



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Giselle Braga Carvalho

**PREDIÇÃO DE COBERTURA DE RADIOFREQUÊNCIA PARA
SMART GRID EM 900 MHz**

Área de Telecomunicações

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Dr
Orientador

São Luís - MA
2016

Giselle Braga Carvalho

**PREDIÇÃO DE COBERTURA DE RADIOFREQUÊNCIA PARA SMART
GRID EM 900 MHz**

Monografia apresentada à Banca Examinadora
do Curso de Engenharia de Computação para
análise e aprovação.

Orientador: Carlos Henrique Rodrigues de
Oliveira, Dr.

São Luís – MA
2016

Carvalho, Giselle Braga

Predição de cobertura de radio frequencia para Smart Grid em 900 MHz/
Giselle Braga Carvalho – São Luís, 2016.

... f

Monografia (Graduação) – Curso de Computação.Universidade Estadual
do Maranhão, 2016.

Orientadora: Prof^o . Dr^o Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

1.Redes inteligentes.2.Interoperabilidade. 3. Ponto – multiponto.4.
Mesh.5.SGIRM

CDU:004.738.5:621.317

Giselle Braga Carvalho

**PREDIÇÃO DE COBERTURA DE RADIOFREQUÊNCIA PARA SMART GRID EM 900
MHz**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do
Curso de Engenharia de Computação para análise e
aprovação. Orientador: Dr. Carlos Henrique Rodrigues
de Oliveira.

Trabalho aprovado. São Luís - MA, 23 de junho de 2016:

Dr. Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira
Orientador

Dr. Lúcio Flávio de Albuquerque Campos
Convidado 1

Msc. Cláudio Manoel Pereira Aroucha
Convidado 2

São Luís – MA
2016

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo OSI.	22
Figura 2: Modelo de Interoperabilidade SGRIM.	29
Figura 3: Domínio das redes elétricas inteligentes.	30
Figura 4: Modelo de Comunicação IEEE 2030-2011.	33
Figura 5: Modelo de Comunicação e as entidades do SGIRM.	35
Figura 6: Rádio Transnet.	37
Figura 7: Coordenadas dos Religadores e subestações.	38
Figura 8: Especificação do Rádio Transnet.	39
Figura 9: Parâmetros de entrada para as ERBs.	40
Figura 10: Parâmetros de entrada para as CPEs.	41
Figura 11: Parâmetros de entrada para rede <i>Mesh</i> de acesso.	42
Figura 12: Parâmetros de entrada para a rede <i>mesh</i> de <i>backhaul</i>	43
Figura 13: Primeira zona de Fresnel.	46
Figura 14: Rede Ponto-Multiponto.	49
Figura 15: Modo de variabilidade para as CPEs.	50
Figura 16: Visada direta entre o Rel9 e a Subestação do Cohafuma.	54
Figura 17: Modelo de Rede <i>Mesh</i>	55
Figura 18: Rede <i>mesh</i> de acesso.	57
Figura 19: Rede backhaul em 5,8 GHz.	58
Figura 19: Rede backhaul em 5,8 GHz.	59
Figura 21: Fator K, condutividade do solo e a permissividade relativa do solo.	60
Figura 22: Enlace entre o Rel ₃₂ e Cohafuma.	61
Figura 23: Visada direta entre Rel ₁₆ e Rel ₃₃ , para a rede de Acesso.	62
Figura 24: Visada direta entre Rel ₃₃ e Rel ₂₁ , para a rede de Acesso.	63
Figura 25: Visada direta entre Rel ₂₁ e Rel ₂₀ , para a rede de Acesso.	64
Figura 26: Visada entre o Rel20 e a subestação Cohafuma, para a rede de acesso.	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo da Zona de Fresnel	46
Equação 2: Potência Efetiva Irradiada	51
Equação 3: Cálculo da Atenuação.....	51
Equação 4: Equação de Friss.....	52
Equação 5: Equação para calcular o nível de potência do Receptor	53
Equação 6: Cálculo da atenuação.....	59

LISTA DE ACRÔNIMOS

AMI *Advanced Metering Infrastructure*
BAN *Building Area Network*
CPE *Customer Premises Equipment*
CPN *Customer Premises Network*
CT-IAP *Tecnologia de Comunicação*
DMS *Distribution Management System ou Sistema de Gestão de Distribuição*
EAN *Extended Area Network*
EISA *Energy Independence and Security Act*
EMS *Energy System Management ou Sistema de Consumo Inteligente*
EPRI *Electric Power Research Institute*
EPS *Electric Power System*
ERB *Estação Rádio Base*
FAN *Field Area Network*
HAN *Home Area Network*
IAP *Interoperability Architectural Perspective*
IAN *Industrial Area Network*
IED *Intelligent Electronic Device*
IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IT-IAP *Information Technology - Interoperability Architectural Perspective*
LAN *Local Area Network*
MAP *Mesh Access Point*
NAN *Neighborhood Area Network*
NIST *National Institute of Standards and Technology*
NTIA *National Telecommunications and Information Administration*
OMS *Outage Management System*
OSI *Open Standard Interconnection*
PII *Personally Identifiable Information*
PMU *Phasor Measurement Unit*
PLC *Power Line Communication*
PS-IAP *Power System- Interoperability Architectural Perspective*
RF *Radiofrequência*
RTU *Remote Terminal Unit*
SAIDI *System Average Interruption Duration Index*
SAIFI *System Average Interruption Frequency Index*
SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*
SGIRM *Smart Grid Interoperability Reference Model*
STA *Station*
TIC *Tecnologia de Informação e Comunicação*
TI *Tecnologia da informação*
WAN *Wide Area Network*
WMN *Wireless Mesh Network*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE EQUAÇÕES	5
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	6
RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
AGRADECIMENTOS	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. <i>Objetivos</i>	<i>14</i>
1.1.1. OBJETIVO GERAL	14
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.2. <i>Metodologia.....</i>	<i>15</i>
1.3. <i>Estrutura do trabalho.....</i>	<i>15</i>
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. <i>arquitetura de smart grid</i>	<i>16</i>
2.2. <i>INTEROPERABILIDADE EM SMART GRID.....</i>	<i>20</i>
2.3. <i>TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO.....</i>	<i>21</i>
2.4. <i>PRIVACIDADE</i>	<i>22</i>
2.5. <i>SEGURANÇA</i>	<i>23</i>
2.6. <i>CONFIABILIDADE</i>	<i>26</i>
2.7. <i>MODELO DE REFERÊNCIA SGIRM.....</i>	<i>28</i>
2.8. <i>TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO IAP (CT-IAP)</i>	<i>31</i>
3. PROJETO.....	37
3.1. <i>RADIO MOBILE</i>	<i>39</i>
3.2. <i>MODOS DE VARIABILIDADE</i>	<i>44</i>
3.3. <i>ZONA DE FRESNEL</i>	<i>45</i>
3.4. <i>RESOLUÇÃO Nº 506, DE 1º DE JULHO DE 2008.....</i>	<i>46</i>
3.5. <i>REDES PONTO-MULTIPONTO.....</i>	<i>48</i>
3.6. <i>PREDIÇÃO DE COBERTURA DA REDE PONTO-MULTIPONTO</i>	<i>48</i>
3.7. <i>REDES MESH.....</i>	<i>54</i>
3.8. <i>PREDIÇÃO DE COBERTURA DA REDE MESH</i>	<i>56</i>
4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS.....	69
GLOSSÁRIO	71

RESUMO

As mudanças de paradigma observadas nos sistemas elétricos motivaram grande parte das pesquisas relacionadas com o conceito de redes inteligentes.

Diferentes modos de operação, controle e estratégias de integração de mercado têm sido usados para implementar sistemas elétricos dinâmicos, que visam níveis de eficiência, segurança e confiabilidade mais elevados, assegurando vantagens para as partes envolvidas.

A interoperabilidade entre sistemas permitirá que as empresas de energia, consumidores e outros interessados adquiram hardware e software no mercado para incorporá-los em diferentes áreas, mantendo a compatibilidade com outros componentes e sistemas legados.

O Modelo de Referência para Interoperabilidade em Smart Grid (*SGIRM-Smart Grid Interoperability Reference Model*) apresentam alternativas de concepção e implementação da interoperabilidade para sistemas que facilitam a troca de dados entre seus elementos, cargas e aplicações para o consumidor. A rede é a infraestrutura de suporte que deve assegurar a troca de informação entre as entidades, de acordo com os requisitos especificados pelas aplicações para as redes inteligentes.

Este estudo é uma análise de topologias de redes ponto-multiponto e *mesh* para arquitetura de redes inteligentes. A fim de verificar a possibilidade de implementar uma topologia de acordo com os Padrões do SGIRM foi utilizado o software *Radio Mobile* para a simulação na faixa de frequência em 900 MHz.

Palavras-chave: Redes Inteligentes; Interoperabilidade; Ponto-Multiponto; *Mesh*; SGIRM.

ABSTRACT

The recent paradigm change observed about electric power system has motivated a significant amount of research relates with the smart grid concept.

Different modes of operation, control and market integration strategies have been used to implementing dynamic electric power system that have focused on high levels of efficiency, security and reliability securing advantages for the involved participants.

Interoperability among systems will allow utilities, consumers and other interested parties, to acquire hardware and software on the market to incorporate them in different areas maintaining compatibility with other components and legacy systems.

The smart grid interoperability reference model (SGIRM-Smart Grid Interoperability Reference Model presents alternative design and implementation of interoperability for systems that facilitate the exchange of data between its elements, loads and applications for consumers.

Networks are the supporting infrastructure that should ensure information exchange among different entities, according to the requirements specified by applications for smart grids.

This study is an analysis of two kinds of topologies: network point-to-multipoint and network mesh for smart grid architecture. In order to verify the possibility of implementing a topology according to SGIRM standard it was used the Radio Mobile software to simulate in 900 MHz.

Keywords: *Smart Grid; Interoperability; Point-to-multipoint; Mesh; SGIRM.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Henrique de Oliveira, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais e irmã, pelo amor, incentivo e apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com ROHJANS (2010, p.583) o conceito para Rede elétrica inteligente, conforme a citação abaixo.

O termo 'Smart Grid' refere-se a uma modernização do sistema de distribuição de eletricidade por isso monitora, protege e automaticamente a operação de seus elementos conectados desde o gerador e central de distribuição através o sistema de rede e distribuição de alta tensão, a indústrias e sistemas de automação predial, para o armazenamento de energia instalações e à utilização final consumidores e seus termostatos, veículos elétricos, aparelhos e outros aparelhos domésticos.

A rede elétrica é vista como uma estação central de distribuição provendo eletricidade para os consumidores. Tradicionalmente, os equipamentos existentes entregam energia ao consumidor sem administração ou monitoramento do consumo de energia. Os sistemas de comunicações e informação permitem um sistema de energia mais inteligente, integrado e completamente automatizado que permite opções produtivas aos consumidores e as operadoras de serviço de melhorar a confiabilidade do sistema de energia e utilização de equipamentos de forma eficiente e segura.

As redes elétricas inteligentes trazem uma mudança de paradigma para o sistema de distribuição de energia elétrica atualmente, que tem como objetivo aperfeiçoar a distribuição, produção e consumo de energia elétrica, trazendo viabilidade para a entrada de novos fornecedores possibilitando a produção de novos equipamentos e serviços com melhoria significativa no monitoramento, gestão e qualidade da energia ofertada.

Rede elétrica inteligente é um sistema complexo feito de sistemas inter-relacionados que possibilitam mais flexibilidade, comunicação integrada e controle avançado que permite a integração e interoperabilidade em larga escala de várias tecnologias e aplicações para usuários finais.

As características distintivas de redes elétricas inteligentes citadas pelo *Energy Independence and Security Act* (EISA) em 2007 incluem:

- I.O uso crescente de informação digital e tecnologia de controle para melhorar a confiabilidade, segurança e eficiência da rede elétrica;
- II.Otimização dinâmica de redes de operação e recursos, com segurança cibernética integral;
- III.Desenvolvimento e integração de recursos distribuídos e geração, incluindo fontes renováveis;

- IV. Desenvolvimento de tecnologias “inteligentes” para medir comunicações relativas à rede de operação e status e distribuição automatizada;
- V. Integração de aparelhos e dispositivos de consumo inteligentes;
- VI. Fornecer aos consumidores informações e opções de controle em tempo hábil;
- VII. Desenvolvimento de normas para a comunicação e interoperabilidade de aparelhos e equipamentos conectados à rede elétrica, incluindo a infraestrutura que serve a rede; e identificação e redução das barreiras injustificadas ou desnecessárias à adoção de tecnologias de Smart Grid, práticas e serviços.

No entanto, o Comitê “IntelliGrid” do EPRI (*Electric Power Research Institute*) desenvolveu alguns requisitos que a Smart Grid deve atender:

1. Interatividade: Tem como finalidade um desempenho econômico significativo, torna-se obrigatório conceder aos usuários uma ampla visão e acesso às tarifas cobradas pelas concessionárias, possibilitando resposta à demanda.
2. Capacidade de adaptação: A rede deve adaptar-se às mudanças do ambiente em que está inserida, que podem ter influência sobre ela. Dessa forma, deve ter capacidade de autorrecuperação e redirecionamento de recursos.
3. Previsibilidade: Não deve ter somente a capacidade de adaptação, mas também a capacidade de identificar riscos potenciais antes que estes ocorram.
4. Otimização: A rede deve ter um monitoramento contínuo, a previsibilidade conforme já foi mencionada e controle pela interatividade. O sistema pode racionar o uso de seus ativos, dessa forma diminui o investimento destinado à construção de novas plantas.
5. Integração: As redes elétricas inteligentes devem reunir sistemas de monitoramento, controle, proteção e manutenção, assim como o Sistema de Gerenciamento de Energia (*EMS-Energy System Management*) e o Sistema de Gerenciamento de Distribuição (*DMS-Distribution Management System*).
6. Segurança de Dados: Uma rede elétrica inteligente deve fornecer segurança de todos os dados que por ela trafegam assim como todo sistema de informação.

Para que todos os requisitos sejam cumpridos é necessária a integração de tecnologias de medição eletrônica, sensores, comunicação e o uso da tecnologia da informação.

A medição eletrônica envolve todo o processo de distribuição elétrica, desde a sua geração até a sua distribuição, que possibilitará as concessionárias maior controle e monitoramento sobre toda a rede. Para os consumidores haverá a possibilidade de controlar sua demanda de carga com a instalação de um medidor inteligente, dessa forma ele será capaz de monitorar o seu consumo de energia diariamente.

As tecnologias adotadas para comunicação entre os nós dessa rede são fatores de extrema importância que estão sendo

estudadas ou já existem. Entre as formas de comunicação possíveis para Rede elétricas inteligentes se encontram as tecnologias *Power Line Communication* (PLC), *Wireless* (Comunicação de dados sem fio) e rede celular (VIEIRA; ARAÚJO, 2011).

A escolha da tecnologia está ligada a diversos fatores, como por exemplo, a distância entre consumidores e a central, localidade e viabilidade.

Para tanto, é necessário o uso de um protocolo aberto e padronizado para que grandes empresas não utilizem protocolos proprietários e fechados, criando monopólio. Utilizando protocolos abertos será possível a comunicação entre equipamentos de fabricantes diferentes.

Em suma, a proposta das Redes Inteligentes é trazer benefícios para as distribuidoras e consumidores. Dentre os benefícios, é importante mencionar o serviço mais eficiente a um custo menor com melhor detecção e conseqüentemente, com resposta mais rápidas à falhas e redução do consumo, devido a melhoria da gestão de energia. No Brasil, o monitoramento irá possibilitar a queda expressiva nas perdas sofridas pelas concessionárias com fraude e roubo de energia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo auxiliar o entendimento dos requisitos e conceitos no que se refere à geração, transmissão e distribuição de energia nas redes elétricas inteligentes e verificar a viabilidade técnica da rádio comunicação de uma concessionária de energia na faixa de 900 MHz.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o projeto de predição de cobertura de radiofrequência para Redes Ponto-multiponto e Redes *Mesh*;
- Utilizar a ferramenta *Radio Mobile* e avaliar os resultados obtidos a partir da simulação;
- Especificar os elementos de rede e infraestrutura, de acordo com as normas dos órgãos responsáveis.

1.2. METODOLOGIA

A fundamentação teórica apresentada neste trabalho será baseada no Modelo de interoperabilidade (SGIRM- *Smart Grid Interoperability*), proposto pelo IEEE. Na qual recomenda-se aplicar os conceitos e as tecnologias para a comunicação entre entidades do mesmo domínio ou de domínios diferentes. No capítulo 2 é proposto o uso de Redes de longas distâncias (WAN- *Wide Area Network*), *Mesh* e Ponto-Multiponto. Neste capítulo, será mencionado as tecnologias para as soluções de comunicação, tais como fibras ópticas, *wireless* e uso de rádio enlace.

Com base nestes argumentos, é proposta uma metodologia que será detalhada no capítulo 3, para sistematizar a implementação da Predição de cobertura de Radiofrequência para Rede elétricas inteligentes em 900 MHz.

Para ilustrar a metodologia, é apresentada na seção 3.1 a ferramenta utilizada para fazer a predição de cobertura. Na seção 3.2 e 3.3, são apresentadas redes ponto-multiponto e redes *mesh* e as análises com base nos resultados apresentados pela simulação, respectivamente. Todo o projeto foi feito com base na Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008 da Anatel, que será descrito na seção 3.4. Por fim, no capítulo 4 será feita uma análise comparativa entre os dois tipos de redes escolhidos como solução.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da forma como segue. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica. O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do trabalho. Finalmente no Capítulo 4 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ARQUITETURA DE SMART GRID

De acordo com ROHJANS (2010, p.583) o conceito de arquitetura para redes elétricas inteligentes:

O Smart Grid é uma rede elétrica na qual se incorpora tecnologias de sensoriamento, monitoramento e tecnologias da informação e telecomunicações, visando utilizar eficientemente a energia, considerando o comportamento e ações dos usuários conectados a ela, incluindo geradores, consumidores e aqueles que pertencem aos dois grupos ao mesmo tempo. Desta forma, automatiza-se a rede e se garante um sistema de potência sustentável e economicamente eficaz com poucas perdas e alto nível de segurança.

A rede elétrica atualmente tem uma abordagem conservadora com relação aos TICs (Tecnologia de Informação e Comunicação), visto que estes ajudam a executar e gerenciar estas redes, pois a maioria dos sistemas utilizados foram construídos para atender um determinado conjunto de requisitos. Como resultado, nas últimas três décadas, vários dispositivos e sistemas foram desenvolvidos com interfaces ponto-a-ponto. Esta prática se torna inviável para dispositivos que implementam as características necessárias para redes inteligentes de forma eficiente ao longo das próximas décadas. Isso ocorre porque as redes elétricas inteligentes possuem sensores pela rede com fluxo bidirecional.

A rede elétrica inteligente é um sistema complexo feito de sistemas inter-relacionados que possibilitam mais flexibilidade, comunicação integrada e controle avançado que permite a integração e interoperabilidade em larga escala de várias tecnologias e aplicações para usuários finais. Segundo o (SGRA, 2011, p. 11-12) a arquitetura de sistemas suporta as seguintes funcionalidades:

- Os componentes podem ser adicionados, substituídos ou modificar sem afetar o restante do sistema;
- Os componentes podem ser distribuíveis, ou seja, podem executar em vários servidores;
- Os componentes se comunicam por meio de chamadas de serviços ou mensagens;
- As interfaces dos componentes são definidas utilizando metadados padrão;
- As interfaces dos componentes são descobertas por aplicações desenvolvedoras;

- Um componente pode realocar outro com a mesma interface;
- Serviços podem ser utilizados várias vezes por diferentes aplicações ou pela mesma aplicação.

