que podem utilizar as tecnologias de 5G ou WiMAX, dependendo da simulação realizada e, finalmente, o quarto nível, composto por uma conexão via fibra óptica entre a *Macrocell* e a BBU em nuvem. A Fig. 6.1 ilustra a rede 5G.

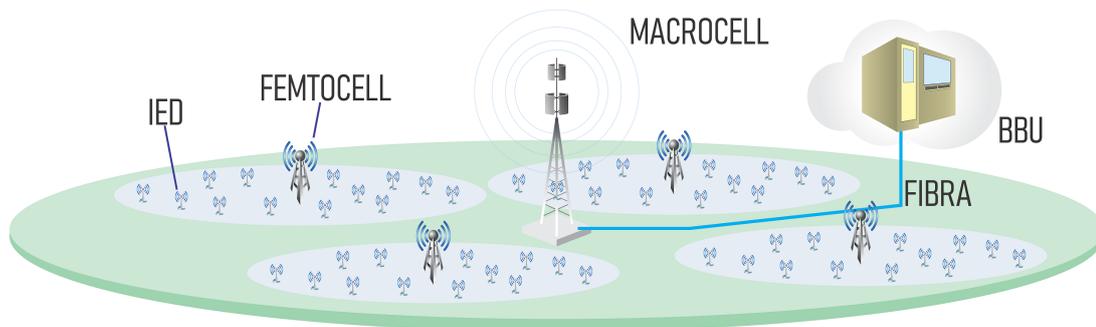


Figura 6.1 – Modelo de Estrutura de Comunicação 5G Proposto.

Para esta pesquisa, utilizou-se o cenário: *The IEEE 8500-node test feeder*¹. Embora seja chamado de cenário do *The IEEE 8500-node test feeder*, possui 2469 nós primários de média tensão para os quais as coordenadas são fornecidas e, por isso, considera-se essa quantidade de nós neste trabalho. Assume-se, agora, cada nó como um IED. Segundo (DUGAN; ARRITT, 2010), este circuito é moderadamente grande, deve ser suficiente para exercitar a maioria dos algoritmos de análise do sistema de distribuição e provar a capacidade de lidar com problemas de grande escala. Na Fig. 6.2, é apresentado o cenário de teste, que possui 4000m x 4500m.

6.2 Características das Aplicações Utilizadas

Com o objetivo de definir a topologia da rede a ser analisada economicamente, utiliza-se, neste trabalho, o método de clusterização *K-means* para a aplicação de posicionamento de implantação de equipamentos de estação base para *Smart Grids* (VRBSKÝ et al., 2018). Observando parâmetros mínimos de QoS, no qual, para cada cenário, existe um ponto de acesso que recebe todos os dados, neste caso, modo *upstream*, e envia todos os dados no modo *downstream*, considerando o atraso entre o ponto de acesso e o servidor do fornecedor de energia.

O *National Institute of Standards and Technology* (NIST) dos Estados Unidos definiu o IEC 61850 como um dos principais padrões para alcançar a interoperabilidade no ambiente *Smart Grid* (IEC61850, 2003) (GREER et al., 2014). Assim, requisitos específicos como atraso,

¹ <http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>

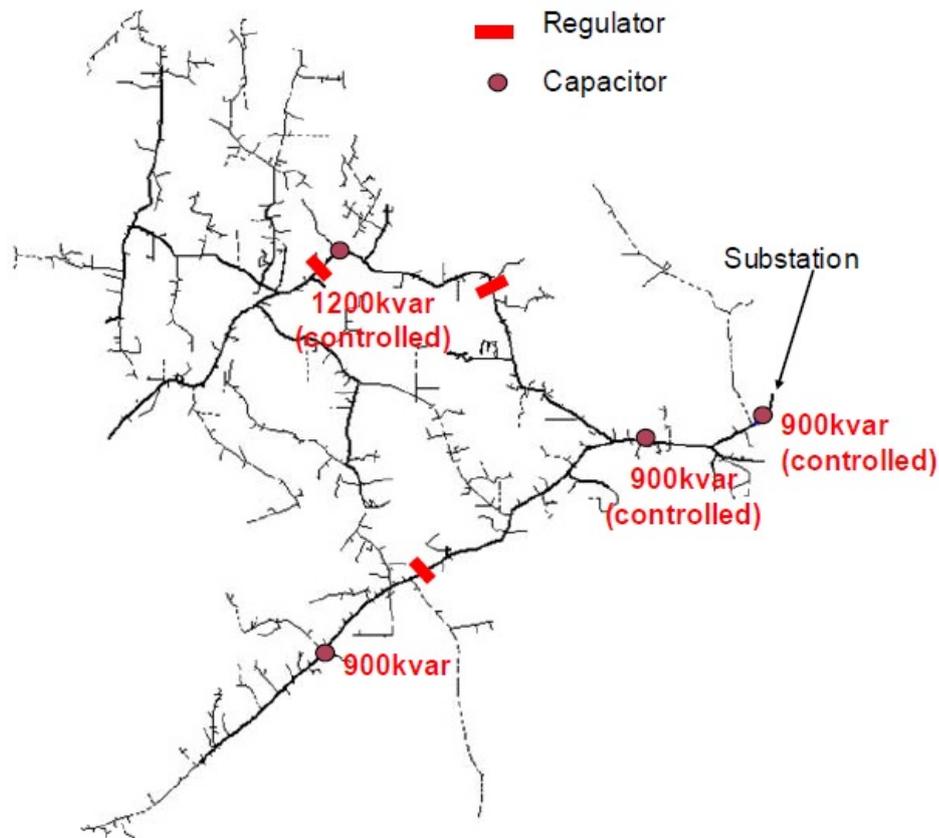


Figura 6.2 – 8500 - Circuito de teste de alimentação (DUGAN; ARRITT, 2010).

quantidade de dados e importância da mensagem foram estudados para definir os valores mostrados abaixo. Segundo (SILVA, 2014) baseado em (IEC61850, 2003), três classes de mensagens prioritárias se destacam e foram selecionadas: Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3. Tem as seguintes definições:

- Tipo 1 - Mensagens Rápidas, nesta classe estão as mensagens mais importantes que, tipicamente, envolvem o envio de códigos binários simples de comando para os IEDs, por exemplo: *close*, *start*, *stop*, *block*, *unblock*, *trigger* e outros. Ao receber a mensagem, o IED deve agir imediatamente.
- Tipo 2 - Mensagens de Média Velocidade, estão incluídas, nesta classe, as mensagens nas quais os dados apresentam alta precisão em relação ao momento em que a medição foi realizada, entretanto, o tempo máximo aceitável de transmissão entre o IED e o servidor não é tão restrito quanto o da classe Tipo 1.
- Tipo 3 - Mensagens de Baixa Velocidade, este tipo deve ser usado para funções de controle automático de baixa velocidade, para a transmissão dos registros de eventos, para ler ou

alterar valores de limiares do sistema e para coleta geral de dados do sistema.

Ainda segundo (SILVA, 2014), a mensagem de velocidade média representa a mensagem transmitida do IED ao servidor para ser utilizada na aplicação de proteção, a velocidade alta denota a mensagem de comando enviada para o IED e a velocidade baixa representa dados coletados pelos IEDs e enviados ao servidor. Dos requisitos definidos na IEC 61850, estes foram selecionados por possuírem um atraso máximo aceitável com menor valor dentre os demais tipos de mensagens.

A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros das mensagens, na qual, a importância de cada mensagens foi adicionada devido a necessidade desta definição para o modelo proposto. O *payload* é definido pela IEC 61850, os demais parâmetros ficam a critério do desenvolvedor da rede de comunicação, considerar o *overhead* gerado pelos protocolos.

Mensagem	Velocidade	Importância	Payload (bits)	Máximo Delay (ms)
Tipo 1	Alta	Alta	1	1
Tipo 2	Média	Média	128	50
Tipo 3	Baixa	Baixa	1024	100

Tabela 6.1 – Parâmetros das mensagens usando PICOMs. Adaptado de (VRBSKÏ et al., 2018) (IEC61850, 2003)

Além disso, as mensagens usam os protocolos: *Real-time Transport Protocol* (RTP) / *User Datagram Protocol* (UDP) / *Internet Protocol* (IP), que adiciona uma sobrecarga de 40 bytes para cada mensagem. Em (VRBSKÏ et al., 2018), essa sobrecarga é adicionada à carga útil da mensagem, aumentando o tamanho total da mensagem, considerando, também, que cada IED é representado pela soma dos tamanhos das mensagens, enquanto o atraso máximo total tolerado é o atraso mínimo tolerado das mensagens de um determinado usuário.

Ainda de acordo com (VRBSKÏ et al., 2018), pode ser benéfico para o sistema, dissociar as mensagens tipo 1 e tipo 3. O motivo é que, enquanto o tipo 1 transporta uma pequena quantidade de dados em até 1 ms, o tipo 3 transporta uma quantidade maior de dados em até 100 ms. Isso significa que as duas mensagens precisam ser transmitidas ao mesmo tempo. A taxa de dados no caminho entre esse IED e o servidor precisa ser alta o suficiente para enviar ambas as mensagens em até 1 ms. Além disso, as mensagens tipo 1, tipo 2 e tipo 3 são classificadas, para esta pesquisa, como de alta, média e baixa importância, respectivamente.

6.3 Modo Normal e Restrito

Um modo de comunicação que restringe a rede às mensagens tipo 1 e tipo 2, é utilizado, supondo que, as mensagens tipo 3 sejam enviadas, posteriormente, para diminuir o tráfego da rede. Por fim, a metodologia também exige que o *Time Division Duplex* (TDD) seja especificado pela razão entre o tempo alocado para o *uplink* e *downlink* e a soma entre TDD de *uplink* mais *downlink* será igual a 1. Por estes motivos, neste estudo de caso, é considerado, o modo NORMAL e RESTRITO de comunicação, para o modo NORMAL os 3 tipos de mensagens são enviados na rede e no modo RESTRITO apenas as mensagens do tipo 1 e 2 são enviadas. O TDD das simulações é de 12:15 para *uplink* e 3:15 para *downlink*

O método de clusterização *K-means* é aplicado neste estudo, por apresenta resultados satisfatórios nos cenários analisados, em comparação com outros métodos (VRBSKY et al., 2018). O cluster resultante das simulações posicionam todas as *Macrocells* e *Femtocells*, nas melhores posições para promover um QoS aceitável para o planejamento da rede de dados do *Smart Grid*, bem como, economia no uso de fibra óptica entre a *Macrocell* e a BBU.

6.4 Parâmetros e Componentes do Smart Grid

Para uma melhor avaliação de desempenho das tecnologias propostas para compor a comunicação do *Smart Grid*, é analisado três tecnologias levando em consideração a importância do QoS na transmissão dos dados.

A Tabela 6.2 resume os parâmetros aplicados ao 5G, WiMAX, WiFi. A comunicação entre a *Macrocell* e a BBU é feita via fibra optica, considerando uma taxa de transferência de 10 Gbps entre a Macro e o CO para ambos os *uplink* e *downlink*. Os parâmetros indicados pela Tabela 6.2, foram obtidos de (VRBSKY et al., 2018), (CHEN et al., 2010), (MAHLOO et al., 2014), (HOLM et al., 2015) e (MENDES; RODRIGUES, 2011).

Na Tabela 6.3, os custos normalizados, utilizados para calcular o TCO de *fronthaul* e *backhaul*, são apresentados. A normalização dos preços utilizados foi baseada no preço do quilômetro de fibra optica, que apresenta unidade de custo igual a 1. Os parâmetros indicados pela Tabela 6.3, foram obtidos de (FARIAS et al., 2016), (YUNAS; ANSARI; VALKAMA, 2016) e (CHARNI; MAIER, 2013), apresentando o custo e os valores de cada componente. Sua organização consiste em: descrição de equipamentos/serviços, seu custo normalizado, tempo

necessário de instalação em horas, tempo que o equipamento permanece em funcionamento antes de falhar, tempo necessário de reparo, em horas, e consumo de energia em *Watts*.

