

JOÃO RAFAEL RIBEIRO RENÓFIO

# **ALGORITMO DE PLANEJAMENTO DE REDES SEM FIO AMI PARA SMART GRID**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática.

Curitiba PR  
Setembro de 2016

JOÃO RAFAEL RIBEIRO RENÓFIO

# **ALGORITMO DE PLANEJAMENTO DE REDES SEM FIO AMI PARA SMART GRID**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática.

Área de concentração: *Ciência da Computação*

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz

Co-orientador: Prof. Dr. Altair Olívio Santin

Curitiba PR  
Setembro de 2016

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central

Renóbio, João Rafael Ribeiro  
R418a      Algoritmo de planejamento de redes sem fio AMI para *Smart Grid* / João  
2016      Rafael Ribeiro Renóbio ; orientador: Marcelo Eduardo Pellenz ; co-orientador:  
            Altair Olívio Santin. – 2016.  
            Xx, 56 f. : il. ; 30 cm

            Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,  
            Curitiba, 2016  
            Bibliografia: f. 51-56

            1. Sistemas de comunicação sem fio – Medidas de segurança. 2. Redes  
            locais sem fio. 3. Algoritmos. I. Pellenz, Marcelo Eduardo. II. Santin, Altair  
            Olívio. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de  
            Pós-Graduação em Informática. IV. Título.

CDD 22. ed. – 005.8

**ATA DE SESSÃO PÚBLICA**

**DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 08/2016**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA – PPGIa  
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - PUCPR**

Em sessão pública realizada às 13h30 de 14 de Setembro de 2016, na Sala 223 – Escola de Negócios, ocorreu a defesa da dissertação de mestrado intitulada “**Algoritmo de Planejamento de Redes sem Fio AMI para Smart Grid**” apresentada pelo aluno **João Rafael Ribeiro Renóbio**, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Informática**, na área de concentração **Ciência da Computação**, perante a banca examinadora composta pelos seguintes membros:

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz (Orientador)- PUCPR**

**Prof. Dr. Edgard Jamhour – PUCPR**

**Prof. Dr. Manoel Camilo de Oliveira Penna Neto - PUCPR**

**Prof. Dr. Richard Demo Souza – UTFPR**

Após a apresentação da dissertação pelo aluno e correspondente arguição, a banca examinadora emitiu o seguinte parecer sobre a tese:

| Membro                                         | Parecer                                                       |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz              | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovada    ( ) Reprovada |
| Prof. Dr. Edgard Jamhour                       | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovada    ( ) Reprovada |
| Prof. Dr. Manoel Camilo de Oliveira Penna Neto | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovada    ( ) Reprovada |
| Prof. Dr. Richard Demo Souza                   | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovada    ( ) Reprovada |

Portanto, conforme as normas regimentais do PPGIa e da PUCPR, a tese foi considerada:

☒ **APROVADA**

(aprovação condicionada ao atendimento integral das correções e melhorias recomendadas pela banca examinadora, conforme anexo, dentro do prazo regimental)

( ) **REPROVADA**

E, para constar, lavrou-se a presente ata que vai assinada por todos os membros da banca examinadora. Curitiba, 14 de Setembro de 2016.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edgard Jamhour

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Manoel Camilo de Oliveira Penna Neto

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Richard Demo Souza

**ANEXO À ATA DE SESSÃO PÚBLICA  
CORREÇÕES E MELHORIAS RECOMENDAS PELA BANCA EXAMINADORA**



# Agradecimentos

Aos meus amigos e familiares pela compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz, por seu apoio e amizade, além de sua dedicação, competência e especial atenção nas revisões e sugestões, fatores fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Dr. Altair Olivio Santin, Dr. Manoel Camillo e Dr. Richard Souza por compartilharem seus conhecimentos, sugestões e pelo exemplo de dedicação.

Ao Prof. Dr. Edgard Jamhour pelas sugestões, por disponibilizar o seu simulador e por despendar seu tempo explicando o funcionamento do mesmo.

A todos os funcionários da PUC/PR que sempre foram muito prestativos e educados.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

A Sue Ellen, minha querida esposa, um agradecimento especial, pelo apoio e carinho diários. Pela transmissão de confiança e de força, em todos os momentos. Por tudo, a minha enorme gratidão!

# Resumo

As redes sem fio com arquitetura mesh (WMNs) têm sido utilizadas na implantação da infraestrutura de medição avançada (AMI) para aplicações em Smart Grid. A infraestrutura AMI é composta por um conjunto de redes sem fio de abrangência local (NANs), que são capazes de interligar os medidores inteligentes com a concessionária de energia elétrica. Devido a natureza compartilhada do canal sem fio, estas redes estão inevitavelmente expostas aos efeitos de propagação e interferência, bem como sujeitas a ataques de interferência realizados de forma intencional. Portanto, o planejamento eficiente das redes AMI é um grande desafio para os projetistas. Neste trabalho propomos um algoritmo para planejamento de redes sem fio AMI, que permite definir o posicionamento e o número de gateways, bem como estimar a capacidade de transmissão da rede. A metodologia desenvolvida permite estabelecer relações entre a resiliência da rede e a potência de transmissão dos nós, fornecendo diretrizes importantes para o projeto da NAN. Também avaliamos o efeito de ataques de interferência em redes AMI baseadas no padrão IEEE802.15.4g usando protocolo RPL, investigando o efeito da densidade de gateways no número de nós interferidos e na qualidade dos caminhos de roteamento. Os resultados permitem definir estratégias para minimizar os impactos dos ataques de interferência no desempenho do RPL, melhorando a eficiência da NAN.

**Palavras-chave:** resiliência, capacidade, ataques de interferência.

# Abstract

Wireless networks with mesh architecture (WMNs) have been used in the deployment of advanced metering infrastructure (AMI) for applications in Smart Grid. AMI infrastructure consists of a set of local coverage wireless networks (NANs), which are able to connect smart meters with electric utility. Because of the shared nature of the wireless channel, these networks are inevitably exposed to the effects of propagation and interference, as well as subject to interference from attacks carried out intentionally. Therefore, the efficient planning of AMI networks is a challenge for designers. In this paper we propose an algorithm for planning wireless AMI networks, which allows you to define the position and the number of gateways, as well as estimate the network transmission capacity. The methodology allows to establish relations between the resilience of the network and the transmission power of nodes, providing important guidelines for the design of NAN. We also evaluated the effect of interference of attacks on networks based on AMI IEEE802.15.4g using standard RPL protocol investigating the effect of the gateways density in the number of nodes interfered and quality of routing paths. The results allow to define strategies to minimize the impact of interference attacks in the performance of RPL, improving the efficiency of NAN.

**Keywords:** resilience, capacity, jamming attacks.

# Sumário

|                                                       |             |
|-------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Resumo</b>                                         | <b>vii</b>  |
| <b>Abstract</b>                                       | <b>viii</b> |
| <b>Lista de Figuras</b>                               | <b>xii</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>                               | <b>xiii</b> |
| <b>Lista de Abreviações</b>                           | <b>xiv</b>  |
| <b>1 Introdução</b>                                   | <b>1</b>    |
| 1.1 Objetivos . . . . .                               | 3           |
| 1.2 Contribuições . . . . .                           | 3           |
| 1.3 Publicações . . . . .                             | 4           |
| 1.4 Estrutura do Documento . . . . .                  | 4           |
| <b>2 Fundamentos Teóricos</b>                         | <b>5</b>    |
| 2.1 Redes de Comunicação para AMI . . . . .           | 5           |
| 2.2 Padrão IEEE 802.15.4 . . . . .                    | 7           |
| 2.3 Protocolo RPL . . . . .                           | 8           |
| 2.4 Estratégias de Ataques em Redes Sem Fio . . . . . | 10          |
| 2.5 Cálculo de Capacidade de Rede . . . . .           | 11          |
| 2.6 Modelo do Canal de Rádio Móvel . . . . .          | 12          |
| <b>3 Análise e Planejamento de Redes AMI</b>          | <b>16</b>   |
| 3.1 Motivação e Trabalhos Relacionados . . . . .      | 16          |
| 3.2 Um Novo Modelo Topológico para NAN . . . . .      | 17          |
| 3.2.1 Modelo Proposto . . . . .                       | 17          |
| 3.2.2 Propriedades Topológicas . . . . .              | 18          |
| 3.3 Metodologia de Análise . . . . .                  | 21          |
| 3.3.1 Análise de Resiliência . . . . .                | 22          |
| 3.3.2 Análise de Capacidade . . . . .                 | 25          |
| 3.4 Estudo de Caso . . . . .                          | 25          |
| 3.4.1 Análise de Resiliência . . . . .                | 26          |
| 3.4.2 Análise de Capacidade . . . . .                 | 33          |
| 3.5 Aplicação em Projetos . . . . .                   | 36          |
| 3.6 Conclusão . . . . .                               | 38          |

|          |                                              |           |
|----------|----------------------------------------------|-----------|
| 3.7      | Trabalhos Futuros . . . . .                  | 38        |
| <b>4</b> | <b>Análise de Interferência no RPL</b>       | <b>39</b> |
| 4.1      | Motivação e Trabalhos Relacionados . . . . . | 39        |
| 4.2      | Protocolo RPL . . . . .                      | 40        |
| 4.2.1    | Modelo Teórico ETX . . . . .                 | 40        |
| 4.3      | Modelo de Canal . . . . .                    | 41        |
| 4.4      | Estudo de Caso . . . . .                     | 42        |
| 4.5      | Conclusões . . . . .                         | 45        |
| 4.6      | Trabalhos Futuros . . . . .                  | 47        |

# Lista de Figuras

|      |                                                                        |    |
|------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Arquitetura típica Smart Grid . . . . .                                | 1  |
| 2.1  | Exemplo de uma NAN em Smart Grid . . . . .                             | 6  |
| 2.2  | Arquitetura AMI . . . . .                                              | 7  |
| 2.3  | Exemplo de cenário LLN . . . . .                                       | 9  |
| 2.4  | Distribuição de Rayleigh . . . . .                                     | 14 |
| 2.5  | Distribuição de Nakagami . . . . .                                     | 15 |
| 3.1  | Área de Implantação de uma NAN . . . . .                               | 19 |
| 3.2  | Exemplo de topologia de uma NAN gerada (-5 dBm) . . . . .              | 20 |
| 3.3  | Exemplo de uma topologia de uma NAN gerada (-10 dBm) . . . . .         | 20 |
| 3.4  | k-Connectividade para diferentes modelos de topologia. . . . .         | 21 |
| 3.5  | Assortativitvidade para diferentes modelos de topologia. . . . .       | 22 |
| 3.6  | Metodologia Proposta . . . . .                                         | 23 |
| 3.7  | Exemplo de topologia clusterizada (-5 dBm) . . . . .                   | 24 |
| 3.8  | Exemplo de topologia clusterizada (-10 dBm) . . . . .                  | 25 |
| 3.9  | Estrutura do quadro de Camada Física . . . . .                         | 27 |
| 3.10 | Número Médio de Caminhos Independentes. . . . .                        | 28 |
| 3.11 | Número médio de saltos. . . . .                                        | 28 |
| 3.12 | Número máximo de saltos para atingir o gateway . . . . .               | 29 |
| 3.13 | Número máximo de saltos para atingir o gateway . . . . .               | 30 |
| 3.14 | Caminhos independentes para diferentes modelos de topologia. . . . .   | 30 |
| 3.15 | Caminhos independentes para diferentes modelos de topologia. . . . .   | 31 |
| 3.16 | Resiliência Inter-cluster. . . . .                                     | 32 |
| 3.17 | Resiliência para diferentes modelos de topologia. . . . .              | 32 |
| 3.18 | Resiliência para diferentes densidades de rede (-10 dBm). . . . .      | 33 |
| 3.19 | Número e comprimento de caminhos independentes (-10 dBm). . . . .      | 33 |
| 3.20 | Resiliência para diferentes números máximo de saltos(-10 dBm). . . . . | 34 |
| 3.21 | Número de Canais utilizados. . . . .                                   | 35 |
| 3.22 | Capacidade de rede: Cenário 1. . . . .                                 | 35 |
| 3.23 | Capacidade de rede: Cenário 2. . . . .                                 | 36 |
| 3.24 | Capacidade de Rede (Cenário 2). . . . .                                | 36 |
| 3.25 | Capacidade de Rede (Cenário 1). . . . .                                | 37 |
| 4.1  | Exemplo de DODAG construído com 4 gateways . . . . .                   | 45 |
| 4.2  | Número de nós isolados na rede . . . . .                               | 46 |
| 4.3  | ETX médio dos caminhos de roteamento. . . . .                          | 47 |
| 4.4  | Número de nós isolados na rede. . . . .                                | 48 |

4.5 ETX médio dos caminhos de roteamento. . . . . 48

4.6 Influência da potência de transmissão do interferente. . . . . 49

# Lista de Tabelas

|     |                                                                    |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Expoentes de perda de percurso para diferentes ambientes . . . . . | 13 |
| 3.1 | Parâmetros do Rádio AVR . . . . .                                  | 26 |

# Lista de Abreviações

|           |                                                                          |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|
| WSN       | Wireless Sensor Networks                                                 |
| WMN       | Wireless Mesh Network                                                    |
| SG        | Smart Grid                                                               |
| WAN       | Wide Area Network                                                        |
| NAN       | Neighborhood Area Network                                                |
| HAN       | Home Area Network                                                        |
| DSM       | Demand Side Management                                                   |
| RSSI      | Received Signal Strength Indicator                                       |
| LLN       | Low-Power and Lossy Networks                                             |
| RPL       | Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks                        |
| PHY       | Physical Layer                                                           |
| MAC       | Media Access Control                                                     |
| BPSK      | Binary Phase Shift Keying                                                |
| QPSK      | Quadrature Phase Shift Keying                                            |
| QAM       | Quadrature Amplitude Modulation                                          |
| MSK       | Minimum-Shift Keying                                                     |
| OOK       | On-Off keying                                                            |
| MR-FSK    | Multi-Rate and Multi-Regional Frequency Shift Keying                     |
| MR-O-QPSK | Multi-Rate and Multi-Regional Offset Quadrature Phase-Shift Keying       |
| MR-OFDM   | Multi-Rate and Multi-Regional Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| DSSS      | Direct Sequence Spread Spectrum                                          |
| MDSSS     | Multiplexed Direct Sequence Spread Spectrum                              |
| FFT       | Fast Fourier Transform                                                   |
| DODAG     | Destination-Oriented Directed Acyclic Graph                              |
| ETX       | Estimated Number of Transmissions                                        |
| OF        | Object Function                                                          |
| LBR       | Low-Power and Lossy Network Border Router                                |
| DIO       | DODAG Information Object                                                 |
| DIS       | DODAG Information Solicitation                                           |
| DAO       | Destination Advertisement Object                                         |

# Capítulo 1

## Introdução

Há uma crescente demanda de energia a nível mundial e muitos países ao redor do mundo vem procurando formas alternativas de se obter energia. Devido aos efeitos do aquecimento global é importante que essa energia seja obtida de uma forma sustentável, o que incluiria fontes de geração de energia a partir do vento, do sol, das marés e entre outras. O sistema elétrico tem muitas usinas que tentam manter um equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia elétrica, no entanto, tal demanda está aumentando ano a ano. A substituição dos carros a combustão, que é uma tendência em função da escassez dos combustíveis fósseis, com certeza contribuirá e muito com o aumento dessa demanda de energia em um futuro próximo. Enfim, estes entre outros conjuntos de fatores vem direcionando as pesquisas e projetos para o que é conhecido como rede elétrica inteligente (Smart Grid (SG), em inglês). Estas redes são hoje um tema amplamente discutido diante da forte tendência de modernização do sistema elétrico a nível mundial.

Aplicado ao setor elétrico o SG deve utilizar fluxos bidirecionais de eletricidade e informações de forma a criar uma rede de geração, transmissão, distribuição de energia automatizada e amplamente distribuída. Um sistema como este pode ser considerado mais seguro, resiliente, eficiente e sustentável. Uma arquitetura típica de SG pode ser vista na Figura 1.1



Figura 1.1: Arquitetura típica Smart Grid

Através desse novo modelo de rede inteligente, as concessionárias de energia podem aplicar o gerenciamento pelo lado da demanda (Demand-Side Management (DSM), em inglês) e passam a ter uma relação maior com seus consumidores. Essa aproximação pode se refletir em benefícios mútuos para ambos os lados. As concessionárias de energia poderiam ter uma mudança no perfil de sua curva de carga, reduzir as perdas de transmissão e distribuição proporcionando uma melhor qualidade de energia e desta forma maximizar a sua produtividade [Palensky, 2011] além da possibilidade de impor novas modalidades de tarifação. Já o consumidor tem a possibilidade de gerenciar o seu consumo com energia, acompanhando a utilização de equipamentos de alto consumo que eventualmente podem ser substituídos por outros mais eficientes. O DSM promove a geração distribuída, onde os clientes também podem produzir a sua energia a partir de fontes renováveis de modo que a energia excedente possa ser vendida se inserida no sistema de distribuição. Além disso, através do DSM os clientes também são incentivados a mudar os seus hábitos e reduzir o consumo em períodos de pico [Vineetha and Babu, 2014]. Alguns exemplos de projetos piloto de SG em todo o mundo podem ser encontrados em [Yan et al., 2013, Wor, 2015, Eur, 2015].

Um sistema elétrico de potência com essas características precisa de uma complexa infraestrutura para fornecimento de energia elétrica que deve obedecer a padrões de confiabilidade e qualidade. Em SG ela é conhecida como Infraestrutura Avançada de Medição (Advanced Metering Infrastructure (AMI, em inglês). Na prática essa infraestrutura está relacionada à infraestrutura de meios de comunicação necessários para permitir as funcionalidades deste novo modelo de medição inteligente e vai ser responsável por permitir o gerenciamento em tempo real de muitas funcionalidades do sistema [Yan et al., 2013].

A AMI pode ser utilizada não só para monitorar e gerenciar o sistema elétrico, mas também os sistemas de distribuição de água e gás [Popovic and Cackovic, 2014]. Essa infraestrutura automatiza o processo de operação, permitindo manutenção preditiva e auto restabelecimento em caso de distúrbios no sistema. Além disso, ela também facilita a implantação de fontes de energia renováveis e, assim, aumenta a capacidade e eficiência das redes de energia elétrica existentes [Fang et al., 2012].

A AMI deverá proporcionar uma comunicação confiável e resiliente entre o sistema de gerenciamento e da rede elétrica. Além disso, deve ter uma segurança robusta para evitar ataques como os de interferência (jamming attacks) e interoperar com outras partes da rede [Gungor et al., 2011]. Muitas estratégias de comunicação poderiam ser utilizadas neste tipo de aplicação. No entanto, as tecnologias sem fio têm sido amplamente utilizados devido ao baixo custo e facilidade de implantação. Entre todos os padrões sem fio disponíveis, as tecnologias que utilizam arquiteturas mesh [Kulkarni et al., 2012] podem ser consideradas apropriados para uma implantação NAN. Através de uma rede mesh, os medidores inteligentes podem dinamicamente estabelecer a comunicação ad-hoc com os medidores vizinhos e encontrar caminhos alternativos para se comunicar com a empresa Distribuidora de Energia, aumentando a resiliência da rede. Com intuito de proporcionar uma comunicação sem fio com múltiplos saltos (multihop), esse tipo de arquitetura normalmente utiliza protocolos de roteamento ad-hoc para computar as melhores rotas disponíveis. A qualidade de uma conexão neste tipo de rede varia frequentemente e, portanto, esses protocolos de roteamento devem utilizar métricas de qualidade de enlaces para calcular os melhores caminhos a fim de que seus pacotes possam ser enviados até o destino.

Uma alternativa para a implementação de uma rede com arquitetura mesh é a utilização módulos de rádio que implementam protocolo Zigbee. Esse protocolo construído sobre

o padrão IEEE802.15.4 e define as camadas de rede e aplicação [Baronti et al., 2007]. Outra opção interessante é a utilização de um sistema operacional Contiki [Tang et al., 2012]. Utilizando protocolo de roteamento RPL [Lo and Ansari, 2012] e inclusive dando suporte ao IPv6 o Contiki pode ser utilizado em sistemas embarcados com restrições de memória equipados com módulos que implementam o padrão IEEE802.15.4 [Balmau et al., 2014].

Diante de tudo isso, o projeto e implantação de NANs confiáveis e eficientes passa a ser um problema de pesquisa importante. Estas redes podem ser compostas por centenas de dispositivos embarcados com recursos limitados normalmente interligados com tecnologias de comunicação que podem fornecer baixa largura de banda e os links de comunicação não confiáveis [Ancillotti et al., 2013a]. O conhecimento prévio da capacidade de resiliência e da capacidade de transmissão da rede podem orientar a especificação e desenvolvimento de novas aplicações e serviços que serão fornecidos pela concessionária de energia elétrica.