Alcançar tais capacidades requer grande interação entre sistemas. Por exemplo, a maioria das concessionárias depende dos clientes para relatar uma falha; no futuro, a infraestrutura de medição avançada (AMI- *Advanced Metering Infrastructure*) irá interagir com o sistema de gerenciamento de interrupções (OMS- *Outage Management System*) para prever e confirmar falhas. Uma vez que a OMS confirma uma queda de energia, o sistema de gestão de distribuição (DMS) calcula os passos de comutação necessários para isolar a área da falha e restaurar o serviço em tempo hábil. Uma equipe irá interagir diretamente com a OMS e DMS, respondendo automaticamente as ordens de serviço e fornecer uma estimativa detalhada de tempo de restauração. Enquanto isso, o cliente pode ser notificado sobre o status de interrupção em tempo real por meio de meios definidos pelo usuário (telefone celular, web, etc.). Como as capacidades dos avanços de infraestrutura de comunicação, inteligência adicional será implantada mais perto de instalações dos clientes, permitindo que as decisões proativas possam ser feitas localmente para evitar ou minimizar interrupções, informando os sistemas de serviços públicos e as concessionárias das ações implementadas localmente para o potencial ajuste e otimização dos recursos energéticos.

As capacidades da rede elétrica inteligente terão de ser modificadas para uma arquitetura que permita dispositivos e sistemas conectados interagirem de forma segura para troca de informação e controle. Os dispositivos de campo e equipamentos elétricos não devem apenas publicar dados para ajudar a melhorar o monitoramento em tempo real da rede elétrica, eles terão que acessar informações de outros dispositivos, bem como, permitir que os dispositivos respondam aos sinais de controle e solicitações de dados emitidos por aplicações e sistemas responsáveis pelo monitoramento e controle de rede. Esta dispersão de dados em toda a rede representa um desafio significativo para o gerenciamento de dados de utilidade. A qualidade dos dados também é uma preocupação, exigindo dispositivos inteligentes para serem adequadamente configurados e mantidos. O controle de configuração do dispositivo é melhor executado por uma gestão de ferramenta comum encarregada de provisionamento de componentes e de-provisionamento. No entanto, a infraestrutura de comunicação futuramente deve ser mais robusta e dispor de canais de alta performance de comunicação, pois a grande quantidade de dados, fontes de dados e os consumidores de dados requerem inteligência da rede para ter aspectos descentralizados e centralizados:

- Os sistemas embarcados descentralizados e as aplicações serão responsáveis pela análise, filtragem e tomada de ações específicas com base nos dados fornecidos pelos dispositivos de campo locais;
- Os sistemas centralizados serão responsáveis pela coordenação dos sistemas descentralizados, garantindo a confiabilidade geral e a estabilidade da rede.

Com aplicações e sistemas fisicamente dispersos na rede para reduzir o custo de implantação e manutenção, cada componente do sistema deve satisfazer quatro princípios fundamentais da arquitetura de serviços em camadas:

- Os componentes individuais podem ser adicionados, substituídos ou modificados sem impacto para outros sistemas;
- Os componentes são distribuíveis, a comunicação por mensagens ou chamadas de serviço;
- Interfaces entre os componentes podem ser descobertos e alavancar metadados padrão;

Serviços de componentes podem ser facilmente reutilizados por diferentes aplicações.

Segundo a norma IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), 2030 (2011), para conseguir atingir tais objetivos é necessário que a rede consiga cumprir os seguintes requisitos¹:

- **Padronização:** Os elementos da infraestrutura e a maneira na qual eles estão relacionados são claramente definidos, publicados, útil, aberto e estável ao longo do tempo.
- **Aberto:** A infraestrutura é baseada na tecnologia disponível para todos os parceiros especializados em uma base não discriminatória. Provedores de tecnologia tem um plano de evolução em direção à abertura e padronização.
- **Interoperabilidade:** A padronização de interfaces dentro de uma infraestrutura está organizada como: O sistema pode ser facilmente adaptado para uma geografia

¹ Tradução própria do IEEE 2030-2011 para efeito de amostragem neste trabalho.

particular, aplicações específicas ou circunstâncias de negócios. Porém adaptação não impede as comunicações necessárias para os elementos de infraestrutura.

- **Segurança:** A infraestrutura é protegida contra acesso não autorizado e interferência com operações normais. Implementa privacidade de informação de maneira consistente e outras políticas de segurança.
- **Extensibilidade:** A infraestrutura não é designada com restrições embutidas para estender suas capacidades, quando novas aplicações são descobertas e desenvolvidas.
- Para alcançar esses objetivos:
 - -Os dados são definidos e estruturados de acordo com um *CIM*².
 - -São separados as definições de dados dos métodos usados para entregá-lo.
 - -Os componentes podem anunciar e descrevê-los para outros componentes.
- **Escalabilidade:** A infraestrutura pode ser expandida por todo o sistema de energia sem limitações inerentes à sua dimensão.
- **Gerenciabilidade:** Os componentes da infraestrutura podem ter suas configurações ativadas e gerenciadas, falhas podem ser identificadas e isoladas, e os componentes são gerenciados remotamente.
- **Atualização:** A configuração, software, algoritmos e credenciais de segurança da infraestrutura podem ser atualizadas de forma segura. Isso é um aspecto particular de gerenciamento.
- **Compartilhamento:** A infraestrutura utiliza recursos que oferecem economias de escala, minimizar a duplicação de esforços e, se devidamente organizada, incentivar a introdução de soluções inovadoras competitivas.
- **Ubiquidade:** Usuários autorizados da rede podem tirar vantagens da infraestrutura e o que ela fornece independente de barreiras geográficas ou de outros tipos.
- **Integridade:** A infraestrutura em um alto nível de disponibilidade, desempenho e confiabilidade. O redirecionamento automático da comunicação, opera durante quedas de energia, e armazena dados em intervalo suficiente para recuperar-se de eventos de falhas.

² É um padrão que possibilita a troca de informações para ajudar no gerenciamento de sistemas elétricos. O CIM (*Common Information Model*) é um dos mais importantes, pois teve uma aceitação rápida como um modelo de semântica comum para unificar e integrar os dados de vários sistemas envolvidos no suporte de operações de energia elétrica em tempo real.

- **Fácil de usar:** Existem regras de lógicas, consistentes e de preferência intuitivas e procedimentos para a utilização e gestão da infraestrutura. O sistema maximiza as informações e opções disponíveis para os usuários da rede inteligente, minimizando as ações que devem tomar, se optar fazê-lo.

2.2. INTEROPERABILIDADE EM SMART GRID

De acordo com a norma (IEEE 2030, 2011) interoperabilidade é a capacidade de duas ou mais redes, dispositivos, aplicações ou componentes de trocar informações de forma segura e eficaz.

No contexto de Redes Inteligentes, a interoperabilidade oferece a capacidade de ter comunicação efetiva, mesmo que seja utilizado sistemas ou infraestrutura diferentes. Para obter esta característica é necessário cumprir os seguintes requisitos:

- Componentes de hardware ou software, sistemas e plataformas permitem que a comunicação entre dispositivos ocorra. Esse tipo de interoperabilidade geralmente é centrado em protocolos e infraestrutura necessária para o funcionamento desses protocolos;
- Formato de dados, onde as mensagens transferidas por protocolos de comunicação precisam ter sintaxe e codificação bem definida;
- Interoperabilidade no conteúdo da mensagem, ou seja, as duas partes da comunicação (transmissor e receptor) devem entender o significado do conteúdo da mensagem.

A interoperabilidade em rede elétrica inteligente irá permitir que consumidores e outras partes interessadas comprem hardware e software no mercado e incorpore-os em diferentes áreas da rede para que funcionem com outros componentes existentes.

A transição de redes legadas para redes mais inteligentes e seguras, é um dos objetivos da rede elétrica inteligente, que precisa de colaboradores, incluindo consumidores e comunidades, desenvolverem padrões de redes inteligentes que estejam próximo de soluções baseadas em interoperabilidade e processos de negócios flexíveis.

2.3. TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO

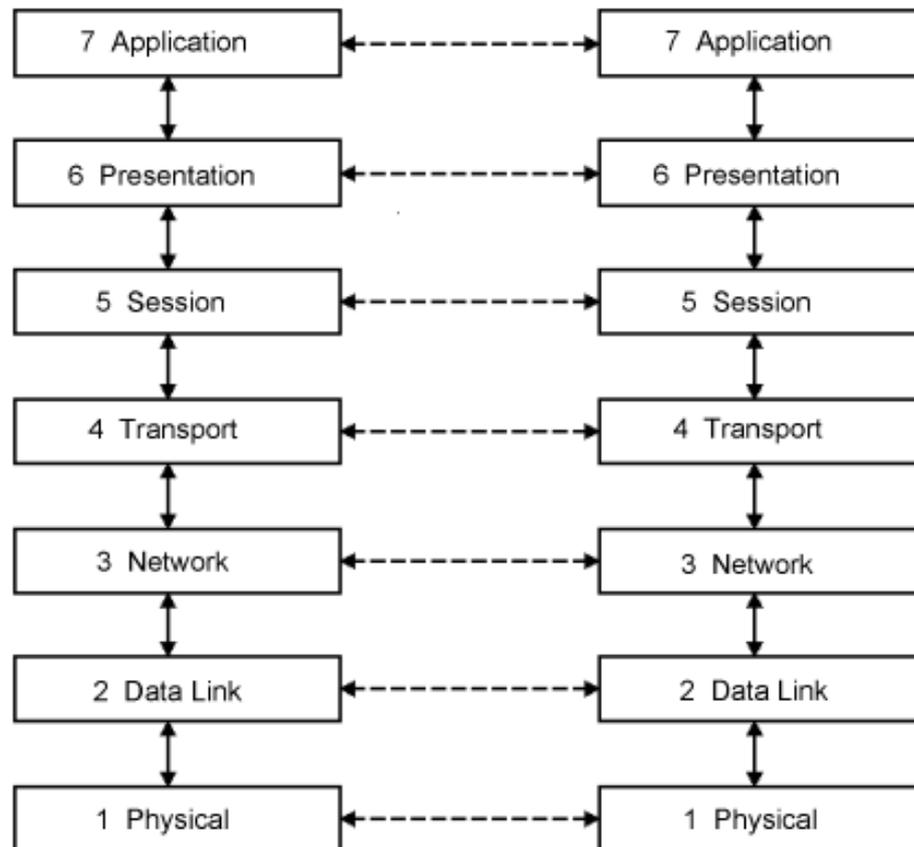
O desenvolvimento de rede elétrica inteligente será uma evolução contínua, logo é necessário adaptar protocolos legados para as novas capacidades dos TICs. A interoperabilidade em TICs tem melhorado por meio do uso de protocolos em camadas de acordo com o modelo OSI (*Open Standard Interconnection*) de referência.

Dentro do modelo OSI, as funções são colocadas em sete camadas e as camadas são interconectadas com interfaces de serviços. Dessa forma, a tarefa de substituir tecnologia de comunicação com tecnologias alternativas é mais simples.

Por exemplo, os protocolos de transporte foram criados para funcionar com vários tipos de dados que estejam em conformidade com a interface de serviço. Muitos protocolos legados e de comunicação na rede podem se conectar diretamente a aplicação com uma tecnologia de camada 2, um circuito de telefone dedicado, muitos desses links de comunicação podem existir na rede.

Na evolução de protocolos e aplicações existentes para a arquitetura de comunicação em camadas, os desenvolvedores podem precisar adaptar o protocolo existente para estar em conformidade com a camada de transporte de uma rede de comunicação em camadas modernas conforme a Figura 1.

Figura 1: Modelo OSI.



Fonte [9].

2.4. PRIVACIDADE

É associada à coleta, propriedade, controle de acesso, distribuição, modificação, reconstrução, adaptação e disposição de informação pessoalmente identificável (PII- *personally identifiable information*) relacionadas a indivíduos ou empresas.

Novas tecnologias e aplicações como medidores inteligentes, aparelhos inteligentes ou sistemas de gerenciamento de consumo inteligentes (EMS) do cliente poderão oferecer riscos de invasão de privacidade. O reconhecimento de sinais elétricos de aparelhos inteligentes podem relatar atividades em um determinado tempo (por meio de um log) por aparelhos ou serviços

provedores para análise de eficiência, também revelam detalhes do estilo de vida do cliente que pode ser caracterizado como PII.

Novos recursos são incluídos em redes inteligentes, preocupações sobre privacidade devem existir, para reduzir ou evitar mitigação jurídica. Avaliação de impacto de privacidade é uma análise de como o PII é coletado e gerenciado para:

- Assegurar que a manipulação está de acordo com aplicações legais, regulatórias e com requisitos de políticas sobre privacidade;
- Determinar os riscos e efeitos de coletas, manutenção e disseminação de informação de forma identificável em um sistema de informação;
- Examinar, avaliar proteções e processos alternativos para manipular informação para diminuir potenciais riscos de invasão de privacidade.

2.5. SEGURANÇA

Para cumprir com os requisitos de privacidade as redes inteligentes devem implementar medidas de segurança que focam em proteger pessoas e ativos tangíveis e intangíveis.

Um intruso pode de forma intencional ou não intencional, causar a energização de uma linha de transmissão que oferece perigo a vida das pessoas. De forma análoga, uma linha de transmissão pode ser desenergizada de alguma forma que causaria prejuízo para os sistemas de controle e transmissão e possivelmente comprometer a segurança dos funcionários/clientes.

No contexto de Redes inteligentes para o NIST dois componentes são tratados: a segurança cibernética e segurança física.

Tradicionalmente, a segurança cibernética para a tecnologia da informação (TI) concentra-se na proteção dos sistemas de informação e de acesso não autorizado, utilização, divulgação, interrupção, modificação ou destruição, a fim de garantir a confidencialidade, integridade e disponibilidade. Em redes elétricas inteligentes, há necessidade de expandir esse enfoque para abordar o sistema de energia combinada, de TI e sistemas de comunicação, a fim de manter a confiabilidade, a segurança para reduzir o impacto dos ataques coordenados e proteger a privacidade dos consumidores. A segurança cibernética deve incluir um equilíbrio de ambas as tecnologias, processos a alimentação, sistemas de segurança em TI e em operações de sistemas de

potência e governança. Cuidados devem ser tomados para aplicar práticas diretamente de um setor, por exemplo, o setor de TI ou de comunicações para o setor de energia, pois isso pode prejudicar a confiabilidade e aumentar o risco. Isso ocorre porque as exigências para o setor de energia, para o sincronismo de comunicações, por exemplo, podem ser diferentes dos setores de TI e comunicações.

A segurança física é também motivo de preocupação, pois aborda um conjunto diferente de ameaças, vulnerabilidades e mais riscos do que a segurança da informação. Muitas categorias de segurança física existem, incluindo controle de acesso mecânico e eletrônico, detecção de intrusão e monitoramento de vídeo. Para garantir segurança física é necessário fazer uma avaliação dos princípios básicos, como acesso seguro ao equipamento e ao processamento de imagem a partir da zona de controle. Os mecanismos de segurança física servem para proteger as pessoas, dados, equipamentos, sistemas, instalações e muitos outros ativos. Além da proteção de ativos, os mecanismos de segurança física incluem: concepção e *layout* do lugar; prédio; instalação; salas de informática; *Data Center*; janelas; portas; cercas; estacionamentos; componentes ambientais; prontidão de resposta a emergências; Controle de energia; proteção contra fogo; aquecimento, ventilação e ar condicionado; guardas; cães; etc.

Segundo o (IEEE 2030,2011), para prevenir falhas de segurança como, o uso não autorizado, indevido, modificação ou negação do uso de dados, devem ser tomadas algumas medidas³:

- **Avaliação de risco:** O risco é o potencial de perda que requer proteção. Se não existe o risco, não há nenhuma necessidade de segurança. Quando o risco é examinado, as vulnerabilidades e ameaças devem ser identificadas. Esta é fase de avaliação que inclui a análise de ativos, ou seja, identificar o valor de informações e ativos de uma organização, vulnerabilidades e riscos potenciais (devido a ameaças), as medidas de redução de risco e as decisões relacionadas com a aceitação, a evasão ou transferência do risco. Essa atividade é realizada por uma equipe de análise de risco seguindo a abordagem de gerenciamento de risco. Esta etapa caracteriza tanto o processo como o resultado de análise e avaliação de riscos. A avaliação de risco é aplicada à informação, comunicações e energia. Durante esta fase, os ativos críticos devem ser identificados.

³ Tradução própria do IEEE 2030-2011 para efeito de amostragem neste trabalho.

- **Políticas:** Política de segurança é um conjunto de princípios básicos para seguir relacionado ao estabelecimento de o que significa ser seguro para um sistema, organização, ou outra entidade. Definem como a segurança deve ser implementada por meio de mecanismos próprios para usar, proteger a informação e sistemas. Inclui vários aspectos, tais como: capacidade técnica, melhores práticas, medidas preventivas, respostas a incidentes, administração e gerenciamento.
- **Implantação:** As políticas de segurança, padrões e medidas para ser eficaz deve ser implementadas por uma organização praticar o devido cuidado e diligência.
- **Treinamento:** É o mecanismo para fornecer as informações necessárias para os funcionários.
- **Auditoria:** Esta função aumenta a probabilidade de que os controles são configurados e monitorados corretamente com relação à política. As funções incluem a política de auditorias: adesão, avaliações periódicas e novas e testes de intrusão.

Neste sentido, o nível de segurança é medido em níveis de impacto para cada objetivo de segurança, conforme mencionado anteriormente: Confidencialidade, integridade e disponibilidade da informação. Os níveis de impacto podem ser baixo, moderado ou alto e representam o impacto em operações, ativos ou indivíduos. A seguir serão apresentados os níveis de impacto de acordo com o objetivo de segurança.⁴

- **Confidencialidade**

- Baixo: Divulgação não-autorizada de informação pode ter efeito limitado a operações organizacionais, ativos ou indivíduos.
- Moderado: divulgação não-autorizada de informação pode ter efeito adverso grave a operações organizacionais, ativos ou indivíduos.
- Alto: Divulgação não-autorizada de informação pode ter efeito adverso grave ou catastrófico a operações organizacionais.

- **Integridade**

⁴ Tradução própria do IEEE 2030-2011 para efeito de amostragem neste trabalho.

- Baixo: modificação ou destruição não-autorizada de informação pode ter efeito negativo limitado em operações organizacionais, ativos ou indivíduos.
- Moderado: modificação ou destruição não-autorizada de informação pode ter efeito negativo grave em operações organizacionais, ativos ou indivíduos.
- Alto: modificação ou destruição não-autorizada de informação pode ter efeito negativo grave ou catastrófico em operações organizacionais, ativos ou indivíduos.
- **Disponibilidade**
- Baixo: A interrupção do acesso ou uso de informação ou de um sistema de informação poderia ser esperado para ter um efeito limitado sobre as operações de organização, ativos organizacionais ou indivíduos.
- Moderado: A interrupção do acesso ou uso de informação ou de um sistema de informação pode ter um efeito grave nas operações organizacionais, ativos organizacionais ou indivíduos.
- Alto: A interrupção do acesso ou uso de informação ou de um sistema de informação pode ter um efeito adverso grave ou catastrófico sobre operações organizacionais, ativos organizacionais, ou indivíduos.

Gestão de segurança inclui gerenciamento de risco, planos e políticas de segurança, procedimentos, padrões, normas, diretrizes, base de dados, classificação de informação, organização de segurança e educação de segurança. O desenvolvimento para o projeto e implantação de Redes Inteligentes devem ser adaptados de acordo com as necessidades de cada organização ou aplicação.

Uma serie de padrões, ISO/EIC 27000, é usado para normas e garantias de segurança além dos padrões e orientações para Segurança cibernética em Smart Grid (NISTIR 7628, 2014, Vol. 1).