Parâmetro	5G	WiMAX	WiFi
Frequência (GHz)	26	3,5	2,4
Potência Total macro TX (dBm)	46	43	43
Potência Total femto TX (dBm)	23	30	40
Macrocell ganho (dB)	18	20	15
Femtocell ganho (dB)	15	20	0
Largura de banda (MHz)	100	10	20
Fibra (Gbps)	10	10	10

Tabela 6.2 – Parâmetros usados na Macrocell e Femtocell

Item	Normal.	Inst.(h)	Falha(FIT)	Reparo(h)	Energia(W)
Antena	12,5	0,16	540	1	20
BBU	303,13	24	193548,36	2	270
Femto WiFi	10	1	1612,9	2	45
Femto WiMax	0,43125	1	1612,9	2	20
Femto 5G	3,12	1	1612,9	2	10
Macrocell	72,4125	24	32258,06	2	6074
Macrocell 5G	72,10	24	32258,06	2	1000
KWh	0,00125	-	-	-	-
ONU	0,9125	1	256	1	5
P_{fiber} (km)	1	-	-	7	-
OLT	18,75	1	756	1	150
Splitter	0,88	0,16	120	1	0
P_{tech} (h)	0,33	-	-	-	-
P_{trench} (km)	812,5	-	570/Km	7	-
P (h)	7,5	-	-	-	-

Tabela 6.3 – Parametros para CAPEX e OPEX

6.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os cenários e configurações desenvolvidas a partir da literatura, usados na execução do modelo proposto, para isto, é realizado um estudo de caso, bem como, a validação da modelagem de TCO. Cada tecnologia dá, ao cenário, características em relação ao seu QoS, equipamentos, dentre outros pontos, com o propósito de alcançar o melhor QoS possível, atendendo a maior quantidade de IEDs. Os resultados desta modelagem são apresentados e

discutidos no próximo capítulo, demonstrando a viabilidade do uso de tecnologias sem fio para *Smart Grids*.

7 RESULTADOS

De modo a aplicar os modelos propostos para análise econômica de arquiteturas para *Smart Grid*, esta seção apresenta os resultados referentes ao estudo de caso, utilizando o número de Femtocells de 40, 60, 80, 100, 150, 200 e 250 para cada cenário e alternando entre 1 ou 2 o número de *Macrocells*, estes valores foram determinados de forma empírica para esta pesquisa. Os resultados de posicionamento das *Femtocells*, *Macrocells* e IEDs, foram obtidos de acordo com o trabalho de (VRBSKÝ et al., 2018), para demais informações, consulte o anexo A. As Tabelas 7.1, 7.3, 7.4, mostram os resultados obtidos de QoS, suficiente, em porcentagem para os 3 tipos de tecnologias simuladas, já a Tabela 7.2 apresenta os resultados de QoS para 5G em números de IEDs não atendidos.

Os resultados das simulações de cada modo de transmissão de dados foram reproduzidos 500 vezes, para *uplink/NORMAL*, *downlink/NORMAL*, *uplink/RESTRITO* e *downlink/RESTRITO*, dentro do método *K-means*, totalizando 22000 resultados gerados, sendo que, a quantidade e a localização de cada tipo de mensagem (NORMAL, RESTRITO), é aleatória e, por isso, é avaliado o pior caso, o melhor caso e a média de QoS desses resultados.

As Fig. 7.1 e 7.2 ilustram as posições das *Femtocells* e *Macrocells* obtidos pelo algoritmo de *K-means* em modo RESTRITO, para as tecnologias 5G e WiMAX, com 250 *Femtocells* e 2 *Macrocell* que são os cenários com melhor desempenho. Os resultados de WiFi, por serem quase homogêneos, não foram incluídos, mas serão discutidos mais a frente.

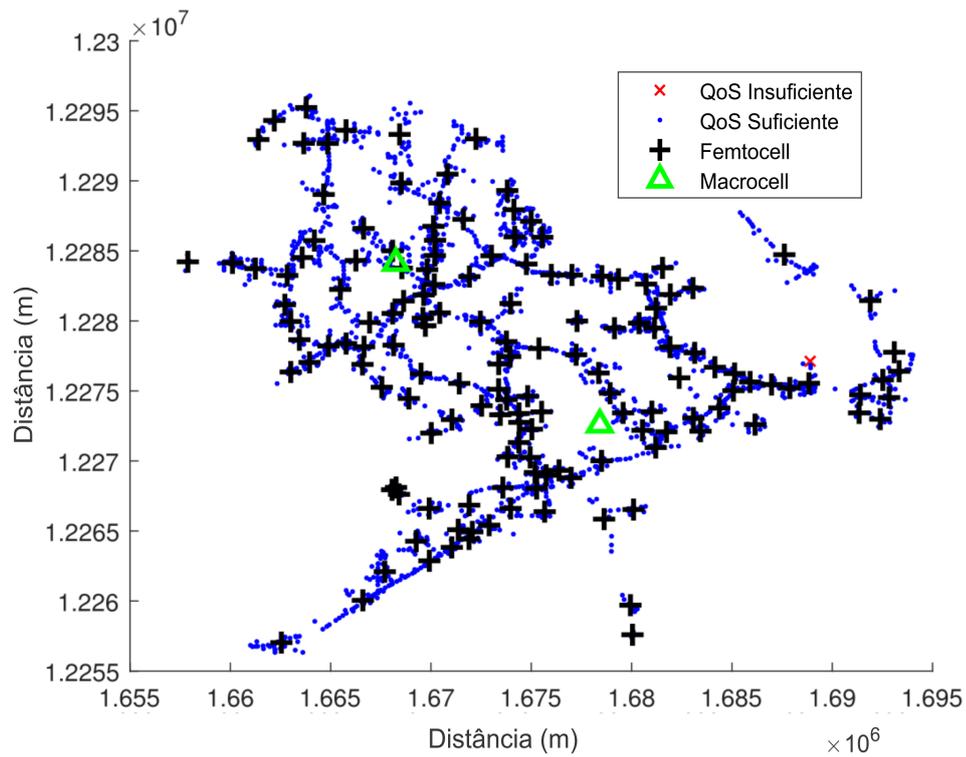


Figura 7.1 – 5G - Posições resultantes de equipamentos de rede em relação aos 2469 IEDs. 150 Femtocells e 2 Macrocell.

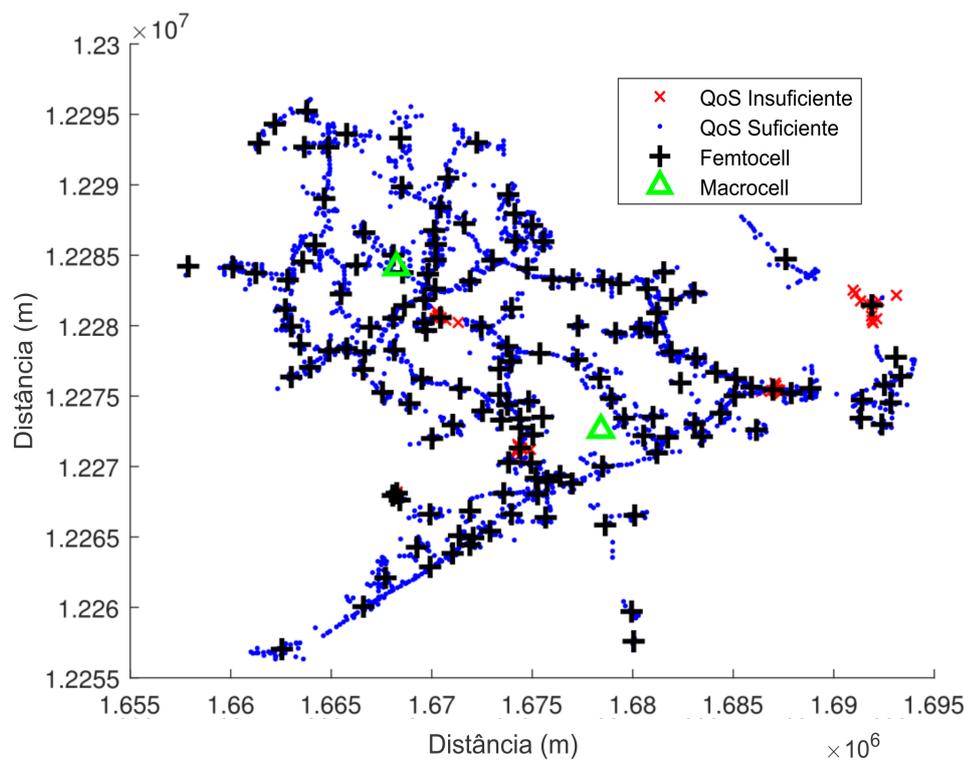


Figura 7.2 – WiMAX - Posições resultantes de equipamentos de rede em relação aos 2469 IEDs. 150 Femtocells e 2 Macrocell.

7.1 Resultados de QoS

Na Tabela 7.1, são apresentados os resultados das simulações da tecnologia 5G, onde a quantidade mínima de *Femtocells* com 100% de atendimento do número de IEDs dentro dos parâmetros de QoS em *uplink* é de 80 *Femtocells* e 1 *Macrocell*. Para *downlink*, a média de IEDs com o melhor resultado foi de 99.49% de QoS com 60 *Femtocells*. Entretanto, o número de IEDs com QoS aceitável reduz de 100% para 98,91% em *uplink* com 80 *Femtocells* e 98,93% com 60 *Femtocells*, no modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. Em uma avaliação geral, o melhor resultado de IEDs atendidos desta simulação está com o número mínimo de 150 *Femtocells* e 2 *Macrocells*, onde os resultados tiveram uma média de desempenho de 100% e 99.4% de atendimento para *uplink* e *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. A média de IEDs desta instância é de 100% para *uplink* e 99.4% para *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente.

Observa-se ainda na Tabela 7.1, que ocorre uma perda na média dos IEDs atendidos equivalente a 34,35%, com 100 *Femtocells* e 1 *Macrocell*, em relação ao caso anterior. Isso está relacionado à interferência entre células, ou seja, à área de cobertura de uma *Femtocell*, a qual cria um efeito gargalo no envio das mensagens, fazendo com que o tempo de envio e recebimento dos dados sofra uma defasagem, diminuindo o número de IEDs atendidos. Esta sobrecarga à *Macrocell*, é amenizada na instância seguinte quando o número de *Femtocells* sobe para 150, essas 50 *Femtocells* a mais se conectam com um número maior de IEDs, aumentando a capacidade de atendimento.

A Tabela 7.3 contém os resultados da simulação com tecnologia WiMAX. A menor quantidade de células com o melhor QoS é de 150 *Femtocells* e 2 *Macrocells*, que possuem um atendimento de 100% para *uplink* em modo NORMAL e RESTRITO, já seu *downlink* é de 98.3% e 98.25% para o modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. Sua média de IEDs dentro dos parâmetros de QoS, neste caso, é de 100% para *uplink* e 98.65% para *downlink*, tanto para o modo NORMAL quanto para o RESTRITO, respectivamente.

Na Tabela 7.4 temos os resultados referentes à simulação com tecnologia WiFi. Note que, para todos os casos número de IEDs atendidos é de quase 100%, com destaque para a instância com 200 *Femtocells* e 1 *Macrocell* que obteve 100% de atendimento para todos os casos. Os parâmetros usados na simulação do WiFi, proporcionam essa melhora no QoS, todavia, a qualidade do IEDs atendidos no WiFi não é suficiente para se afirmar que é a melhor opção

de tecnologia para aplicação em *Smart Grid*, é necessário avaliar o TCO de cada tecnologia e cruzar esses dados com o QoS para se chegar a um resultado satisfatório.

Femto	Macro	Uplink									Downlink								
		NORMAL (%)			RESTRITO (%)			NORMAL (%)			RESTRITO (%)								
		Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média						
40	1	96.64	79.63	89.06	96.03	79.63	89.13	96.76	95.14	95.92	97.81	95.30	95.90						
60	1	100.00	97.37	98.91	100.00	97.41	98.93	99.76	99.27	99.49	99.76	99.27	99.49						
80	1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.47	98.99	99.22	99.47	98.95	99.22						
100	1	74.97	57.11	65.65	74.56	56.87	65.68	99.11	98.50	98.80	99.19	98.42	98.79						
100	2	99.47	93.64	97.36	99.39	94.25	97.40	98.91	97.93	98.31	98.66	97.89	98.29						
150	1	100.00	98.95	99.61	100.00	98.91	99.61	98.10	96.68	97.21	98.02	96.84	97.24						
150	2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.92	99.03	99.40	99.92	99.03	99.40						
200	1	97.29	86.03	92.25	97.25	86.51	92.29	99.15	98.34	98.68	99.23	98.38	98.68						
200	2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.11	98.06	98.67	99.19	98.06	98.69						
250	1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.78	97.29	97.90	98.83	97.21	97.90						
250	2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.70	96.88	97.78	98.58	96.88	97.80						

Tabela 7.1 – 5G - IEDs com QoS Suficiente.