A fim de avaliar de forma mais precisa estes parâmetros, se faz necessário uma representação fiel da topologia da rede [Nowak et al., 2014]. De maneira geral, os medidores inteligentes, gateways e repeditores estão posicionados nas bordas das quadras de rua e diante do estágio de implantação desse novo conceito de rede elétrica ou ainda por questões de sigilo existe uma grande dificuldade em se obter informações dessas redes. No entanto, a topologia pode ser definida com base na localização e alcance de transmissão de rádio dos nós e gateways da rede. Os medidores inteligentes podem se comunicar com o gateway usando caminhos com múltiplos saltos, o que afeta a capacidade devido aos domínios de contenção e de colisão. Além disso, a uma NAN pode sofrer com as interferências não intencionais inerentes ao meio de comunicação compartilhado mas também com ataques de interferência com intuito de degradar ou ainda impossibilitar a comunicação entre nós desta rede. Assim, do ponto de vista do projetista de uma NAN seria muito interessante avaliar como esta rede é afetada pelo ataque de interferência.

## 1.1 Objetivos

O primeiro objetivo deste trabalho é determinar como a potência de transmissão e o número de gateways afetam a resiliência e capacidade de NANs equipadas com rádios compatíveis com o novo padrão IEEE 802.15.4g [IEEE, 2012c] operando na banda ISM não licenciada 902-928MHz. A fim de obter resultados mais precisos foi proposto uma estratégia de geração de topologia que atenda a determinadas características impostas pelo ambiente de implantação. Na sequência é definida uma metodologia para a análise de resiliência e capacidade de transmissão, que pode ser aplicado para determinar a potência de transmissão necessária dos nós além do número necessário de gateways de rede.

O segundo objetivo é investigar como o RPL reage a ataques de interferência. Considerando parâmetros de densidade de rede, número de gateways a avaliação é efetuada com base no número de nós afetados pelo ataque e da qualidade dos caminhos de roteamento.

## 1.2 Contribuições

A primeira contribuição deste trabalho é um modelo de geração de topologia que considera aspectos práticos de cenário de implantação NAN e pode ser utilizado para o estudo e planejamento de muitas características de rede.

A segunda contribuição é uma metodologia para o cálculo de resiliência e capacidade de transmissão com intuito de proporcionar informações importantes para o projetista de uma NAN relacionadas a determinação do número e posicionamento de gateways, além da potência de transmissão de rádio a ser utilizada.

A terceira contribuição deste trabalho diz respeito aos estudos de ataques de interferência sobre NANs. Este estudo pode fornecer diretrizes importantes sobre a dinâmica do protocolo RPL sob diferentes níveis de potência interferente e uma série de gateways na topologia de uma NAN. O tempo que leva para o protocolo reagir ao ataque de jamming, o número de nós afetados e a qualidade dos caminhos de roteamento reconfigurados são questões importantes que ajudam a otimizar a operação do protocolo RPL e algoritmos como o Trickle.

### 1.3 Publicações

Os resultados deste trabalho de pesquisa foram publicados em duas conferências internacionais qualificadas:

- Conferência Internacional (IEEE International Conference on Communications (ICC 2016)) realizada em Kuala Lumpur em maio de 2016. Neste artigo foi avaliada a dinâmica do protocolo de Roteamento RPL sob ataques de jamming em redes Smart Grid [Renofio et al., 2016a].
- Conferência Internacional (IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC 2016)) realizada em Messina em junho de 2016. Neste artigo foi avaliada a resiliência de NANs em termos de números de gateways e potência de transmissão [Renofio et al., 2016b].

### 1.4 Estrutura do Documento

O restante deste documento está estruturado conforme descrito a seguir. O Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais relacionados a esta pesquisa. O Capítulo 3 discute sobre a resiliência relacionada a parâmetros de planejamento da NAN. Neste Capítulo é apresentado o Modelo Topológico empregado nas simulações bem como a Metodologia Proposta para Análise da Resiliência e Capacidade. O Capítulo 4 investiga o impacto dos ataques de interferência na resiliência de uma NAN avaliando o número de nós isolados além de uma métrica utilizada pelo RPL na construção dos caminhos de roteamento.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

Neste Capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados a esta pesquisa, com o objetivo de abordar os fundamentos que serão empregados nas propostas dos capítulos seguintes. Primeiramente, na Seção 2.1 é apresentada uma breve discussão sobre uma rede AMI e as tecnologias mais adequadas para uma NAN. Na Seção 2.2 são apresentados conceitos sobre o padrão IEEE802.15.4g. A Seção 2.3 apresenta e descreve os conceitos fundamentais do protocolo de roteamento RPL. Na Seção 2.4 é apresentado um tipo de ataque que pode causar instabilidade a redes de sensores sem fio e consequentemente ao funcionamento do sistema que a utiliza. O conceito de Capacidade de rede em termos de throughput é apresentado na Seção 2.5. Finalmente alguns modelos de canal de rádio são apresentados na Seção 2.6

### 2.1 Redes de Comunicação para AMI

A fim de proporcionar a comunicação entre os medidores inteligentes e centro de controle da concessionária de energia, é necessária uma rede estruturada. O nível de rede que abrange os eletrodomésticos inteligentes presentes na casa do cliente define a Home Area Network (HAN). Os dispositivos HAN podem se comunicar com o medidor inteligente quando o DSM é empregado. O conjunto de medidores inteligentes que estão ligados a um concentrador de dados (gateway) específico, em uma determinada região geográfica de uma cidade, define a Neighborhood Area Network (NAN). A figura 2.1 mostra um exemplo de cenário de uma NAN.

O medidor de energia elétrica deve ser capaz de enviar e receber dados a partir de um gateway, que por sua vez está conectado ao centro de controle da empresa de distribuição através de uma Wide Area Network (WAN) [Popovic and Cackovic, 2014] [Lighari et al., 2014]. Um exemplo de arquitetura de rede AMI é mostrada na Figura 2.2.

Existem muitas tecnologias com e sem fios que podem ser utilizados na implementação de uma NAN. Tecnologias com fios típicas incluem fibra óptica e Power Line Communication (PLC) [Mishra et al., 2015]. A utilização de redes FTTH (Fiber To The Home) [Zhou et al., 2014] vem crescendo mas ainda é limitada por questões de custo. O PLC parece ser uma escolha natural ao implementar uma rede AMI, mas questões legais e regulatórias ainda estão limitando o uso em grande escala desta estratégia em muitos países. Entre as tecnologias sem fio, o uso de redes estruturadas como 3G/4G e WiMAX também acabam sendo limitadas por razões de custo [Gungor et al., 2011]. Os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 tem sido

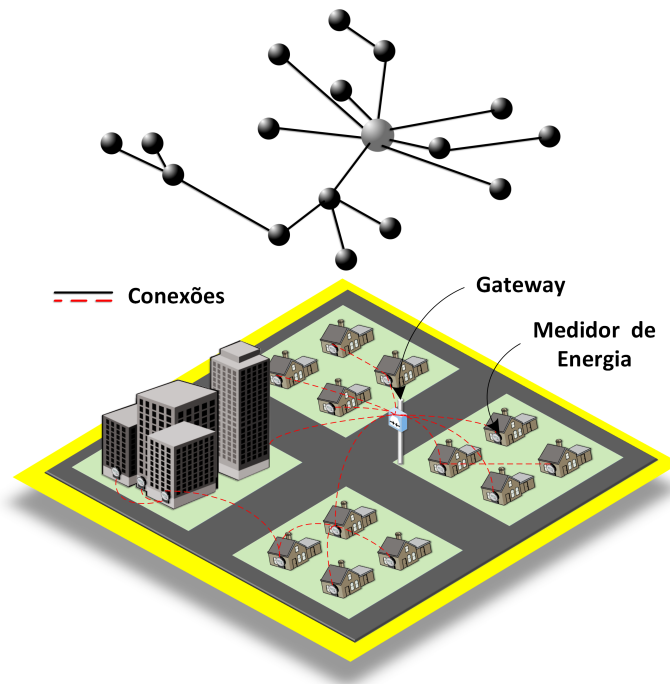


Figura 2.1: Exemplo de uma NAN em Smart Grid

utilizados para implementações práticas em NANs, tipicamente utilizando topologia em malha (mesh) sem fio [Yan et al., 2013].

Do ponto de vista de implantação, as redes sem fio têm a vantagem adicional de instalação flexível e ampla cobertura. No entanto, possui recursos limitados com relação ao espectro de radiofrequências, podendo gerar problemas como o desempenho insatisfatório da rede dependendo da parte do SG onde for utilizado [Xu and Wang, 2013]. Sistemas de comunicação baseados em redes mesh são amplamente utilizados na América do Norte e outras regiões do mundo em SG, principalmente aplicadas à NAN [Lichtensteiger and Bjelajac, 2010] [Toor and Ma, 2015] [Ho et al., 2015].

Redes com arquitetura mesh possuem roteadores sem fio, que com intuito de entregar mensagens a outros roteadores distantes, tem a capacidade de manter comunicação com roteadores intermediários no modo ad-hoc e através de múltiplos saltos (multihop, em inglês) fragmentam longas distâncias em uma série de saltos mais curtos. Tal arquitetura oferece alta cobertura de rede, eficiência espectral, vantagens relacionadas ao custo de implantação o que a torna eficiente e confiável. Devido essas características pode ser considerado que este tipo de arquitetura atende aos requisitos de desempenho de uma rede inteligente e então, tem sido considerada uma boa alternativa para efetuar a comunicação em uma rede inteligente [Moulema et al., 2014].

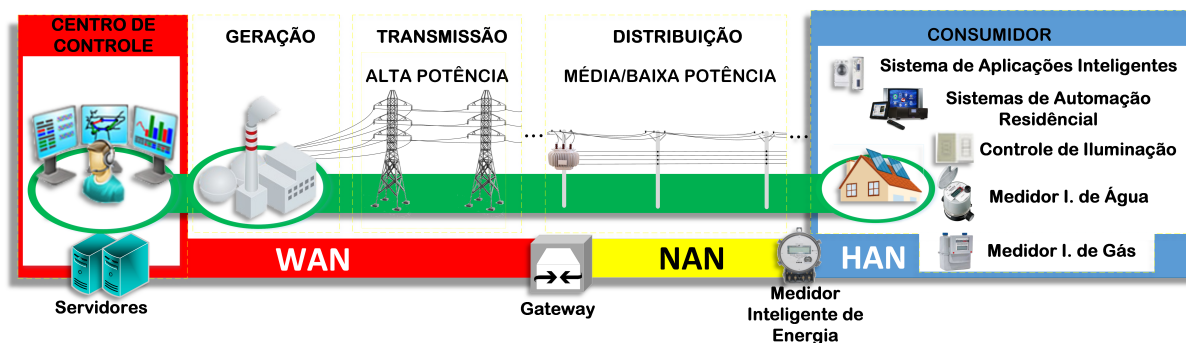


Figura 2.2: Arquitetura AMI

## 2.2 Padrão IEEE 802.15.4

A série de padrões IEEE 802.15.4 [IEEE, 2011] especifica definições de camada física (PHY) e controle de acesso ao meio (Media Access Control (MAC)) para redes sem fios de baixa taxa de dados, baixo custo além de baixa potência (LR-WPAN).

A camada PHY definida no padrão IEEE802.15.4 é responsável por permitir a transmissão das PPDU's (PHY Protocol Data Units, em inglês) ou unidades de dados. Basicamente esse padrão utiliza três bandas de frequência (868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz) que fazem parte das faixas de frequência ISM (Industrial Scientific and Medical) e não necessitam de licenciamento para operação. De acordo com cada banda tem-se diferentes taxas de comunicação. Além disso a norma também define as modulações a serem utilizadas nessa camada.

A camada MAC define dois tipos de dispositivos diferentes capazes de participar de uma rede IEEE 802.15.4: um dispositivo com funções completas (Full Function Device - FFD) e um dispositivo de função reduzida (Reduced Function Device - RFD). Um FFD é um dispositivo equipado com um conjunto completo de funções da camada MAC e é capaz de atuar como um coordenador ou como um dispositivo de destino final (end device). Um FFD pode se comunicar tanto com outro FFD quanto com um RFD. Um RFD não pode atuar como coordenador da rede devendo estar associados a somente um FFD na rede e assim pode ser implementado utilizando menos recursos de hardware. O IEEE802.15.4 ainda considera 2 tipos principais de topologia de rede: topologia estrela e topologia ponto-a-ponto. Através de uma rede com topologia estrela, os nós RFDs e FFDs somente podem se comunicar com um determinado dispositivo FFD que assume o papel de coordenador da rede. Já quando a rede utiliza uma topologia ponto a ponto um nó FFD pode se comunicar com outros FFDs dentro de seu alcance de rádio. Além disso a camada MAC é responsável por definir mecanismos de busca e associação (ou desassociação) de redes. De acordo as definições desta camada uma rede pode seguir o modo *beacon* e *não-beacon*. Em uma rede que utilize o modo beacon o coordenador é responsável por transmitir informações periodicamente para os dispositivos mais próximos, para que eles possam se conectar a rede. De maneira similar, em redes com o modo não-beacon habilitado, o coordenador somente envia os beacons somente quando algum dispositivo envie uma solicitação de beacon com intenção de participar da rede.

Existem algumas alterações relacionadas a esta norma. O IEEE 802.15.4e [IEEE, 2012a] especifica comportamentos adicionais relacionados ao MAC além de formatos de quadros que permitem dispositivos suportar uma ampla gama de aplicações industriais e

comerciais. A alteração correspondente ao IEEE 802.15.4f [IEEE, 2012b] especifica duas alternativas a camada PHYs (MSK e LRP UWB) e alterações na camada MAC de forma que dispositivos baseados nesse padrão possam operar em outras bandas utilizando outros tipos de modulação (MSK e OOK).

Em resposta principalmente ao crescente interesse mundial em redes aplicadas a Smart Grid, em abril de 2012 foi proposto o IEEE 802.15.4g [IEEE, 2012c] que define diversas faixas de frequências além de diferentes taxas de dados dependendo do país onde for utilizado. Além disso, são definidos três alternativas de camada PHY [Baronti et al., 2007] que aliado a modificações da camada MAC visam atender a requisitos de rede de medição aplicadas a Smart Grid: multi-rate and multi-regional frequency shift keying (MR-FSK), multi-rate and multi-regional offset quadrature phase-shift keying (MR-O-QPSK) e o multi-rate and multi-regional orthogonal frequency division multiplexing (MR-OFDM).

O MR-FSK fornece boa eficiência de potência de transmissão devido ao envelope constante do sinal de transmissão. As taxas de dados suportadas pelo MR-FSK podem variar de 5kbps a 400 kbps. De acordo com definições de camada física, o MR-FSK pode ou não utilizar um filtro de Gaussiano antes do modulador com intuito de diminuir a largura espectral dos sinais a serem transmitidos. Dependendo O MR-FSK pode possuir nível 2 ou 4 operando em 3 modos diferentes definidos a partir da taxa de dados, espaçamento de canais e índice de modulação. Já o MR-O-QPSK compartilha as características da modulação O-QPSK definida na camada física do padrão IEEE 802.15.4, no entanto considerando sistemas multi-modo que acabam trazendo benefícios em termos de custo e facilidade de projeto. Suporta taxas de 6kbps a 500kbps, utiliza DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) para espalhar a banda de comunicação. Deve utilizar um modo alternativo conhecido como MDSSS (Multiplexed Direct Sequence Spread Spectrum) para um determinado conjunto de frequências. Por outro lado, o MR-OFDM é projetado para fornecer taxas de dados mais altas em canais com desvanecimento seletivos em frequência, sendo mais robusto em canais de desvanecimento rápido. Ele pode atuar em 4 modos de operação suportando taxas de dados de 50kbps até 800kbps e utiliza transformada rápida de Fourier (FFT) com BPSK, QPSK ou 16-QAM.

Cada uma destas especificações de camada tem um tamanho de quadro distinto diante das configurações particulares pertinentes a cada uma delas [Chang and Mason, 2012]. Considerando que o padrão IEEE802.15.4g foi especificamente adaptado para aplicação em redes Smart Grid, no presente trabalho, as simulações efetuadas consideram parâmetros de rádios de comunicação que implementam este padrão.

## 2.3 Protocolo RPL

Redes com baixo consumo de energia e com perdas (LLNs) requerem sistemas operacionais otimizados para uso em um ambiente cujos equipamentos pertencentes a ela são caracterizados por restrições em termos de capacidade de hardware (processamento, memória, etc). Esses equipamentos geralmente se comunicam através de meios como o ar, que pode proporcionar altas taxas de perdas de pacotes e deixar a rede instável. Uma solução em termos de protocolo de roteamento para este tipo de rede é o RPL (Routing Protocol for LLNs, em inglês) [Brandt et al., 2012]. O RPL é um protocolo do tipo vetor de distância (distance vector, em inglês) adaptado para uma variedade de tipos de redes LLN.

O RPL é um protocolo de roteamento IPv6 para LLNs que especifica como construir um grafo de forma que todas as arestas são orientadas ou enraizadas em um nó concentrador

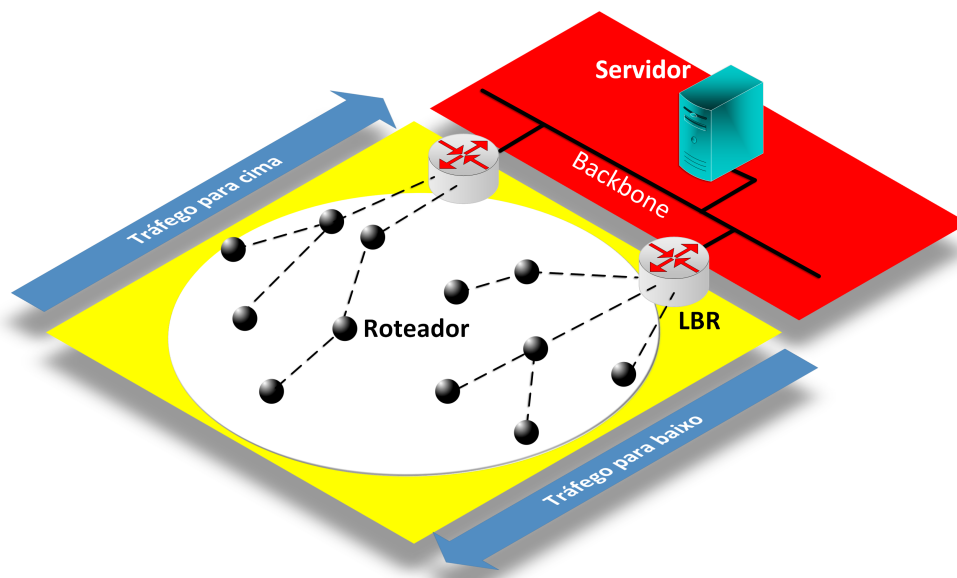


Figura 2.3: Exemplo de cenário LLN

(gateway) de maneira que não existem ciclos (DODAG - Destination-Oriented Directed Acyclic Graph, em inglês). O conjunto de DODAGs que compartilham a mesma identificação (RPLInstanceID) podem ser considerados pertencentes a uma instância RPL. O gateway que conecta uma LLN ao backbone é chamado roteadores de borda (LBRs - Lossy Network Border Router, em inglês).

Com relação às métricas de roteamento, algumas implementações de RPL podem optar por adotar uma abordagem extremamente simples, baseada na utilização de uma única métrica. No entanto, pode haver implementações em que se faz necessário utilizar um conjunto maior de restrições, métricas de conexão e roteamento. Isso pode ser efetuado por meio da definição de Funções Objetivo (OF - Object Function, em inglês). De uma forma geral, uma OF deve ser utilizada por todos os nós na instância RPL de forma a especificar como os nós devem selecionar caminhos através de métricas de roteamento e restrições no DODAG. Por exemplo, o caminho pode ser computado para evitar conexões que não fornecem um nível suficiente de confiabilidade (uso como uma restrição) ou como o caminho que oferece a maioria das conexões com um nível de confiabilidade especificado (uso como uma métrica). Tudo isso proporciona ao protocolo um alto grau de flexibilidade. Uma das métricas mais utilizadas é o ETX (Estimated number of Transmissions) [De Couto et al., 2003] que busca por caminhos com maior vazão minimizando o número total de transmissões requeridas para a transmissão de um pacote até o seu destino.

Através das métricas de roteamento e das restrições definidas na OF os nós são capazes de calcular sua classificação ou Rank. O rank de um nó define sua posição individual em relação ao LBR. Este parâmetro diminui se os nós se aproximam do LBR e consequentemente aumentam na direção contrária. Além disso, ele previne ciclos (loops) de roteamento.