2.6. CONFIABILIDADE

Um dos benefícios da rede elétrica inteligente é o aumento da confiabilidade do sistema de energia elétrica, de acordo com o IEEE, 1989, “*Confiabilidade é a capacidade de um componente ou sistema para executar funções requeridas sob condições estabelecidas por um determinado período de tempo.*”

Os benefícios referentes à confiabilidade, dentre eles, estão a redução de custo operacional das concessionárias devido a um número menor de deslocamento de equipes de manutenção, menor demanda de *call center* e de recursos para resposta a apagões.

Para os consumidores, o aumento da confiabilidade diminui os inconvenientes devido a apagões e danos em equipamentos eletrônicos decorrentes a problemas na qualidade da energia oferecida.

Nesta seção alguns itens serão importantes no quesito de confiabilidade em rede elétrica inteligente:

- Entrega confiável de energia elétrica;
- Confiabilidade de dados;
- Confiabilidade de Comunicação.

A confiabilidade do sistema de entrega de energia é medida utilizando índices de confiabilidade chamados: índice de duração de interrupção média do sistema (SAIDI- *System Average Interruption Duration Index*) e Índice de frequência de interrupção média do sistema (SAIFI- *System Average Interruption Frequency Index*).

Estes índices são medidos e utilizados pelas agências reguladoras para avaliar a confiabilidade de energia elétrica fornecida pelas concessionárias. Eles englobam o desempenho da distribuição, transmissão e geração. Um objetivo típico de qualquer concessionária é manter os valores destes índices pequenos. Uma vez que algumas dessas medidas não podem incluir falhas relacionadas com o clima, métricas de confiabilidade de energia elétrica, que incluem todos os dados de falha e reparo, devem ser usadas.

Para melhorar a confiabilidade na distribuição de energia são necessários vários dados de sensores e controle por meio de links baseados nas TICs. Algumas aplicações precisarão de altos níveis de confiabilidade (por exemplo, eliminação de falhas ou restauração automática de energia) enquanto outras aplicações poderão suportar interrupções longas ou frequentes sem afetar a confiabilidade da energia elétrica (por exemplo, leitura de medidores).

A confiabilidade de dados é levada em consideração pelas TICs para determinar as especificações de implementação necessárias para alcançá-la. As métricas de confiabilidade para ser

usada e os intervalos de possíveis valores devem ser entendidos por todos, para que este processo funcione de forma eficaz. Algumas das características de confiabilidade de dados usados inclui o seguinte:

- Prioridade;
- Disponibilidade;
- Nível de garantia;
- Capacidade de resistir a eventos de baixa frequência de alto impacto.

Em redes inteligentes, a confiabilidade em comunicação não pode ser quantificada apenas no quesito de falta de energia. Mas sim no tempo de comunicação entre a central e o cliente, por exemplo.

É importante ressaltar que se um critério de fluxo de dados não for atendido, pode ser considerado perda de dados ou interrupção de serviço. Por exemplo, se o tempo de transferência de informação é especificado como um máximo de 1,0 s para um determinado fluxo de dados e os dados são entregues após 1,3 s, isso é considerado uma interrupção mesmo que os dados estejam íntegros.

A integração de novas tecnologias pode contribuir para o aumento da confiabilidade. Entre elas, destaca-se a infraestrutura de medição com medidores inteligentes (AMI) que possuam comunicação com a central de medição da concessionária e possibilita a detecção de problemas de energia e perda de potência, habilitando os operadores a diagnosticar e restaurar o fornecimento rapidamente.

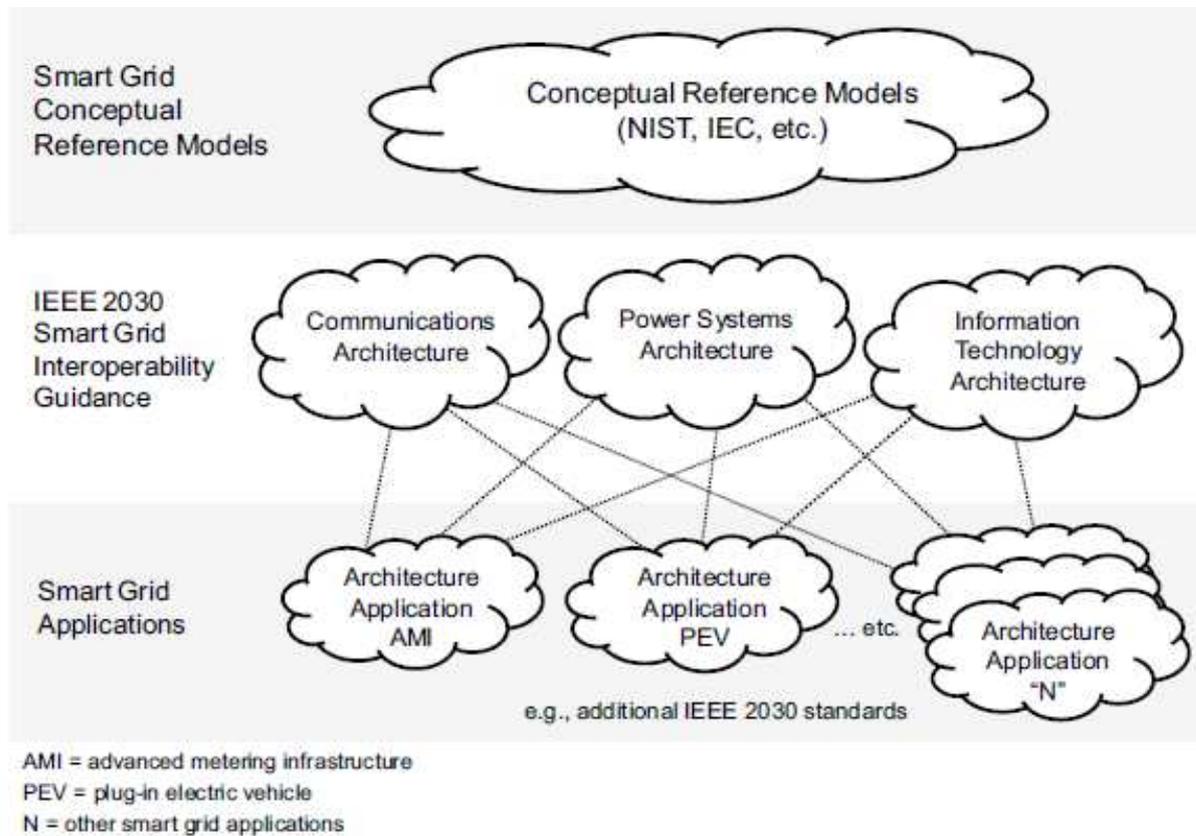
2.7. MODELO DE REFERÊNCIA SGIRM

Tem como objetivo apresentar um projeto interoperável e implementações alternativas para sistemas que facilitem a troca de informações entre elementos da rede inteligente, cargas e aplicações de uso final. Na Figura 2, é possível visualizar a da arquitetura de uma rede elétrica inteligente sob três perspectivas:

1. Sistemas de energia;
2. Comunicações;

3. Tecnologia de informação.

Figura 2: Modelo de Interoperabilidade SGRIM.



Fonte [9].

O SGIRM contém as entidades e relacionamentos dentro do ambiente da rede inteligente e define as interfaces sem determinar tecnologias que serão utilizadas. A arquitetura de três componentes é projetada para acomodar a evolução de equipamentos atuais para a implementação no futuro, sem a obsolescência indevida.

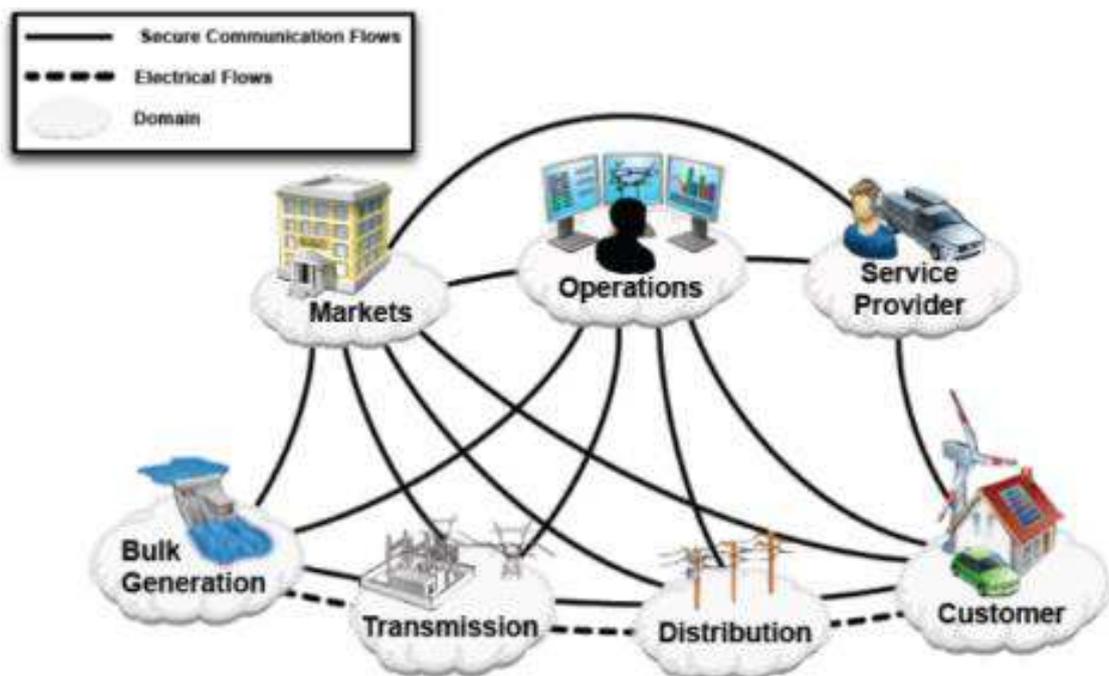
O conceito da ferramenta SGIRM é permitir extensibilidade, escalabilidade e capacidade de atualização. Este modelo consiste de dois componentes:

1. Perspectivas Arquitetônicas de Interoperabilidade (IAP- *Interoperability Architectural Perspectives*) da rede elétrica inteligente;
2. Características do fluxo de dados entre as entidades dentro dessas perspectivas.

O conceito de IAPs refere-se principalmente aos requisitos funcionais lógicos dos sistemas de energia e das interfaces de tecnologia da informação e comunicação, dessa forma tem-se três IAPs (IEEE 2030, 2011):

- **Sistemas de energia IAP (PS-IAP):** Sua ênfase é a produção, entrega e consumo de energia elétrica, incluindo aparelhos, aplicativos e conceitos operacionais. Esta perspectiva define sete domínios: Geração massiva, Transmissão, Distribuição, Prestadores de serviços, Mercados, Controle / Operações e Consumidores.
- **Tecnologia de comunicações IAP (CT-IAP):** A ênfase é a conectividade entre sistemas, aplicações e dispositivos no contexto de rede elétrica inteligente que inclui comunicações de redes, mídias, desempenho e protocolos;
- **Tecnologia de informação IAP (IT-IAP):** A ênfase é o controle de processos e gestão de fluxo de dados. A perspectiva inclui tecnologias de informação que armazenam, gerenciam, processam e controlam a segurança do fluxo de dados.

Figura 3: Domínio das redes elétricas inteligentes.



Fonte [12].

Cada uma das IAPs é composta de domínios, entidades e interfaces e/ou fluxos de dados, representado na Figura 3 (NIST, 2010). Os domínios comuns a todas as IAPs são⁵:

- **Geração.** A geração de energia em grandes quantidades. Inclui-se aqui armazenamento de energia para ser distribuída posteriormente.
- **Transmissão.** Os transportadores de grande quantidade de energia por longas distâncias.
- **Distribuição.** As distribuidoras de energia elétrica para Consumidores.
- **Prestadores de serviços.** As organizações que prestam serviços de infraestrutura aos Consumidores.
- **Mercados.** Os operadores e os participantes nos mercados da eletricidade.
- **Controle / operações.** A gestão do movimento de energia.
- **Consumidores.** Os usuários finais de energia elétrica.

As Entidades (dispositivos, redes de comunicação, sistemas de computadores, programas de software, etc.) são geralmente localizadas no interior de um domínio e estão ligados entre si por meio de uma ou mais interfaces. As Interfaces são conexões lógicas de uma entidade para outra que suportam um ou mais fluxos de dados implementados com um ou mais enlaces de dados. Os Fluxos de dados são usados em vez de interfaces na IT-IAP. Estes fluxos são comunicações de nível de aplicação das entidades que fornecem dados para entidades que os consomem. Cada perspectiva arquitetônica tem entidades que mais de perto mapeiam para sua tecnologia. No entanto, cada entidade pode mapear entidades de outra perspectiva arquitetônica.

2.8. TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO IAP (CT-IAP)

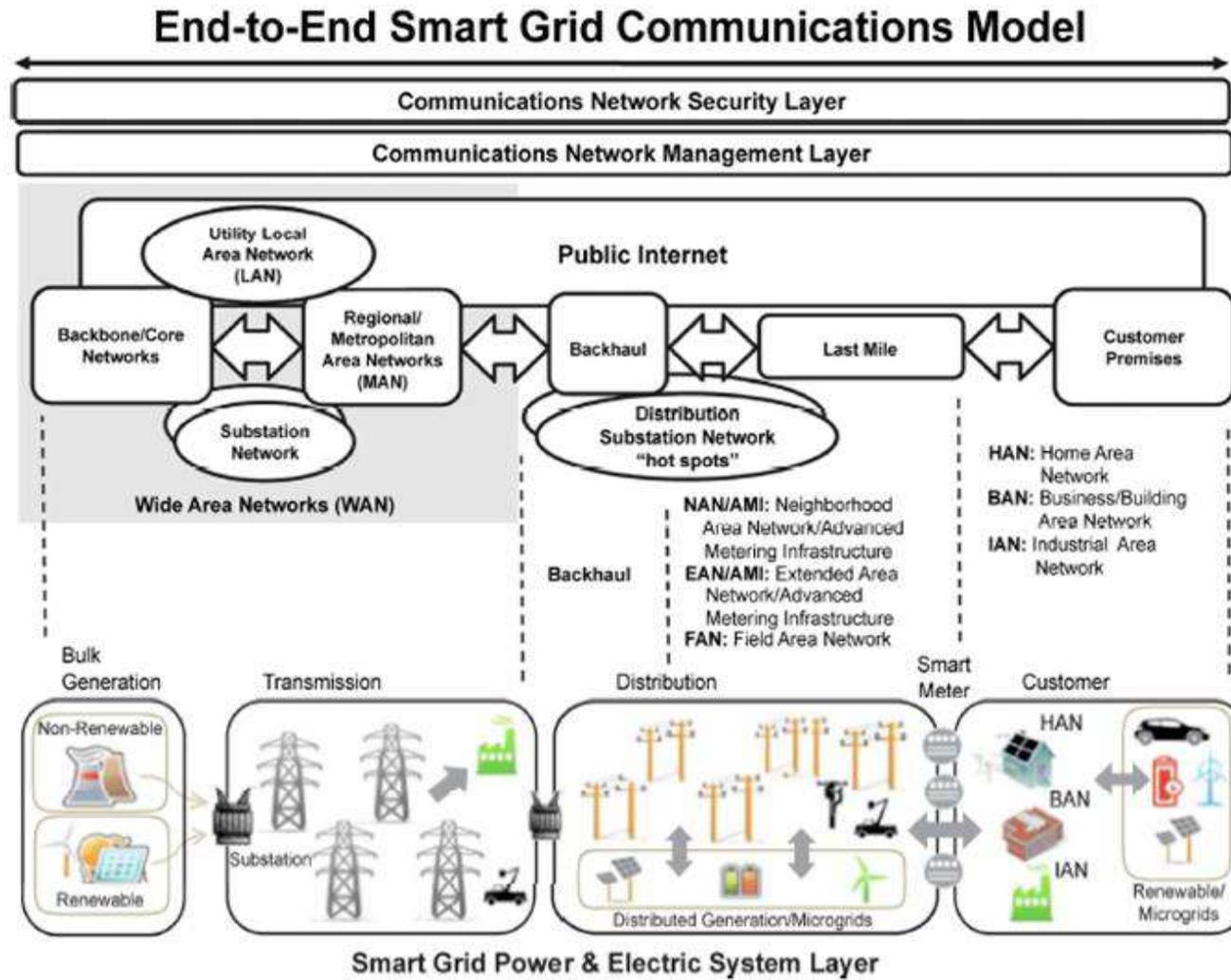
A tecnologia de comunicação do SGIRM permite vários tipos de redes para os setes domínios citados anteriormente: Geração, transmissão, distribuição, prestadores de serviços, mercados, controle/operações e consumidores. Em alguns casos, o mesmo nome pode ser utilizado para a mesma subrede funcional. Por exemplo, nas redes de instalações dos clientes (CPNs) variam no tamanho e quantidade de dispositivos conectados, mas são tipicamente classificadas como *Home*

⁵ Tradução própria do NIST, 2010 para efeito amostragem neste trabalho.

Area Network (HAN), *Bussiness Area Network* (BAN) ou *Industrial Area Network* (IAN) e não há demarcação dessas redes usadas no domínio de distribuição. Alguns caminhos de comunicação estão entre pontos dentro do mesmo domínio e outros caminhos de comunicações estão entre domínios diferentes e pode incluir várias subredes.

Segundo SILVA (2015), O SGIRM CT-IAP apresentada nesta subseção é desenvolvido por meio do processo e visão descrito na Figura 4. A figura destina-se a simplesmente representar o CT-IAP e sua relação com diferentes processos de entrada / saída que o fazem interativo e dinâmico. As arquiteturas das concessionárias podem ser mapeadas juntamente com casos de uso e com a consideração do sistema legado. Da mesma forma, o fluxo de dados de aplicação pode ser mapeado sobre a perspectiva de comunicação. O CT-IAP apresentado pode incluir novas tecnologias assim que elas estiverem disponíveis e também pode ser usado para desenvolver arquiteturas-alvo por parte dos desenvolvedores. É uma representação visual da maioria dos sistemas relevantes inteligentes de comunicações de rede, subsistemas e elementos-chave com uma arquitetura genérica, flexível e dinâmica que vai evoluir à medida que a tecnologia avança.

Figura 4: Modelo de Comunicação IEEE 2030-2011.