Femto	Macro	Uplink						Downlink					
		NORMAL			RESTRITO			NORMAL			RESTRITO		
		Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média
40	1	503	83	270	503	98	268,4	120	80	100,7	116	54	101,1
60	1	65	0	26,9	64	0	26,4	18	6	12,4	18	6	12,5
80	1	0	0	0	0	0	0	25	13	19,2	26		19,3
100	1	1059	618	848,2	1065	628	847,3	37	22	29,7	39	20	29,8
100	2	157	13	65,2	142	15	64,1	51	27	41,7	52	33	42,2
150	1	26	0	9,6	27	0	9,5	82	47	68,8	78	49	68,2
150	2	0	0	0	0	0	0	24	2	14,9	24	2	14,7
200	1	345	67	191,4	333	68	190,2	41	21	32,6	40	19	32,5
200	2	0	0	0	0	0	0	48	22	32,9	48	20	32,3
250	1	0	0	0	0	0	0	67	30	51,8	69	29	51,7
250	2	0	0	0	0	0	0	77	32	54,4	77	35	54,4

Tabela 7.2 – 5G - IEDs com QoS Insuficiente.

Femto	Macro	Uplink						Downlink					
		NORMAL (%)			RESTRITO (%)			NORMAL (%)			RESTRITO (%)		
		Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média
40	1	91,21	47,47	70,16	91,29	48,20	70,21	95,71	91,54	94,73	95,83	91,49	94,69
60	1	100,00	74,65	89,05	100,00	74,73	89,03	98,91	98,06	98,47	98,87	98,06	98,47
80	1	100,00	98,38	99,92	100,00	98,38	99,94	91,01	88,74	89,71	90,68	88,90	89,75
100	1	62,49	42,04	52,13	62,29	42,00	52,03	97,61	94,17	96,01	97,12	94,17	96,08
100	2	90,56	78,41	84,67	90,24	78,21	84,61	99,03	97,57	98,41	98,99	97,53	98,46
150	1	99,55	95,99	98,32	99,55	96,19	98,33	95,79	93,97	94,57	95,63	93,80	94,55
150	2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,11	98,30	98,66	99,27	98,26	98,65
200	1	86,39	69,30	77,89	86,59	69,99	77,86	99,39	98,18	98,63	99,07	98,18	98,60
200	2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,60	95,30	95,98	96,92	95,38	95,97
250	1	100,00	97,89	99,29	100,00	97,73	99,27	97,25	95,79	96,44	97,12	95,83	96,42
250	2	100,00	99,07	99,83	100,00	99,07	99,83	95,50	93,84	94,65	95,63	93,64	94,63

Tabela 7.3 – WIMAX - IEDs com QoS Suficiente.

Femto	Macro	Uplink									Downlink								
		NORMAL (%)			RESTRITO (%)			NORMAL (%)			RESTRITO (%)								
		Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média						
40	1	100,00	99,84	99,98	100,00	99,84	99,98	100,00	99,92	99,95	100,00	99,92	99,95						
60	1	100,00	99,84	99,98	100,00	99,88	99,98	100,00	99,80	99,87	100,00	99,80	99,86						
80	1	100,00	99,88	99,99	100,00	99,88	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						
100	1	100,00	99,92	99,99	100,00	99,92	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						
100	2	100,00	99,80	99,97	100,00	99,80	99,97	100,00	99,92	99,95	100,00	99,92	99,95						
150	1	100,00	99,88	99,98	100,00	99,88	99,98	100,00	99,96	99,97	100,00	99,96	99,97						
150	2	100,00	99,96	99,97	100,00	99,96	99,97	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						
200	1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						
200	2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,92	99,95	100,00	99,92	99,95						
250	1	100,00	99,92	99,99	100,00	99,92	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						
250	2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,96	99,97	100,00	99,96	99,98						

Tabela 7.4 – WIFI - IEDs com QoS Suficiente.

7.2 Resultados do 5G

A Fig. 7.3 apresenta o TCO estimado no período de 1 ano, para tecnologia 5G. Conforme, os resultados de QoS que cada tecnologia gerou nas simulações realizadas, e que são demonstrados nas Tabelas 7.1, 7.3 e 7.4, também nas Fig. 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11, observa-se que a instância com a melhor configuração é de 150 *Femtocells* com 2 *Macrocells*.

A tecnologia 5G apresentou uma máxima de 100% e mínima de 99.03% de IEDs atendidos, dentro dos parâmetros de QoS, para *uplink* e *downlink*, com uma média de IEDs atendidos, de 100% para *uplink* e 99.4% para *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. Esse resultado ocorre, devido ao número de *Femtocells* que atendem aos IEDs nesta configuração, aumentando a quantidade de IEDs que ficam na espera de atendimento e o aumento de uma *Macrocells* que contribui com um melhor fluxo da taxa de transmissão em relação à instância anterior. O TCO desta configuração 5G com 150 *Femtocells* com 2 *Macrocells*, foi de 16115,67. Todos os custos de TCO estão normalizados pelo preço da fibra óptica.

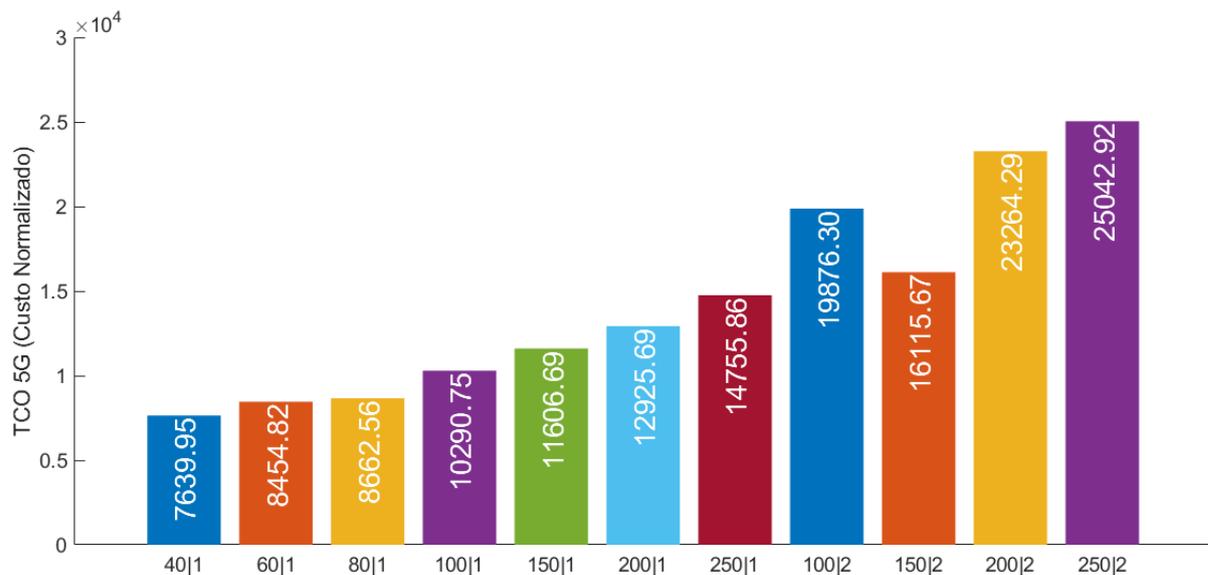


Figura 7.3 – Custo do TCO para 5G.

A Fig. 7.4, ilustra os resultados do CAPEX da tecnologia 5G, no qual, os dispêndios relacionados a infraestrutura representam uma parte considerável do capital de investido para implantação da rede de dados, em outros casos, ocorre uma diferença desse custo, como pode ser visto nas instâncias de 100 *Femtocells* com 2 *Macrocells*, e 150 *Femtocells* com 2 *Macrocells*, isso é justificado pela necessidade de realizar o tunelamento de fibra em todas as localidades do *fronthaul*, este fato se aplica aos resultados encontrados nas Fig. 7.12 e 7.13.

Outro fator importante que contribui com o 5G em relação ao *Smart Grid*, é que, as operadoras de telefonia móvel, podem arcar com a responsabilidade da implantação da rede em zonas sem cobertura ou atualização da rede de comunicação existente, reduzindo o custo das concessionárias de energia elétrica, já que a maior parte do custo de CAPEX seria repassado às operadoras de telefonia.

A quantidade de fibra usada em cada cenário, é calculada considerando a distância de *Manhattan* e que a BBU está localizada no topo/centro do cenário. Os comprimentos encontrados de fibra são demonstrados na Tabela 7.5, porém, é necessário levar em consideração o esquema de segurança P1, no qual, a quantidade de fibra é dobrada para implementação de uma conexão reserva, caso a principal seja danificada, evitando que a comunicação da rede seja interrompida e haja despesas com penalidade por falhas da fibra.

Parameter	40/1	60/1	80/1	100/1	150/1	200/1	250/1	100/2	150/2	200/2	250/2
Fibra (Km)	2.4	2.4	2.0	2.4	2.4	2.3	2.4	5.2	2.2	5.4	5.4

Tabela 7.5 – Comprimento de fibra óptica por cenário. Femtocell/Macrocell

A formulação usada nesta pesquisa possui alguns parâmetros que não se alteram com a mudança de tecnologia, uma vez que, esses parâmetros podem ser aplicados às mesmas tecnologia por possuírem características idênticas. Por exemplo, as formulas de Instalação (5.4) e Infraestrutura (5.5), que contem variáveis que, independente da tecnologia calculada, os resultados serão iguais por orçarem equipamentos comuns em todas as topologias de rede. As Fig. 7.4 e 7.5 apresentam os resultados de CAPEX e OPEX para tecnologia 5G.

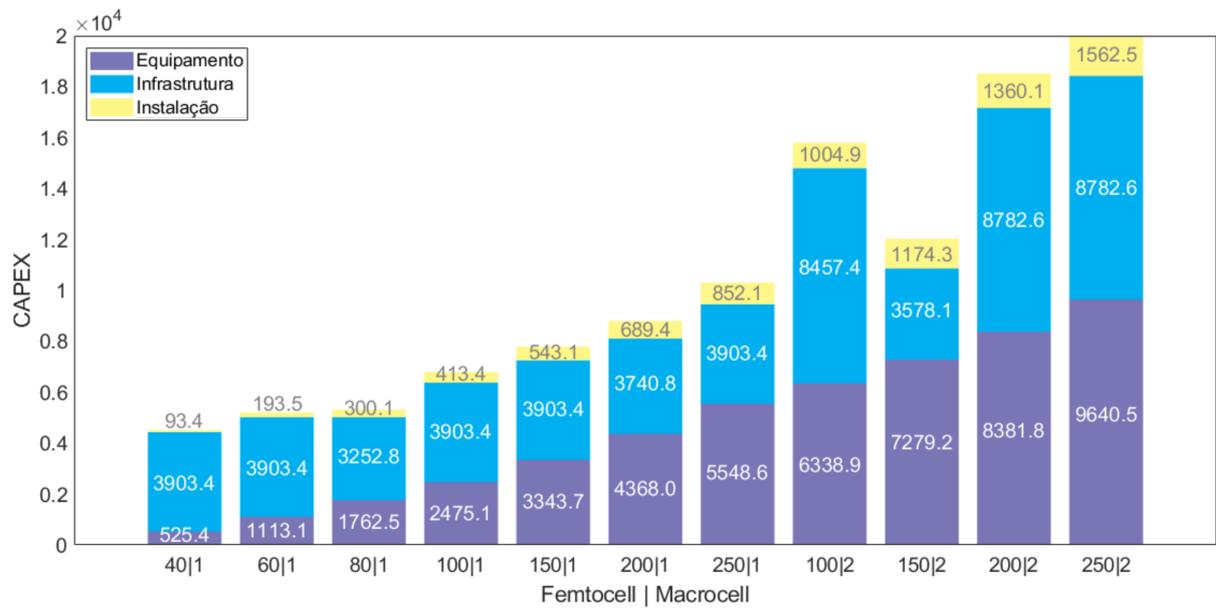


Figura 7.4 – CAPEX para a Arquitetura 5G.

Assim como o CAPEX, as fórmulas do OPEX possuem variáveis que não se alteram com a mudança da tecnologia computada, neste caso, os dados considerados, neste trabalho, dão maior ênfase ao custo da energia consumida em cada arquitetura, conforme a Tabela 6.3 e as Equações (5.6) e (5.7).