Os nós que utilizam o RPL podem armazenar um conjunto de pais alternativos e irmãos candidatos no DODAG, que podem ser utilizados para encaminhar informações se o pai preferencial está incapacitado de fazê-lo. De acordo com este protocolo os nós da rede também podem ser configurados de acordo com o modo de armazenamento e não armazenamento de

rotas. Um nó mantém uma lista completa de roteamento relacionados aos nós em sua sub-DODAG quando configurado para o modo de armazenamento. Então, quando este recebe um pacote, verifica em sua tabela de roteamento e o encaminha se este for um destino válido. Caso contrário encaminha o pacote para o pai preferencial. No modo de não armazenamento, o LBR é que coleta informações de todo o DODAG. Desta forma, todos os pacotes de dados devem chegar até ele, que define o caminho de roteamento através da topologia armazenada, insere este caminho no cabeçalho do pacote e o encaminha. Através desta estratégia os nós da rede que estão presentes na rota do pacote são capazes de encaminhá-lo ao seu destino [Gan et al., 2013].

O RPL especifica um novo conjunto de mensagens de controle ICMPv6 para troca de informações relacionadas ao grafo. Estas mensagens são conhecidas como DIS, DIO e DAO. O DIO é a principal fonte de informações de roteamento de controle e pode armazenar informações como o ranking atual de um nó, a corrente instância RPL, o endereço IPv6 da raiz, etc. O rank recebido deve ser incrementado a fim de definir o rank do nó que se conectou a rede. Nós podem armazenar um conjunto de pais alternativos, que podem ser utilizados se o pai preferencial estiver incapacitado de rotear tráfego. Um mensagem do tipo DAO permite o apoio de tráfego do gateway para os medidores inteligentes e ele é usado para propagar informações de destino ao longo do DODAG. DIS possibilita um nó solicitar mensagens de DIO a um vizinho alcançável.

Um elemento que merece destaque quando se fala em protocolos de roteamento é o mecanismo de reparação de topologia em caso de falhas. No RPL, um mecanismo de Reparo Local (Local Repair, em inglês) deve ser acionado quando um nó que não possui caminho alternativo detecta a inconsistência de uma rota em direção ao LBR. Porém, após um reparo local podemos ter um grafo inconsistente a ponto que seja necessário reconstruí-lo. Esse mecanismo que somente pode ser iniciado pelo LBR é chamado Recuperação Global (Global Repair, em inglês). Nesse processo o LBR incrementa um contador sequencial (DODAGVersionNumber) a fim de reconstruir o DODAG e torná-lo consistente novamente [Khelifi et al., 2014].

Muitos protocolos de roteamento transmitem pacotes de controle em um intervalo de tempo fixo que faz com que a energia seja desperdiçada quando a rede está em uma condição estável. O RPL utiliza o algoritmo Trickle [P. Levis, 2011] que escalona o envio de mensagens DIO visando sempre minimizar a quantidade de DIOS transmitidos. Esse algoritmo tem um bom desempenho em redes caracterizadas por uma vasta gama de densidades de nós. A combinação de supressão de pacotes DIO e temporizadores adaptativos para o envio de atualizações permite ao RPL apresentar um bom desempenho tanto em redes esparsas quanto em redes densas. Diante de todas estas importantes características apresentadas pelo protocolo RPL e sabendo que ele pode ser implementado sobre o padrão IEEE802.15.4g inclusive utilizando uma arquitetura mesh, no presente estudo, as simulações efetuadas no Capítulo 4 consideram a utilização do protocolo RPL totalmente compatível implementado no software Mathematica.

## 2.4 Estratégias de Ataques em Redes Sem Fio

O uso de redes sem fio introduz possíveis vulnerabilidades de segurança devido à natureza compartilhada de canais sem fio. Desta forma, a segurança desse tipo de rede precisa de cuidados especiais.

Adversários podem gerar interferências ou mesmo monitorar qualquer transmissão devido à abertura do meio de transmissão sem fio. Além disso, pessoas mal intencionadas podem comprar dispositivos sem fio, que hoje são encontrados facilmente a baixos custos, e

usá-los para lançar uma variedade de ataques [Vijayakumar et al., 2014]. No ambiente de implantação de uma rede sem fio, por exemplo, podem ser lançados ataques como: ataques de replicação [Parno et al., 2005], ataques man-in-middle [Chan and Perrig, 2003], ataques sinkhole [Karlof and Wagner, 2003], ataques de flooding (inundação) [Bahaddur et al., 2013], ataques de jamming (interferência), ataques de spoofing [Vijayakumar et al., 2014] e Sybil (falsificação) [Chang et al., 2013]. No entanto, nesta pesquisa serão estudados ataques de interferência (jamming attacks).

Um ataque de interferência pode ser caracterizado através da injeção de um ruído de alta energia no canal de comunicação sem fio de uma rede. Ao emitir esse ruído intencional a fim de interromper a comunicação legítima sem fio tem-se a degradação do desempenho da rede, pois através dele é possível interromper a comunicação de um grande número de nós. Em caso de uma comunicação entre dois nós durante um ataque, o receptor pode obter um sinal com uma relação sinal-ruído muito ruim, tornando-o difícil de ser decodificado a partir do sinal recebido [Gupta et al., 2012]. Quando aplicado a uma NAN em Smart Grid, por exemplo, esse tipo de ataque pode causar até mesmo negação de serviço de aplicações do sistema elétrico. Esta seria umas das maneiras mais eficientes de se aplicar ataques de camada física [Lu et al., 2012]. A abordagem baseada em múltiplos caminhos muitas vezes não resolveria o problema tendo em vista que eles estariam comprometidos pelo ataque. Em uma implantação de rede NAN esse tipo de ataque representa uma ameaça primária à segurança [Chai et al., 2014]. Como se defender contra ataques é de importância crítica para proteger as comunicações sem fios em uma rede elétrica inteligente.

## 2.5 Cálculo de Capacidade de Rede

A resiliência de uma rede sem fio pode ser relacionada com falhas de nós ou enlaces de comunicação. Uma rede resiliente tem a capacidade de manter a comunicação global mesmo sendo alvo de ataques, falhas e pode ser considerada um ponto importante para os projetistas de rede [Chiaradonna et al., 2014]. Por outro lado, a largura de banda de uma rede baseada na tecnologia IEEE802.15.4g é limitada. Desta forma a capacidade de uma rede mesh sem fio em termos de throughput também acaba sendo muito importante para fins de planejamento principalmente em termos de garantir uma certa qualidade de serviço.

Tipicamente a natureza compartilhada dos meios sem fio impõe que, quando um nó está transmitindo, nenhum dos nós dentro do alcance de interferência da transmissão, ou domínio de colisão, pode transmitir ou receber. Mais especificamente, cada link possui um domínio de colisão e este domínio de colisão acaba sobrepondo o domínio de colisão de outros links desta rede. Cada domínio de colisão definido por cada link da rede não pode encaminhar mais pacotes do que é permitido, em termos de taxa de transmissão de dados, pela camada MAC ( $B$ ) do rádio utilizado. Desta forma, vai existir um domínio de colisão que estrangula e vai acabar definindo a capacidade, em termos de throughput, da rede como um todo e pode ser definido como domínio de colisão gargalo da rede.

Em uma rede mesh um nó deve transmitir seu próprio tráfego, além de retransmitir tráfego de nós que possuem rotas através dele. Um nó mais longe do gateway deve encaminhar menos tráfego que um nó mais próximo do mesmo. Desta forma, um nó da rede deve disputar o canal de comunicação com os outros nós que pertencem ao seu domínio de colisão. O cálculo da capacidade de uma rede em termos de taxa de transmissão (throughput) pode ser efetuada conforme proposto por [Jun and Sichitiu, 2003].

Neste estudo também foi avaliada esta importante característica de rede através de uma implementação no software Mathematica. Tal implementação assume uma condição idealizada onde todos os nós tem a mesma oportunidade de transmissão. Diante disso, uma simulação encontra o domínio de colisão gargalo da rede e define a capacidade máxima da rede através desse enlace.

## 2.6 Modelo do Canal de Rádio Móvel

As características de um canal de comunicação sem fio delimitam o desempenho de sistemas de comunicação sem fio. O projeto e planejamento de sistemas de comunicação sem fio requerem uma metodologia de projeto que se fundamenta na necessidade de se estimar o comportamento do rádio transmissor/receptor através de suas características em função da distância, assim como os desvanecimentos que podem ser causadas no sinal transmitido em função do ambiente em que esta rede está imersa. Existem 2 tipos de desvanecimento: em larga escala e em pequena escala.

Os modelos de propagação em larga escala são úteis no planejamento de áreas de coberturas de redes e descrevem a intensidade (SNR) média do sinal em função de uma distância entre transmissor/receptor. Existem alguns modelos que descrevem esses comportamentos como o modelo de espaço livre, modelo de 2 raios, modelo log-distance, entre outros.

O modelo mais simples de perda por propagação é o modelo de espaço livre. Este modelo é utilizado para fazer a predição da potência do sinal recebido, quando a entre antena de transmissão e recepção há uma linha de visada sem obstáculos, como pode ser experimentado por enlaces de micro-ondas e comunicações via satélite. De acordo com este modelo, a potência do sinal recebido decai proporcionalmente com o quadrado da distância entre transmissor/receptor e é dada pela equação do espaço livre de Friis:

$$P_r^d = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

onde  $P_t$  é a potência de transmissão,  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora do sinal,  $L$  diz respeito às perdas não relacionadas a propagação ( $L \geq 1$ ),  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos de potência das antenas transmissora e receptora, respectivamente. A diferença em decibéis (dB) entre a potência efetivamente transmitida e a potência recebida pode ser obtida através da equação abaixo:

$$P_{L_0}^{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)^2 \quad (2.2)$$

No entanto, o modelo de propagação em espaço livre é baseado em fenômenos físicos e pode ser considerado exato para aplicação nos cenários restritos que os caracterizam. Modelos baseados nestes mesmos fenômenos, que condizem mais com a realidade de outros cenários de aplicação são muito complicados de se obter e em muitas ocasiões podem não ser tão precisos na prática. Existem alguns modelos de propagação que são baseados em medições como é o caso do modelo Log-Distance. De acordo com este modelo a perda de percurso pode ser dada por:

$$P_L^{dB} = P_{L_0}^{dB} + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \quad (2.3)$$

onde  $d$  é a distância entre transmissor e receptor,  $d_0$  é a distância de referência,  $P_{L_0}^{dB}$  é a perda de percurso de espaço livre calculado na distância de referência através da equação 2.2,  $n$  é o expoente de perda do percurso. O coeficiente da perda no percurso depende de parâmetros como topografia e morfologia do ambiente e possui valores típicos conforme a Tabela 2.1

Tabela 2.1: Expoentes de perda de percurso para diferentes ambientes

| <b>Ambiente</b>         | <b><math>n</math></b> |
|-------------------------|-----------------------|
| <i>Espaço Livre</i>     | 2                     |
| <i>Rural Plano</i>      | 3                     |
| <i>Rural Acidentado</i> | 3,5                   |
| <i>Urbano</i>           | 4                     |
| <i>Urbano Denso</i>     | 4.5                   |

A distância de referência indica até onde a propagação se comporta como no espaço livre e deve ser medida ou escolhida de acordo com o ambiente. Em sistemas com grande cobertura, distâncias de referência de  $1km$  são comumente utilizadas, enquanto que em sistemas com cobertura reduzida, distâncias como  $100m$  ou  $1m$  costumam ser utilizadas.

O desvanecimento em pequena escala tem origem no comportamento aleatório das componentes do sinal, em termos de amplitude e fase, provenientes dos múltiplos percursos e que fazem o receptor experimentar variações rápidas e profundas do sinal, mesmo em curtas distâncias ou em curtos intervalos de tempo.

Os modelos de propagação em pequena escala (desvanecimento de curto prazo) [Goldsmith, 2005], diferente do modelo de propagação em larga escala, descrevem o comportamento da potência instantânea recebida. Rápidas flutuações decorrente dos caminhos múltiplos percorridos por um sinal de rádio (múltiplos percursos) em um curto espaço de tempo ou ainda em pequenas distâncias são combinadas na recepção e em decorrência de diferenças relacionadas a amplitude, fase e tempo geram variações rápidas e profundas da potência do sinal recebido que é caracterizado como desvanecimento em pequena escala. Além dos múltiplos percursos, o movimento relativo entre transmissor e receptor, movimento dos objetos presentes no canal de comunicação além questões relacionadas a largura de banda podem ter influência direta nesse tipo de desvanecimento.

A variação da potência do sinal apresenta uma natureza aleatória e, portanto, o método estatístico é o mais apropriado para o cálculo das perdas. Desta forma cada tipo de canal pode ser modelado por uma função distribuição de probabilidade (pdf) e as mais comuns são: Distribuição de Rayleigh, Rice e Nakagami-m.

A distribuição de Rayleigh é apropriada para os casos em que o ambiente móvel tem componentes de múltiplos percursos, porém não há uma linha de visada entre transmissor e receptor. Nesse caso, a componente do desvanecimento do sinal pode ser modelada pela distribuição de Rayleigh.

A sua função densidade de probabilidade (pdf) é dada por:

$$p_Z(z) = \begin{cases} \frac{z}{\bar{P}_r} e^{-\frac{z}{\bar{P}_r}}, & \text{para } 0 \leq z \leq \infty; \\ 0, & \text{para } z < 0. \end{cases}$$

onde  $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$  segue a distribuição Rayleigh.  $Z$  pode ser obtida a partir de 2 variáveis gaussianas aleatórias  $X$  e  $Y$  com média zero e variância  $\sigma^2$ . Além disso,  $z$  é o envelope e  $\bar{P}_r$  é a média da potência do sinal recebido. Tal distribuição pode ser ilustrada conforme a figura 2.4.

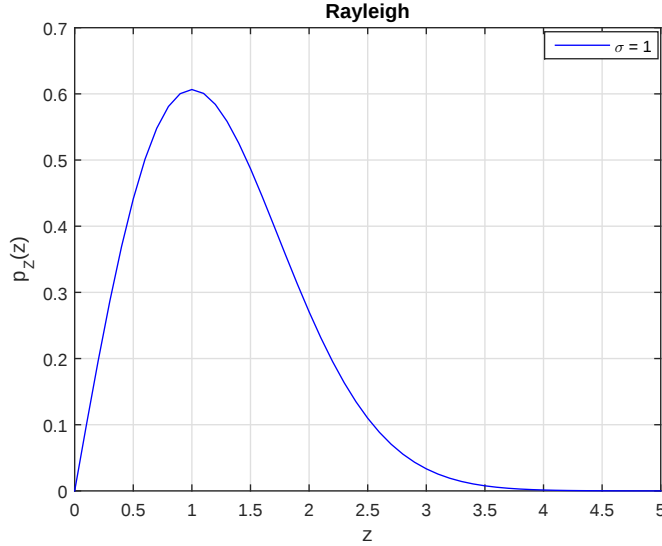


Figura 2.4: Distribuição de Rayleigh

A distribuição de potência pode ser obtida fazendo uma mudança de variáveis:

$$p_{Z^2}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{P}_r} e^{-\frac{x}{\bar{P}_r}}, & \text{para } 0 \leq x \leq \infty; \\ 0, & \text{para } x < 0. \end{cases}$$

onde  $Z^2$  é exponencialmente distribuído.

No entanto, em geral, o resultado de medições efetuadas na prática acompanham melhor dados obtidos com a distribuição de Nakagami-m. Nakagami deduziu uma expressão para a função densidade de probabilidade que é expressa por:

$$p_Z(z) = \begin{cases} \frac{2m^m z^{2m-1}}{\Gamma(m) \bar{P}_r^m} e^{-\frac{mz^2}{\bar{P}_r}}, & \text{para } 0 \leq z \leq \infty; \\ 0, & \text{para } z < 0. \end{cases}$$

onde  $\Gamma(m)$  é função Gama e  $m$  é o parâmetro de Nakagami. A distribuição de Nakagami-m engloba as distribuições de Rayleigh ( $m = 1$ ) além de ser capaz de modelar desvanecimentos mais severos ( $0,5 < m < 1$ ) ou menos severos ( $m > 1$ ) que a Distribuição de Rayleigh. Quando ( $m = \infty$ ) a  $P_r$  pode ser considerada constante e no desvanecimento não existe. Um exemplo da Distribuição de Nakagami-m pode ser observada na figura 2.5.

Além disso, a distribuição de potência para o desvanecimento de Nakagami pode ser obtida por:

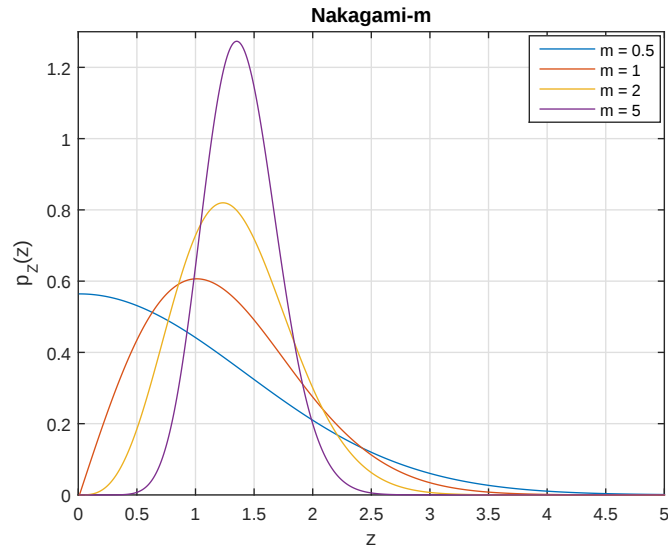


Figura 2.5: Distribuição de Nakagami

$$p_{Z^2}(z) = \begin{cases} \left(\frac{m}{P_r}\right)^m \frac{z^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-\frac{mz^2}{P_r}}, & \text{para } 0 \leq x \leq \infty; \\ 0, & \text{para } x < 0. \end{cases}$$

Já sua CDF pode ser obtida por:

$$P(Z < z) = \frac{\Psi\left(m, \frac{m \cdot z^2}{P_r}\right)}{\Gamma(m)} \quad (2.4)$$

onde  $\Gamma(a)$  representa a função gama completa e  $\Psi(a, b)$  representa a função gama incompleta.

Com base neste conceitos, nos capítulos seguintes deste estudo, afim de modelar o desvanecimento de larga escala nas simulações efetuadas, foi utilizado o modelo de propagação Log-Distance. Adicionalmente no Capítulo 4, a distribuição de Nakagami-m foi empregada nas simulações afim de modelar os desvanecimentos de pequena escala.

## Capítulo 3

# Análise e Planejamento de Redes AMI

### 3.1 Motivação e Trabalhos Relacionados

A fim de projetar ou avaliar o desempenho de uma NAN é necessário lidar com os aspectos topológicos da rede. Dada uma topologia específica é possível calcular métricas de desempenho, prever o impacto de falhas e determinar a resiliência da rede. Além disso, o conhecimento da topologia permite a concepção de protocolos mais eficientes [Erseghe et al., 2013]. Portanto, o projeto e a análise da arquitetura de uma forma mais eficiente exige um modelo topológico preciso e realista de uma NAN.

Como em muitos países as redes inteligentes ainda estão em desenvolvimento, é difícil obter acesso a dados de topologia relacionados a implantações em cenários reais. Existem poucos estudos sobre os modelos topológicos para NAN na literatura. Por exemplo, em [Wang et al., 2010], os autores propõem uma geração específica de topologias com base em parâmetros do sistema de energia americana. Eles extraem algumas métricas de sistemas reais e a partir daí, geram topologias aleatórias que estatisticamente seguem essas métricas. Alternativamente, em [Das and Das, 2012], é proposto uma estratégia para minimizar o custo de transmissão e de energia de uma NAN sem fio utilizando topologias aleatórias com distribuição uniforme de nós.

Os autores em [Otani and Miyashita, 2013], investigam a taxa de falha de comunicação e latência usando topologias *aleatórias* e *grid*. Em [Hartmann et al., 2014] os autores analisam as topologias de rede de distribuição energia em uma região geográfica específica de Luxemburgo, propõe um modelo topológico aleatório e realista para a NAN. No entanto, os resultados deste estudo se aplicam principalmente a redes AMI que utilizam a comunicação por PLC. Um estudo recente desenvolvido em [Nowak et al., 2014] propõe uma estratégia interessante para a geração de topologias para uma NAN baseado em mapas. Este modelo cria topologias se baseando em edificações de uma área geográfica urbana. Os autores analisam as propriedades estatísticas das redes AMI gerados usando o modelo proposto além dos modelos de distribuição clássicos como distribuições aleatórias e grid. Inspirado pelo modelo proposto em [Nowak et al., 2014] e com o objetivo de não usar informações específicas de uma determinada região geográfica, foi apresentada na Seção 3.2 uma estratégia simples para gerar topologias para NANs.