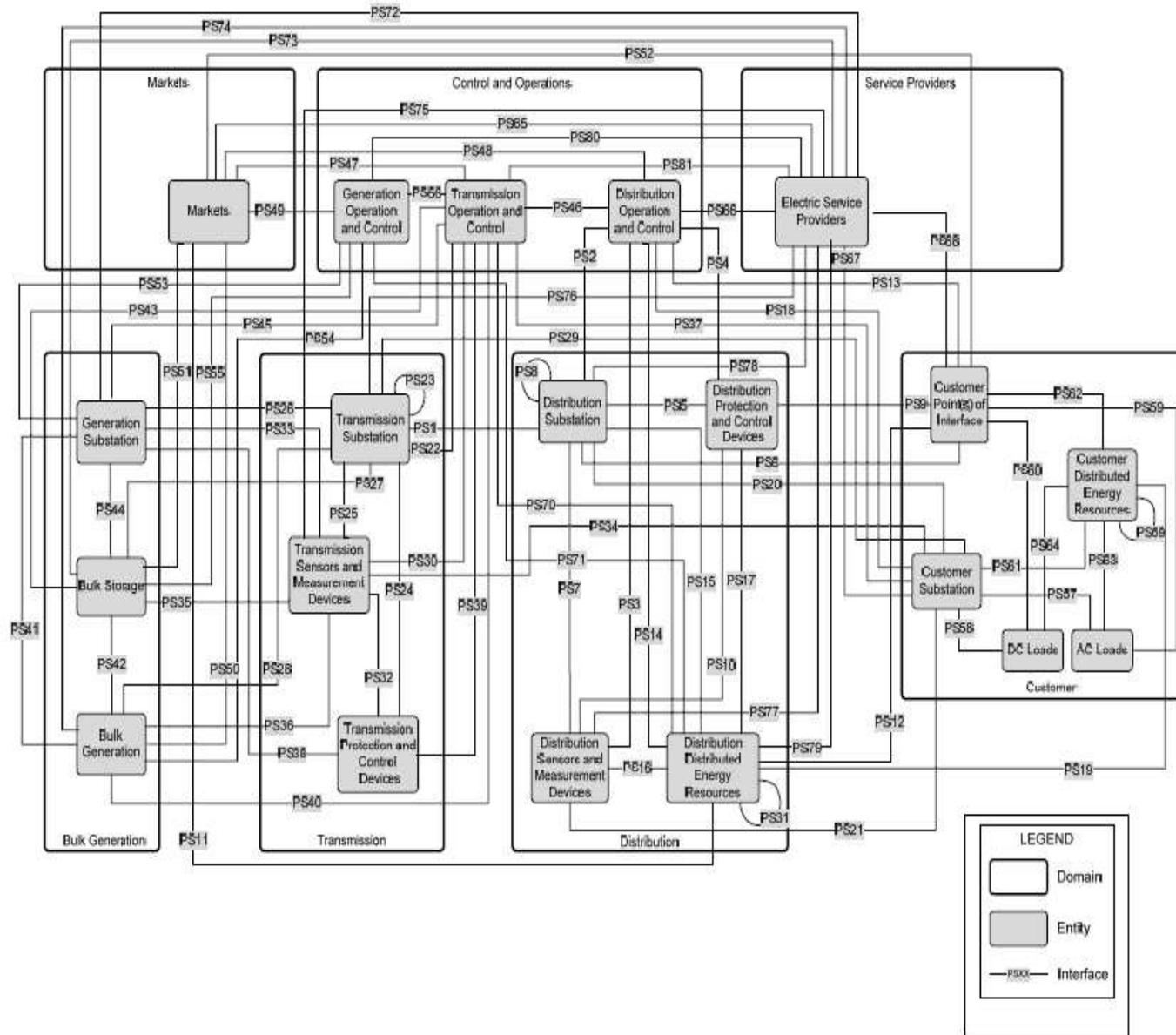
Fonte [9].

Na Figura 4, é possível identificar alguns dos domínios conforme mencionado anteriormente e a definição dos segmentos de rede de comunicações, separados logicamente e funcionalmente com base na CT-IAP definidos na norma. As redes nas instalações do cliente podem ter tamanhos diferentes e podem ser divididos em *Home Area Network* (HAN), *Business Area Network* (BAN) ou *Industrial Area Network* (IAN), dependendo do tipo de cliente. As redes de distribuição de subestações podem ser classificadas de acordo com diferentes funcionalidades em *Neighborhood Area Network* (NAN), o *Extended Area Network* (EAN), *Field Area Network* (FAN) ou *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), este último como uma designação legada. As redes de subestação são definidas como *Wide Area Network* (WAN), uma vez que representam as redes de dados com alcance mais amplo. Esta camada de comunicações associada ao CT-IAP também considera o uso transversal das redes baseadas na Internet pública ao longo dos quatro domínios. Apresenta-se como uma alternativa, já que as concessionárias e outras partes interessadas podem estar relutantes em tais soluções em redes de comunicações não podem ser detidas por eles. A necessidade de gerenciamento de rede de comunicações e segurança é enfatizada também como um tema transversal.

O CT-IAP, representado pela Figura 5 considera várias redes de comunicações, inter-domínio ou intra-domínio, as entidades estão ligadas uma a outra por meio de interfaces. O número de interfaces conectando uma ou mais entidades representam as alternativas de interconexão disponíveis atualmente e as que serão desenvolvidas.

As entidades de comunicação são ou sistemas de rede fixa ou sem fios ou elementos do sistema de comunicações relevantes que se destacam como importante no contexto de toda a arquitetura do sistema. As interfaces são ainda definidas como interconexões genéricas que estabelecem o nível mínimo de requisitos de interoperabilidade entre duas ou mais entidades. As interfaces são, então, especificadas em termos de exigência de desempenho, nível de segurança, camada de protocolo e outras necessidades mais específicas que serão identificados no futuro. As entidades serão descritas com as especificações do IEEE 2030, 2011.

Figura 5: Modelo de Comunicação e as entidades do SGIRM.



Fonte [9].

- **Rede de *backhaul*:** Conecta os serviços de controle/operações, incluindo a Infraestrutura de Medição Avançada (AMI), por meio de redes WANs, as redes de distribuição de subestações, Field Area Network (FAN), pontos de acesso de distribuição de redes NANs que se localizam no cliente, etc.
- **Rede de geração de energia:** A rede utilizada dentro de uma instalação de geração em massa que se conecta a várias redes. Facilitam a geração de energia em grande escala ligado ao lado da rede de geração-transmissão.
- **Rede de energia distribuída:** Sistemas de geração e armazenamento dos clientes estão ligados ao CPN (HAN, BAN, IAN) por meio de interfaces de serviços energéticos (FEIN) e / ou submedidores elétricos, usando a rede cabeada e / ou redes sem fio.
- **Ponto de Acesso de distribuição:** É o dispositivo que recolhe e agrega dados provenientes de ou para outros dispositivos ou usuários por meio das NANs. Também está conectada com a rede de *backhaul*.
- **Rede de subestação de distribuição:** Interconecta dispositivos em uma subestação de distribuição (por exemplo, composta de LANs que contêm SCADA, IEDs(*Intelligent Electronic Device*), remotas unidades terminais (RTUs-*Remote Terminal Units*), PMUs (*Phasor Measurement Units*), e outros dispositivos de campo que precisam ser controlados e monitorados por meio da rede de *backhaul*).
- **Rede do Consumidor:** Representam as redes do lado do consumidor: HAN, BAN ou IAN.
- **Microgrid:** Contém todas as fontes de energia renováveis e não-renováveis (e.g., eólica, solar, diesel) não faz parte da geração de energia centralizada. Estas redes podem ser conectadas pelas de redes LANs.
- **Rede de distribuição:** Rede de comunicações sobrepostas na rede elétrica. Pode ser conectada por tecnologias cabeadas ou sem fio.

- **Field Area Network (FAN):** Conecta à rede de as subestações, redes de distribuições e *Microgrids*. Incluindo armazenamento de energia para controle e centro de operações.
- **Mercado:** Fornecerá as variações de preço de energia para os consumidores, estabelecendo um mercado de energia de vendedores e clientes.
- **Neighborhood Area Network:** Conecta medidores inteligentes, dispositivos de alimentação, *microgrids*, incluindo armazenamento de energia, para dispositivos de controle e centro de operações.
- **Wide Area Network:** Uma rede que conecta outras redes, incluindo rede de geração, subestação, *backhaul*.

3. PROJETO

O objetivo deste projeto é fazer uma predição de cobertura de radiofrequência para Smart Grid. Os componentes deste projeto são as subestações de energia da concessionária CEMAR e 45 religadores, que estarão localizados em postes espalhados pela cidade de São Luís - MA. Na Figura 6, são apresentados os rádios marca GE modelo Transnet para comunicação dos religadores com o supervisor (SCADA- *Supervisory Control and Data Acquisition*).

Figura 6: Rádio Transnet.



Fonte [4]

As subestações da concessionária de energia CEMAR escolhidas no projeto são: Cohafuma, Centro, Operação, Turu e BR. Foram escolhidos esses lugares para que todos os religadores possam ter comunicação com uma subestação mais próxima. Geralmente, nas subestações existem torres de

transmissão, dessa forma há possibilidade de viabilizar o projeto e baratear o custo para a concessionária de energia.

Feito isso, as informações dos religadores serão enviadas para a subestação do Cohafuma, onde é a central de gerenciamento, monitoramento e controle.

Na Figura 7, é possível observar as coordenadas das subestações e dos religadores.

Figura 7: Coordenadas dos Religadores e subestações.

Unit name	Latitude(°)	Longitude(°)
rel1	-2.583565	-44.2098
rel2	-2.527205	-44.30599
rel3	-2.541753	-44.28271
rel4	-2.558079	-44.26109
rel5	-2.574146	-44.23825
rel6	-2.55058	-44.21945
rel7	-2.546697	-44.23576
rel8	-2.530855	-44.25805
rel9	-2.508942	-44.24118
rel10	-2.549044	-44.15481
rel11	-2.521362	-44.22337
rel12	-2.696578	-44.21799
rel13	-2.619313	-44.24206
rel14	-2.634345	-44.26877
rel15	-2.60139	-44.18306
rel16	-2.627717	-44.3518
Concentrador	-2.700552	-44.31078
rel18	-2.728427	-44.35876
rel19	-2.568424	-44.18008
rel20	-2.574535	-44.26662
rel21	-2.65	-44.2532
rel22	-2.524256	-44.19315
rel23	-2.589607	-44.14894
rel24	-2.543979	-44.25388
rel25	-2.546446	-44.32077
rel26	-2.565834	-44.20764
rel27	-2.67659	-44.31993
rel28	-2.565781	-44.3316
rel29	-2.556225	-44.23857
rel30	-2.600874	-44.29241
rel31	-2.627465	-44.15707
rel32	-2.716252	-44.27798
rel33	-2.675239	-44.26535
rel34	-2.53349	-44.26102
rel35	-2.576312	-44.30076
rel36	-2.597502	-44.21967
rel37	-2.557031	-44.28387
rel38	-2.549828	-44.28181
rel39	-2.532679	-44.27332
rel40	-2.602226	-44.25903
rel41	-2.626564	-44.31181
rel42	-2.654957	-44.2315
rel43	-2.637831	-44.18639
rel44	-2.665323	-44.18954
rel45	-2.65676	-44.29557
Cohafuma	-2.519073	-44.23218
Centro	-2.550139	-44.28861
Turu	-2.51825	-44.21584
Operação	-2.548368	-44.20421
BR	-2.717367	-44.31737

Fonte: Autoria própria.

3.1. RADIO MOBILE

O *Radio Mobile* é um programa de simulação utilizado para fazer predição de cobertura de radiofrequência (RF) de uma estação rádio base, repetidores ou outra rede de rádio. A elevação do solo e vários parâmetros de rádio são utilizados para fazer a simulação de uma predição de RF em torno de um único ou vários locais de rádio.

Os seguintes parâmetros de entrada são utilizados para realizar a predição de cobertura:

- Potência de transmissão;
- Frequência;
- Tipo de Antena;
- Padrão de antena;
- Ganho da antena;
- Perdas nas linhas de transmissão (cabos e conectores);
- Os tipos de terreno e elevação de dados para a área.

Os parâmetros deste projeto foram extraídos do *datasheet* do rádio Transnet. A Figura 8 mostra as especificações do equipamento.

Figura 8: Especificação do Rádio Transnet.

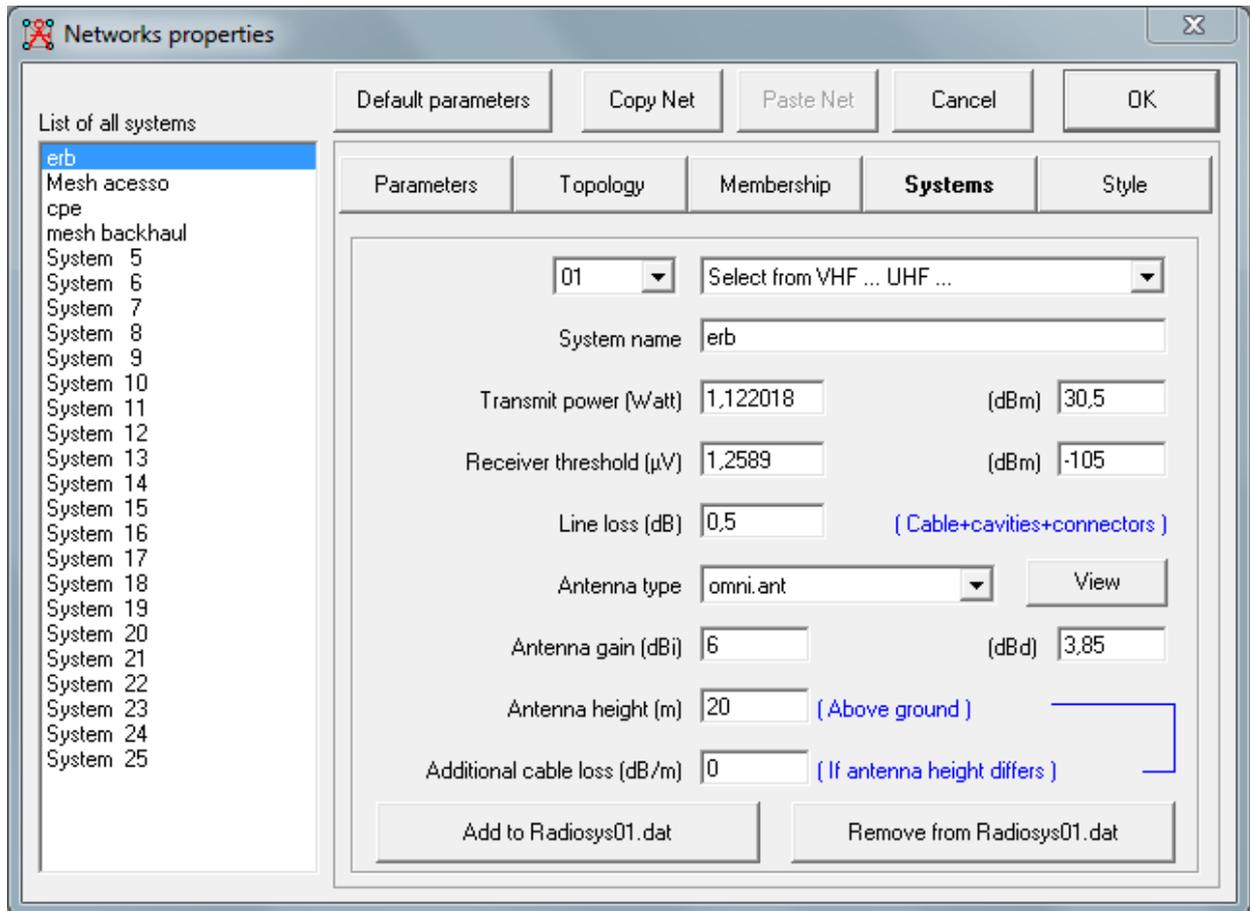
Specifications

GENERAL			
Frequency Band	902-928 MHz ISM band		
Dimensions	8.9 D x 12.7 W x 2.5 H cm. (3.5 D x 5 W x 1 H in.)		
Input Power	6 to 30 Vdc		
Current Drain for AP and Remote			
	Mode	30 Vdc	13.8 Vdc
	30 Vdc	13.8 Vdc	6 Vdc
	Transmit	236 mA	510 mA
	Receive	51 mA	100 mA
		1.18 A	155 mA
Sleep Mode	4 mA typical		
Temperature	-40° C to +70° C		
Range	Up to 30 miles		
Humidity	< 95% RH (Non-Condensing)		
TRANSMITTER			
Power Output	1 Watt (30 dBm) at 6 Vdc to 30 Vdc, user selectable down to 100 mw (+20 dBm)		
Modulation	CPFSK		
RECEIVER			
Sensitivity	-105 dBm (1 x 10 ⁻⁶ BER) typical		
Error Detection	CRC16; Resend on Error		
Interference Avoidance	64,000 hop patterns selected automatically via network address FEC, CRC/ARQ and/or Multiple Packet Transmits Excellent Strong Signal (interference) Characteristics Band Segmentation for Friendly Coexistence with other services such as LMS		
DATA			
Interface	RS-232/RS-485 (User Selectable)		
Usable Throughput	115.2 kbps		
Port Speeds	1.2 to 115.2 kbps		
CONNECTORS			
Power, User, NMS	2 Pin Phoenix, DB-9, RJ11		
RF	TNC		
OPERATING MODES			
Point-to-Multipoint			
Master			
Remote			
Repeater Extension (store and forward) - Unlimited repeaters, self healing networks			
NETWORK MANAGEMENT			
Diagnostics			
Centralized network control eliminates site visits			
Create store and forward configurations			
Compatible with other MDS Products			
MDS InSite			
AGENCY APPROVALS			
FCC	Part 15 Approved		
UL/CSA	Class 1 Div. 2 approved (UL 508, UL 1604)		
IC	Approved		

Fonte [4]

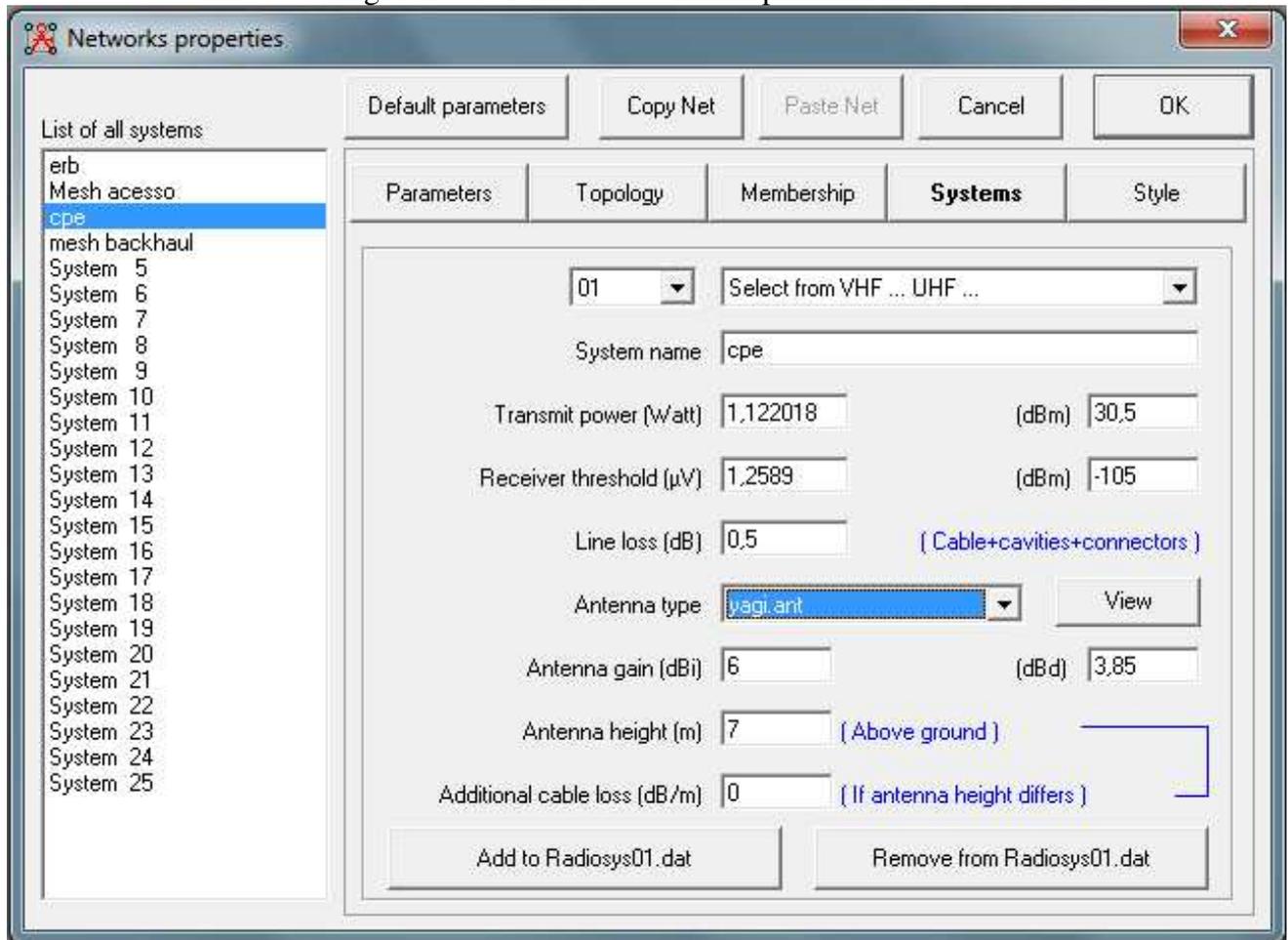
Para este projeto os seguintes parâmetros de entradas foram utilizados para as estações rádio base e CPE (*Customer Premises Equipment*) conforme Figura 9 e Figura 10, respectivamente:

Figura 9: Parâmetros de entrada para as ERBs.