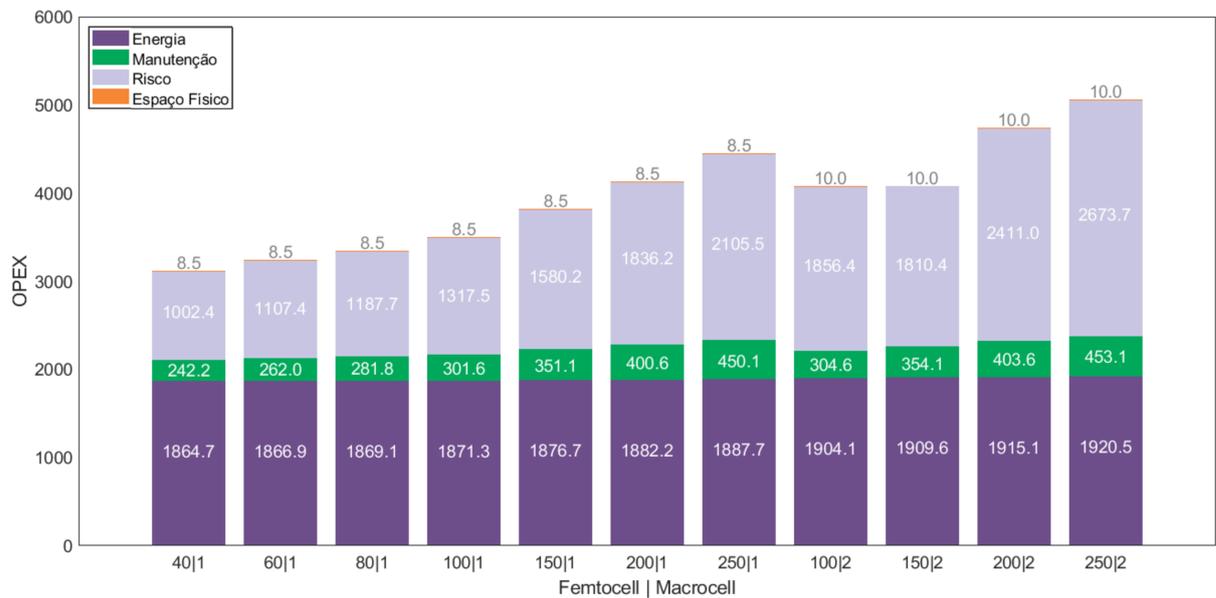


Figura 7.5 – OPEX para a Arquitetura 5G.

7.3 Comparação de Resultados

As Fig. 7.6 e 7.7 apresentam uma projeção de 10 e 20 anos para os custos de CAPEX e OPEX, no qual, dois valores, custo do salário do técnico, e o custo de energia, são estimados a partir do primeiro ano, com base nos valores apresentados na Tabela 6.3. Para analisar a desvalorização anual no CAPEX, uma taxa de depreciação de 5% é aplicada sobre o custo dos equipamentos utilizados na rede (CHARNI; MAIER, 2014). Com base em progressão geométrica, assumiu-se um aumento anual de 1,03 nos custos do custo do salário do técnico e custo de energia, gerando resultados que contribuem na avaliação do aumento do OPEX ao longo dos anos projetados (CHARNI; MAIER, 2014) (FARIAS et al., 2016).

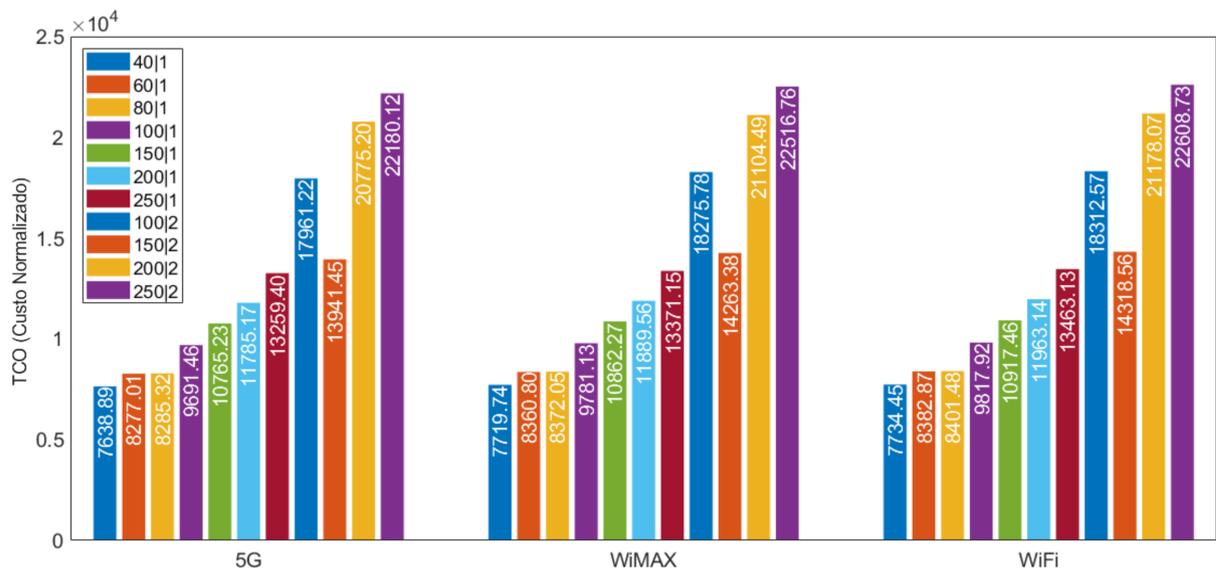


Figura 7.6 – Custo do TCO por Tecnologia em 10 anos.

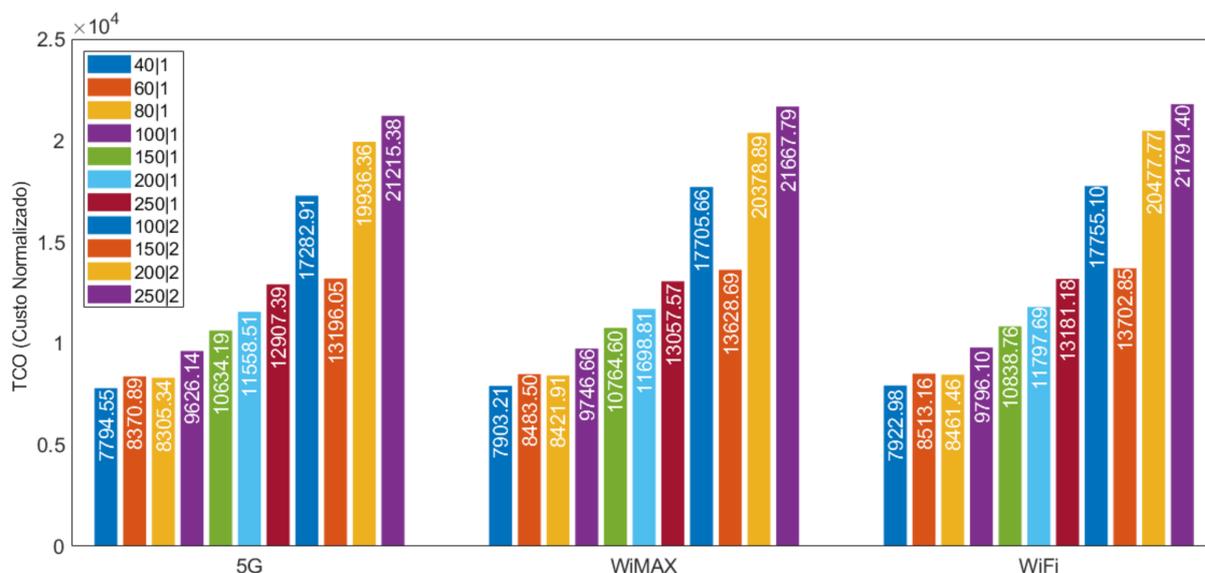


Figura 7.7 – Custo do TCO por Tecnologia em 20 anos.

Nas Fig. 7.8 e 7.9, o custo médio do TCO por IED atendido, em modo NORMAL e RESTRITO, na primeira anuidade é demonstrado. Apesar de o WiMAX possuir a maioria dos custos mais baixos, dentre as 3 tecnologias para todas as instâncias simuladas, os resultados de TCO nas projeções de 10 e 20 anos, Fig. 7.6 e Fig. 7.7, demonstram que o investimento a médio e longo prazo não viabiliza o uso desta tecnologia.

Por exemplo, com 100 *Femtocells* e 2 *Macrocells* o dispêndio do TCO em 10 anos, Fig. 7.6, para o 5G é de 17961.22 enquanto para WiMAX é de 18275.78, já em um prazo de 20 anos, Fig. 7.7, o custo do TCO para o 5G é de 17282.91 enquanto para WiMAX é de 17705.66, demonstrando que a longo prazo, o dispêndio da tecnologia WiMAX é maior que o do 5G.

Analisando os dados de forma mais detalhada, as Fig. 7.8 e 7.9, demonstram que a instância de 150 *Femtocells* e 2 *Macrocells*, retém o menor custo por IED atendido a partir de 100 *Femtocells*, em concordância com a Tabela 7.1 e 7.3. Fato importante, é que o 5G apresenta um custo próximo ao do WiMAX, podendo, a longo prazo, se tornar a melhor tecnologia para investimento em um *Smart Grid*. Apesar de possuir o melhor QoS desta pesquisa, o TCO do WiFi torna a tecnologia muito mais onerosa, inviabilizando sua aplicação, quando equiparado ao 5G e WiMAX.

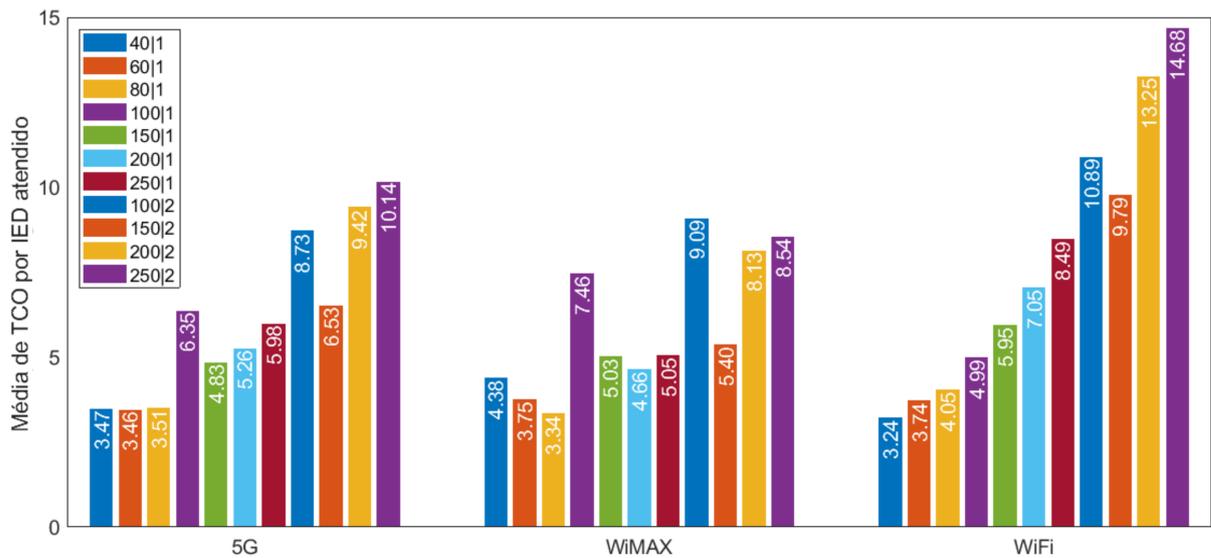


Figura 7.8 – Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. NORMAL/UPLINK

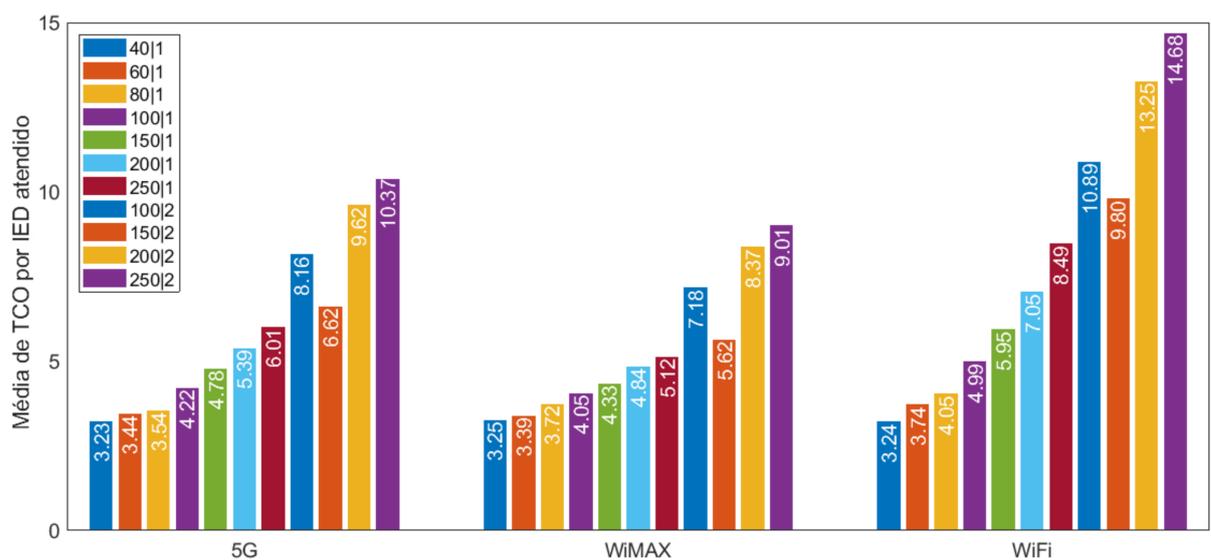


Figura 7.9 – Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. NORMAL/DOWNLINK

A média por IED atendido, em modo RESTRITO, é exibido nas Fig. 7.10 e 7.11. Na Fig. 7.10, o modo RESTRITO distribuiu as vantagens do TCO entre as tecnologias, por exemplo, em 40 ou 100 *Femtocells* e 1 *Macrocell*, é mais vantajoso utilizar WiFi que 5G ou WiMAX. O WiMAX foi mais oneroso que o 5G em 5 casos em *uplink*, já em *downlink* Fig. 7.11, o WiMAX tem um custo maior em 2 casos em relação ao 5G, 40 e 80 *Femtocells*, nos demais casos, o WiMAX foi mais vantajoso.