O modelo de topologia proposto é utilizado para o estudo de resiliência. Dado que tem-se um modelo topológico que represente de uma forma mais realista uma NAN, é possível estudar a resiliência da rede de uma forma mais precisa. Vários pesquisadores têm proposto

o uso de métricas de grafos para melhor prever a resiliência da rede, além da capacidade de resistir a ataques [Alenazi and Sterbenz, 2015]. No entanto, do ponto de vista do projetista da NAN, seria muito útil definir essa resiliência em termos do número de gateways e também da potência de transmissão dos nós.

Em [Tsado et al., 2014], os autores investigam a confiabilidade de uma rede AMI baseado no padrão IEEE 802.11 em termos do atraso fim-a-fim e do delay relacionado a diferentes números de nós na rede. Eles propõem o uso de uma arquitetura híbrida (sigle hop e multihop) a fim de aumentar a resiliência da rede. Em [Ye et al., 2015], os autores investigam como melhorar a confiabilidade de uma rede sem fio com base em uma NAN alimentada por energia solar e baterias recarregáveis. Eles se concentram em um protocolo de roteamento específico que inclui a capacidade de recuperação rápida das conexões. Porém, neste estudo, os aspectos topológicos da NAN não são levados em conta. Concentrando-se em aspectos de resiliência em relação ao número de gateways e potência de transmissão de rádio, foi proposto na Seção 3.3 uma nova metodologia de análise de resiliência que pode ser aplicada a projetos de NAN.

Além da resiliência, a capacidade da rede é outro tema importante abordado neste capítulo. Em [Karimi and Namboodiri, 2012] os autores teoricamente avaliam a capacidade de uma rede AMI, porém seu estudo é restrito a arquiteturas de comunicação sem fio com múltiplos saltos organizados em uma cadeia linear. Em [Karimi and Namboodiri, 2014] os autores fazem uma análise teórica e além de simulação de capacidade para a AMI, com ênfase em arquiteturas baseadas no padrão IEEE802.11.

No presente estudo foi implementada uma ferramenta de software capaz de calcular a capacidade da rede utilizando o modelo bem estabelecido apresentado em [Jun and Sichitiu, 2003]. Dada uma topologia e o conjunto de nós ativos, o modelo fornece limites superiores para o throughput da rede. Além disso, nossos cenários de simulação empregam arquiteturas de NAN que seguem o modelo proposto na Seção 3.2 considerando ainda o IEEE 802.15.4g, que é um padrão novo para aplicações em redes elétricas inteligentes.

## 3.2 Um Novo Modelo Topológico para NAN

A fim de permitir que as principais funcionalidades do Smart Grid, tais como leitura remota, controle remoto de dispositivos e aplicação de políticas de preços de acordo com a programação e demanda de energia, uma arquitetura NAN sem fio apropriada se faz necessária. Como discutido na Seção 3.1, os modelos de topologia clássicos não são adequados para estudos de NANs de uma forma mais realista. Para contornar este problema, os autores em [Nowak et al., 2014] propõem um modelo topológico para NANs baseado em mapas, que identifica áreas relacionadas a edificações e distribui os nós de maneira uniforme somente dentro destas áreas. Além disso, em uma implementação real de NAN, os medidores inteligentes são geralmente posicionados na fronteira das quadras e próximo à rua. Portanto, com base no estudo apresentado em [Nowak et al., 2014] e considerando alguns aspectos práticos de implementação, foi proposto uma nova estratégia de geração de topologia em que os nós são colocados aleatoriamente em regiões restritas definidas pelas instalações práticas previamente discutidas.

### 3.2.1 Modelo Proposto

Considere uma região geográfica de uma cidade onde as residências estão divididas em quadras com dimensões  $(l, l)$  e uma distância máxima  $c$ , a partir da fronteira da quadra. Isto

define a região periférica de uma quadra, onde se assume que os elementos de uma NAN (medidores inteligentes, repetidores e gateways) podem ser implantados. A fim de criar topologias mais abrangentes, foi possível definir uma largura de rua ( $r$ ) para que desta forma seja possível criar topologias com mais quadras. Um exemplo desta estrutura considerando quatro quadras é apresentada na Figura 3.1. Utilizando a estrutura que define as possíveis regiões onde os nós podem ser posicionados, os elementos da topologia da NAN são definidos através de distribuição uniforme. As Figuras 3.2 3.3 ilustram exemplos de topologias geradas quando os elementos dessa NAN são configurados com potências de transmissão de -5 e -10 dBm, respectivamente, além de outros parâmetros descritos na Seção 3.4.

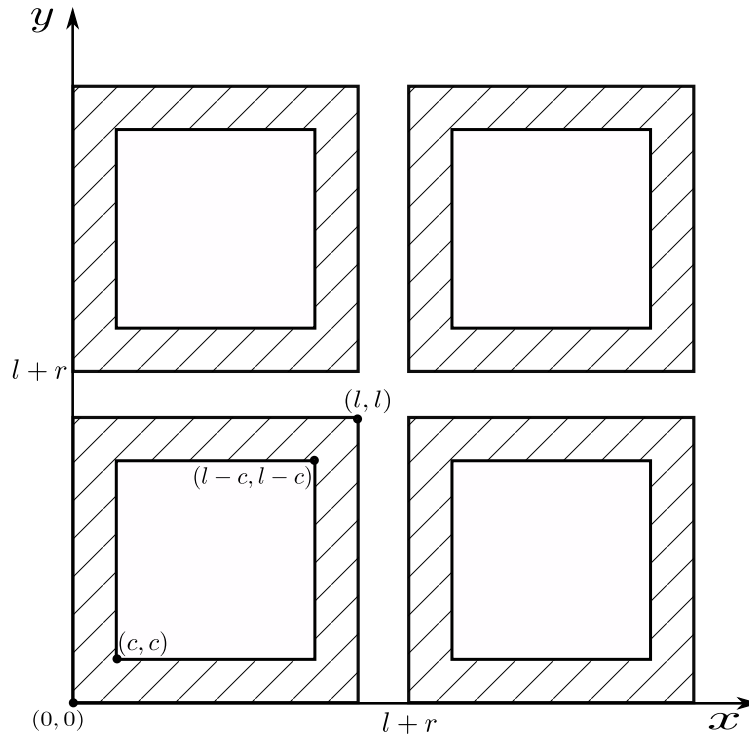


Figura 3.1: Área de Implantação de uma NAN

### 3.2.2 Propriedades Topológicas

Matematicamente, a NAN pode ser representada por um grafo  $G = \langle \mathbf{V}, \mathbf{E} \rangle$ , onde  $\mathbf{V}$  é o conjunto de vértices ou nós e  $\mathbf{E} \subset \mathbf{V} \times \mathbf{V}$  é o conjunto de arestas. Uma aresta é denotada por  $e_{ij} \in \mathbf{E}$  onde  $e_{ij} = (v_i, v_j)$ . Para o grafo não direcionado,  $e_{ij} \in \mathbf{E}$  se e somente se  $e_{ji} \in \mathbf{E}$ . Seja  $M$  o número total de arestas no grafo. Note que  $|\mathbf{E}| = 2M$  desde que cada aresta não direcionada corresponda a dois elementos em  $\mathbf{E}$ . O modelo topológico proposto para a NAN apresenta algumas diferenças estatísticas em comparação com os modelos clássicos, principalmente em termos de métricas de grafos como  $k$ -conectividade e assortatividade [Zhao et al., 2013, Mussmann et al., 2014, Alenazi and Sterbenz, 2015].

Em redes sem fio a métrica  $k$ -conectividade define o número tolerável de falhas de nós. Assim, mesmo que  $(k - 1)$  nós ou links de comunicação falhem ainda existe um caminho entre dois nós da rede e estes ainda permanecem conectados [Zhao et al., 2013]. Na Figura 3.4 foi possível verificar que topologias geradas pelo modelo proposto, o que pode representar uma área

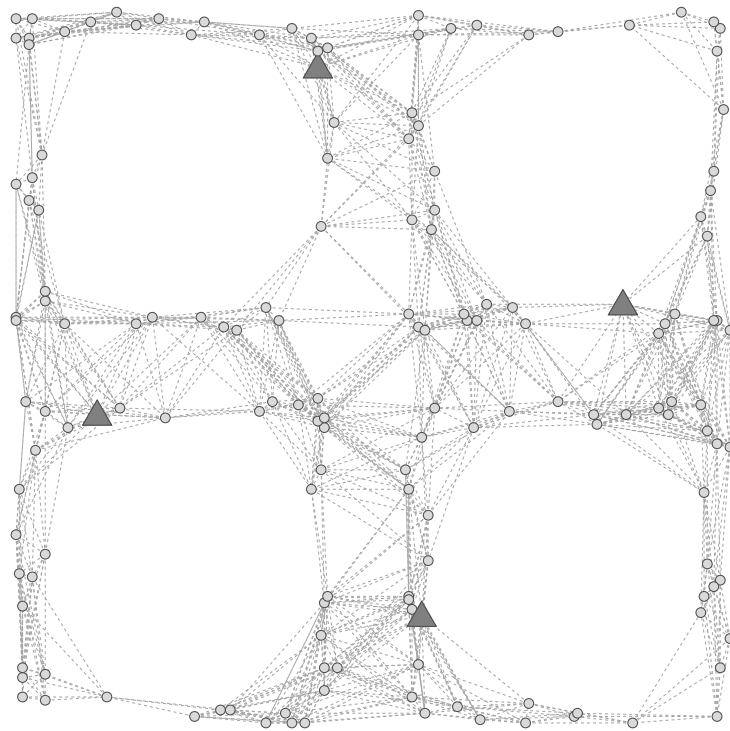


Figura 3.2: Exemplo de topologia de uma NAN gerada (-5 dBm)

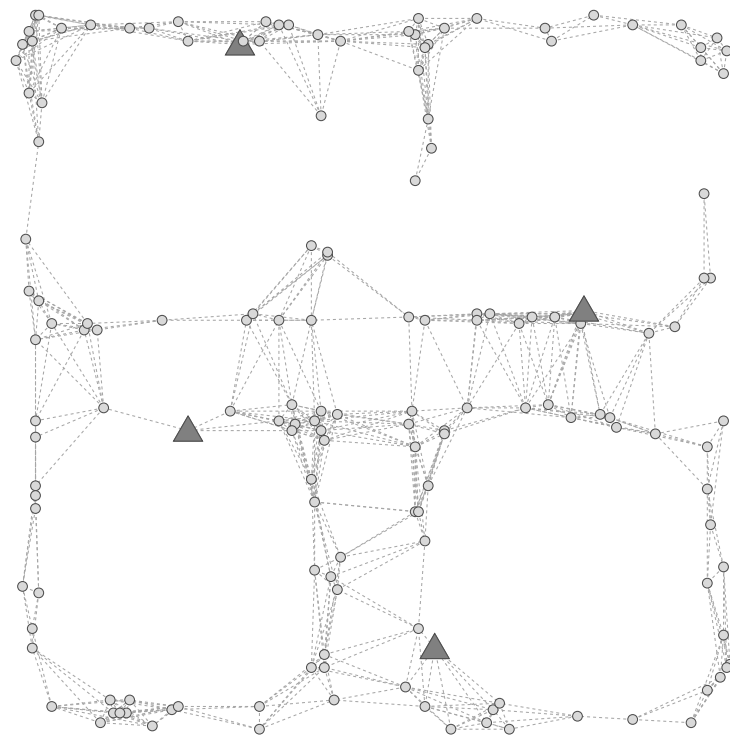


Figura 3.3: Exemplo de uma topologia de uma NAN gerada (-10 dBm)

de implantação mais realista de uma NAN, têm uma menor  $k$ -conectividade e consequentemente

uma menor tolerância a falhas em comparação com as topologias geradas com distribuições clássicas.

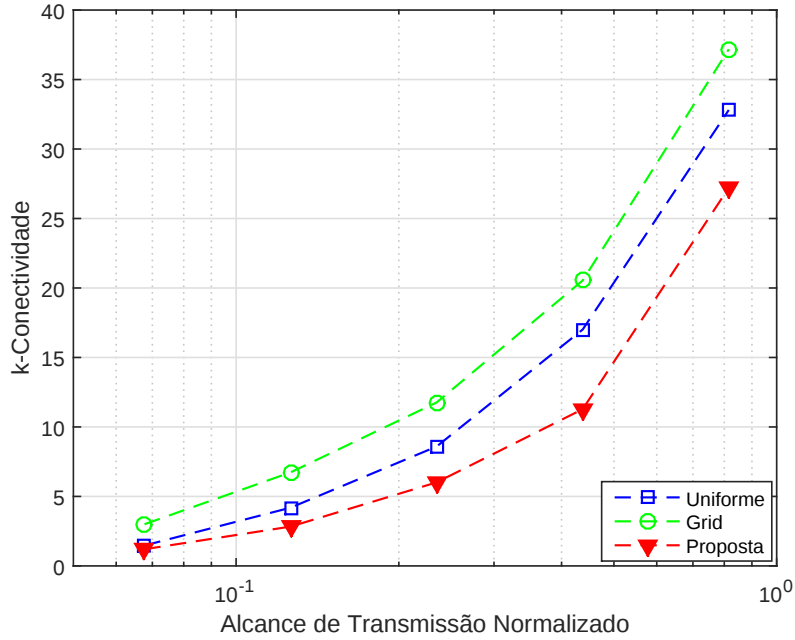


Figura 3.4: k-Connectividade para diferentes modelos de topologia.

A métrica de Assortatividade [Mussmann et al., 2014, Alenazi and Sterbenz, 2015] fornece informações sobre a estrutura e resiliência de uma rede. Essa métrica mede a tendência de que as conexões sejam estabelecidas entre elementos de grau semelhante. É possível definir  $K = \{(d_i, d_j) | e_{ij} \in \mathbf{E}\}$ , onde  $d_i$  é o grau de um nó  $v_i$  no grafo. A assortatividade é um exemplo do coeficiente de correlação de Pearson  $\mathcal{A}$ , ( $-1 \leq \mathcal{A} \leq +1$ ) aplicados aos elementos do conjunto  $K$ , de modo que:

$$\mathcal{A} = \frac{\sum_{e_{ij} \in \mathbf{E}} (d_i - \bar{d})(d_j - \bar{d})}{\sum_{e_{ij} \in \mathbf{E}} (d_i - \bar{d})^2} \quad (3.1)$$

onde  $\bar{d} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \sum_{e_{ij} \in \mathbf{E}} d_i$ . Se um grafo tem assortatividade negativa, os nós com grau diferente tendem a se conectar. Por outro lado, se um grafo tem assortatividade positiva, os nós tendem a se conectar aos nós de grau semelhante. Uma rede com assortatividade positiva tem uma resiliência melhor do que uma rede com assortatividade negativa. Uma falha ou ataque a um nó com elevado grau em uma rede assortativa deixaria outros nós de elevado grau conectados um ao outro. Isso minimiza a chance de a rede como um todo se tornar desconectada [Noldus and Van Mieghem, 2015]. Muitos caminhos entre os nós da rede são dependentes de nós de alto grau de conexão. A falha de um nó de alto grau em uma rede não-assortativa terá mais impacto sobre a conectividade da rede. De acordo com a Figura 3.5 o modelo proposto, que pode representar uma NAN de uma forma mais realista, tem uma assortatividade maior do que as topologias aleatórias e grid.

Portanto, é evidente que existem diferenças estruturais importantes entre o modelo de topologia proposto e os modelos clássicos quando aplicados a uma NAN, ao passo que o modelo

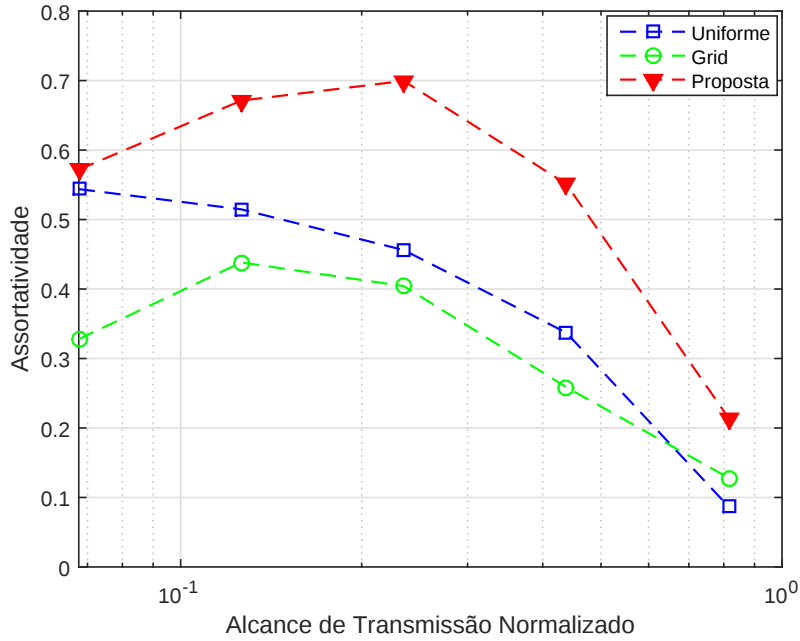


Figura 3.5: Assortativitvidade para diferentes modelos de topologia.

proposto representa melhor os cenários reais de implantação. Usando o modelo de topologia proposto é apresentado na seção a seguir, uma metodologia para o planejamento da resiliência da rede com base no número de gateways e seleção da potência de transmissão.

### 3.3 Metodologia de Análise

Projetar uma arquitetura de comunicação resiliente para o Smart Grid é muito importante para minimizar os efeitos de eventuais ataques e oferecer alto nível de disponibilidade. Em implantações de NANs sem fio, os nós são muitas vezes vulneráveis a ataques, a desastres naturais além de estarem susceptíveis a falhas que podem perturbar o seu funcionamento normal. Uma rede resiliente tem a capacidade de manter a comunicação da rede como um todo mesmo em face desses desafios e pode ser considerada como um meta a ser atingida pelos projetistas de rede [Chiaradonna et al., 2014]. Nesta Seção foi investigada a capacidade de resiliência da NAN em função do número de gateways e da potência de transmissão dos nós da rede, além da capacidade de rede em termos de throughput. A metodologia considera topologias de rede geradas pelo modelo proposto na seção 3.2.1 através de  $N = N_g + N_s$  nós representados por um grafo  $G$ , com  $N_g$  gateways e  $N_s$  medidores inteligentes. Tal metodologia, considera em sua análise, métricas intra-cluster e métricas inter-cluster que serão discutidas na Seção 3.3.1. Além disso, uma nova métrica para avaliar a capacidade de resiliência da NAN foi definida e uma metodologia de análise foi proposta. A capacidade de uma NAN também foi investigada porque ela pode limitar o desempenho de aplicações implementadas sobre uma NAN sem fio. A metodologia proposta é mostrada na Figura 3.6 e como pode ser observado, os cinco passos iniciais são comuns para ambas as análises.

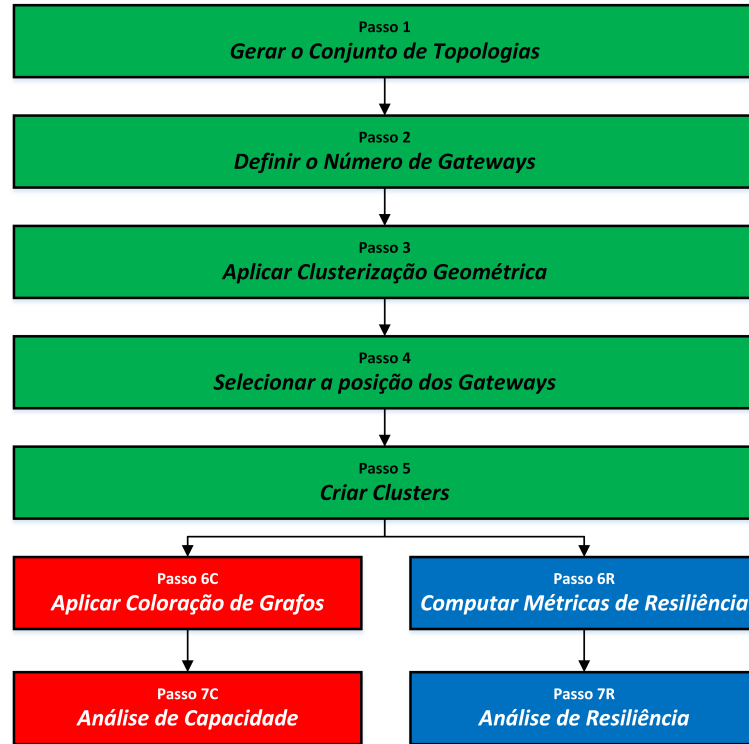


Figura 3.6: Metodologia Proposta

### 3.3.1 Análise de Resiliência

Um caminho em  $G$  com o comprimento  $(l - 1)$  saltos pode ser definido como um sub-grafo  $P$  onde  $V(P) = \{p_0, p_1, \dots, p_l\}$  e  $E(P) = \{(p_0, p_1), (p_1, p_2), \dots, (p_{l-1}, p_l)\}$ , onde  $V(P) \subset \mathbf{V}$  and  $E(P) \subset \mathbf{E}$ . Os vértices  $p_0$  e  $p_l$  denotam os nós de origem e de destino, respectivamente. O caminho mais curto entre dois nós  $(p_0, p_l)$  é denotada por  $P_{sp}$ . Dois caminhos entre  $(p_0, p_l)$ , são independentes se eles não têm vértices em comum, a não ser os vértices de origem e destino. A existência de caminhos independentes é uma característica muito importante e que está diretamente relacionada com a resiliência da rede. Em caso de falha de um nó de rede ou falha na conexão, é desejável que o nó de origem tenha caminhos alternativos para atingir o gateway. Os passos para a análise foram definidos conforme abaixo:

- **Passo 1:** Gerar um conjunto aleatório de topologias através do modelo proposto.
- **Passo 2:** Definir o número alvo de gateways,  $N_g$ .
- **Passo 3:** Agrupar os nós da rede em  $N_g$  clusters utilizando a estratégia de clusterização geométrica. A clusterização geométrica tem como objetivo atribuir os nós da rede aos  $N_g$  clusters de tal modo que a distância máxima a partir de qualquer nó ao seu centro de geométrico seja minimizado. Nesta etapa, no presente estudo foi aplicado o algoritmo k-means [Sasikumar and Khara, 2012].
- **Passo 4:** Selecionar a posição dos nós gateway. O nó gateway é definido como o nó da rede que tem a posição mais próxima do centro geométrico de cada cluster.