Fonte: Autoria própria

Figura 10: Parâmetros de entrada para as CPEs.



Fonte: Autoria própria.

Sendo:

Potência de transmissão: 23,5 dBm;

Frequência: 915 a 928 MHz;

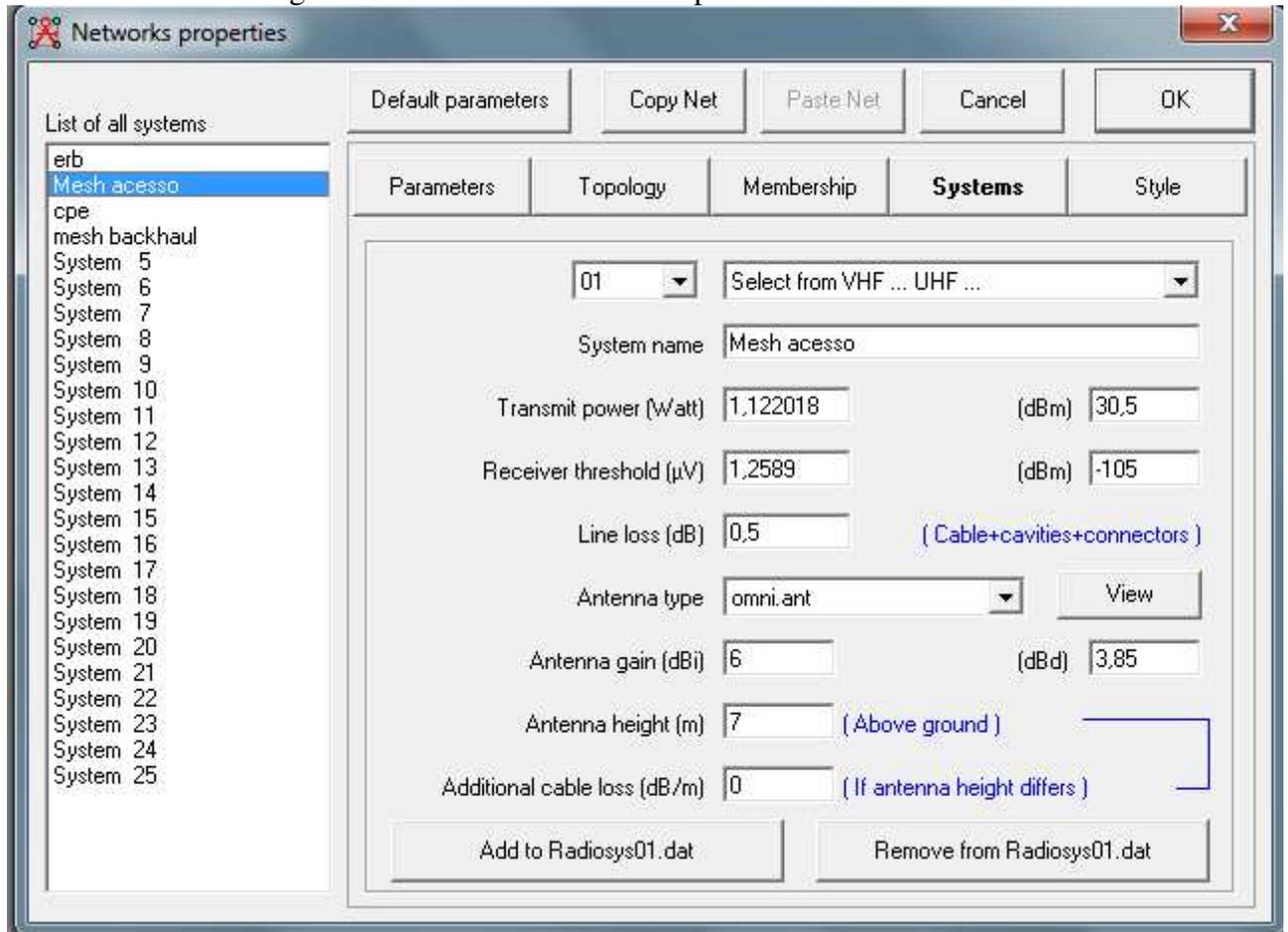
Tipo de Antena: Omnidirecional e diretiva;

Ganho da antena de transmissão: 6 dBi;

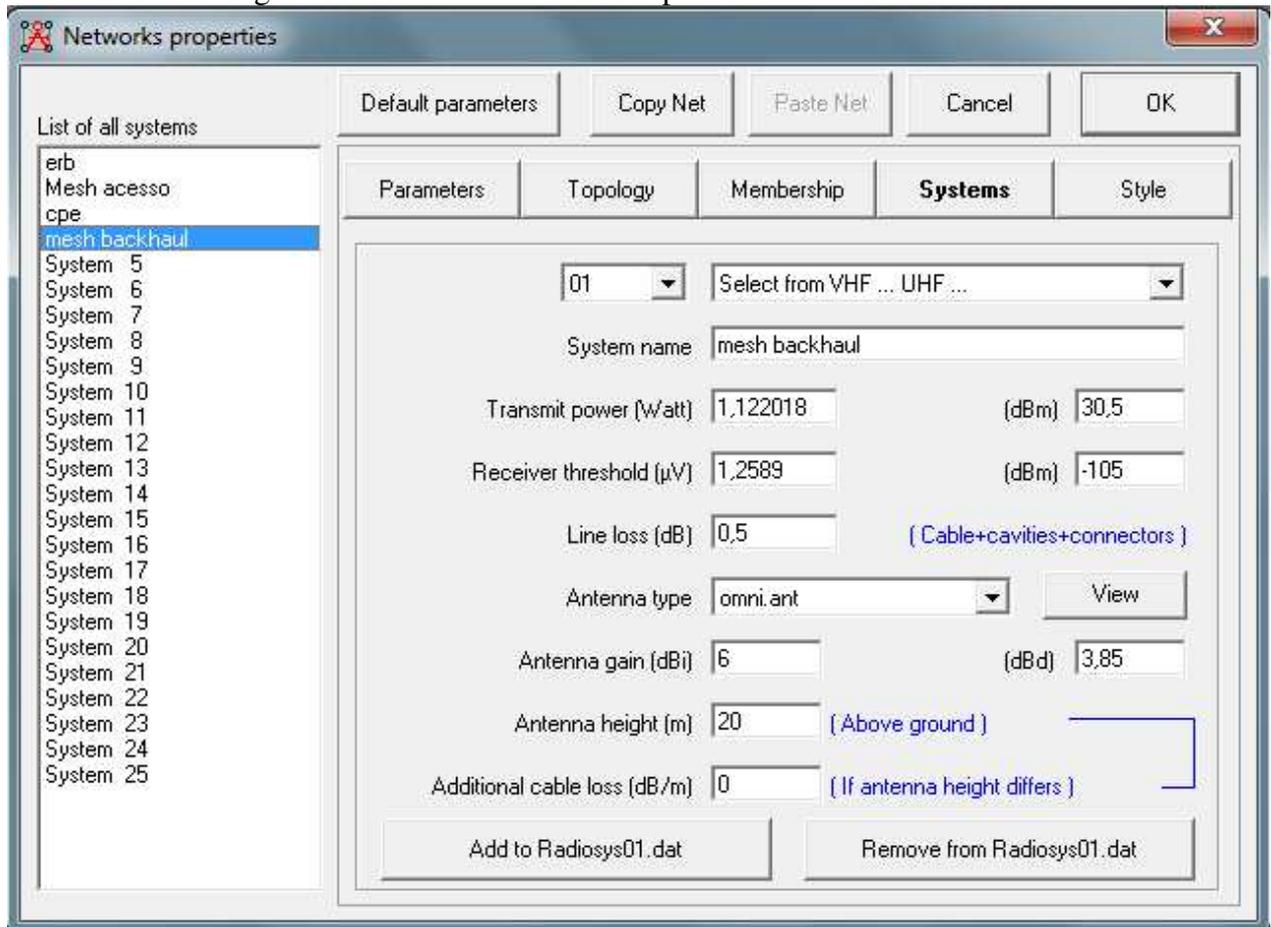
Perdas em cabos e conectores: 0,5 dB.

Os parâmetros de entrada para a rede *Mesh* de acesso e a *mesh* de *backhaul* são apresentados e descritos nas Figura 11 e Figura 12, respectivamente:

Figura 11: Parâmetros de entrada para rede *Mesh* de acesso.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Parâmetros de entrada para a rede *mesh* de *backhaul*.

Fonte: Autoria própria.

Sendo:

Potência de Transmissão: 30,5 dBm;

Frequência: 5800 MHz;

Tipo de Antena: Omnidirecional;

Ganho da antena: 6 dBi;

Perdas em cabos e conectores: 0,5 dB.

3.2. MODOS DE VARIABILIDADE

Existem três dimensões para o conceito de variabilidade que é aplicada na predição de rádio: localização, tempo e situação. É uma forma de caracterizar a qualidade da recepção. Para isso, é utilizado o quantil que é a percentagem de tempo que se pode esperar o sinal atingir um determinado nível.

Variabilidade de Tempo. Esta dimensão tem a ver com as diversas formas em que os sinais de rádio são atenuados num determinado cenário (ou situação), numa localização particular, durante um período prolongado de tempo. Variações de curto prazo devido à propagação multipercurso e similares são explicitamente excluídos da estatística de variabilidade do tempo. O exemplo dado por Hufford, Longley, e Kissick em NTIA Relatório 82-100, é: "Por este caminho por 95% do tempo a atenuação não ultrapassou 32,6 dB" (29). Os valores típicos são "(99,99%)" e "(99,999%)".

Variabilidade de Localização. Esta dimensão tem a ver com a variação na recepção do sinal com relação a localização. Embora, o terreno seja estatisticamente semelhante, podem ser diferentes, dependendo do terreno a porcentagem pode mudar. Para estes casos, (HUFFORD, et. Al.1982): "Nesta situação, haverá de 70% dos locais de caminho onde a atenuação não superior a 32,56 dB para, pelo menos, 95% do tempo". Um valor razoável é de 90%.

Variabilidade de Situação. Trata-se da variação do sinal com relação a "variáveis ocultas", ou seja, as variáveis que não são reconhecidas, que permanecem após os parâmetros "sistema definido e parâmetros ambientais e parâmetros de emprego". Segundo (HUFFORD, et. al.1982): "Em 90% dos casos como, haverá pelo menos 70% dos locais em que a atenuação não será, superior a 32,6 dB, pelos menos, 95% do tempo". Ou seja, 30% quando há grande confiança na situação e 70% quando não há muita confiança com relação ao ambiente.

No programa de simulação, além dos modos de variabilidade de tempo, localização e situação, o *Radio Mobile* possui quatro modos, que devem ser escolhidos. Dependendo do modo escolhido, segundo o relatório do NTIA 82-100 (*National Telecommunications and Information Administration*) há distinção entre confiabilidade e confiança para cadamodo: modo de transmissão, modo individual (ou acidental), o modo móvel e monomodo mensagem (ou local).

- **Modo de Transmissão:** aborda as estatísticas de interesse a uma transmissão de rádio, estação de TV, ou cenário de ponto-multiponto (PMP). Confiabilidade neste modo é a combinação

de localização e tempo. A confiança é então variabilidade situação. Todos os três modos são tratadas separadamente.

- **Modo de Individual (ou acidental):** aborda as estatísticas de interesse para um único receptor, por exemplo, um rádio em uma casa, ou TV, ou um enlace de dados ponto-a-ponto. Confiabilidade, neste caso, é simplesmente a variabilidade do tempo. A confiança é uma combinação de localização e situação de variabilidade.

- **Modo Móvel:** aborda as estatísticas de interesse para uma única estação de base (ponto de acesso) transmitir para um veículo em movimento, ou de que a transmissão do veículo para a estação base, enquanto este está mudando de localização. Aqui confiabilidade é variabilidade de tempo e localização. A confiança é então variabilidade de situação.

- **Modo de mensagem única (ou *spot*):** aborda as estatísticas de interesse para um sistema de alerta de desastres, um link de comunicações móvel, e assim por diante. Este modo refere-se à combinação de todas as três dimensões da variabilidade em uma única variável aleatória dimensional. Por exemplo, a probabilidade de a primeira tentativa ser sucesso.

3.3. ZONA DE FRESNEL

Para possibilitar a comunicação de rádio enlace é ideal que o meio de comunicação esteja livre de obstáculos, para isso é necessário o estudo da zona de Fresnel que, de acordo com HAYKIN (2008, p.459).

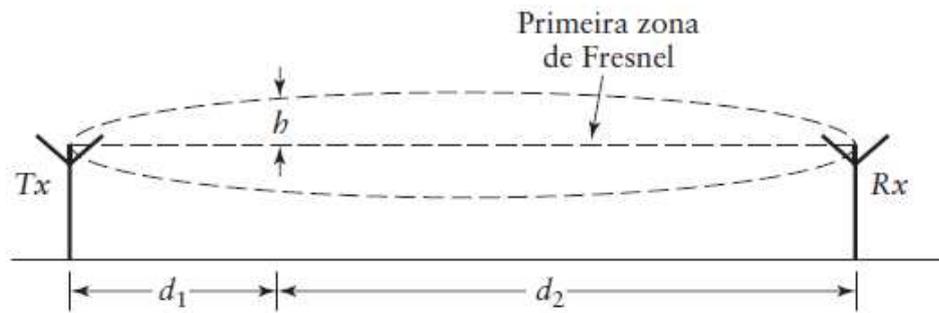
A propagação em espaço livre depende do caminho de visada direta entre o transmissor e o receptor e uma certa área limpa ao redor do caminho. A área limpa necessária, ilustrada na figura abaixo, é relacionada com a separação entre os dois e o comprimento de onda da transmissão. Uma regra empírica é que o volume chamado primeira zona de Fresnel deve ser mantida limpo de objetos para uma propagação aproximada à de espaço livre. A zona de Fresnel define um elipsoide de revolução. Objetos na primeira zona de Fresnel irão afetar a transmissão e causarão desvios do modelo de propagação em espaço livre. O raio da primeira zona de Fresnel depende da posição entre antena de transmissão e recepção, sendo dado por

$$h = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Equação 1: Cálculo da Zona de Fresnel

Na qual λ é o comprimento de onda de transmissão, d_1 é a distância para o transmissor e d_2 é a distância para o receptor, para um ponto em particular ao longo do caminho.

Figura 13: Primeira zona de Fresnel.



Fonte [7]

3.4. RESOLUÇÃO Nº 506, DE 1º DE JULHO DE 2008

O desenvolvimento deste trabalho teve como base aspectos regulatórios para as faixas de frequências utilizadas para as topologias de rede.

Segundo a Anatel, radiofrequência é a faixa do espectro eletromagnético de 9 kHz a 300 GHz utilizada na radiocomunicação.

O espectro de radiofrequências é um recurso limitado, constituindo-se em bem público e, conforme prevê a Lei nº 9.472, é administrado pela Anatel.

Na administração do espectro de radiofrequências são observadas as atribuições das faixas, definidas em tratados e acordos internacionais, aprovados na União Internacional de Telecomunicações - UIT, e, anualmente, é emitido o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil, o qual 19 contém o detalhamento do uso das faixas de radiofrequências associadas aos diversos serviços e atividades de telecomunicações.

As faixas podem ser atribuídas em caráter primário, no qual o uso de radiofrequências é caracterizado pelo direito à proteção contra interferências prejudiciais, ou em caráter secundário, no qual o uso de radiofrequências é caracterizado pela inexistência de direito à proteção contra interferências prejudiciais.

Os equipamentos utilizados como parâmetros para este trabalho devem funcionar em caráter secundário. A questão do uso do espectro desses equipamentos, que operam em caráter secundário, e as situações de radio interferências são previstas no Art 4º e 43º da Resolução nº 506/08, que diz:

As estações de radiocomunicação correspondentes a equipamentos de radiação restrita operam em caráter secundário, isto é, não têm direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qualquer outra estação de radiocomunicação nem podem causar interferência em qualquer sistema operando em caráter primário.

Parágrafo único. Os equipamentos de radiação restrita, que vierem a causar interferência prejudicial em qualquer sistema operando em caráter primário, devem cessar seu funcionamento imediatamente até a remoção da causa da interferência.

A fim de que a predição de RF deste projeto atenda as especificações da Resolução nº506/08 para as frequências de 915-928 MHz, os seguintes requisitos devem ser atendidos:

a) a potência de pico máxima de saída do transmissor não deve ser superior a 1 Watt para sistemas que empreguem no mínimo 35 canais de salto e 0,25 Watt para sistemas empregando menos de 35 canais de salto;

b) se a largura de faixa do canal de salto a 20 dB for inferior a 250 kHz, o sistema deve usar, no mínimo, 35 radiofrequências de salto e o tempo médio de ocupação de qualquer radiofrequência não deve ser superior a 0,4 segundos num intervalo de 20 segundos;

c) se a largura de faixa do canal de salto a 20 dB for igual ou maior que 250 kHz, o sistema deve usar, no mínimo, 17 radiofrequências de salto e o tempo médio de ocupação de qualquer radiofrequência não deve ser superior a 0,4 segundos num intervalo de 10 segundos;

d) a máxima largura de faixa ocupada do canal de salto a 20 dB deve estar limitada a 500 kHz.”

Art. 43. Exceto nos casos previstos a seguir, equipamentos utilizando tecnologia de espalhamento espectral ou outras tecnologias de modulação digital, que façam uso de antenas de transmissão com ganho direcional superior a 6 dBi, devem ter a potência de pico máxima na saída do transmissor reduzida para valores abaixo daqueles especificados nos incisos V, VI e VII do art. 40 e no inciso II do art. 41, pela quantidade em dB que o ganho direcional da antena exceder a 6 dBi:

I - sistemas operando na faixa de 2.400-2.483,5 MHz e utilizados exclusivamente em aplicações ponto-a-ponto do serviço fixo podem fazer uso de antenas de transmissão com ganho direcional superior a 6 dBi, desde que potência de pico máxima na saída do transmissor seja reduzida de 1 dB para cada 3 dB que o ganho direcional da antena exceder a 6 dBi;

II - sistemas operando na faixa 5.725-5.850 MHz e utilizados exclusivamente em aplicações ponto-a-ponto do serviço fixo podem fazer uso de antenas de transmissão com ganho direcional superior a 6 dBi sem necessidade de uma

correspondente redução na potência de pico máxima na saída do transmissor.

§ 1º Sistemas utilizados de acordo com o estabelecido nos incisos I e II deste artigo excluem o uso de aplicações ponto-multiponto, aplicações omnidirecionais e múltiplos equipamentos numa mesma instalação transmitindo a mesma informação.

§ 2º O responsável pela operação de um equipamento funcionando de acordo com o estabelecido nos incisos I e II deste artigo deve assegurar que o sistema seja utilizado exclusivamente em aplicações ponto-a-ponto do serviço fixo. Informações sobre tal responsabilidade devem constar, com destaque, no manual de instruções fornecido pelo fabricante.