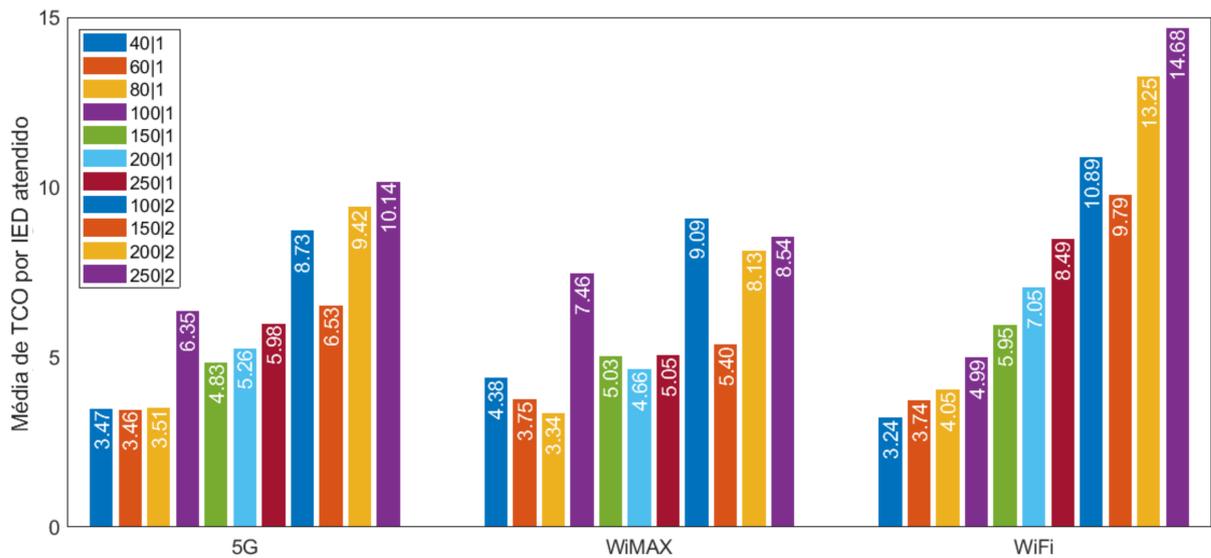


Figura 7.10 – Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. RESTRITO/UPLINK

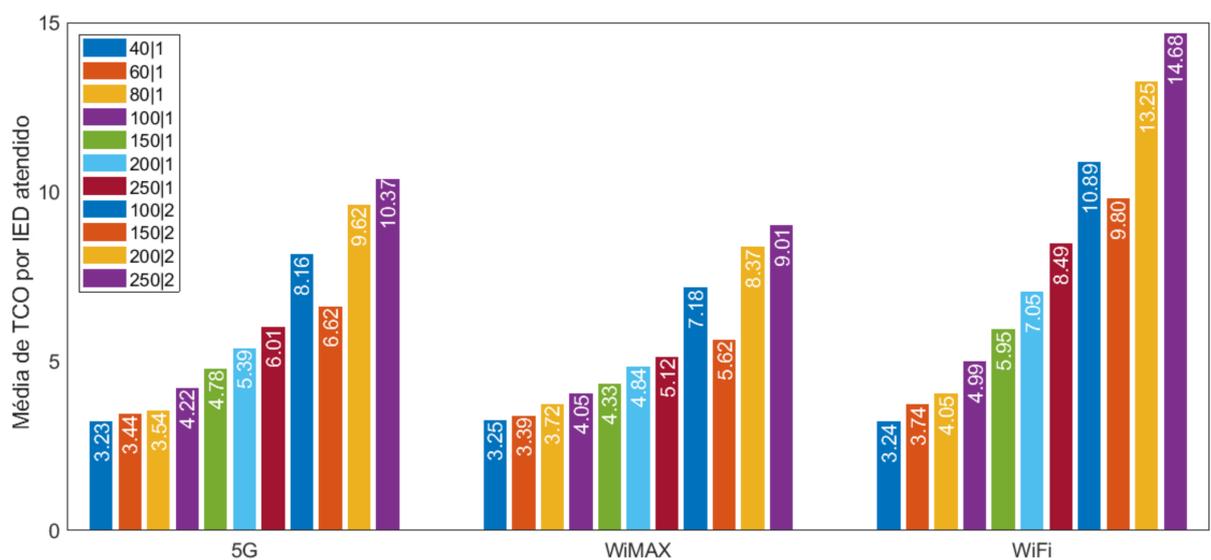


Figura 7.11 – Custo do TCO por Média de IEDs Atendidos. RESTRITO/DOWNLINK

Os resultados do CAPEX da tecnologia WiFi, demonstrados na Fig. 7.13, mostram que essa tecnologia foi a mais onerosa, mesmo possuindo a vantagem de QoS com quase todos os IEDs atendidos, seus custos elevados, a torna inviável à implantação em um cenário real, pois o 5G possui resultados de QoS próximos aos seus. Apesar do WiMAX ter obtido bons resultados no CAPEX, Fig. 7.12, seu desempenho de QoS e custo de operação a médio e longo prazo o colocam atrás do 5G.

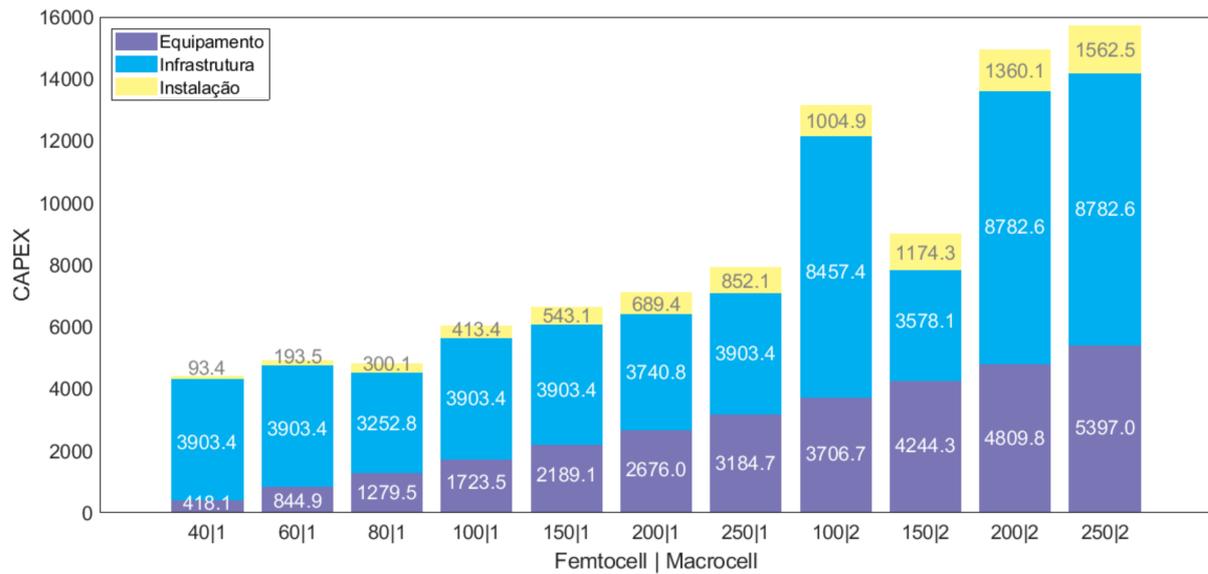


Figura 7.12 – CAPEX para a Arquitetura WiMAX.

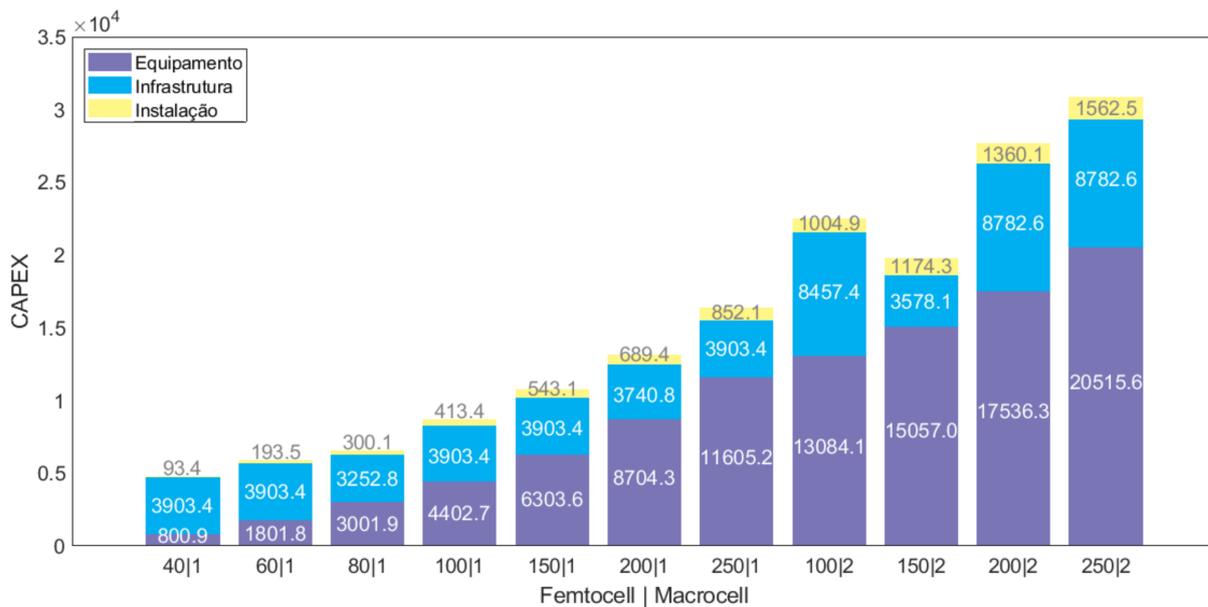


Figura 7.13 – CAPEX para a Arquitetura WiFi.

Observando os custos do OPEX na Fig. 7.14, percebe-se que o custo operacional do WiMAX está acima do custo de 5G, por exemplo, com 100 *Femtocells* e 2 *Macrocells* o dispêndio do OPEX em 5G é de 1904,1 enquanto para WiMAX é de 2138,2 que, a longo prazo, tornará o dispêndio dessa tecnologia mais oneroso que o 5G, como pode ser visto nas Fig. 7.6 e 7.7. Na Fig. 7.15, o OPEX da tecnologia WiFi é apresentado, mostrando um alto consumo de energia que desfavorece o bom desempenho adquirido na Tabela 7.4, por tornar muito mais oneroso sua operação, principalmente a longo prazo.