- Passo 5:** Este é o passo em que efetivamente se criam os clusters da NAN. O procedimento de separação em clusters executado no Passo 3 indica os nós que estariam associados a cada cluster com base em critérios de distância. No passo 4, há uma grande probabilidade de que os gateways escolhidos não estejam posicionados exatamente no centro de cada grupo. Por conseguinte, existe uma possibilidade de que alguns nós não tenham conexão devido ao alcance de transmissão de seu rádio. Assim, um procedimento adicional é necessário para concluir o clusterização. Neste passo foram aplicados critérios de caminho mais curto (Shortest Path, em inglês) [Shi et al., 2011] com intuito a reproduzir o que deve ocorrer na prática e desta forma atribuir um gateway a cada nó da rede, além de criar os clusters finais. Exemplos do processo de clusterização são mostrados nas Figuras 3.7 e 3.8, onde os nós são configurados com -5 dBm e -10 dBm, respectivamente.

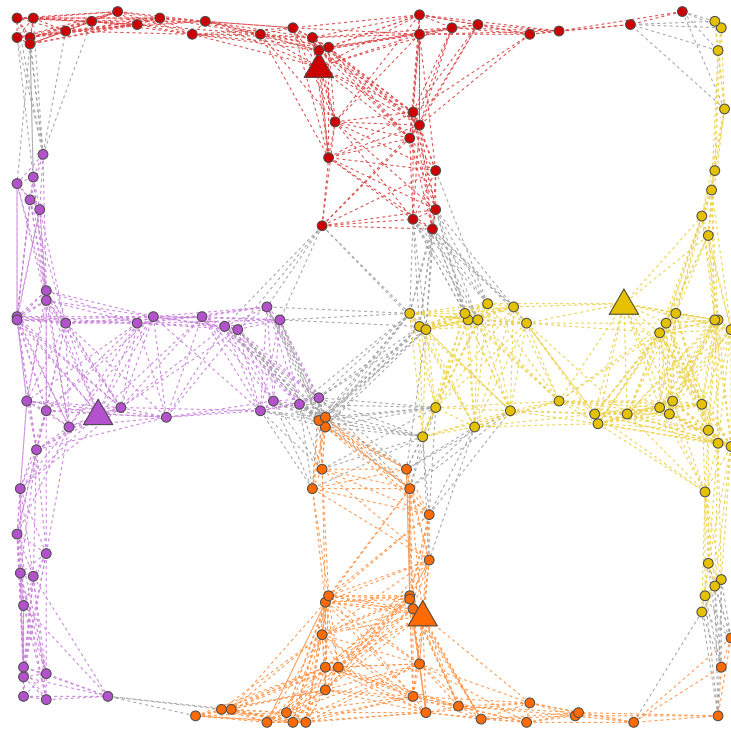


Figura 3.7: Exemplo de topologia clusterizada (-5 dBm)

- Passo 6R:** Calcular as métricas de resiliência intra-cluster e inter-cluster. Para a análise intra-cluster, foram calculados o número médio de saltos e o número de caminhos independentes para que os nós alcancem seu gateway padrão no cluster. A análise inter-cluster aborda a capacidade do nó de se conectar a outros gateways caso venha a perder a conectividade com seu gateway padrão. Cada nó da rede define uma lista de gateways candidatos e que possam ser selecionados como destino de suas mensagens, com base no menor métrica do caminho. Os gateways candidatos são ordenados pela distância, a partir do mais próximo até o mais distante. Em seguida, calcula-se o número de caminhos independentes a partir do nó para todos os gateways. Nesta etapa devem ser selecionados somente os caminhos independentes cujo comprimento sejam limitados a um máximo de  $L$  saltos. Este foi considerado como um critério de ajuste que pode ser definido com base nas restrições de atraso da rede a ser projetada.

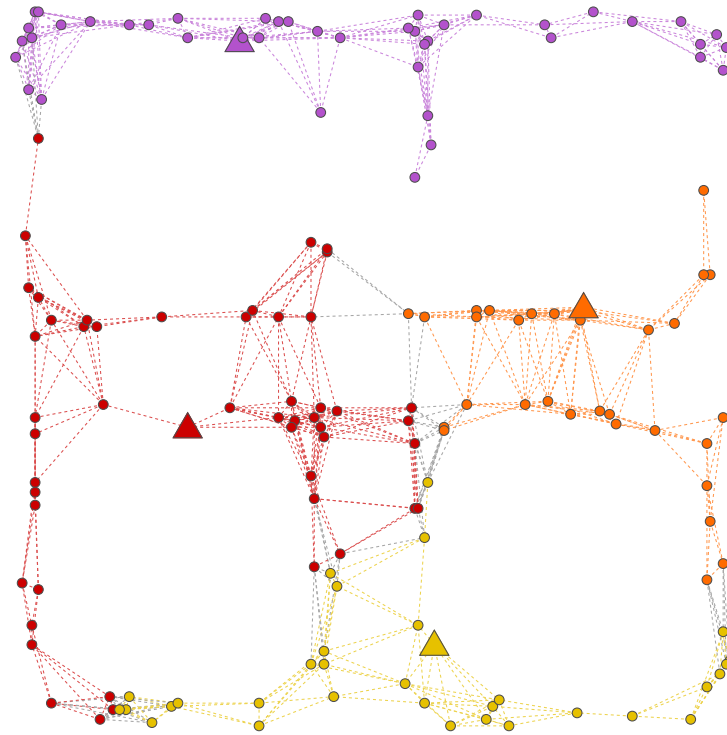


Figura 3.8: Exemplo de topologia clusterizada (-10 dBm)

- **Passo 7R:** Analisar as métricas intra-cluster e inter-cluster. A partir de métricas intra-cluster, foi possível analisar como o número médio de caminhos independentes e saltos são afetados pelo número de gateways e a potência de transmissão dos nós. Portanto, dado um número alvo de gateways, a partir desta análise, é possível obter a potência de transmissão mínima que permite que os medidores inteligentes atinjam o seu gateway, usando um caminho limitado a  $L$  saltos. Para uma arquitetura de rede mais resiliente, é importante que um medidor inteligente tenha muitos caminhos independentes para o gateway no interior de seu cluster, mas também que tenha caminhos independentes para outros gateways de acesso à rede da Companhia de Energia. Portanto, no presente estudo foram avaliadas métricas inter-cluster.

Em muitos outros trabalhos, os autores propõem a utilização de métricas de grafo ou ainda definem métricas para avaliar a resiliência de rede [Alenazi and Sterbenz, 2015]. No presente estudo, a resiliência inter-cluster é avaliada utilizando a métrica definida pela equação 3.2. O parâmetro  $I_{ij}$  é o número de caminhos independentes de um nó  $i$  ao gateway  $j$ . Foi assumido que  $j$  representa o índice para a lista ordenada de candidatos gateways para o nó  $i$ . A lista é ordenada pela distância, a partir do mais próximo ao mais distante.

$$R_{inter} = \frac{1}{R_{ref}} \frac{1}{N_s N_g} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_g} I_{ij} \cdot j, \quad (3.2)$$

O multiplicador  $j$  representa um fator de ponderação relacionado com o número de gateways que um nó pode alcançar. Os nós que podem chegar a um número maior de gateways com um maior número de caminhos independentes apresentam uma resiliência mais elevada. O

parâmetro  $R_{ref}$  é um fator de normalização que representa a capacidade de resistência obtidos no caso de se utilizar a potência de transmissão máxima permitida e o número máximo de gateways de um determinado cenário.

### 3.3.2 Análise de Capacidade

A capacidade da rede está diretamente relacionada ao gargalo do domínio de colisão. Além disso, o domínio de interferência de um nó afeta a qualidade do sinal recebido e degrada o desempenho do link de comunicação em uma determinada região. Ao aumentar a potência de transmissão do nó, aumenta-se a área de cobertura do nó na rede, mas a um custo de aumentar os domínios de colisão e de interferência. Desta maneira, o objetivo desta análise é investigar como a capacidade da NAN é afetada pelos parâmetros da topologia. A metodologia segue os mesmos passos iniciais de análise de resiliência (passos de 1 a 5). Os passos específicos são descritos a seguir:

- **Passo 6C:** Aplicar uma estratégia de coloração de grafos [Abdullah et al., 2014] para atribuir canais para os diferentes clusters da rede, a fim de minimizar as interferências co-canal e de canal adjacente. Cada cluster é representado por um conjunto de vértices no procedimento de coloração de grafos. A capacidade foi estimada utilizando o modelo apresentado em [Jun and Sichitiu, 2003] [Aoun et al., 2006].
- **Passo 7C:** Analisar como a capacidade da rede é afetada pela potência de transmissão dos nós e também pelo número de gateways da rede.

## 3.4 Estudo de Caso

Nesta sessão, é apresentado a aplicação da metodologia proposta nas sessões anteriores. Neste estudo, foi considerada uma NAN sem fio cujos medidores inteligentes e gateways são equipados com rádios IEEE802.15.4g [Chang and Mason, 2012]. Nas simulações efetuadas foram considerados os parâmetros do rádio IEEE802.15.4g da fabricante Atmel [Atm, 2015] que se comunicam utilizando a banda ISM de 902-928 MHz. Dentre as opções apresentadas pelo fabricante do rádio foi escolhido o esquema de modulação MR-FSK (multi-rate Frequency Shift Keying), que proporciona opções de ordens de modulação de 2 ou 4 bits por símbolo, além de taxas de transmissão de 50, 100 e 200 kbps. Tabela 3.1 resume os parâmetros utilizados nos nossos dois cenários de simulação usando uma modulação MR-FSK binária. O parâmetro  $f$  é a frequência de operação,  $S_{rx}$  é a sensibilidade do receptor,  $R$  é a taxa de transmissão e  $N_F$  é a figura de ruído do receptor. A potência de transmissão de rádio é ajustável entre -12 e 15 dBm.

Tabela 3.1: Parâmetros do Rádio AVR

| Scenário | $f$ (MHz) | $R$ (kbps) | $S_{rx}$ (dBm) | $N_F$ (dB) |
|----------|-----------|------------|----------------|------------|
| 1        | 914       | 50         | -109           | 4.5        |
| 2        |           | 200        | -102           |            |

A estrutura de quadro de camada física é mostrada na Figura 3.9. Para a modulação MR-FSK binária, o tamanho do preâmbulo é de 8 bytes para uma taxa de transmissão de 50 kbps e 16 bytes para 200kbps. O delimitador de início de um quadro (SFD) e o cabeçalho

(PHR) têm ambos um comprimento 2 bytes. A unidade de dados de serviço física (PSDU) tem um comprimento máximo de 250 bytes.

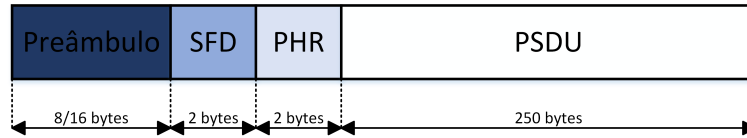


Figura 3.9: Estrutura do quadro de Camada Física

Foi empregado o modelo de propagação Log-Distance [Goldsmith, 2005] assumindo um expoente de perda do percurso  $n = 3,7$ , que é um valor razoável para a modelagem de perda de percurso em áreas urbanas. Desta forma, a potência de recepção é calculada conforme abaixo:

$$P_{rx}^{dBm} = P_{tx}^{dBm} + G_t^{dB} + G_r^{dB} - P_L^{dB} - N_F^{dB}, \quad (3.3)$$

onde  $G_t^{dB}$  e  $G_r^{dB}$  são os ganhos de transmissão e recepção da antena, respectivamente. Dois nós podem ser considerados conectados se  $P_{rx}^{dBm} \geq S_{rx}$ . Para este estudo de caso ficou definido que  $G_t^{dB} = G_r^{dB} = 0$ .

Além disso, foram consideradas topologias NAN abrangendo quatro quadras de rua, onde cada quadra tem dimensão  $(l, l) = (100, 100)$  metros. A distância da fronteira da quadra onde os medidores inteligentes podem ser implantados foi definido como  $c=10m$  e a largura da rua para  $r=20m$ . Um exemplo de uma topologia gerada usando esses parâmetros é mostrado na Figura 3.2, onde tem-se uma densidade de 40 nós por quadra e a potência de transmissão de -5 dBm para todos os nós da rede. Nesta análise, ficou definido um número máximo de gateways  $N_g=10$ , um conjunto de possíveis potências de transmissão  $\{-10, -5, 0, 5, 10\}$  dBm e um comprimento máximo para os caminhos independentes de  $L=10$  saltos. Um conjunto de 100 topologias foram gerados para tal análise. O objetivo seria investigar a resiliência e a capacidade de uma NAN em função do número de gateways selecionado além da potência de transmissão utilizada pelos nós. Adicionalmente, em seguida, foram apresentados alguns resultados de simulações em que os cenários obedeceram a distribuições clássicas de topologia.

### 3.4.1 Análise de Resiliência

Primeiramente são apresentados os resultados referentes as métricas intra-cluster. A Figura 3.10 mostra o número médio de caminhos independentes no interior do cluster para um número diferente de gateways. Para potências de transmissão entre -10 dBm e 0 dBm, o número de caminhos independentes, de uma maneira geral, não é sensível ao número de gateways devido a baixa conectividade da topologia. Quando os rádios operam com potências de transmissão mais elevadas (+5 e +10 dBm), obtém-se um ganho significativo em termos de caminhos independentes devido à alta conectividade dentro dos clusters. Quando o número de gateways aumenta o número de caminhos independentes reduz em consequência do tamanho da redução do tamanho dos clusters.

O número de saltos mostrados na Figura 3.11 apresenta um comportamento semelhante. Para um grande número de gateways os nós são capazes de atingir o gateway em um salto devido ao tamanho reduzido cluster. Estes dois resultados definem um equilíbrio entre resiliência intra-cluster e atraso.

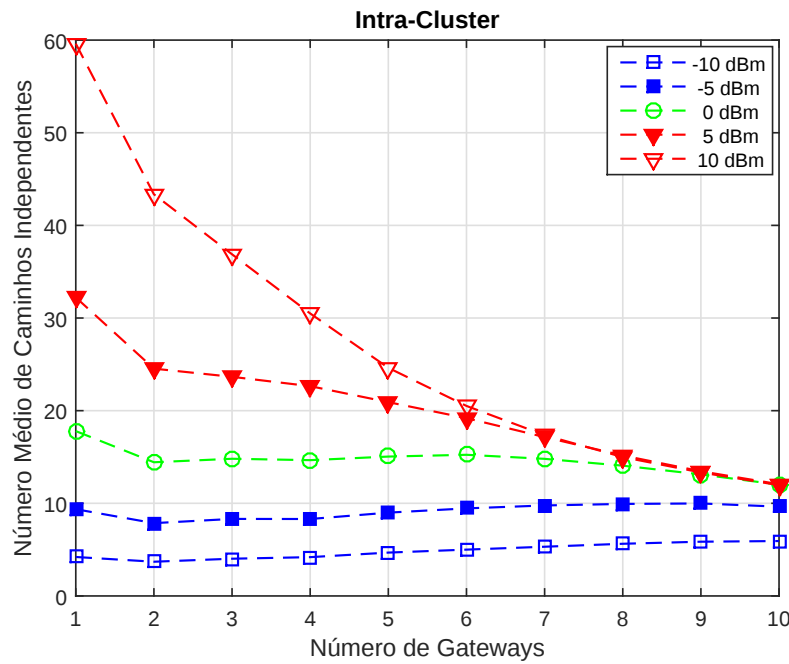


Figura 3.10: Número Médio de Caminhos Independentes.

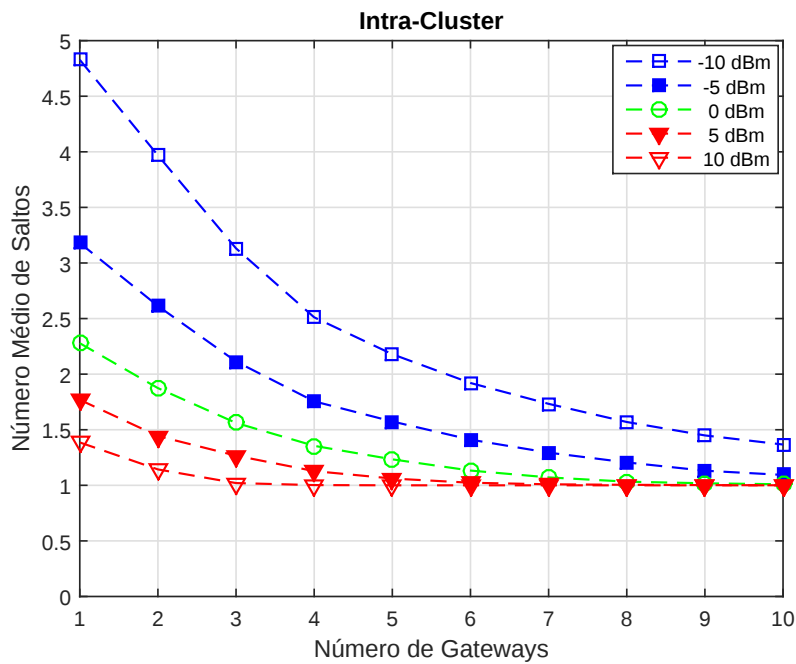


Figura 3.11: Número médio de saltos.

Com base nos resultados mostrados nas Figuras 3.10 e 3.11 pode-se determinar a potência mínima de transmissão que deve ser definida no rádio e o número de gateways necessários para restringir o número máximo de saltos que esses rádios necessitam para alcançar o gateway. Este resultado é apresentado na Figura 3.12, para um número máximo entre 1 e 4 saltos para que a mensagem dos medidores alcancem o gateway. Por exemplo, para alcançar

os gateways com, no máximo, 4 saltos é necessário configurar os rádios com uma potência de transmissão mínima de -10 dBm e um mínimo de dois gateways. Da mesma forma, a fim de obter uma NAN onde os nós tem uma conexão direta com os gateways (um salto), podem-se obter três configurações possíveis. Pode-se definir a potência de transmissão para 0 dBm em uma rede com 9 gateways, 5 dBm com 7 gateways ou 10 dBm com 4 gateways. Estes parâmetros representam valores mínimos que devem ser assumidos para a configuração NAN na prática.