Assim como, frequência de 5800 MHz deve atender os requisitos de acordo com a Resolução nº 506/08:

- a) a potência de pico máxima de saída do transmissor não pode ser superior a 1 Watt;
- b) o pico da densidade espectral de potência, em qualquer faixa de 3 kHz durante qualquer intervalo de tempo de transmissão contínua, não deve ser superior a 8 dBm;
- c) equipamentos que façam uso de antenas de transmissão com ganho direcional superior a 6dBi, devem ter a potência de pico máxima na saída do transmissor reduzida para valores abaixo daquele especificado nos inciso I deste artigo, pela quantidade em dB que o ganho direcional da antena exceder a 6 dBi.

3.5. REDES PONTO-MULTIPONTO

Nessa topologia, ou arquitetura de rede, um ponto central pode estar enviando informações para vários pontos da rede, utilizando um mesmo meio e fazendo derivações ao longo do meio. Este tipo de ligação pode existir em uma arquitetura de redes conectadas a grandes distâncias, as WANs (*Wide Area Network*). Nesta topologia a informação parte de um computador central por um único meio de transmissão e é distribuída para vários pontos por meio de endereços lógicos diferentes.

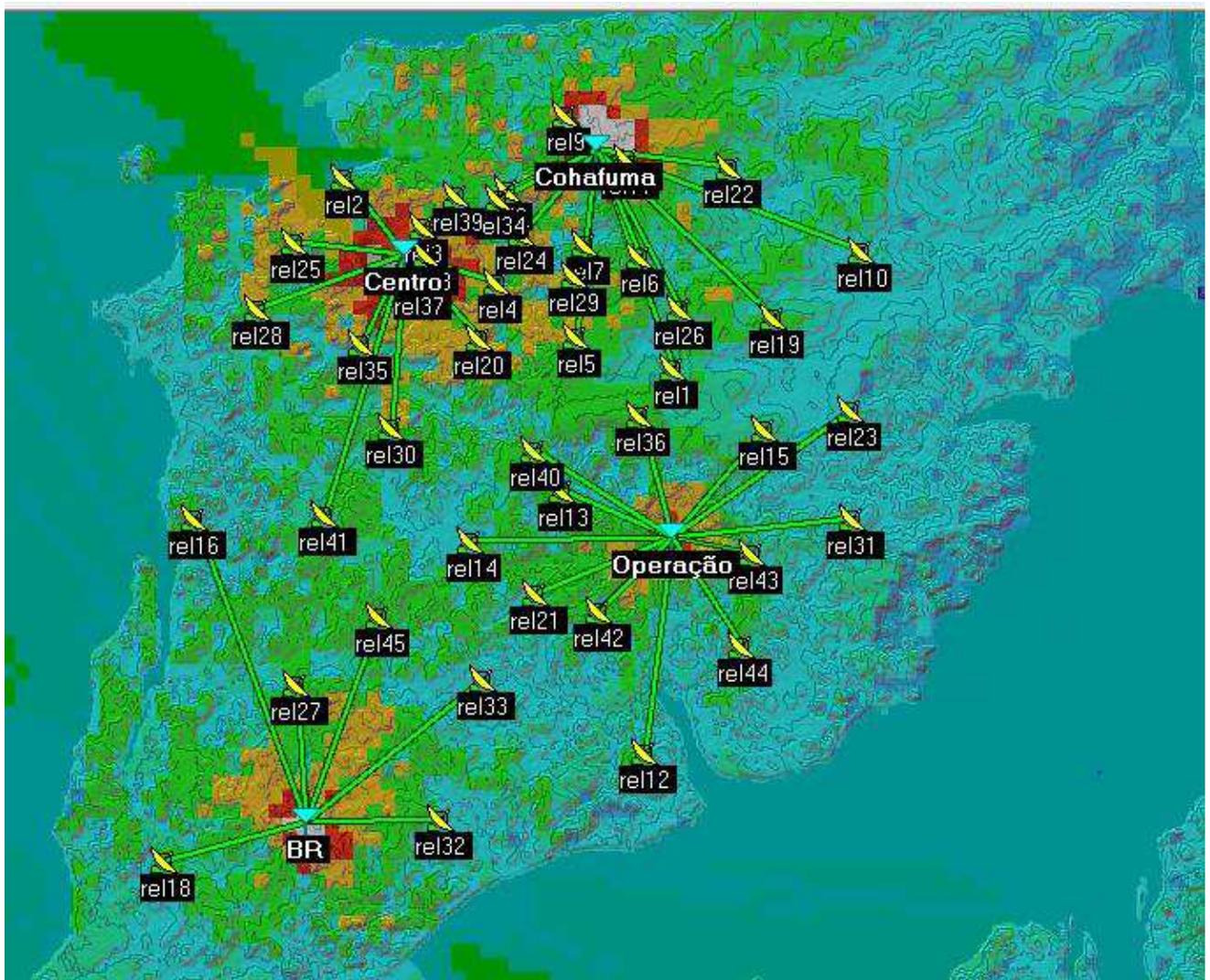
Atualmente, as soluções de acesso Ponto-Multiponto (PMP) permitem uma conexão econômica, confiável e segura. As soluções PMP funcionam em uma grande variedade de espectros licenciados e não licenciados.

3.6. PREDIÇÃO DE COBERTURA DA REDE PONTO-MULTIPONTO

Conforme foi mencionado no item 3.3 a análise de obstrução da primeira zona de Fresnel e os modos de viabilidade serão utilizados como formas de analisar a disponibilidade dos links entre as ERBs(Estação Rádio Base) e as CPEs (*Customer Premises Equipment*). Desta forma, serão analisados os melhores e piores casos, para a solução de rede Ponto-Multiponto.

De acordo com a ilustração da Figura 14, é possível perceber que todos os links estão com ótimo nível de recepção e a comunicação dos religadores com suas respectivas ERBs não apresentam problemas nos links de comunicação, que estão representados pela cor verde.

Figura 14: Rede Ponto-Multiponto.



Fonte: Autoria própria.

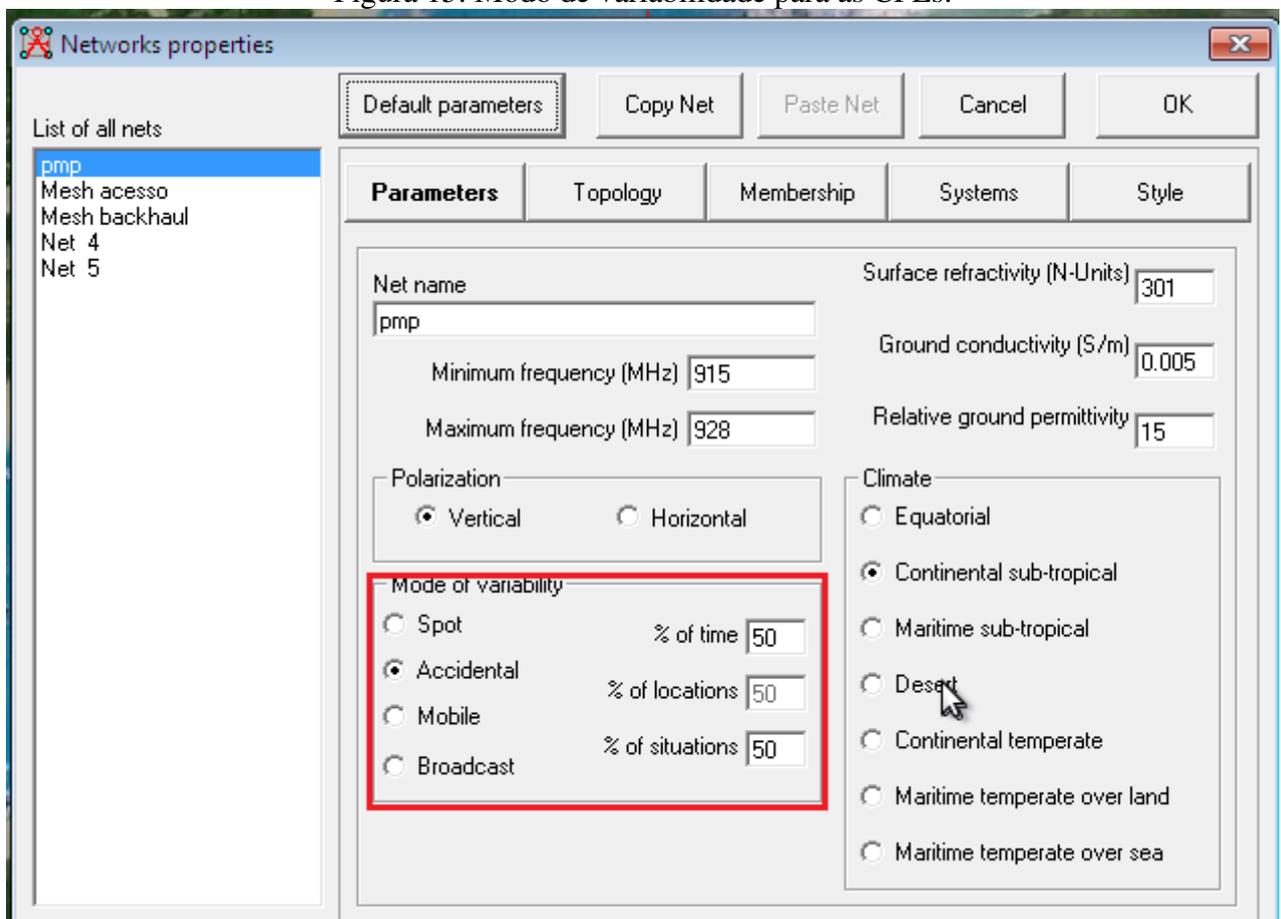
Para a rede Ponto-Multiponto o modo de variabilidade escolhido foi o Modo *accidental*, este modo é dado apenas pela variabilidade de situação e tempo.

É correto afirmar que, em 50% de situações em que a atenuação não exceda 95,5 dB para, pelo menos, 70% do tempo. Neste caso, "Em 50% de situações como" representa a medida de confiança. E "a atenuação não exceda 90 dB para, pelo menos, 70% do tempo" é a medida de confiabilidade.

Ao executar simulações utilizando variabilidade de situação, deve ser mantido em mente que muitos fatores entram nesta estatística. Caso a situação particular seja conhecida e não seja necessário simulá-la, o percentual de variabilidade de situação deve ser bem baixo.

A atenuação foi calculada com base nos melhores resultados de comunicação entre os links.

Figura 15: Modo de variabilidade para as CPEs.



Fonte: Autoria própria.

É necessária uma comparação entre os valores dados pela simulação com os cálculos de enlace dados abaixo, para uma análise satisfatória desta solução.

A potência de Transmissão é igual à Potência Efetivamente Irradiada (P_{EIRP}) que é dada pela equação 2:

$$PEIRP = Ptx + Gtx - Pcc$$

Equação 2: Potência Efetiva Irradiada

Sendo:

Ptx : Potência do Transmissor;

Gtx : Ganho da antena transmissora;

Pcc : Perda de cabos e conectores.

Resolvendo a Equação 2 com os parâmetros do sistemas temos,

$$PEIRP = 30,5 + 6 - 0,5$$

$$PEIRP = 36 \text{ dBm}$$

É necessário também que se calcule toda a atenuação sofrida pela onda eletromagnética em sua trajetória. Deve-se considerar as atenuações causadas pela perda no espaço livre, nos cabos, nos conectores e também considerar o ganho das antenas e a potência de transmissão. A atenuação será calculada pela fórmula da Potência de recepção. Conforme a equação 3:

$$Prx = Ptx - L + Grx$$

Equação 3: Cálculo da Atenuação

Onde:

Prx : Potência de Recepção;

Ptx : Potência de Transmissão;

L : Atenuação

Grx: Ganho da antena receptora.

Resolvendo a Equação 23, com os parâmetros do sistemas o resultado obtido:

$$-53,5 = 36 - L + 7$$

$$L = 95,5 \text{ dB}$$

Onde:

Prx: Potência de Recepção;

Ptx: Potência de Transmissão;

L: Atenuação

Grx: Ganho da antena receptora.

A distância entre os enlaces pode ser calculada com a equação de Friis, que considera f como sendo a frequência (em MHz) do enlace e d como sendo a distância total (em km) do mesmo, de acordo com a equação 4:

$$A = 32,44 + \log(f)_{\text{MHz}} + 20 \log(d)_{\text{Km}}$$

Equação 4: Equação de Friis

Resolvendo a Equação 24, com os parâmetros do sistemas o resultado obtido:

$$95,5 = 32,44 + 20 \log 915 + 20 \log d$$

$$-20 \log d = 91,66 - 95,5$$

$$-20 \log d = -3,48$$

$$d = 1,5 \text{ Km}$$

As informações do *datasheet* do Rádio Transnet foram utilizadas para os parâmetros de entrada da rede. Dessa forma, é possível estimar o nível de potência do receptor, com a equação 5:

$$R_x = P_t + G_t + G_r - A - A_{\text{cabo+conectores}}$$

Equação 5: Equação para calcular o nível de potência do Receptor

Onde:

R_x = nível de potência no receptor [dBm];

P_x = nível de potência no transmissor [dBm];

G_t = ganho da antena transmissora [dBi];

G_r = ganho da antena receptora [dBi];

A = atenuação no espaço livre [dB];

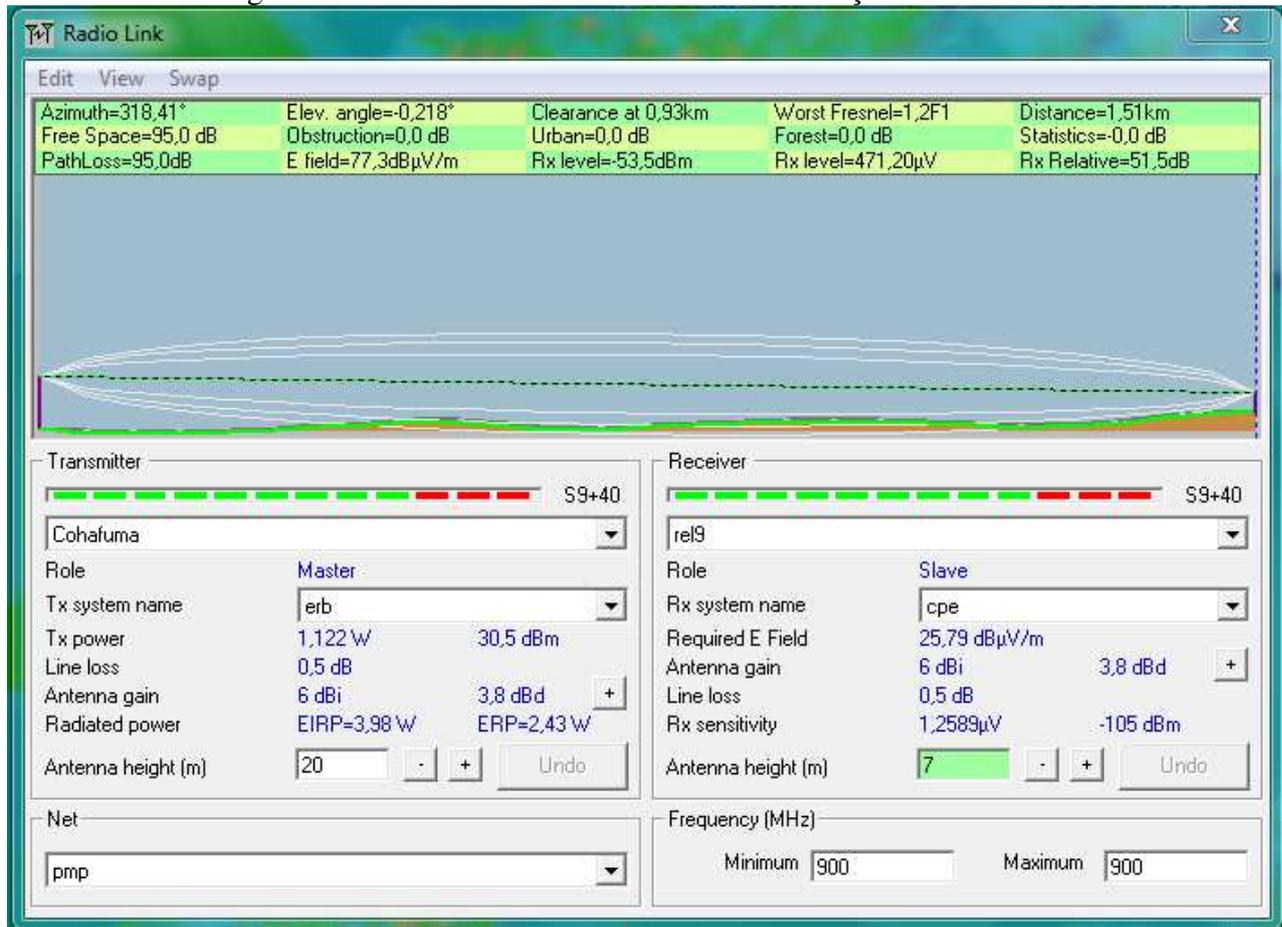
$A_{\text{cabo+conectores}}$ = perda por atenuação de condutor (cabo coaxial, guia de onda e conector) [dB].

Resolvendo a Equação 25, com os parâmetros do sistemas o resultado obtido:

$$R_x = 30,5 + 6 + 6 - 95,5 - 0,5 = -53,5 \text{ dBm}$$

Considerando os dados mencionados anteriormente, foi possível validar a ferramenta *Radio Mobile* comparando o resultado teórico por meio da fórmula de Friis com o resultado da simulação de um rádio enlace apresentado na Figura 16.

Figura 16: Visada direta entre Rel9 e a Subestação do Cohafuma.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os cálculos feitos considerando uma potência recebida de -61,5 dBm, a distância teórica do rádio enlace é de 1,5 km e este mesmo valor foi obtido na simulação (canto superior direito da Figura 16), validando assim a ferramenta.

O cálculo para a Equação de Friis deve ser feito para enlaces com a primeira zona de Fresnel sem obstrução, conforme o caso estudado nesse exemplo.

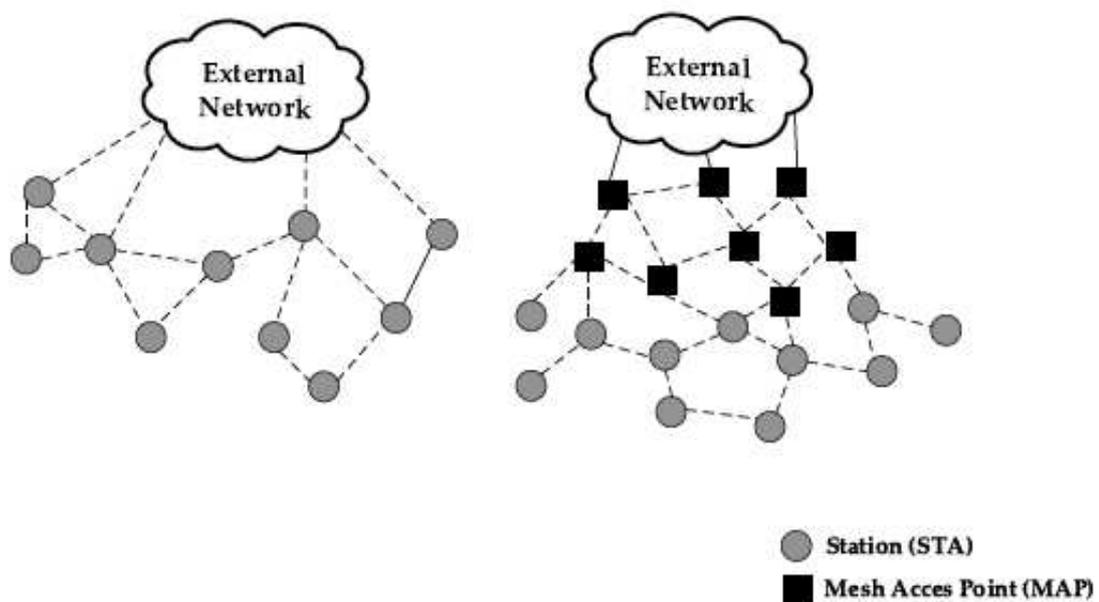
3.7. REDES MESH

A segunda solução proposta faz uso de Redes *Mesh* (WMN- *Wireless Mesh Networks*) como um meio para estender a cobertura de uma rede sem fio com múltiplos saltos e fornecer acesso a redes de infraestrutura, com ou sem fio. São redes compostas de Pontos de Acesso *Mesh* (MAP) organizados de acordo com diferentes topologias. No segmento de redes elétricas a implantação de redes de comunicações tem sido tradicionalmente escassa, o que significa que WMNs pode de fato

ser considerada como uma solução para estender redes de comunicações de outros segmentos, neste caso tipicamente de rede de *backhaul* e acesso.