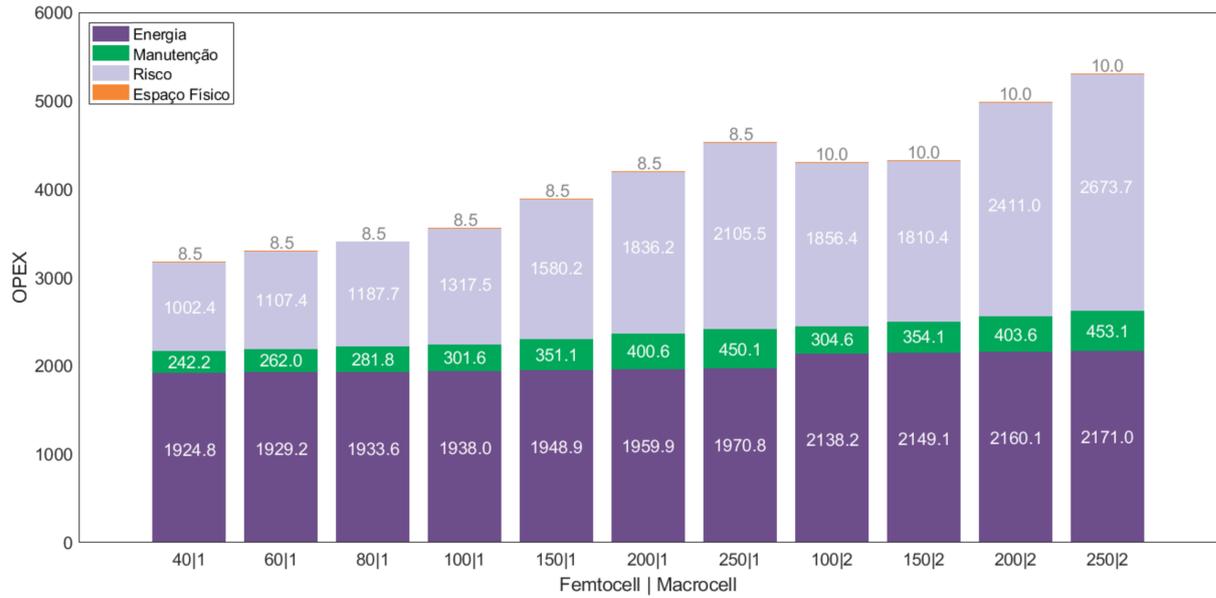


Figura 7.14 – OPEX para a Arquitetura WiMAX.

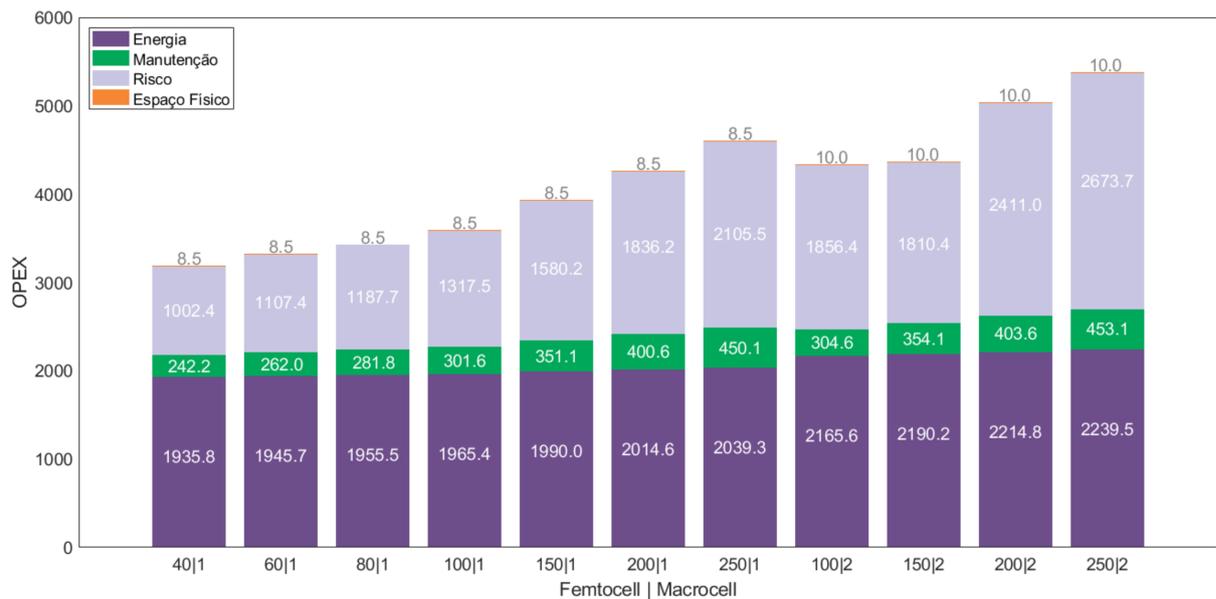


Figura 7.15 – OPEX para a Arquitetura WiFi.

Levando em consideração a depreciação dos equipamentos utilizados na infraestrutura da rede comunicação, pode-se concluir. Com base nos resultados do OPEX aqui demonstrado, indica que o 5G, Fig. 7.5, tem o melhor desempenho, pois seu baixo consumo de energia favorece a utilização desta tecnologia a médio e longo prazo, visto que, os custos da manutenção e risco de falhas tendem a aumentar, conforme os anos de uso da rede, o que pode resultar em mau funcionamento dos equipamentos e infraestrutura, gerando um maior consumo de energia e gastos com substituição.

Os resultados apresentados na Fig. 7.5, estão baseados no período de um ano. Os valores de Espaço Físico, como calculado em (5.16), é uma taxa de aluguel anual paga pela operadora da rede para alojar seus equipamentos, esta é a razão dos valores serem baixos.

7.4 Resultados da Falha na Rede e Fibra Óptica

A Fig.7.16, apresenta os resultados do custo por falha na fibra óptica utilizada no *Smart Grid*. O custo está relacionado ao comprimento da fibra e as falhas que os equipamentos, utilizados em seu funcionamento, podem ter no período de um ano. Note que, com 150 *Femtocells* e 2 *Macrocells*, o custo é menor que em 100 *Femtocells* e 2 *Macrocells*, pois a distância entre as *Macrocells* e a BBU é menor em relação as outras, conforme a Tabela 7.5. Quanto menor o comprimento da fibra, menor será a penalidade, pois o número de falha nas fibra é reduzido.

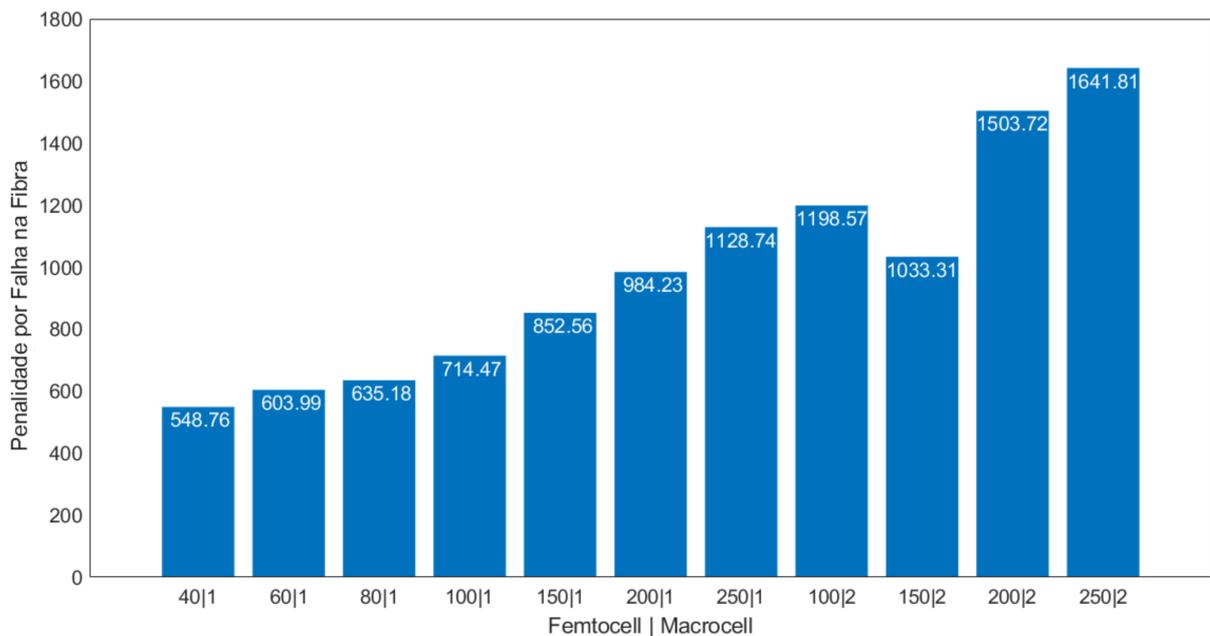


Figura 7.16 – Custo da Penalidade por Falha de Fibra.

Este trabalho também considera o custo por falhas na transmissão de dados da rede, conforme a Fig. 7.17, que apresenta os custos de falhas por cada IED na transmissão da rede. Estes valores são importantes para se saber o quão dispendioso é a interrupção do serviço de comunicação no *Smart Grid*, sendo que os IEDs, possivelmente, fiquem inoperante com a queda da comunicação, deixando sua área de atuação sem monitoramento.

Observa-se nas Tabelas 7.1 e 7.3, um alto número de IEDs atendidos nas configurações com 80 *Femtocells* e 1 *Macrocell*, torna esta topologia da rede a melhor, abaixo de 150 *Femtocells*

e 2 *Macrocell*, com média de 100% de IEDs conectados em *uplink* e 99.22% em *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO para 5G. Já em WiMAX, os resultados desta configuração são 99.92% e 89.71% de IEDs atendidos para *uplink* e *downlink*, respectivamente, enquanto que, no modo NORMAL e RESTRITO, os resultados obtidos na média são, 99.94% e 89.75% para *uplink* e *downlink*, respectivamente. Essa diferença representa uma perda de aproximadamente 9.5% no *downlink* para ambos os modos, o que representa aproximadamente 234.55 IEDs do total de 2469, ou seja, 234.55 IEDs estariam desconectados, gerando um déficit por falha na rede, de aproximadamente 2071.1 conforme a Fig. 7.17, aumentando consideravelmente o OPEX.

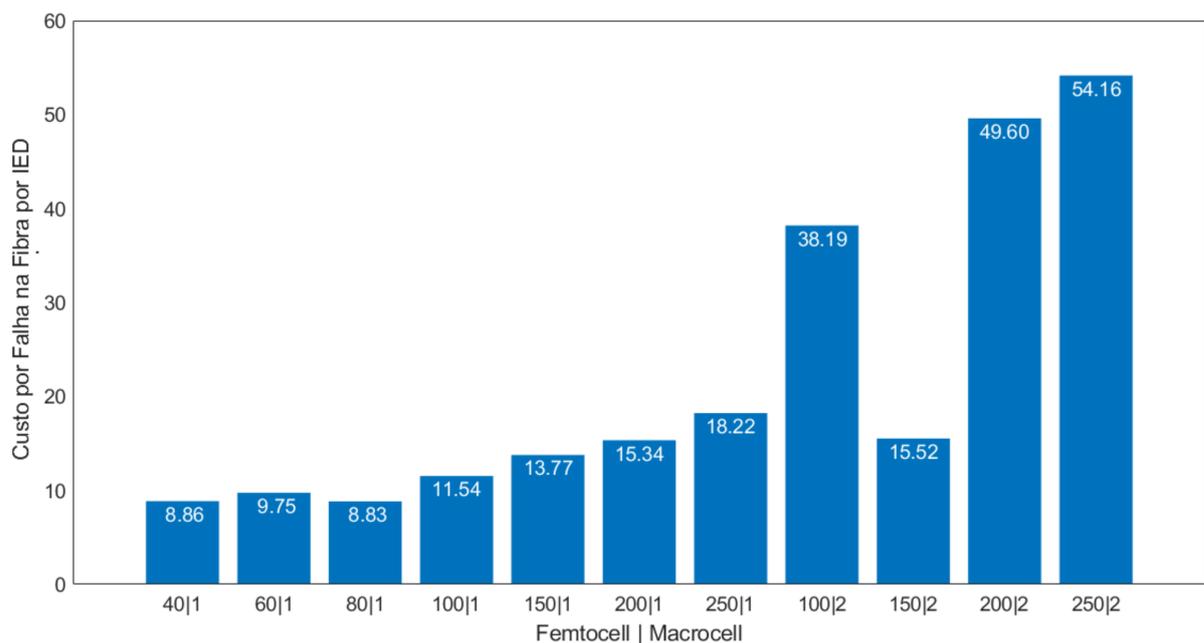


Figura 7.17 – Custo da Falha por IEDs.

Na Fig. 7.18, é exposto a probabilidade de ocorrer uma falha na fibra óptica em cada instância simulada, o que prejudicaria todo o funcionamento do *Smart Grid*, bem como o seu respectivo custo. Conforme a Tabela 7.5, as probabilidades aumentam ou diminuem de acordo com o comprimento da fibra, pois, apesar da probabilidade ser baixa, devido ao curto comprimento da fibra usada nos cenários deste trabalho, este cálculo contribui com o aperfeiçoamento do planejamento da *Smart Grid*. Com 150 *Femtocells* e 2 *Macrocells* obteve-se a segunda menor probabilidade de falha na fibra, com P igual a 0,08 e o custo por IED é de 15.5236, valor normalizado em relação a preço da fibra.