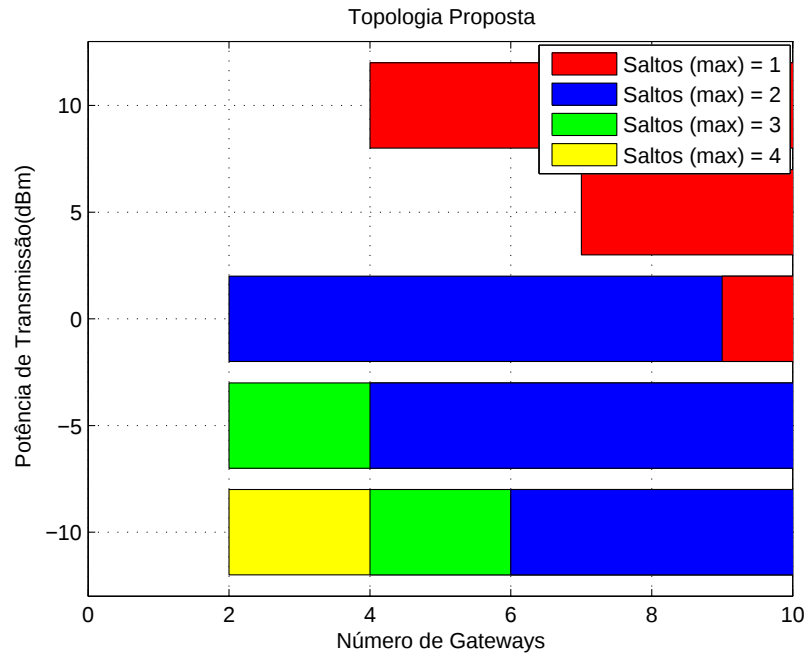


Figura 3.12: Número máximo de saltos para atingir o gateway

Da mesma maneira, porém considerando topologias clássicas, na Figura 3.13 pode ser observado que foram obtidos resultados diferentes aos apresentados na Figura 3.12. Os modelos de topologias uniforme e grid apresentaram valores semelhantes e desta forma foi possível sintetizá-los em um único gráfico. Assim, de acordo com a Figura 3.13, para alcançar os gateways com, no máximo, 1 salto ao utilizar uma potência de 0 dBm, são necessários no mínimo 6 gateways ao passo que, de acordo com os dados obtidos com modelo topológico proposto (Figura 3.12), considerando a mesma potência de transmissão, são necessários 9 gateways ou mais. Levando em consideração que o modelo topológico proposto possui características mais realistas, quando relacionado ao ambiente de implantação de uma NAN, pode-se verificar que o projeto de redes utilizando distribuições clássicas podem apresentar futuros problemas principalmente em termos de delay.

Em relação a análises inter-cluster também podem ser observadas diferenças diante do modelo topológico utilizado. A Figura 3.14 mostra o número médio de caminhos independentes em relação aos gateways da rede considerando uma potência de transmissão de -10 dBm. Quando os nós na rede com topologia específica são configurados com essa potência, inicialmente apresentam um menor número médio de caminhos independentes do que redes que seguem topologias clássicas e quando o número de gateways aumenta, essa métrica tende a aproximar dos resultados apresentados pelas outras topologias. No entanto, quando se aumenta a potência de transmissão dos nós, os resultados das topologias clássicas tendem a distanciar

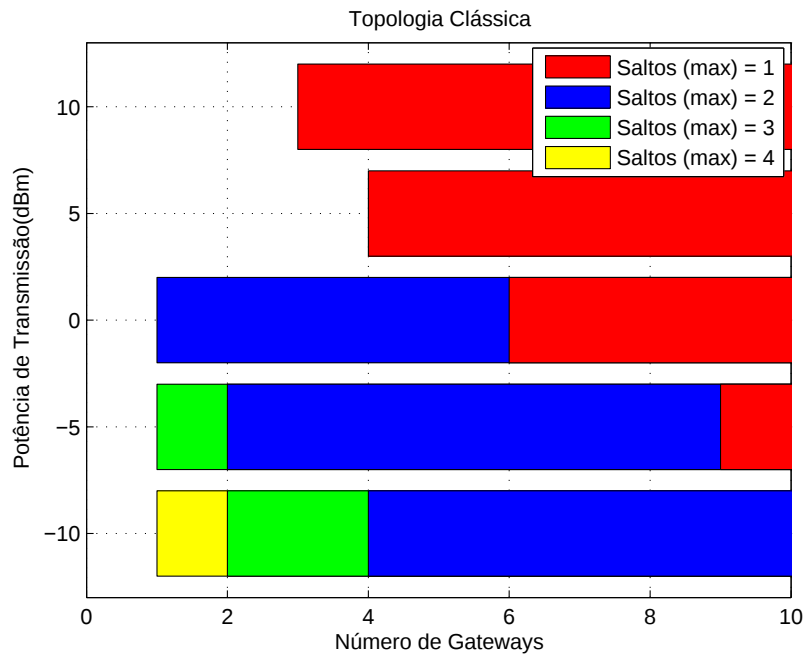


Figura 3.13: Número máximo de saltos para atingir o gateway

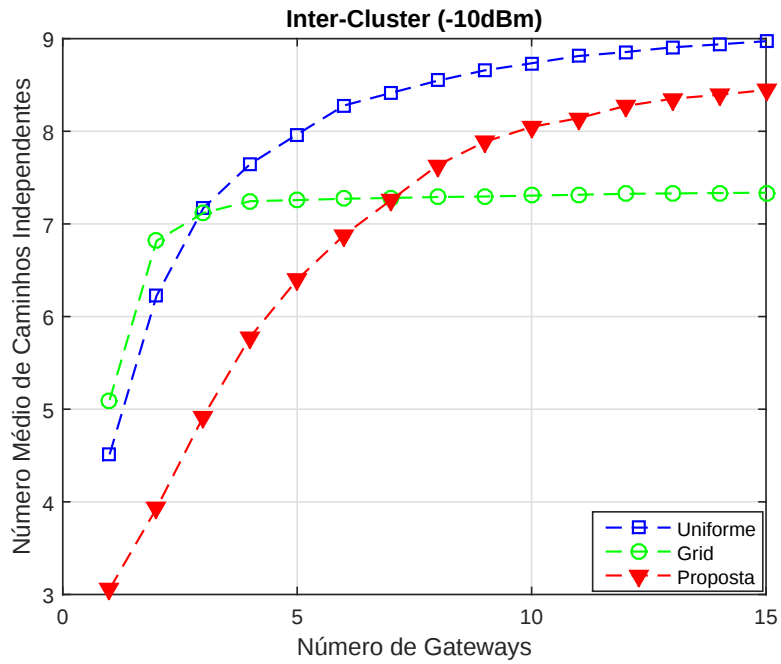


Figura 3.14: Caminhos independentes para diferentes modelos de topologia.

das topologias propostas, o que pode ser verificado na Figura 3.15 que representa cenário onde os nós estão configurados com uma potência de 0 dBm.

A Figura 3.16 apresenta os resultados utilizando a métrica de resiliência, definida pela equação 3.2, em que  $R_{ref}$  é o fator de normalização, que representa a capacidade de resiliência da rede a uma potência de transmissão de 10 dBm e 10 gateways. É importante notar que quando

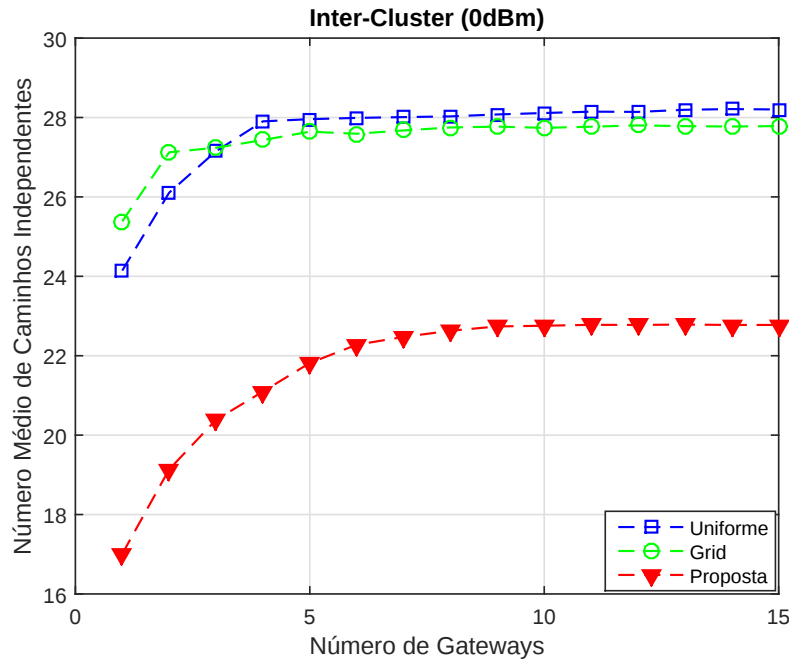


Figura 3.15: Caminhos independentes para diferentes modelos de topologia.

o número de gateways aumenta, a resiliência tende a saturar para potências de transmissão entre -10 e 0 dBm. Este efeito é causado pela conectividade reduzida e pelo limite de comprimento de percurso ( $L$ ) definida na Etapa 6. Por exemplo, para uma potência de transmissão de -10 dBm a resiliência máxima é alcançada com cerca de 8 gateways. No entanto, com uma potência de transmissão de 0 dBm a resiliência máxima é obtida com apenas 4 gateways na área de cobertura da NAN. Para os cenários com potências mais altas de transmissão (5 e 10 dBm), tem-se uma tendência de aumento da resiliência com o número de gateways, devido à alta conectividade.

Na Figura 3.17, foi possível mostrar a resiliência quando os nós de rede são configuradas com um alcance de transmissão de -10 dBm relacionadas com diferentes tipos de topologias avaliadas. Pode-se observar que as topologias criadas a partir do modelo topológico proposto tem uma resiliência menor que as topologias clássicas até 3 gateways. No entanto, a partir de 4 gateways apresentam uma maior resiliência do que outras topologias.

A Figura 3.18 mostra a capacidade de resiliência dos nós para diferentes densidades na topologia (40, 60 e 80 rádios por quadra), todos configurados com uma potência de transmissão de -10 dBm. Como esperado, para uma densidade de rádios mais elevada tem-se um aumento da resiliência devido ao aumento do número de caminhos independentes. No entanto, com o aumento do número de gateways os ganhos tendem a saturar para NANs com mais do que cinco gateways.

Em seguida foi possível avaliar o efeito do comprimento máximo para os caminhos independentes ( $L$ ) para cenários com a potência de transmissão de -10 dBm. Na Figura 3.19 é mostrado o que representa o número máximo de saltos em termos de número (NIP) e comprimento (LIP) de caminhos independentes. Foi possível observar que o número de caminhos independentes não só aumenta com o aumento do número de gateways, mas também com o aumento de  $L$  devido ao maior número de caminhos disponíveis, porém saturam em torno de

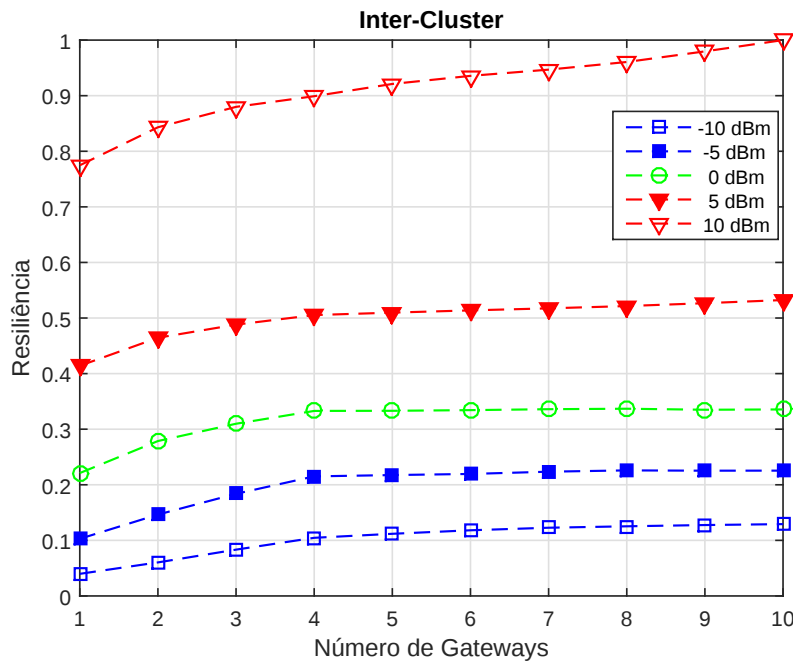


Figura 3.16: Resiliência Inter-cluster.

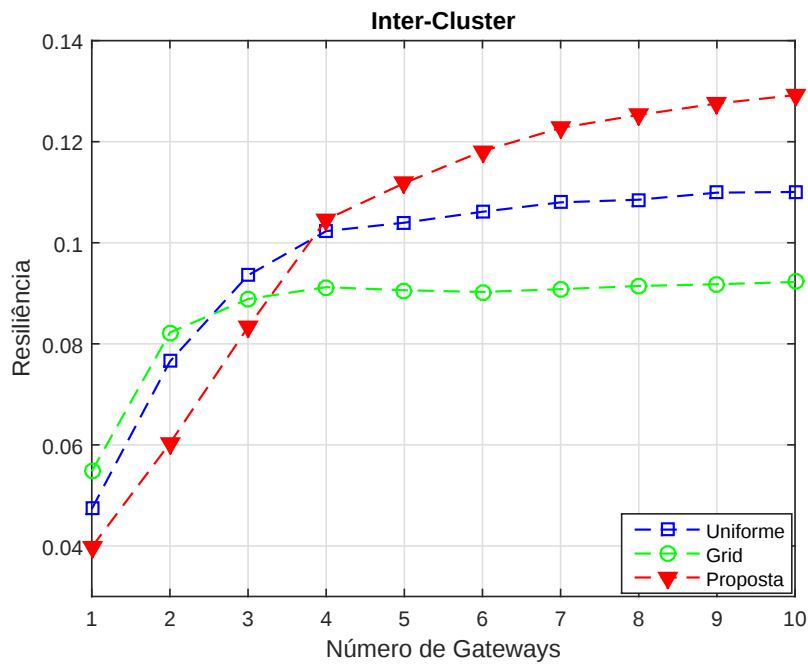


Figura 3.17: Resiliência para diferentes modelos de topologia.

10 gateways. Por outro lado o comprimento destes caminhos diminui com o número e proximidade dos gateways.

A Figura 3.20 apresenta a relação entre resiliência e o número máximo de saltos. Ao definir um valor alvo mais elevado para o número máximo de saltos, consegue-se uma resiliência melhor também devido ao maior número de caminhos disponíveis. No entanto,

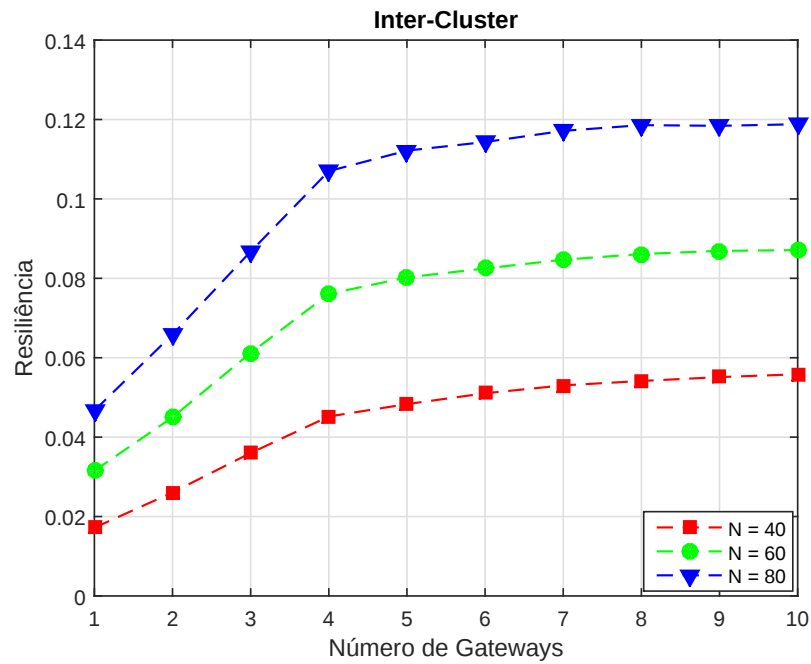


Figura 3.18: Resiliência para diferentes densidades de rede (-10 dBm).

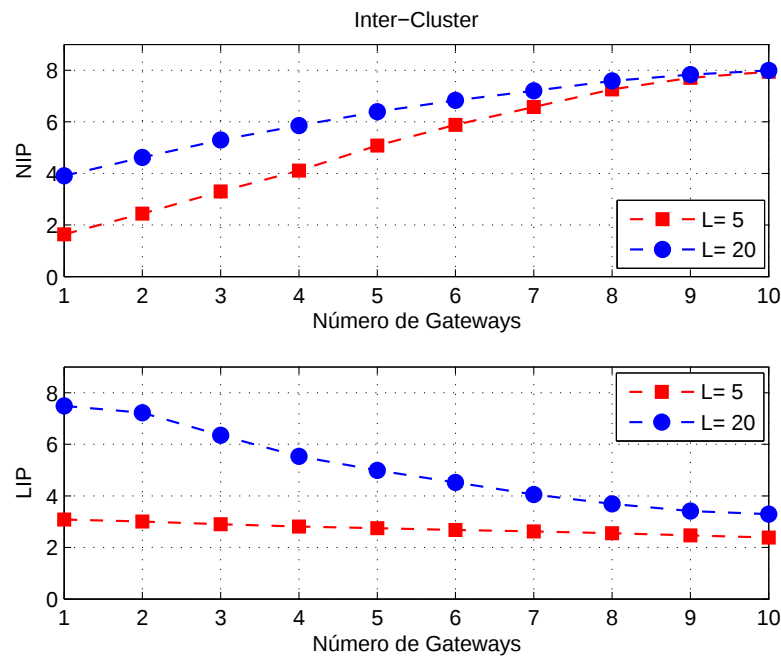


Figura 3.19: Número e comprimento de caminhos independentes (-10 dBm).

a desvantagem é que o atraso de comunicação aumenta ao utilizar-se rotas com um número muito grande de saltos, o que pode ser uma limitação para serviços com restrição de tempo na arquitetura AMI.

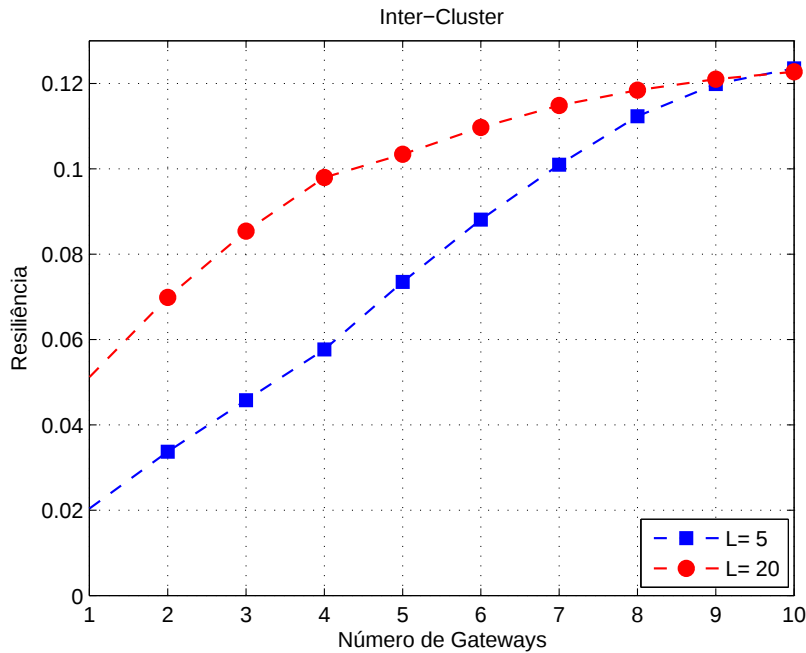


Figura 3.20: Resiliência para diferentes números máximo de saltos(-10 dBm).

### 3.4.2 Análise de Capacidade

Além da resiliência foi também investigada a capacidade da rede para os dois cenários de configuração apresentados na Tabela 3.1. Para tal análise, primeiramente foi necessário aplicar a estratégia de coloração de grafos para distribuir os canais de rádio de forma que os clusters adjacentes não utilizem a mesma frequência e nem mesmo possuam frequências adjacentes para que, desta forma, seja possível minimizar as interferências co-canal e canal adjacente. De acordo com a Figura 3.21 é possível verificar que a partir de 5 gateways é possível fazer o reuso de frequências.

Depois deste procedimento foi possível efetuar a análise de capacidade. No cenário 1 o rádio de comunicação utiliza uma taxa de transmissão inferior, mas tem uma sensibilidade de recepção melhor do que o cenário 2.

A Figura 3.22 mostra a capacidade de rede utilizando o cenário de configuração 1, em que a taxa de transmissão do rádio é de 50 kbps. Por exemplo, para uma potência de transmissão de -10 dBm e 5 gateways, a capacidade média é de cerca de 400 bps. Para potências de transmissão de 0 e 10 dBm, o valor de capacidade obtido é muito semelhante independente do número de gateways utilizado. A razão é que a rede é altamente conectada para estes valores de potência devido à sensibilidade do receptor e, consequentemente, porque as informações necessitam de menos saltos para alcançar o gateway.