Pode ser considerada uma alternativa potencialmente rentável e robusta em relação a Redes Ponto-Multiponto para a rede de distribuição elétrica. Em uma visão simples da WMN é composta por nós que funcionam como estações terminais (STA- *Station*), onde a informação trocada é retransmitida para uma rede externa por qualquer nó como ilustrado na Figura 17. Os dispositivos da *mesh* de acesso se comunicam diretamente com outros dispositivos vizinhos, que fornecem comunicação com a rede de *backhaul* para redes externas. Desse modo, é possível ter uma rede escalável e robusta, garantindo a conectividade entre os nós.

Figura 17: Modelo de Rede *Mesh*.



Fonte [13].

As Redes *Mesh* oferecem níveis mais elevados de redundância e robustez em termos de comunicações de dados em caso de um link ou perda nó, temporária ou permanente, ou degradação do link.

As desvantagens desse tipo de topologia de acordo com V. C. Gungor *et. al.*(2011, p.531).

A capacidade da rede, desvanecimento e interferência pode ser contado como os principais desafios dos sistemas de redes mesh sem fio. Nas áreas urbanas, as redes de malha tem enfrentado um desafio da cobertura uma vez que a densidade

do emissor não pode proporcionar uma cobertura completa da rede de comunicações.

Proporcionando o equilíbrio entre encaminhamento confiável e flexível, um número suficiente de nós inteligentes, tendo em conta o custo do nó, são muito críticos para as redes mesh. Além disso, uma terceira empresa é necessária para gerenciar a rede, e desde a quantidade de informação que passa por meio de cada ponto de acesso, algumas técnicas de criptografia são aplicadas aos dados para fins de segurança. Além disso, enquanto que os pacotes de dados são transportados para muitos vizinhos, pode haver problemas de sobrecarga do canal de comunicação que resultaria numa redução da largura de banda disponível [20].

3.8. PREDIÇÃO DE COBERTURA DA REDE MESH

A análise de obstrução da primeira zona de Fresnel e os modos de viabilidade serão utilizados como formas de analisar a disponibilidade dos links entre as ERBs e as CPE's. Desta forma, serão analisados os melhores e piores casos, para a solução de rede *mesh*, que foi dividida em Rede de acesso e Rede *backhaul*.

De acordo com a Figura 18, é possível perceber que todos os nós estão se comunicando, por meio dos links de cor verde, isso é possível devido a redundância entre os rádios localizados nos postes (Nós) com os rádios localizados nas subestações (Terminal). Essa afirmação é válida tanto para a rede de Acesso como para a rede de *backhaul*.

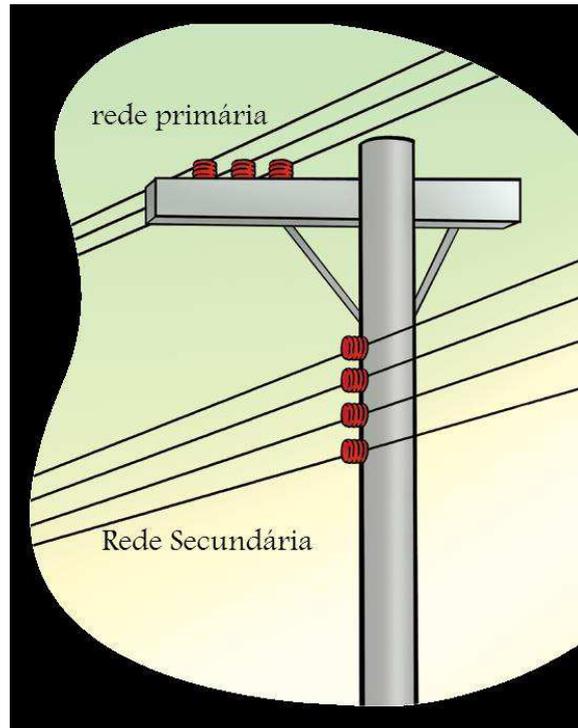
Figura 19: Rede backhaul em 5,8 GHz.



Fonte: Autoria própria.

As alturas não serão calculadas, pois todos os equipamentos que estão acoplados aos postes, que são as CPEs, não poderão ultrapassar 7 metros de altura. Segundo a norma, os rádios devem ficar a 7 metros de altura, entre as redes primárias que são aquelas com tensão elétrica de 2,3 kV e 4,4 kV e as redes secundárias com tensão de 110 V e 440 V. De acordo, com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 20: Rede backhaul em 5,8 GHz.



Fonte: Autoria própria.

A atenuação será calculada pela fórmula da Potência de recepção. Na equação 6:

$$Prx = Ptx - L + Grx$$

Equação 6: Cálculo da atenuação

Resolvendo a equação 6, obteve o seguinte resultado:

$$-105 = 36 - L + 6$$

$$L = 147 \text{ dB}$$

Para a rede de *backhaul*, o modo de variabilidade escolhido foi o Modo Individual, este modo é dado pela combinação dos modos de tempo e situação, neste caso apenas esses dois modos são relevantes.

É correto afirmar que, em 50% de situações em que a atenuação não exceda 147 dB para, pelo menos, 70% do tempo.

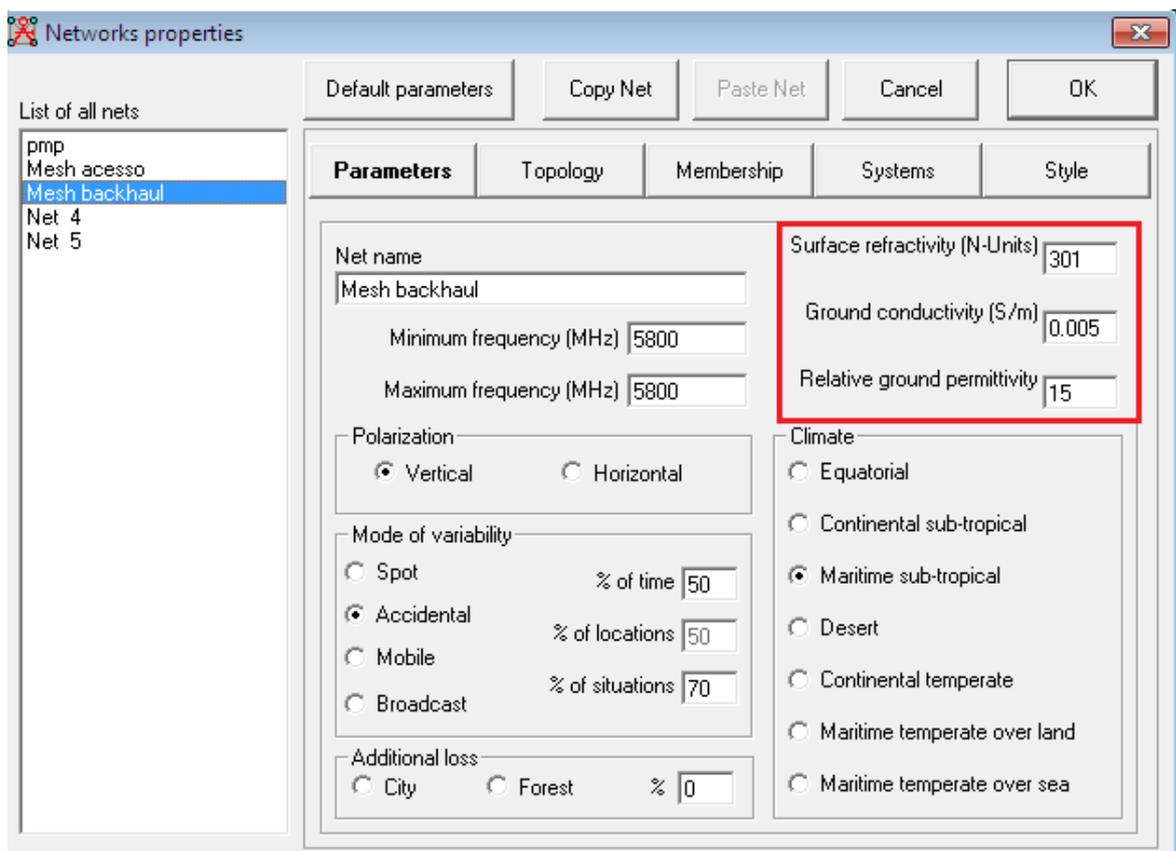
Neste caso, "Em 50% de situações como" representa a medida de confiança. E "a atenuação não exceda 142 dB para, pelo menos, 70% do tempo" é a medida de confiabilidade. Ao executar simulações utilizando variabilidade de situação, deve ser mantido em mente que muitos fatores entram nesta estatística. Caso a situação particular seja conhecida e não seja necessário simulá-la, o percentual de variabilidade de situação deve ser bem baixo.

A atenuação foi calculada com base nos melhores resultados de comunicação entre os links.

O Fator K ou a refratividade da superfície da terra, o valor padrão $K = 4/3$. Na simulação esse valor equivale a 301 N-Units.

Os valores da condutividade do solo e a permissividade relativa do solo, são de 5 S/m e 25, respectivamente. Esses valores devido a cidade de São Luís ser ilha banhada pelo mar, são os valores padrão para esses casos, conforme a Figura 21.

Figura 21: Fator K, condutividade do solo e a permissividade relativa do solo.

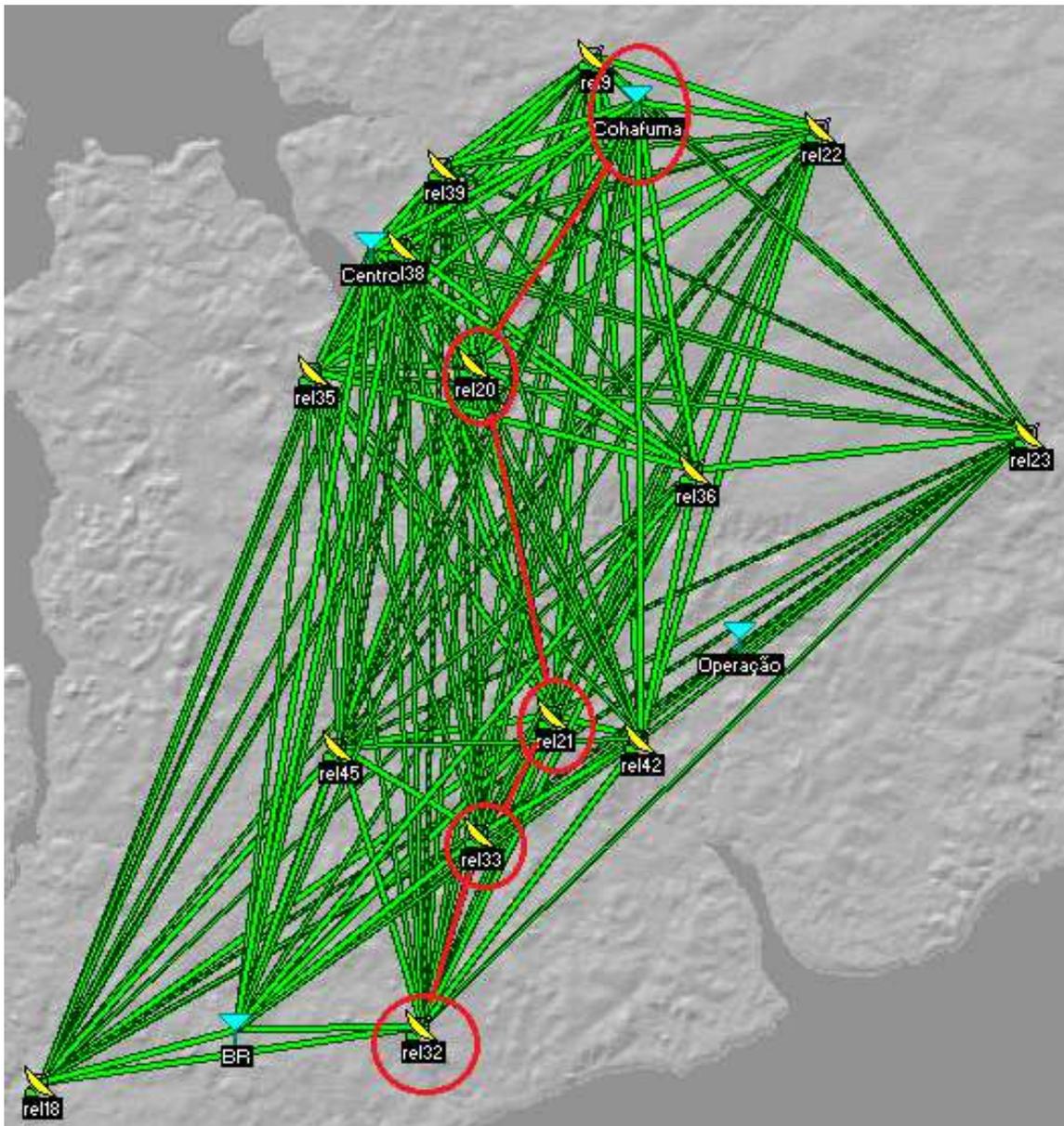


Fonte: Autoria própria.

Foi escolhido um caso para ilustrar a comunicação de um religador com a subestação da Cohafuma, que será a Central de Controle e Monitoramento da rede. O caso escolhido foi a

comunicação entre o Rel₃₂ e a Subestação Cohafuma, a quantidade máxima de saltos para retransmissão de mensagens é 5. Dessa forma, não há necessidade do uso de rede *backhaul*, junto com a *mesh* de acesso. Pois esta se mostrou autossuficiente devido a quantidade de saltos para retransmissão. O religador consegue retransmitir a mensagem para outros religadores até que esta alcance a Central de Controle e Monitoramento, sem exceder a quantidade máxima de saltos. O nível de recepção em todos os enlaces está aceitável, apesar de haver obstrução em alguns enlaces.

Figura 22: Enlace entre o Rel₃₂ e Cohafuma.

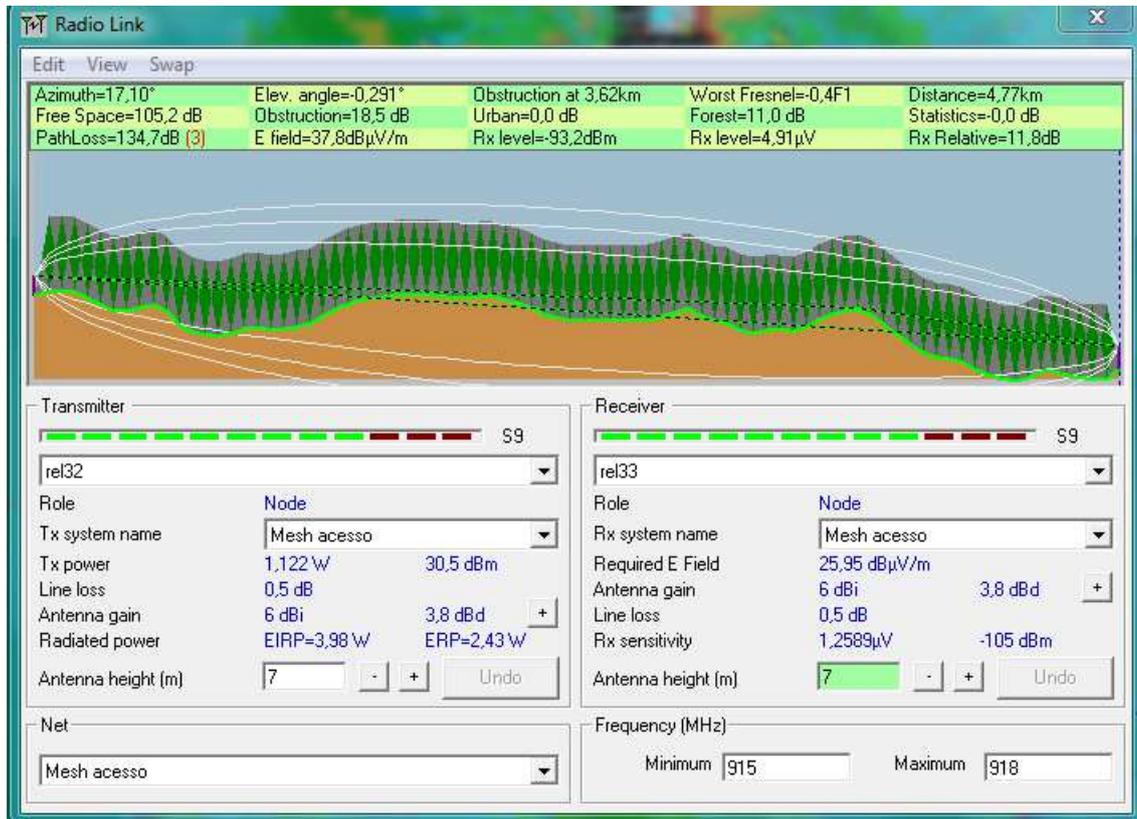


Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 mostra os trechos da comunicação entre o Rel₃₂ e a Subestação Cohafuma com enlace estabelecido com o Rel₃₃ (conforme mostra a Figura 23), com enlace estabelecido com o

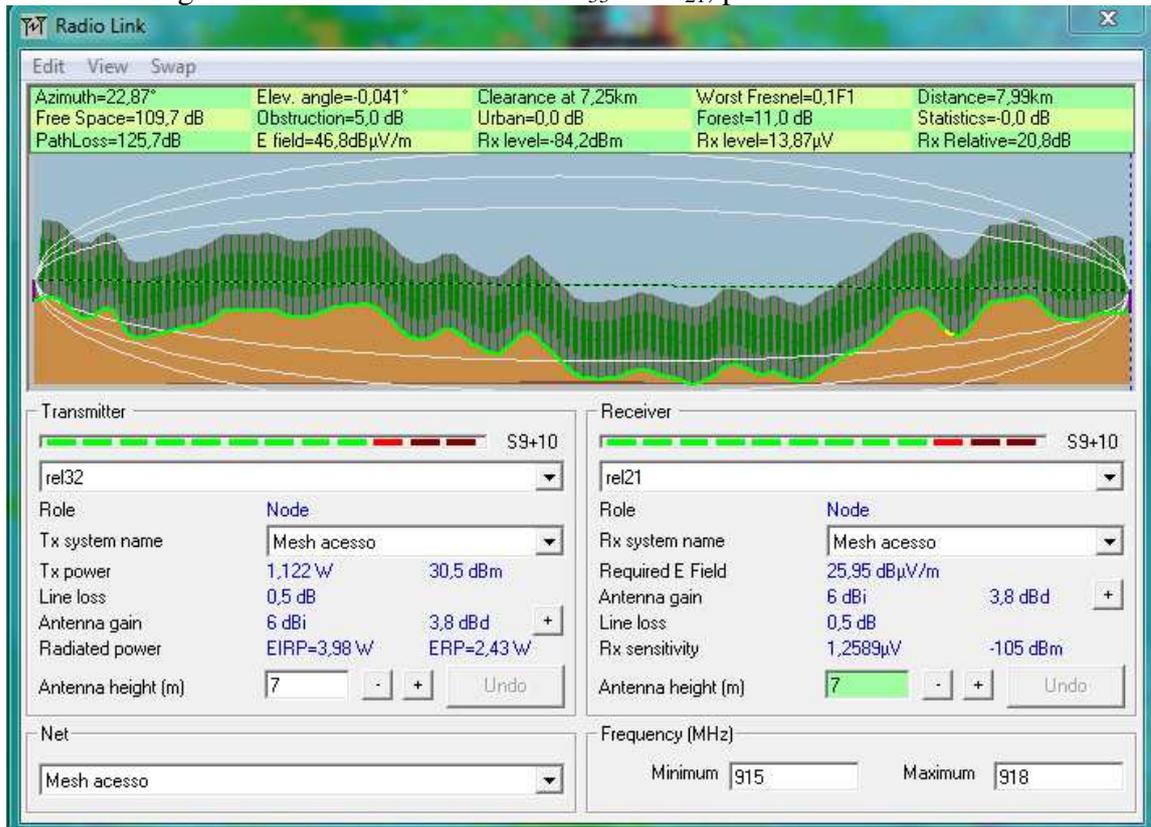
Rel₂₁ (conforme mostra a Figura 24), com enlace estabelecido com o Rel₂₀ (conforme mostra a Figura 25) e enlace estabelecido com a subestação Cohafuma (conforme mostra Figura 26).