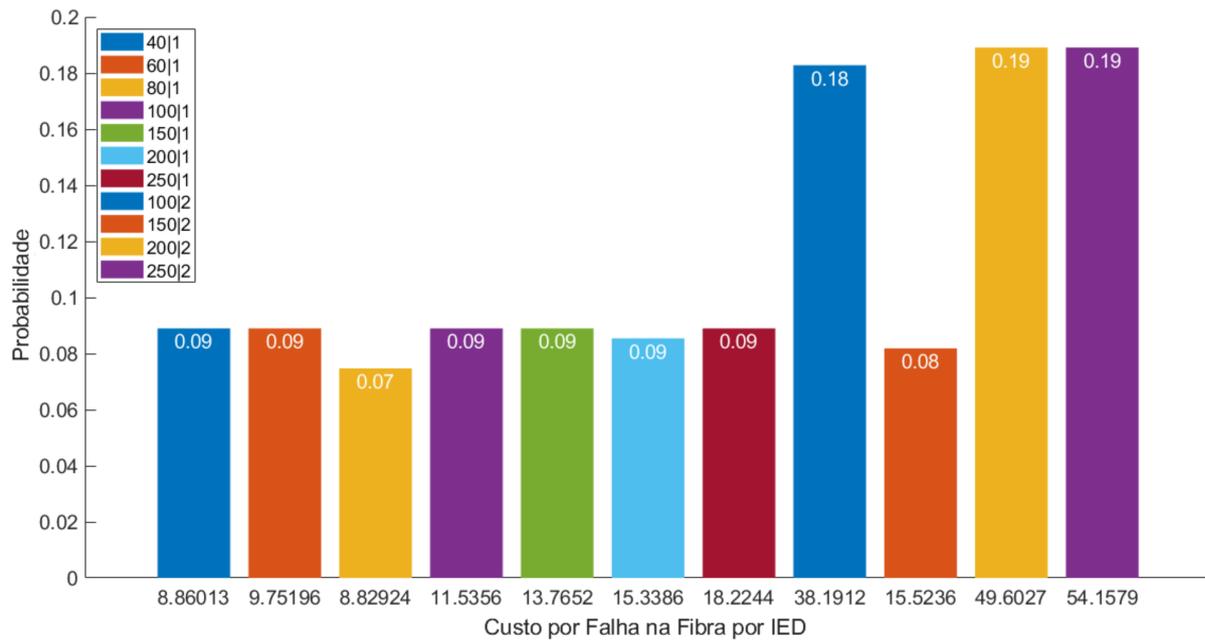


Figura 7.18 – Probabilidade de Falha por Custo por IED.

7.5 Considerações Finais

Os resultados obtidos apresentam os TCOs e o QoS para avaliar a implantação de uma rede de dados que possibilite a comunicação em um *Smart Grid*. Os elementos de custo relacionados ao TCO, estão divididos em duas partes: CAPEX, como os custos de equipamentos, instalação e infraestrutura e OPEX, como os custos de energia, manutenção, gerenciamento de falhas e espaço. As tabelas e gráficos apresentados, contribuem com as concessionárias de energia elétrica e operadoras de telefonia, a identificar os pontos mais onerosos do TCO e o QoS de atendimento que cada tecnologia oferece, o que é essencial para a eficiência e implantação do *Smart Grid*, dependendo da tecnologia e da arquitetura implantada.

Os melhores resultados de IEDs atendidos, em todas as tecnologias, se concentraram na rede que possuía configurações de 150 *Femtocells* com 2 *Macrocells*, isso por causa da grande área de cobertura alcançada nesta configuração com uma menor interferência de sinal entre antenas, chegando a 100% e 99.4% de QoS no 5G para *uplink* e *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente.

Os resultados demonstram que, o QoS mais elevado pertence a tecnologia WiFi, na qual quase se atingiu 100% de IEDs com QoS em todos os casos simulados, porém, o alto custo dos equipamentos e energia consumida elevam o TCO, inviabilizando a aplicação desta tecnologia.

Com o terceiro maior QoS de atendimento, WiMAX é uma boa opção de custo-benefício, tendo em vista possuir o menor TCO dos resultados obtidos, ganhando em quase todos modos simulados (NORMAL, RESTRITO, *UPLINK* e *DOWNLINK*).

No entanto, o WiMAX possui o segundo maior OPEX, o que a longo prazo, tornará o uso desta tecnologia muito mais onerosa, tornando-a obsoleta. Com um QoS aceitável, superior ao do WiMAX, o 5G torna-se a tecnologia com o melhor custo-benefício a médio e longo prazo, sendo o futuro das comunicações móveis e Internet das Coisas, e os resultados do 5G demonstram ser promissores. Os TCOs e QoS do 5G, segundo esta análise, demonstram ser melhores opções para planejamento a médio e longo prazo.

De forma mais detalhada, observando os resultados obtidos nas simulações de cada tecnologia, a instância com a melhor configuração é de 150 *Femtocells* e 2 *Macrocells* para as tecnologias 5G e WiMAX. O 5G apresentou 100% e 99.02% de IEDs com QoS para *uplink* e *downlink* máximo, e a média de IEDs atendidos, é de 100% para *uplink* e 99.4% para *downlink* em modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. O TCO desta configuração 5G foi de 16115.67.

O WiMAX possui um QoS de IEDs máximo de 100% para *uplink* em modo NORMAL e RESTRITO, em seu *downlink*, com resultados de QoS mínimo de 98.3% e 98.26% de IEDs para o modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. A média de IEDs com QoS do WiMAX é de 100% para *uplink* e 98.65% para *downlink* para o modo NORMAL e RESTRITO, respectivamente. Seu TCO, nesta configuração, é de 13320,36.

Para o WiFi, a melhor configuração foi de 200 *Femtocells* e 1 *Macrocell*, com 100% de IEDs atendidos para todos os modos, e seu TCO é de 17394.39 para esta configuração. Todos os custos de TCO estão normalizados pelo preço da fibra optica.

8 CONCLUSÃO

8.1 Conclusão

Este trabalho apresenta, como contribuição, uma modelagem econômica para avaliar a relação custo-benefício de diversas possibilidades de implantação de redes de dados para *Smart Grid*, de forma a destacar seus principais pontos de implantação e operação. A partir de estudos feitos em ambientes simulados, são apresentadas as melhores configurações de rede, com o menor TCO e que atenda aos padrões de QoS em um sistema *Smart Grid*. Sendo o TCO, o corolário do somatório do CAPEX e OPEX, a implantação e manutenção da topologia ideal para cada cenário podem ser melhor analisados e planejados com base nos resultados do TCO e QoS.

O cálculo do CAPEX é fundamental para o dimensionamento ideal da uma rede 5G, pois apresenta o investimento necessário para cada topologia desenvolvida, tal como, o OPEX torna possível a avaliação do dispêndio operacional de toda a infraestrutura e seus componentes, oferecendo um controle do sumpto de implantação e operação de uma HetNet aplicada ao *Smart Grid*.

Com isto, este trabalho demonstra, com base nos resultados, que a tecnologia 5G foi que obteve a melhor avaliação como opção para implantação da comunicação de uma rede de dados aplicada a *Smart Grid*. Os resultados do número de IEDs atendidos dentro dos requisitos de QoS aliados aos dados obtidos no TCO, mostraram que em médio e longo prazo o 5G tem seu custo inferior as tecnologias usadas para comparação dos resultados. O custo de implantação da rede 5G pode ser ainda menor às concessionárias de energia elétrica, se a responsabilidade da implantação da rede ou atualização, for arcada pelas operadoras de telefonia móvel.

8.2 Contribuição deste Trabalho

Esta dissertação apresenta as seguintes como contribuições à academia:

- Uma modelagem econômica para avaliar a relação custo-benefício de diversas possibilidades de implantação de redes de dados para *Smart Grid*, de forma a destacar seus principais pontos de implantação e operação;
- A partir de estudos feitos em ambientes simulados, são apresentadas as melhores confi-

gurações de rede, com o menor TCO e que atenda aos padrões de QoS em um sistema *Smart Grid*. Sendo o TCO, o corolário do somatório do CAPEX e OPEX, a implantação e manutenção da topologia ideal para cada cenário podem ser melhor analisados e planejados com base nos resultados do TCO e QoS;

- O cálculo do CAPEX é fundamental para o dimensionamento ideal da rede 5G, pois apresenta o investimento necessário para cada topologia perscrutada, tal como, o OPEX torna possível a avaliação do dispêndio operacional de toda a infraestrutura e seus componentes, oferecendo um controle do sumpto de implantação e operação de uma rede 5G aplicada ao *Smart Grid*;
- O desenvolvimento de um modelo tecno-econômico, que atenda as necessidades das concessionárias de energia elétrica, no âmbito do planejamento da implantação do *Smart Grid*, considerando despesas relacionadas ao *fronthaul* e *backhaul* de uma rede de dados aplicada ao *Smart Grid*;
- Oferecer uma metodologia para cálculo do dimensionamento da rede de dados, com o objetivo de reduzir despesas de capital e custos operacionais de um *Smart Grid*, evitando déficit desnecessário as concessionárias de energia elétrica;
- Dar subsídios através do levantamento do estado da arte à novas pesquisas e projetos relacionados ao *Smart Grid*;
- O dimensionamento da rede foi projetado com base em um cenário pré-definido, entretanto, cada componente utilizado na rede 5G pode ser equacionado, possibilitando com precisão, à previsão do número de cada item que será utilizado no *Smart Grid*;
- Publicação gerada com base nesta pesquisa, contribuindo com o crescimento do conhecimento da academia sobre *Smart Grid*:
 - Paulo Tassio da L. Melo, Daniel da S. Souza, Marcos C. R. Seruffo, Diego L. Cardoso, Marcelino S. da Silva. "Custo Total de Propriedade para Infraestruturas de Comunicações de Smart Grid". VIII CONFERÊNCIA NACIONAL EM COMUNICAÇÕES, REDES E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO, 8. 2018. Salvador. Anais. p. 85-86.

8.3 Dificuldades Encontradas

As limitações encontradas na elaboração desta dissertação são listadas a seguir:

- O número de publicações sobre Custo Total de Propriedade aplicado ao *Smart Grid*, e a grande repetição de temas menos relevantes a este trabalho encontrados durante o levantamento literário, formaram um empecilho na busca de subsídios para elaboração desta dissertação;
- A grande maioria de trabalhos publicados sobre *Smart Grid* utilizam referências da literatura clássica sobre o tema, o que dificulta a atualização de conceitos e normas;
- A segurança da rede também deve ser levada em consideração na implantação da topologia, pois, de acordo com a necessidade de cada sistema, os custos podem ser elevados, conforme o sistema de segurança escolhido. Este trabalho limitou-se à avaliação apenas do sistema de segurança P1, por este ser de menor custo e de fácil implantação;
- Carência de informações atualizadas sobre o custo de equipamentos e serviços, dentre outros ativos que compõem parâmetros importantes para a implantação do *Smart Grid*.

8.4 Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, destacam-se:

- Implantar um modelo de dimensionamento da rede, que possibilitando o fornecimento exato da quantidade de equipamentos necessários a infraestrutura da rede para suprir a topologia e demanda, otimizando recursos que compõem o *Smart Grid*, levando a uma redução do TCO.
- Estudar a viabilização da implantação de *micro-grids*, como contribuição a rede, com recursos de energia distribuída que podem ser operados em paralelo com a *Smart Grid*, permitindo a geração de energia elétrica a partir pequenas fontes de energia independente, facilitando a integração de fontes alternativas de energia, aumentando a confiabilidade, geração, distribuição, eficiência da rede e redução de custo com linhas de transmissão.
- Abordar a questão dos prossumidores, ou seja, os consumidores que produzem e compartilham a energia excedente com a rede e outros usuários, tornando-se uma fonte de energia

em pequena escala, porém, se o volume de prossumidores em uma rede for alto, a carga gerada pode ser aplicada em reservas para regiões ou setores sofram queda de energia.

- Fazer um levantamento do estado da arte sobre métodos de geração de energia limpa e renovável, para mitigar o consumo de energia de fonte não renováveis no *Smart Grid*.
- Implantar outros sistemas de segurança a comunicação do *Smart Grid*, comparando seus custos e implantação, não somente a questões de segurança física da rede, mas também, questões relacionadas aos dados dos usuários.