A Figura 3.23 mostra a capacidade para cenário 2. Neste caso, para uma potência de transmissão de -10 dBm e 5 gateways, foi obtida uma capacidade de aproximadamente 600 bps. Isto está diretamente relacionado a taxa de transmissão de rádio que é superior ao outro cenário. Ao contrário do cenário 1, aumentando a potência de transmissão e o número de gateways aumenta-se significativamente a capacidade. A sensibilidade de recepção mais baixa reduz a conectividade de rede quando comparado com o cenário 1, para a mesma potência de transmissão. Assim, a capacidade é mais sensível ao aumento de potência.

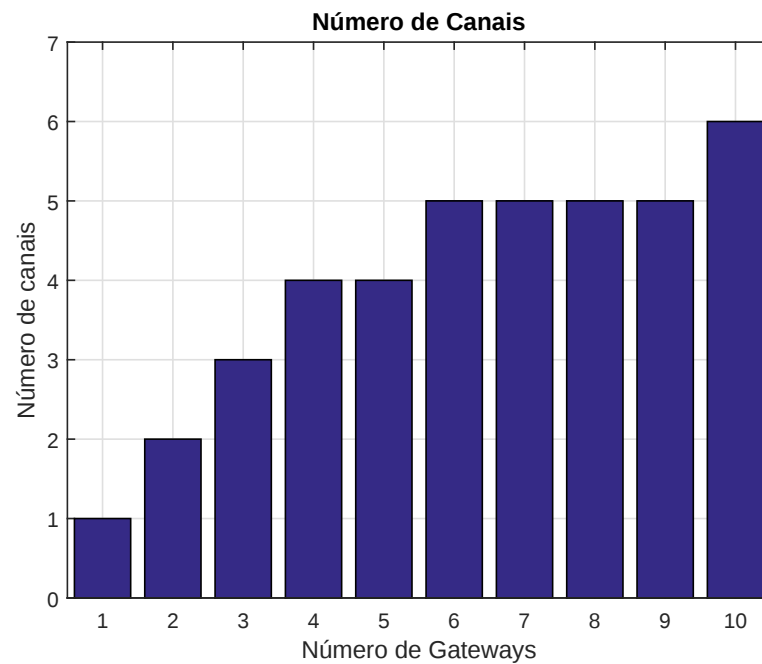


Figura 3.21: Número de Canais utilizados.

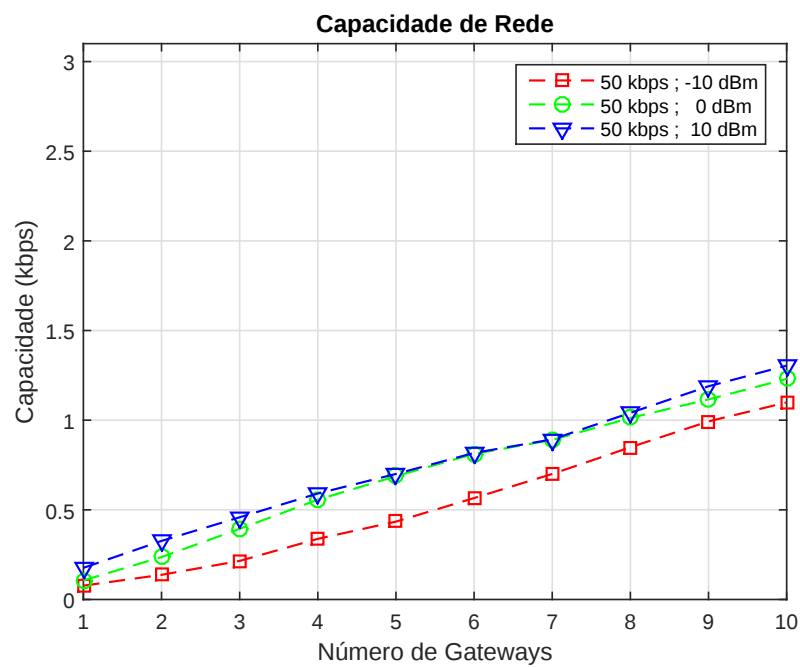


Figura 3.22: Capacidade de rede: Cenário 1.

As Figuras 3.24 e 3.25 mostram como se comporta a capacidade da rede com nós configurados para a potência de -10 dBm em termos do aumento do número de nós por quadra e diferentes taxas de comunicação. A medida em que é aumentado o número de nós não somente é obtido um aumento relacionado a quantidade dos nós pertencentes a cada cluster como também pode ser observado o aumento de densidade de nós desta rede. Desta forma aumenta-

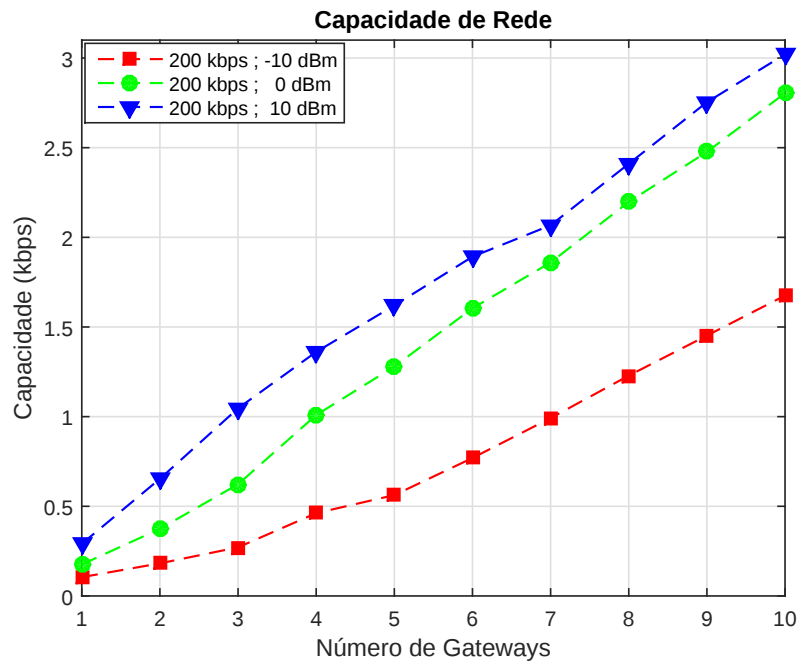


Figura 3.23: Capacidade de rede: Cenário 2.

se a quantidade de nós pertencentes a um mesmo domínio de colisão, a disputa pelo canal de comunicação aumenta e consequentemente a capacidade da rede de uma forma geral diminui.

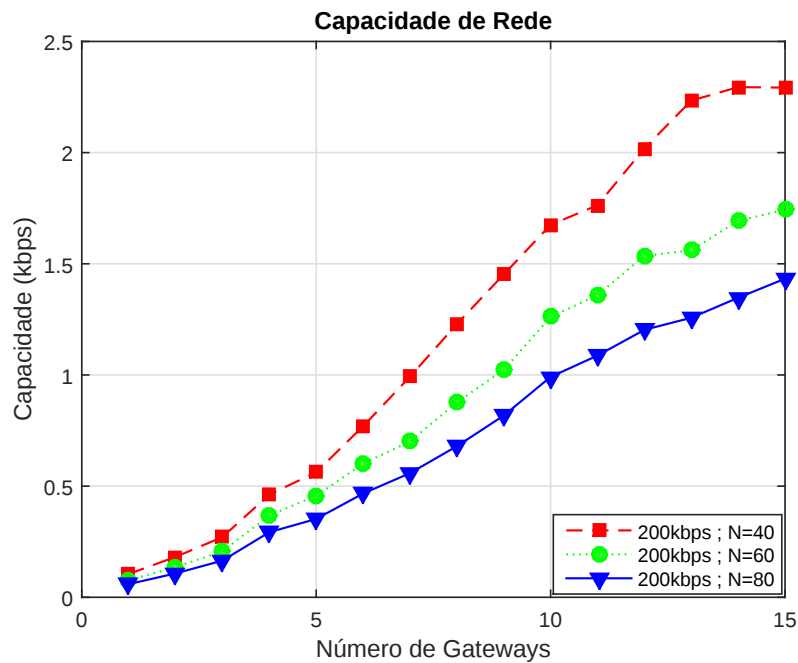


Figura 3.24: Capacidade de Rede (Cenário 2).

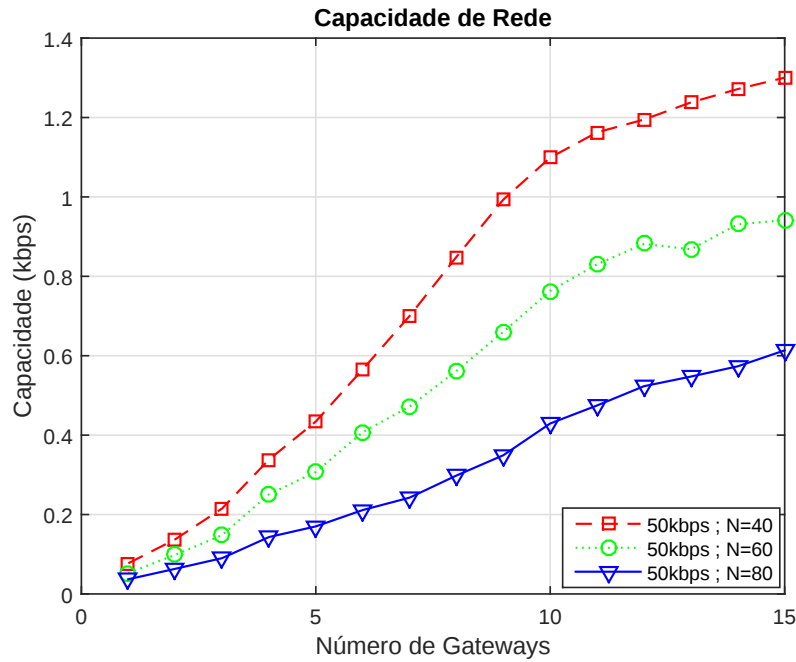


Figura 3.25: Capacidade de Rede (Cenário 1).

### 3.5 Aplicação em Projetos

Com base nos modelos apresentados, e ainda considerando o rádio a ser utilizado já foi definido além de que todos os nós seriam configurados com a mesma potência de transmissão, foi possível definir algumas diretrizes gerais para o projetista da rede:

1. Mapear a área de implantação da NAN considerando o modelo topológico proposto e estimar a densidade de nós por quadra.
2. Definir os valores alvo para o número máximo de saltos e o número mínimo de caminhos independentes (intra-cluster).
3. Aplicar a metodologia de análise apresentada na Figura 3.6 para diferentes números de gateways. Limitar a análise ao número máximo de gateways que podem ser implantados na área de cobertura da NAN.
4. Baseado nos resultados intra-cluster, determinar a potência de transmissão mínima e número de gateways que atenda aos requisitos do item 1. Uma condição deve ser flexibilizada, se ambos os valores alvo não podem ser satisfeitos.
5. Definir um valor-alvo para a métrica de resiliência inter-cluster determinado pela equação 3.2.
6. Baseado nos resultados inter-cluster, determinar a potência de transmissão requerida e o número de gateways.
7. Comparar os parâmetros selecionados obtidos nos itens 4 e 6 e escolher aqueles que atendem tanto a critérios de projeto intra-cluster e inter-cluster. O designer pode priorizar

o intra-cluster ou a resiliência inter-cluster, dependendo dos objetivos, tornando a rede mais resistente a falhas de nós ou gateways, respectivamente.

8. Os gateways devem ser implantados em posições próximas às determinadas pela Etapa 4 da metodologia (apresentada na Seção 3.3.1).
9. A análise de capacidade deve ser utilizada pelo projetista da rede para se ter uma ideia em termos do throughput máximo que pode ser obtido, em média, em cada nó da rede

Considerando que um projetista da rede de uma determinada região geográfica urbana precisa definir um projeto de uma NAN as metodologias descritas acima tornam-se proveitosas e então as diretrizes de projeto apresentadas acima podem ser seguidas. De acordo com o item 1 das diretrizes acima, considerando o modelo topológico proposto, o projetista estima que a densidade de medidores em uma determinada região de implantação é, em média, de 40 nós por quadra. Seguindo restrições de projeto, de acordo com o item 2, define que as mensagens enviadas pelos medidores inteligentes devem alcançar o gateway com, no máximo 10 saltos. No entanto, devido a restrições de tempo, o ideal é que os nós estivessem, em média, a 2 saltos do gateway principal. Adicionalmente, com intuito de definir um certo nível de segurança em termos de falhas de nós ou possíveis interferências, estabelece um número de 10 caminhos independentes através do qual, em média, os nós da rede devem alcançar o gateway. Seguindo a restrições do projeto cogita-se utilizar na área de cobertura, a cada conjunto de 4 quadras, um máximo de 10 gateways. Diante dessas requisitos a metodologia deve ser aplicada conforme a etapa 3.

De acordo com os dados obtidos (Figura 3.10) é possível observar que a meta relacionada a número de caminhos independentes pode ser obtida quando os nós da rede operam com uma potência de transmissão maior ou igual a 0 dBm ou ainda com os nós atuando com a potência de -5 dBm porém utilizando 7 ou 8 gateways. Já a meta relacionada aos saltos (Figura 3.13) pode ser alcançada quando os nós da rede utilizam a potência de transmissão de -10 dBm em uma rede com 6 ou mais gateways, utilizam potência de -5 dBm com 4 ou mais gateways ou ainda utilizam potência de 0 dBm com 2 ou mais gateways. Afim de atingir todas as metas relacionadas as métricas intra-cluster e ainda considerando uma eventual economia relacionada ao número de gateways utilizados pode ser definida a utilização de nós configurados com potência de transmissão de 0 dBm em uma rede com 3 gateways a cada conjunto de 4 quadras. De acordo com o item 5, fica a critério do projetista definir uma resiliência da rede em termos de número de caminhos independentes relacionados a todos os gateways da rede. Nesse caso o projetista pode definir uma porcentagem de resiliência máxima que pode ser atingida pela rede, como por exemplo 40%. Segundo o item 6, de acordo com a métrica de resiliência inter-cluster (Figura 3.16) pode ser observado que a meta de 40% só pode ser batida com nós operando com potência de transmissão mínima de 5 dBm. Neste caso, se as opções não estiverem casadas, o projetista pode optar por dar prioridade pelas análises inter-cluster ou pelas análises intra-cluster conforme o item 7. Priorizando as análises intra-cluster e visando utilizar na implantação nós configurados com potência de transmissão de 0 dBm e 3 gateways tem-se uma resiliência inter-cluster de aproximadamente 32% da resiliência total que poderia ser obtida na rede. No entanto o projetista também poderia utilizar 4 gateways com intuito de maximizar a resiliência inter-cluster apresentada na potência de 0 dBm (34%). Levando em consideração esta última opção e ainda considerando que esta rede utilize o rádio IEEE802.15.4g da fabricante Atmel configurados de acordo com o cenário 1, é possível verificar que cada nó pode experimentar

um throughput máximo de aproximadamente 600bps (Figura 3.22). Segundo os dados apresentados pelo estudo de caso, se os rádios de comunicação desta rede estivessem configurados conforme o cenário 2, podem experimentar um throughput máximo de aproximadamente 1kbps (Figura3.23).

## 3.6 Conclusão

A NAN é um componente muito importante em uma rede inteligente enquanto arquiteturas sem fio baseados no padrão IEEE 802.15.4g têm sido muitas vezes utilizado nas implantações NAN. Neste trabalho, foram investigados aspectos topológicos, a resiliência e a capacidade de NANs. Foi proposta uma estratégia de geração de topologia que atenda a determinadas características impostas pelo ambiente de implementação de uma NAN. Também foi definida uma metodologia de análise que avalia a resiliência da rede, principalmente, relacionado caminhos independentes e número de saltos para alcançar os gateways. Além disso, essa metodologia inclui a avaliação desse tipo de rede em termos de capacidade. De acordo com a metodologia proposta foi possível determinar a potência de transmissão adequada dos nós e do número de gateways para uma determinada região geográfica, a fim de satisfazer os critérios de projetos de desempenho para implantações NAN.

## 3.7 Trabalhos Futuros

As seguintes questões foram identificadas para a continuação do presente estudo:

- Buscar novas variáveis para composição da métrica de resiliência proposta;
- Ampliar a avaliação para cenários um pouco maiores avaliando o impacto;
- Incluir a variável custo;
- Aplicar outros modelos de propagação em pequena e larga escala;

## Capítulo 4

# Análise de Interferência no RPL

### 4.1 Motivação e Trabalhos Relacionados

O protocolo de roteamento para redes de baixo consumo de energia e com perdas (RPL) [Lo and Ansari, 2012] é um padrão recente que é compatível com IPv6 e pode ser aplicado a NANs sem fio. Recentemente, muitos estudos têm considerado a aplicabilidade do RPL para redes AMI [Ancillotti et al., 2012] [Ancillotti et al., 2013b] [Kathuria et al., 2013]. O RPL constrói uma topologia de roteamento formado por um ou mais DODAGs (Destination-Oriented Directed Acyclic Graph). Cada DODAG é enraizada em um único destino, geralmente representando um nó que realiza uma conexão a um backhaul (LBR). Um DODAG difere de uma árvore tradicional uma vez que permite que um nó tenha mais de um pai na direção da raiz. De acordo com a definição padrão, o RPL utiliza um processo pró-ativo lento para construir e manter uma topologia de roteamento, e um processo reativo e dinâmico para resolver inconsistências de rotas. O RPL utiliza o *algoritmo Trickle* [P. Levis, 2011], que determina a operação do protocolo no estado estacionário de forma que as mensagens de controle podem ser enviadas a uma baixa taxa de transmissão, no entanto, essa taxa pode ser rapidamente aumentada com intuito de resolver inconsistências.

Existem poucos estudos [Babar et al., 2013] [Thulasiraman, 2013] [Lu et al., 2014] sobre os efeitos de ataques de interferência no comportamento RPL. Em redes com múltiplos saltos, além da interferência do interfluxo e intrafluxo geradas pelo tráfego de rede em operação, existe a possibilidade de ataques de interferência gerados por nós maliciosos. O tempo que leva para o protocolo reagir ao ataque de interferência, o número de nós afetados e a qualidade dos enlaces após este tipo de ataque são questões importantes que ajudam a otimizar a operação do RPL e algoritmos como o Trickle. Neste trabalho, foi investigado como RPL reage contra ataques de interferência intencionais. Foram considerados redes AMI baseados na tecnologia IEEE802.15.4g [Chang and Mason, 2012]. Esse tipo de rede apresenta fortes requisitos de desempenho em termos de comunicação bidirecional [DOE, 2010].

O impacto dos ataques de interferência no desempenho de redes de sensores sem fio (RSSF) foi investigada em [Babar et al., 2013] considerando diferentes estratégias de ataque em uma rede que utiliza um protocolo de roteamento ad-hoc. Um cenário baseado em clusters usando o protocolo LEACH também foi investigado. Seus estudos foram focados apenas nas métricas de desempenho de tráfego de dados e é específico para o protocolo de roteamento utilizado. Em [Thulasiraman, 2013], os autores incorporam uma métrica de roteamento baseada em interferência no protocolo RPL para aplicação em uma rede AMI com múltiplos gateways.

A métrica quantifica a interferência gerada pela rede a partir dos tráfegos gerados. A presença de ataques de interferência intencional não é considerada e a dinâmica do protocolo RPL também não é investigada.

Em [Lu et al., 2014], os autores investigam o problema da modelagem e detecção de ataques de interferência em redes sem fio com restrições de tempo, como o Smart Grid. O documento foca na concepção de um sistema de detecção de interferência. No entanto, a análise detalhada da arquitetura AMI exige um modelo topológico mais realista para a NAN, em vez das abordagens clássicas como distribuições aleatórias e grid [Das and Das, 2012] [Otani and Miyashita, 2013]. Desta maneira, neste estudo também foi utilizada a estratégia apresentada na Sessão 3.2.1 para gerar as topologias das NANs.

## 4.2 Protocolo RPL

A AMI é considerada uma rede de baixa potência e com perdas (LLN), que é tipicamente composta de dispositivos embarcados com recursos limitados principalmente em termos de processamento memória [Ancillotti et al., 2013b]. Em uma arquitetura típica de rede AMI, os medidores inteligentes são conectados através de rede IP a um gateway. Os gateways que conectam uma LLN ao backhaul são chamados roteadores de borda (LBRs). Podem haver vários LBRs conectando uma LLN a um backhaul ou backbone.

Normalmente, em implantações atuais AMI, as aplicações de medição inteligente exigem que todos os medidores inteligentes se comuniquem com um servidor, implantado no data center da concessionária. Este servidor gera tráfego de dados para configurar a leitura inteligente de dados ou iniciar consultas utilizando mensagens em unicast e multicast para se comunicar de forma eficiente com um único dispositivo ou grupos de dispositivos, respectivamente. Cada medidor inteligente gera tráfego de dados de acordo com um cronograma, em resposta às consultas sob demanda, ou em resposta a algum evento local. O RPL tem sido considerado como um possível protocolo de roteamento NAN na arquitetura AMI [Ancillotti et al., 2013b].