Figura 23: Visada direta entre Rel₁₆ e Rel₃₃, para a rede de Acesso.



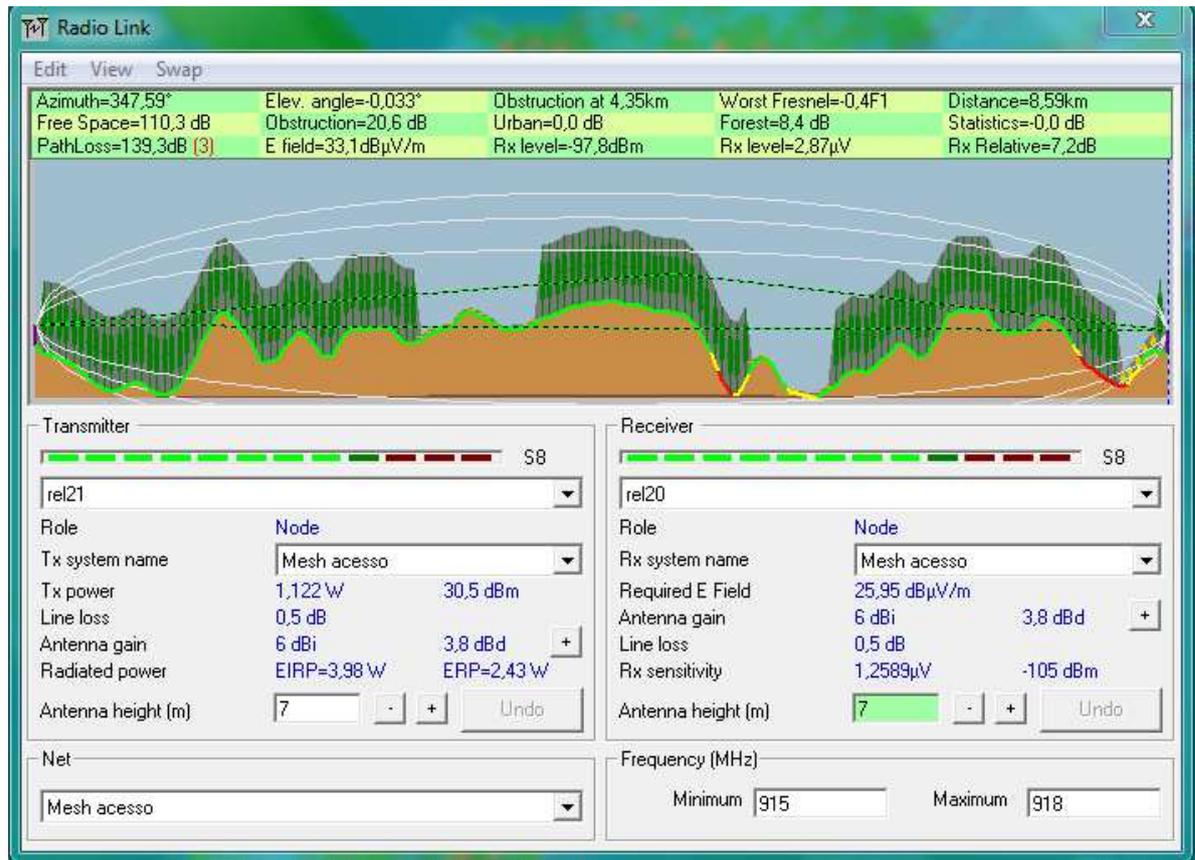
Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Visada direta entre Rel₃₃ e Rel₂₁, para a rede de Acesso.



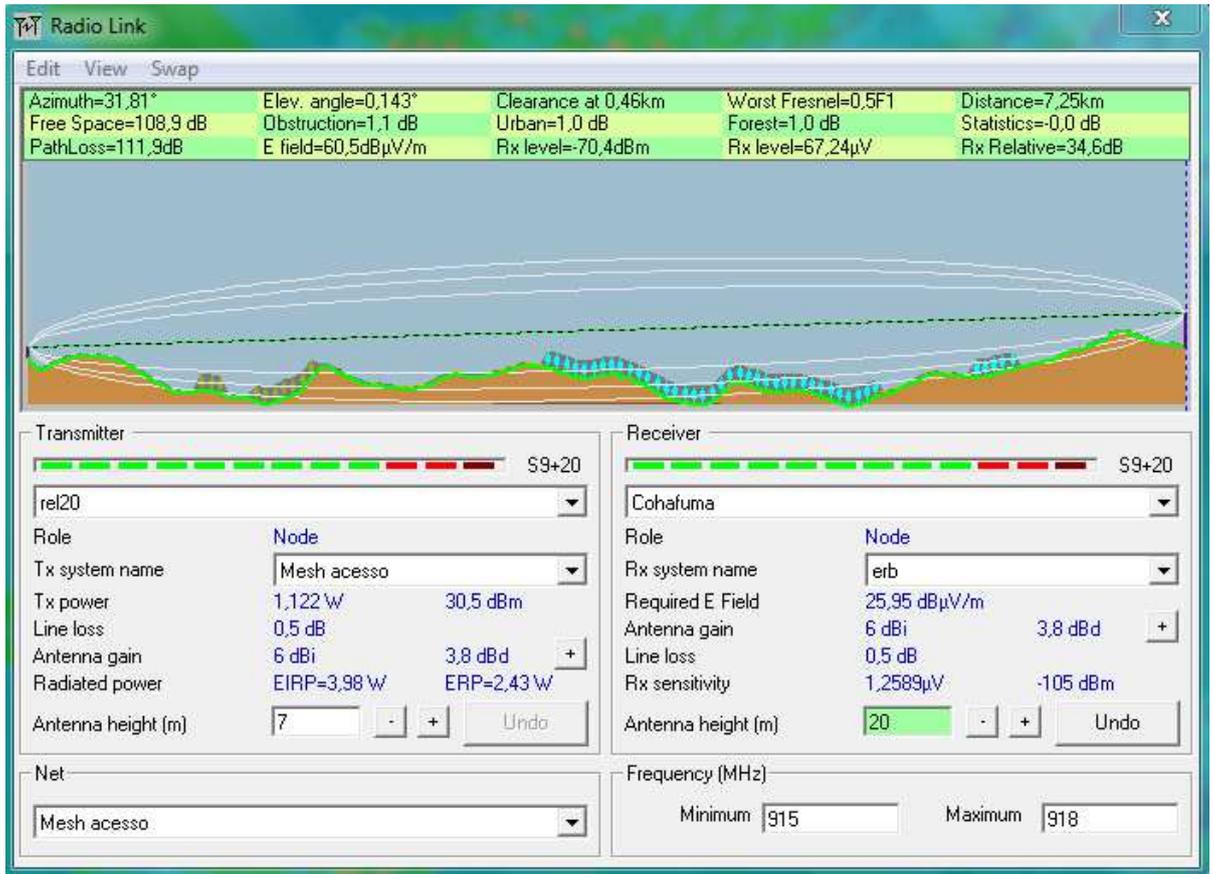
Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Visada direta entre Rel₂₁ e Rel₂₀, para a rede de Acesso.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Visada entre o Rel20 e a subestação Cohafuma, para a rede de acesso.



Fonte: Autoria própria.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento das redes elétricas inteligentes não representa apenas a grande necessidade de integrar fontes de energia renováveis ao sistema e permitir o uso de veículos elétricos em larga escala, mas também representa a necessidade de melhorar a infraestrutura existente e aumentar a eficiência da rede elétrica. Embora esta rede tenha potencial revolucionário, é importante ressaltar que, elas irão se originar das tecnologias existentes, e ter melhoria contínua com a criação de novas tecnologias. As redes elétricas inteligentes têm sido um dos principais tópicos de estudo entre a comunidade acadêmica e a indústria, devido, o seu potencial e a grande quantidade de técnicas envolvidas na sua implantação.

No decorrer deste trabalho as motivações que estão por trás das redes elétricas inteligentes e alguns desafios relacionados à sua implantação, no que tange os aspectos técnicos e normativos, foram mencionados.

Por meio das simulações propostas, foi possível avaliar o desempenho no uso das duas topologias de rede para as redes de acesso e *backhaul*. Os casos simulados são soluções típicas para redes elétricas inteligentes e podem ser estendidas para outras situações, de acordo com necessidades específicas como, por exemplo, Internet das Coisas.

A rede ponto-multiponto é uma rede que atende os requisitos de disponibilidade e confiabilidade quando comparado à rede *mesh* é uma solução relativamente simples. No ponto de vista das concessionárias não seria interessante adotar essa solução, porque a comunicação dos religadores é bem limitada, pois para um conjunto de religadores deve existir uma ERB para que se comuniquem. Além do mais, é necessária uma rede *mesh* de *backhaul*, pois as ERBs devem se comunicar para enviar as informações do religador para a Central. Para a concessionária de energia não seria interessante, porque deve ter um investimento tanto em operação como em uma nova infraestrutura para a rede *mesh* de *backhaul*.

No entanto, as redes *mesh* foi uma solução que apresentou melhor desempenho com relação aos dois requisitos, embora, esta seja uma solução mais complexa (análise de vazão de dados, quantidade de saltos, atraso da comunicação, etc). Todos os links de comunicação não apresentaram falta de comunicação entre os nós, independente de obstrução ou distância, já que o nó da topologia se comunica com outro nó mais próximo, por este motivo não há indisponibilidade de links. Nota-se que esta topologia *mesh* apresenta altos índices de disponibilidade e confiabilidade para a rede de

acesso que se mostrou robusta e eficiente, pois não há necessidade de investir em uma rede de *backhaul*. A rede *mesh* de acesso é capaz de prover comunicação entre religadores e subestações.

Os resultados deste trabalho podem ser de grande utilidade para o dimensionamento de sistemas de redes elétricas inteligentes, para aplicação do mesmo tipo de topologia entre outras entidades (outros tipos de concessionárias como de Água e Gás), com base na norma do IEEE 2030-2011.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros previstos para complementar ou estender o escopo desta pesquisa são:

- Implementar o mesmo tipo de topologia para os outros domínios do SGIRM: Geração, Transmissão, Controle/Operações, Provedor de Serviços, Distribuição e Consumidor;
- Implementar soluções para melhorar a comunicação e viabilidade de topologias Ponto-Multiponto.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. **Resolução N° 506, de 1° de Julho de 2008**. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506>. Acessado em: Mai, 2016.
- [2] CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Redes elétricas inteligentes: Contexto Nacional**. - Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2012. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/atividades/redirect/8050>. Acessado em: Mai, 2016.
- [3] EPRI – **Electric Power Research Institute**. Califórnia. Disponível em: <http://my.epri.com/portal/server.pt>. Acessado em: Mai, 2016.
- [4] GENERAL ELECTRIC AND ALSTOM. **TransNET: Long range, high speed serial communications**. [S.l.], 2015.
- [5] GRID, SMART AND CYBERSECURITY COMMITTEE AND OTHERS. **NISTIR 7628: Guidelines for smart grid cybersecurity: Volume 1: Smart grid cybersecurity strategy, architecture, and high-level requirements**. [S.l.], 2014.
- [6] GUNGOR, V. C. et al. **Smart grid technologies: communication technologies and standards**. IEEE transactions on Industrial informatics, IEEE, v. 7, n. 4, p. 529–539, 2011
- [7] HAYKIN, S. **Communication Systems: 2nd Edition**. John Wiley & Sons, Limited, 2008. ISBN 9780471701354.
- [8] HUFFORD, G. A. et al. **A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, 1982.
- [9] IEEE STANDARDS COORDINATING COMMITTEE AND OTHERS. **IEEE 2030 :IEEE guide for smart grid interoperability of energy technology and information technology operation with the electric power system (eps), end-use applications, and loads**. [S.l.], 2011.
- [10] INDEPENDENCE, ENERGY. **Security Act of 2007**. [S.l.], 2007. v. 110, n. 140, 19 p.
- [11] LEWIS, R. P.; IGICT, P.; ZHOU, Z. **Assessment of communication methods for smart electricity metering in the uk**. In: IEEE. 2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE). [S.l.], 2009. p. 1–4.
- [12] NIST. **Framework and roadmap for Smart Grid interoperability standards, Release 1.0**. 2010.
- [13] RUA, D. E. da S. **Last-Mile Communications Systems for Smart Electric Distribution Grids**. Tese (Doutorado) — Department of Electrical and Computer Engineering Faculty of Engineering, University of Porto, 2013.
- [14] ROHJANS, S. et al. **Survey of smart grid standardization studies and recommendations**. In: IEEE. Smart grid communications (SmartGridComm), 2010 first IEEE international conference on. [S.l.], 2010. p. 583–588.

- [15] SGRA, T. S. **Smart grid reference architecture**. Smart grid reference architecture, 2011.
- [16] SILVA, V. R. N. **Parametrização do framework ipsec para a segurança na interoperabilidade em smart grid**. 2015.
- [17] SMARTGRIDS, E. **Smart grids strategic deployment document for europe's electricity networks of the future**. European Technology Platform Smart Grids, 2010.
- [18] VIEIRA, J. G.; ARAÚJO, S. G. D. **Automação da distribuição e smart grid**. Smart Grid News. Goiás, 2011. Citado na página 15.

GLOSSÁRIO

AMI	A Infraestrutura Avançada de Medição (AMI) consiste no sistema composto por medidores de energia elétrica com inteligência computacional embarcada e providos de portas de comunicação de dados e demais periféricos, suportados por uma infraestrutura de tecnologia da informação (telecomunicação, software e hardware) que permite a aquisição de dados remotamente, em intervalos de tempo, bem como o envio de informações e comandos a distância.
BAN	Semelhante ao HAN, a BAN (<i>Bulding Area Network</i>) é responsável pelo monitoramento e controle de dispositivos inteligentes de consumo e troca de informações com as concessionárias. No entanto, é preciso cobrir um prédio inteiro que consiste em múltiplos apartamentos e escritórios. A BAN pode ser uma coleção de HANs conectados com um edifício de uma rede inteligente que é tipicamente instalada no alimentador de energia.
CPE	<i>Customer premises equipment</i> é um termo técnico muito utilizado por operadoras de telecomunicações e fornecedores de serviços de comunicação. É uma sigla em inglês quer dizer <i>Customer Premises Equipment</i> que significa "equipamento dentro das instalações do cliente".
CPN	Varia de acordo com seu tamanho e do número de dispositivos que servem e podem ser classificados em rede de área local (HAN), <i>Bulding Area Network</i> (BAN) e <i>Industrial Area Network</i> (IAN). Independentemente do tipo CPN, tecnologias de rede local são usados para fornecer conectividade dentro CPN que são utilizados para suportar aplicativos como AMR, monitoramento e controle do DER.
DMS	Tem como objetivo monitorar e controlar toda a rede de distribuição de forma eficiente e confiável. Ele atua como um sistema de apoio à tomada de decisão para ajudar o grupo de operação de controle e de campo com o monitoramento e controle do sistema de distribuição elétrica.
EAN	É a rede que conecta medidores inteligentes com o sistema de gerenciamento de medição distribuída.
FAN	Estão implantados ao longo da rede de distribuição para monitorar e controlar vários dispositivos de campo, tais como isoladores, alimentadores e transformadores. Estes dispositivos estão dispersos sobre a rede para habilitar serviços de automação distribuída e serviços relacionados com a integração contínua e gerenciamento de DERs. Prover conectividade para dispositivos inteligentes na transmissão, subestações e redes de distribuição.
HAN	É uma rede de comunicação que conecta aparelhos "inteligentes" e outros dispositivos, juntamente com sua casa de ou medidor inteligente de

negócios. Isso permite visualizar e controlar a quantidade de energia cada dispositivo usa e permite que dispositivos inteligentes para responder a condições de rede.

IAN	A IAN é uma rede de comunicação implantada nas indústrias. Incorpora sensores conectados, controladores e software de gestão de edifícios especializada. O IAN lida com a criação de aplicativos, como sistema de automação predial e gerenciamento de energia, para a energia otimizada, desempenho econômico e ambiental de todos os dispositivos conectados.
LAN	Uma rede de área local (LAN) é uma rede de computadores dentro de uma área geográfica pequena, como uma casa, escola, laboratório de informática, edifício de escritórios ou grupo de edifícios. A LAN é composta de estações de trabalho interligadas e computadores pessoais que são capazes de acessar e compartilhar dados e dispositivos.
NAM	NAM são utilizados para recolher informações geradas pelas CPNs. Normalmente, uma NAM compreende a infraestrutura de medição avançada instalada para coletar os dados AMR. NANS constituem uma parte da Smart Grid, como intermediário entre o cliente e a rede de distribuição.
PMU	<i>Phasor Measurement Units</i> (PMUs) são unidades capazes de adquirir medidas de fasores de tensão e corrente, com taxas de amostragem de até 60 fasores por segundo, sincronizadas por um sinal de tempo fornecido pelo sistema GPS (<i>Global Positioning System</i>).
PLC	É a tecnologia que utiliza a rede de energia elétrica. Ela consiste em transmitir dados e voz em banda larga pela rede de energia elétrica. Como utiliza uma infraestrutura já disponível, não necessita de obras numa edificação para ser implantada. O PLC trabalha na camada 2 do modelo ISO/OSI, ou seja, na camada de enlace. Sendo assim, pode ser agregada a uma rede TCP/IP (camada 3) já existente, além de poder trabalhar em conjunto com outras tecnologias de camada 2.
RTU	A Unidade Terminal Remota, mais conhecido como RTU, define um dispositivo baseado em microprocessador, que permite enviar as informações para um local remoto onde é processado. Geralmente este site remoto é uma sala de controle onde se encontra um sistema central SCADA, que pode exibir as variáveis enviadas pelo RTU.
SCADA	O sistema de Controle Supervisorio e Aquisição de Dados (<i>Supervisory Control And Data Acquisition- SCADA</i>) foi projetado para ser usado em sistemas produtivos industriais, gerenciando e controlando a comunicação entre dispositivos de computação, sensores e atuadores, além de proporcionar o controle de processos industriais a partir de uma interface

homem-maquina (*Human-Machine Interface- HMI*) [Gomez, 2002]. Subjacente ao sistema SCADA, ha uma rede de comunicação que interconecta um conjunto de dispositivos de campo, tais como sensores e atuadores.

WAN

Agrega dados de múltiplos NANS e transmite-o à rede privada da empresa de serviços. Ele também permite comunicações de longa distância entre os diferentes pontos de agregação de dados de plantas de geração de energia, estações de recursos de energia distribuídos, subestações, transmissão e redes distribuídas.