REFERÊNCIAS

- ALOUL, F. et al. Smart grid security: Threats, vulnerabilities and solutions. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2012.
- AMINI, M. H. et al. Smart residential energy scheduling utilizing two stage mixed integer linear programming. p. 1–6, Oct 2015.
- ARAUJO, W. V. et al. Heuristics for the optimized deployment of small cells in next-generation networks. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, SciELO Brasil, v. 16, n. 3, p. 697–707, 2017.
- BAGHAEI, H. R. et al. A decentralized power management and sliding mode control strategy for hybrid ac/dc microgrids including renewable energy resources. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, p. 1–1, 2018. ISSN 1551-3203.
- BEHRENS, C. E. Energy policy: 113th congress issues. **Congressional Research Service**, 2013.
- BERA, S.; MISRA, S.; OBAIDAT, M. S. Energy-efficient smart metering for green smart grid communication. **Global Communications Conference. GLOBECOM**, p. 2466–2471, December 2014.
- BROWN, T. G. Optical fibers and fiber-optic communications. **FIBER OPTICS HANDBOOK**, 2002.
- BUZZI, S. et al. A survey of energy-efficient techniques for 5g networks and challenges ahead. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 34, n. 4, p. 697–709, 2016.
- CASTILLO, E. et al. Specimen length effect on parameter estimation in modelling fatigue strength by weibull distribution. **International journal of fatigue**, Elsevier, v. 28, n. 9, p. 1047–1058, 2006.
- CHARNI, R.; MAIER, M. Impact study of collaborative implementation models on total cost of ownership of integrated fiber-wireless smart grid communications infrastructures. p. 31–36, 2013.
- CHARNI, R.; MAIER, M. Total cost of ownership and risk analysis of collaborative implementation models for integrated fiber-wireless smart grid communications infrastructures. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 5, n. 5, p. 2264–2272, 2014.
- CHE, L. et al. Optimal planning of loop-based microgrid topology. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 4, p. 1771–1781, July 2017. ISSN 1949-3053.
- CHEN, J. et al. Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 48, n. 2, p. 56–65, 2010.
- CISCO, V. Cisco visual networking index: Forecast and methodology 2017–2022. 2017.
- CUCCHIELLA, F.; D’ADAMO, I.; GASTALDI, M. Photovoltaic energy systems with battery storage for residential areas: An economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 131, p. 460–474, 2016.

- DOMINGUES, F.; ROCHA, A.; ANDRE, P. Failure probability of optical fiber under high optical power and small bend diameters. p. 440–443, 2011.
- DUGAN, R.; ARRITT, R. The ieeec 8500-node test feeder. **Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA**, 2010.
- 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, July 2015.
- FARIAS, F. d. S. et al. Designing cost-efficient transport solutions for fixed and mobile broadband access network. Universidade Federal do Pará, 2016.
- FEDERATION, G. S. G. Global smart grid federation report. **Global Smart Grid Federation**, p. 15, 2012.
- GREER, C. et al. Nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 3.0. 2014.
- HAN, C. et al. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks. **IEEE communications magazine**, IEEE, v. 49, n. 6, 2011.
- HASSEBO, A. et al. 5g-based converged electric power grid and ict infrastructure. p. 33–37, 2018.
- HOLM, H. et al. Optimal assignment of cells in c-ran deployments with multiple bbu pools. p. 205–209, 2015.
- IEC61850, I. 7-1, communication networks and systems in substations-part7-1: basic communication structure for substation and feeder equipment-principles and models. **Compatible logical node classes and data classes**, SI]: IEC, 2003.
- JABER, M. et al. 5g backhaul challenges and emerging research directions: A survey. **IEEE access**, IEEE, v. 4, p. 1743–1766, 2016.
- KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Communication network requirements for major smart grid applications in han, nan and wan. **Computer Networks**, Elsevier, v. 67, p. 74–88, 2014.
- LI, S.; XU, L. D.; ZHAO, S. 5g internet of things: A survey. **Journal of Industrial Information Integration**, Elsevier, 2018.
- LIKAS, A.; VLASSIS, N.; VERBEEK, J. J. The global k-means clustering algorithm. **Pattern recognition**, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 451–461, 2003.
- MAHLOO, M. et al. Cost modeling of backhaul for mobile networks. p. 397–402, 2014.
- MENDES, L. D.; RODRIGUES, J. J. A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 34, n. 2, p. 523–534, 2011.
- NIU, Z. et al. Cell zooming for cost-efficient green cellular networks. **IEEE communications magazine**, IEEE, v. 48, n. 11, 2010.

- OH, E.; SON, K.; KRISHNAMACHARI, B. Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks. **IEEE transactions on wireless communications**, IEEE, v. 12, n. 5, p. 2126–2136, 2013.
- RAHMAN, M.; DESPINS, C.; AFFES, S. Analysis of capex and opex benefits of wireless access virtualization. p. 436–440, 2013.
- ROST, P. et al. Cloud technologies for flexible 5g radio access networks. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 52, n. 5, p. 68–76, 2014.
- SHEBANI, N. et al. Simulation and analysis of path loss models for wimax communication system. p. 692–703, 2013.
- SILVA, M. d. Estratégia de planejamento e otimização de redes de comunicação de dados como suporte a implantação de smart grids. **Universidade Federal do Pará, Belém, 142p**, 2014.
- SOUZA, D. d. S. et al. Modelagem de custo para redes móveis centralizadas de nova geração. v. 22, n. 1/2017, 2017.
- SOUZA, M. de et al. Technical economic analysis of fotovoltaic systems in heterogeneous mobile networks. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 109, p. 825–832, 2017.
- SRINIVASAN, D. et al. Game-theory based dynamic pricing strategies for demand side management in smart grids. **Energy**, Elsevier, v. 126, p. 132–143, 2017.
- STATES, U. **Energy independence and security act of 2007**. [S.l.]: US Government Printing Office, 2007.
- SULYMAN, A. I. et al. Path loss channel models for 5g cellular communications in riyadh city at 60 ghz. **Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on**, p. 1–6, 2016.
- TUBALLA, M. L.; ABUNDO, M. L. A review of the development of smart grid technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 59, p. 710–725, 2016.
- VRBSKÝ, L. et al. Clustering-driven equipment deployment planner and analyzer for wireless non-mobile networks applied to smart grid scenarios. Universidade Federal do Pará, 2018.
- YAGHOUBI, F. et al. A techno-economic framework for 5g transport networks. 2017.
- YU, Y.; YANG, J.; CHEN, B. The smart grids in china—a review. **Energies**, Molecular Diversity Preservation International, v. 5, n. 5, p. 1321–1338, 2012.
- YUNAS, S. F.; ANSARI, W. H.; VALKAMA, M. Technoeconomical analysis of macrocell and femtocell based hetnet under different deployment constraints. **Mobile Information Systems**, Hindawi, v. 2016, 2016.
- ZAFAR, R. et al. Prosumer based energy management and sharing in smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 1675–1684, 2018.
- ZAPPONE, A.; JORSWIECK, E. et al. Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory. **Foundations and Trends® in Communications and Information Theory**, Now Publishers, Inc., v. 11, n. 3-4, p. 185–396, 2015.
- ZHANG, K. et al. Optimal charging schemes for electric vehicles in smart grid: A contract theoretic approach. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 19, n. 9, p. 3046–3058, Sept 2018. ISSN 1524-9050.

Anexo

ANEXO A – CLUSTERIZAÇÃO E SINR

A.1 Método de Clusterização

Clusterização é selecionar dados semelhantes, enquanto separa dados diferentes, dividindo ambos em grupos, subgrupos ou categorias, formando-os de acordo com a homogeneidade interna e a separação externa. O agrupamento depende muito da medida de distância usada, pois na maioria dos algoritmos de clusterização, os grupos resultantes são representados por CHs.

O algoritmo de *K-means* é um dos métodos mais famosos de clusterização. Proposto pela primeira vez por Stuart Lloyd em 1957, é um exemplo básico de modelos centróides, visto que, designa um único vetor de protótipo para cada *cluster*. A posição do CH minimiza a soma das distâncias euclidianas quadradas entre os nós e seus centróides, encontrando o as melhores coordenadas para o seus posicionamentos.

Segundo (VRBSKY et al., 2018), O conjunto de coordenadas dos IEDs serve como uma entrada para o algoritmo de clusterização, que é executado duas vezes, sendo que, na primeira, as coordenadas são agrupadas usando um algoritmo específico, criando k1 CHs e formando o nível 1 da topologia da rede. Na segunda execução, o conjunto *Femtocells* serve como entrada para a segunda rodada de clusterização, gerando um conjunto de k2 CHs, no qual os centroides são as *Macrocells*, e os CHs são definidos por coordenadas bidimensionais, sendo que, essas coordenadas são, então, usadas como posições de célula de rede. Se o algoritmo de clusterização usado é baseado em distâncias euclidianas, esta distância é, então, uma distância euclidiana real, isto é, a distância em uma linha reta entre dois pontos. O Algoritmo 1, mostra como o *k-means* calcula as configurações ótimas dos k protótipos.

A.2 Cálculo de SINR

Nesta seção, o cálculo do *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR), Equação A.1 e suas subequações, consideradas nesta dissertação, é apresentado. A perda de propagação é calculada com base no modelo de perda de propagação da *Stanford University Interim* (SUI) (SULYMAN et al., 2016) (SHEBANI et al., 2013), desenvolvido pelo *Institute of Electrical and*

Algoritmo 1: Algoritmo de K-means (VRBSKY et al., 2018).

- 1 **Entrada:** X - conjunto de observações K - número desejado de CH
 - 2 **Saída:** $\{CH_k\}_{k=1}^K$ - conjunto de CH $\{C_k\}_{k=1}^K$ - agrupamento dos dados, onde cada ponto de dados é atribuído a um C_i
 - 3 **K_means** X, K 1. Inicialize as CH **para** $k \leftarrow 1$ **até** K **faça**
 - 4 **fim**
 - 5 $CH_k \leftarrow$ inicializa aleatoriamente **retorna para** $k \leftarrow 1$ **até** K **faça**
 - 6 **fim**
 - 7 atribuir ao cluster mais próximo $C_k \leftarrow \{x \in X : \forall j, \|x - CH_k\|^2 \leq \|x - CH_j\|^2\}$ **para** $k \leftarrow 1$ **até** K **faça**
 - 8 **fim**
 - 9 atualizar as CHs **se** $C_k > 0$ **então**
 - 10 **fim**
 - 11 $CH_k \leftarrow \frac{1}{C_k} \sum_{x \in C_k} x$ **senão**
 - 12 **fim**
 - 13 $CH_k \leftarrow$ reinicialize $\forall k : C_k^{\tau+1} = C_k^\tau$ convergência alcançada
-

Electronics Engineers (IEEE).

$$SINR_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{I_j + N} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

I_j denota a interferência total em j , e o ruído total é denotado por N .

$P_{i,j}$ é a potência recebida por i do equipamento j , definido de acordo com a Equação A.2

$$P_{i,j}(\text{dBm}) = P_i + G_i + G_j - L_{i,j}, \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$L_{i,j}$ é a perda de caminho entre i e j .

P_i é o poder de transmissão de i .

G_i e G_j é o ganho da antena de i e j , respectivamente.

$L_{i,j}$ é a perda de caminho de i para j .

Existem vários modelos de propagação de ondas de rádio que definem uma perda de trajetória específica e seu cálculo, neste trabalho, o modelo utilizado é o SUI, definido conforme a Equação A.3.

$$L_{i,j} = A + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_f + X_h + S, \quad (\text{A.3})$$

Onde:

d é a distância entre BS e antena receptora (m).

d_0 é a distância de referência 100 (m).

λ é o comprimento de onda (m).

X_f é o fator de correção de frequência para frequência acima de 2 GHz.

X_h é o fator de correção para receber a altura da antena (m).

S é a correção para sombreamento (dB) que é o expoente de perda de caminho. A é dado pela seguinte Equação A.4.

$$A = 20 \log_{10} \frac{4\pi d_0}{\lambda}, \quad (\text{A.4})$$

Sendo o expoente de perda de trajetória γ é dado pela Equação A.5

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b}, \quad (\text{A.5})$$

Onde:

h_b é a altura da antena da estação base em metros. Isso é entre 10 me 80 m.

a , b e c dependem dos tipos de terreno, nesta dissertação é assumido o terreno semi-urbano.

Assumindo a ortogonalidade perfeita de uma rede baseada em OFDMA ou outro método de gerenciamento de espectro, o fator de interferência I na Equação A.1, depende apenas da

interferência intercelular. A interferência entre células I_j no nó j pode ser calculada pela Equação A.7.

$$I_j = \sum_{k \in K} P_{k,j}, \quad (\text{A.6})$$

Onde:

K é o conjunto de todos os nós ativos.

i é o remetente da mensagem atual nesse nó j deseja receber. Neste trabalho, o ruído N é considerado como ruído térmico N_T , dado pela Equação ??.

$$N_T(W) = 10\log_{10}(k_B * T * 1000) + 10\log_{10}(\beta), \quad (\text{A.7})$$

Onde:

k_B é Boltzmann constante com o valor de $1.38064852 * 10^{-16} JK^{-1}$.

T é a temperatura ambiente em Kelvin, e β é a largura de banda de comunicação em Hz. Demais parametros e Formulas podem ser encontrados em (VRBSKY et al., 2018), (SULYMAN et al., 2016) e (SHEBANI et al., 2013).