Na maioria dos cenários, os medidores de energia são alimentados pela rede elétrica que estão monitorando e então não possuem restrições em termos de energia. Em vez disso, esses medidores têm restrições de hardware e de capacidade de comunicação que são determinadas principalmente pelo custo do equipamento e, secundariamente, pelo consumo de energia. Por esta razão, a utilização dos modos de armazenamento ou não-armazenamento deve ser específico de cada implantação. Quando os medidores inteligentes possuem memória limitada e não podem armazenar adequadamente as tabelas de roteamento necessárias para suportar o roteamento, o modo de não-armazenamento deve ser preferido. Por outro lado, quando os nós são capazes de armazenar essas tabelas de roteamento, o uso do modo de armazenamento pode permitir reduzir o overhead da rede, além latência devido a reparação rotas.

Implantações LLN podem utilizar tecnologias de comunicação que podem apresentar perdas de pacotes significativas e, portanto, necessitam de métricas de roteamento que levam a perda de pacotes em conta. O RPL suporta um conjunto flexível de métricas e restrições [Vasseur et al., 2012].

### 4.2.1 Modelo Teórico ETX

No caso de implantações AMI utilizando as tecnologias sem fios, a qualidade dos caminhos através desse tipo de conexão pode ser caracterizada pela métrica de contagem de

transmissão esperadas (ETX). Esta é uma das métricas mais utilizadas e que representa o número esperado de transmissões necessários para transmitir e reconhecer um pacote em uma conexão sem fio com sucesso. A métrica ETX foi introduzido em [De Couto et al., 2003], e foi definida matematicamente pela equação abaixo:

$$ETX = \frac{1}{p_f p_r}, \quad (4.1)$$

onde  $p_f$  é a probabilidade medida de que um pacote é recebido pelo vizinho e  $p_r$  é a probabilidade medida de que um pacote de reconhecimento (ACK) seja recebido com sucesso. A métrica ETX é sensível a perda de pacotes, mas não é sensível ao atraso. Esta métrica é afetada por dois componentes principais: a qualidade do canal sem fio e colisões. O protocolo RPL não assume um mecanismo de prova baseado em mensagens de broadcast como em [De Couto et al., 2003] para estimar o valor do ETX. De fato, as implementações práticas de RPL no sistema operacional Contiki [Tang et al., 2012] começam a medir ETX somente quando o tráfego de dados unicast é realmente transmitido. De acordo com a especificação RPL, o valor ETX antes de um nó iniciar a transmissão de dados é  $ETX = 4$ . Assim que os nós da rede começam a fazer parte do DODAG, o tráfego de dados em unicast pode começar, o que desencadeia a estimativa da ETX com base no número de retransmissões necessárias para entregar corretamente um pacote de dados.

Baseado em experiências de simulação, foi definido um procedimento de estimativa do ETX refinado, a fim de permitir que RPL rastreie rapidamente as modificações das conexões. Para cada conexão do nó um buffer circular armazena os últimos cinco número de retransmissões necessárias para entregar os últimos cinco pacotes de dados,

$$RTX_{buffer} = \{rtx_{i-4}, rtx_{i-3}, rtx_{i-2}, rtx_{i-1}, rtx_i\}. \quad (4.2)$$

O ETX é atualizado de acordo com a seguinte regra:

$$ETX = 0.1 \cdot rtx_{i-4} + 0.1 \cdot rtx_{i-3} + 0.2 \cdot rtx_{i-2} + 0.3 \cdot rtx_{i-1} + 0.3 \cdot rtx_i. \quad (4.3)$$

Esta modificação acelera a construção do DODAG em comparação com a implementação RPL padrão no Contiki. Na presença de um nó interferente, a métrica ETX é afetada, dependendo do nível de interferência. Nós mais próximos do interferente serão bloqueados pela contenção porque sentem que o canal de comunicação está ocupado. Outros nós da rede devem experimentar uma degradação no desempenho das conexões devido a ausência de confirmação para os pacotes transmitidos.

## 4.3 Modelo de Canal

A perda de percurso do canal é modelado de acordo com o modelo de propagação Log-Distance [Goldsmith, 2005]. Desta forma, a potência recebida é dada por:

$$P_{rx}^{dBm} = P_{tx}^{dBm} + G_t^{dB} + G_r^{dB} - P_L^{dB} - N_F^{dB}, \quad (4.4)$$

onde  $P_{tx}$  é a potência de transmissão, enquanto  $G_t^{dB}$  and  $G_r^{dB}$  são os ganhos de antena do transmissor e receptor, respectivamente. O parâmetro  $N_F^{dB}$  é a figura de ruído do receptor. Neste caso, a relação sinal-interferência-ruído (SINR) no receptor é:

$$\bar{\gamma} = \frac{P_{rx}}{P_n + P_I + P_J} \quad (4.5)$$

onde  $P_{rx}$  é a potência do sinal recebido,  $P_n = N_0 \cdot B$  é a potência de ruído no receptor e  $N_0$  é a densidade espectral de potência de ruído em Watts/Hz. O parâmetro  $P_I$  representa a potência total da interferência:

$$P_I = \sum_{j \in N_I} P_{rx}^j, \quad (4.6)$$

em que  $N_I$  é o subconjunto de nós na rede que estão transmitindo simultaneamente e afectando a transmissão corrente, e  $P_{rx}^j$  é a potência recebida a partir do nó interferente  $j$ .  $P_J$  representa a potência do nó interferente. Note-se que neste modelo o interferente e sinais de interferência são modelados como ruído Gaussiano adicional [Goldsmith, 2005].

A probabilidade de falha é uma métrica importante para a avaliação de desempenho de uma conexão de comunicação sem fios porque dá uma boa aproximação para a taxa de erro de pacote (PER) causados por problemas de rádio, tais como perda de percurso e desvanecimento [Goldsmith, 2005]. Uma interrupção ocorre no receptor quando a SINR instantânea  $\gamma$  está abaixo de um limiar de  $\beta = 2^\Delta - 1$  que permite a decodificação sem erros. O parâmetro  $\Delta$  é a eficiência espectral do sistema em bits/s/Hz, e  $B$  é a largura de banda do sistema em Hz.

Neste estudo foi utilizada a distribuição de Nakagami-m [Goldsmith, 2005] para modelar o efeitos de desvanecimento no canal sem fio, de modo que a intensidade do desvanecimento pode ser ajustado através do parâmetro  $m$ . Além disso, o SINR instantânea pode ser escrito como  $\gamma = h^2 \bar{\gamma}$ , em que  $h$  é o envelope de desvanecimento, que obedece a distribuição Nakagami-m, e segue uma distribuição gama [Goldsmith, 2005]. Portanto, a probabilidade de falha para o modelo de canal utilizado neste trabalho é dada por:

$$\mathcal{O} = \mathbb{P}[\gamma < \beta] = \frac{\Psi\left(m, \frac{m \cdot \beta}{\bar{\gamma}}\right)}{\Gamma(m)}, \quad (4.7)$$

onde  $\Gamma(a)$  e  $\Psi(a, b)$  são as funções gama completa e incompleta, respectivamente.

## 4.4 Estudo de Caso

Nesta sessão, foi investigado o comportamento do protocolo RPL em uma rede AMI com vários gateways na presença de ataques de interferência. Foi considerado uma NAN sem fios cujos medidores inteligentes e gateways são equipados com rádios IEEE802.15.4g. Este padrão especifica um esquema de transmissão de camada física, que é adequado para aplicações de medição inteligentes [Chang and Mason, 2012]. Particularmente, foi considerado em nossas simulações os parâmetros do rádio IEEE802.15.4g AVR [Atm, 2015] configurado com a frequência de 914 MHz. A figura de ruído do receptor é  $N_F^{dB} = 4.5$  dB e a faixa de potência de transmissão pode ser ajustável entre -12 e 15 dBm. Para o modelo log distance, foi definido um expoente de perda do percurso  $n = 3.7$ , que é um valor razoável para a modelagem de perda de percurso em áreas urbanas densas. Os ganhos de antena foram definidos como  $G_t^{dB} = G_r^{dB} = 0$ .

Além disso, foram consideradas topologias NAN abrangendo quatro quadras de rua, onde cada bloco tem dimensão  $(l,l)=(100,100)$  metros. A distância  $c$  da fronteira do bloco onde os medidores inteligentes pode ser implantado foi definido como 10m e a largura da rua 20m. Foram assumidas topologias com uma densidade de 40 nós por quadra (totalizando 160 nós) e potência de transmissão de -10 dBm para todos os nós NAN. Em tal análise, foram considerados cenários com 2, 4 e 6 gateways. O nó interferente é colocado aleatoriamente na área de cobertura da rede e utiliza uma potência de transmissão de 0 dBm.

Neste estudo foi utilizado um simulador ad-hoc que implementa o RPL. A Figura 4.1 mostra um exemplo do DODAG gerado pelo RPL para um cenário sem nó interferente e quatro gateways. Os gateways são indicados por um triângulo, o pai principal é representado por uma conexão de linha vermelha, os pais alternativos estão representadas por conexões azul e a cor de cada nó indica seu ranking. Nós com a mesma cor têm o mesmo valor de ranking. Todos os nós empregam fontes de tráfego Poisson adaptativos. Os nós ajustam a taxa de transmissão média durante o funcionamento da rede, a fim de reduzir o congestionamento e otimizar a capacidade da rede. Quando a rede torna-se congestionada, a construção e manutenção DODAG é afetada.

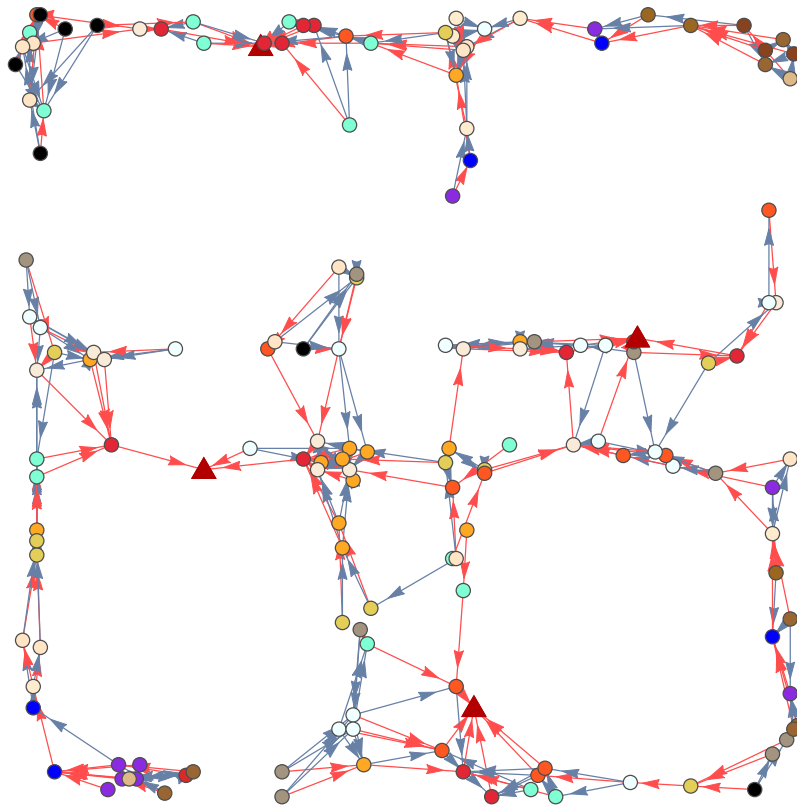


Figura 4.1: Exemplo de DODAG construído com 4 gateways

A primeira análise considera o caso sem nó interferente. Foi investigado a dinâmica do RPL em termos do número de nós isolados no DODAG. A partir da Figura 4.2 foi possível verificar que RPL é capaz de conectar todos os nós em menos de 10 segundos. Ao longo da operação da rede, também foi possível observar a desconexão e reconexão de alguns nós.

Este comportamento é causada por dois motivos. O primeiro é que alguns nós podem ter o desempenho da conexão ruim e acabam sendo mais afetados pela probabilidade de falha. O segundo é devido às interferências intra-fluxo e inter-fluxo [Boushaba et al., 2014], que mudam de acordo com a adaptação das fontes de tráfego. O RPL é executado rapidamente no cenário com seis gateways devido ao tamanho reduzido dos DODAGs.

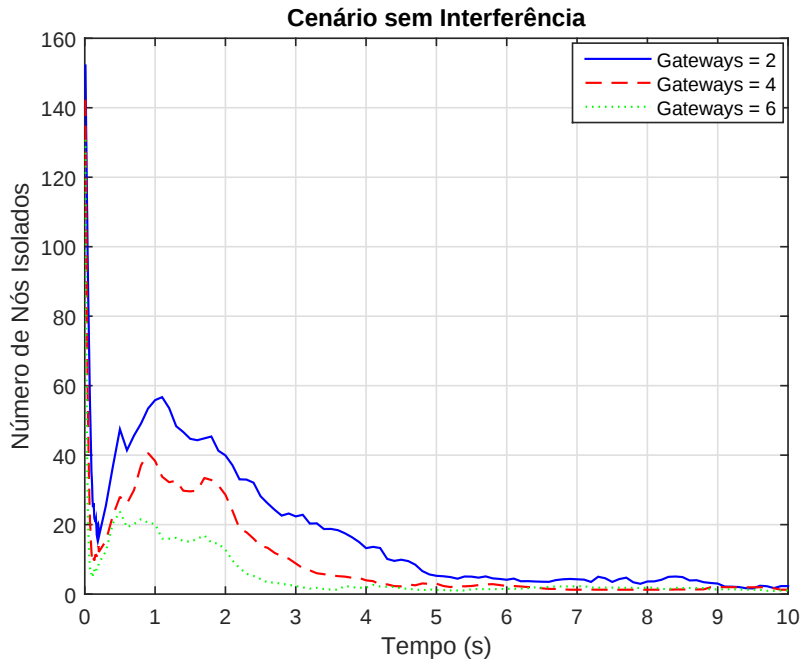


Figura 4.2: Número de nós isolados na rede

A Figura 4.3 apresenta o comportamento da métrica de ETX médio. A métrica estabiliza em torno de 30 segundos e alcança um melhor ponto de operação no cenário com seis gateways porque temos caminhos de roteamento mais curtos. No cenário com 2 gateways, há uma maior oscilação na métrica ETX porque a desconexão de um nó pode desencadear a desconexão de um grande número de nós descendentes. O cenário com quatro gateways apresenta um comportamento semelhante ao cenário de seis gateways, com um pouco de degradação do desempenho. A métrica de ETX médio indica que uma boa escolha para o número de gateways para este modelo topológico deve ser entre quatro e seis gateways.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram os resultados com a presença de um nó interferente. Ficou definido que o nó interferente começa a transmitir a 100s e para de atuar a 200s. Este período foi escolhido porque o DODAG já estava em uma operação de estado estacionário. Foi considerado um conjunto de 30 topologias e 50 posições selecionados ao acaso para o nó interferente em cada topologia.

A Figura 4.4 mostra o número médio de nós isolados. O período ativo do interferente é facilmente identificado. Foi possível identificar três fases diferentes na dinâmica RPL. Durante aproximadamente os primeiros 30 segundos, após iniciado o ataque, os nós gravemente afetados se dissociam do DODAG correspondente. Alguns nós juntaram-se a outros DODAGs ou eles reestabelecem sua conexão através de um caminho alternativo. A segunda fase corresponde à operação em estado estacionário sob ataque de interferência. A terceira fase começa quando o nó interferente para de atacar ou transmitir. Pode-se observar a partir da Figura 4.4 que o

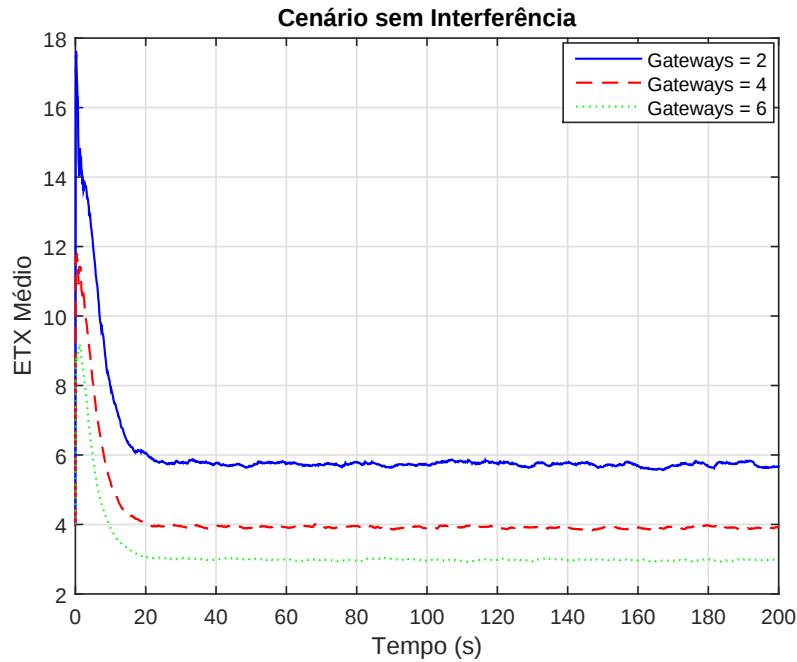


Figura 4.3: ETX médio dos caminhos de roteamento.

tempo de recuperação tem a duração de 70 segundos, aproximadamente. Esta informação é relevante para aplicações de tempo real porque em redes com esse tipo de aplicação os nós devem rapidamente voltar a se conectar ao DODAG. O tempo de reconexão é afetado pelo procedimento de estimativa ETX, que pode ser otimizado.

Pode-se observar a partir da Figura 4.5 que, em ambos os cenários com 4 e 6 gateways, o valor médio ETX retorna para aproximadamente os mesmos níveis. No caso de 2 gateways (densidade de 80 nós/gateway), o ETX estabiliza a um nível ligeiramente mais elevado, porque a sua estrutura sofreu mais alterações. Neste caso, como a métrica ETX é atualizada com base nos dados do tráfego unicast, é necessário um período muito mais longo de operação da rede, a fim de reestabelecer o DODAG com aproximadamente a mesma configuração inicial. Portanto, o tempo de recuperação do DODAG pode exceder significativamente o período de ataque, o que pode comprometer aplicações com limitações de tempo. Com base na métrica de ETX médio é possível selecionar o número apropriado de gateways para um modelo topológico específico, evitando a implantação de um número excessivo de gateways.

A Figura 4.6 mostra uma comparação considerando diferentes potências para o nó interferente num cenário com seis gateways. Para um interferente com o potência de transmissão de + 15dBm, aproximadamente 50% dos nós da NAN estão comprometidos durante o período de ataque.

## 4.5 Conclusões

A arquitetura AMI com base em implementações NAN sem fio é suscetível a ataques de interferência intencional. O RPL tem interações complexas com a rede devido à estimativa de qualidade de conexão e manutenção dos caminhos de roteamento. O conhecimento da dinâmica desse protocolo sob ataques de interferência é uma questão importante porque ajuda a

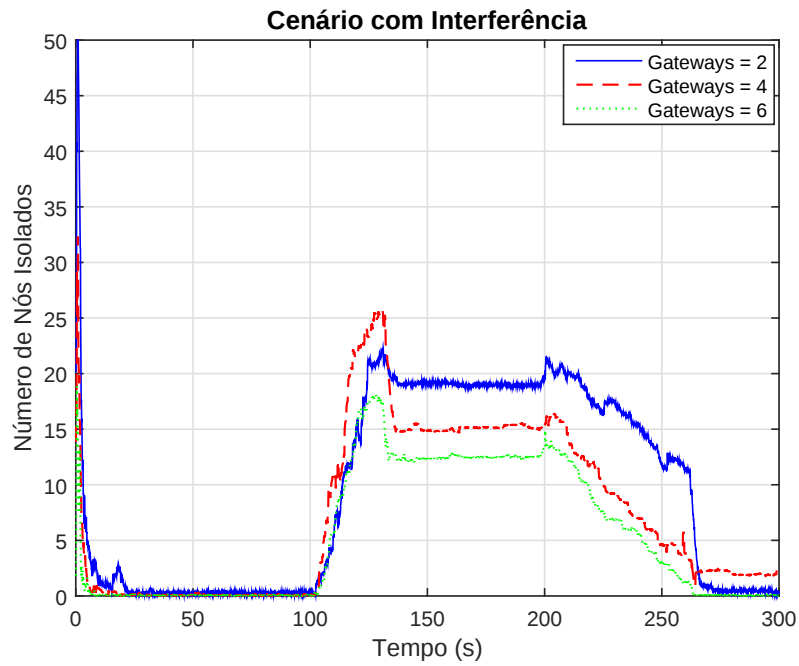


Figura 4.4: Número de nós isolados na rede.

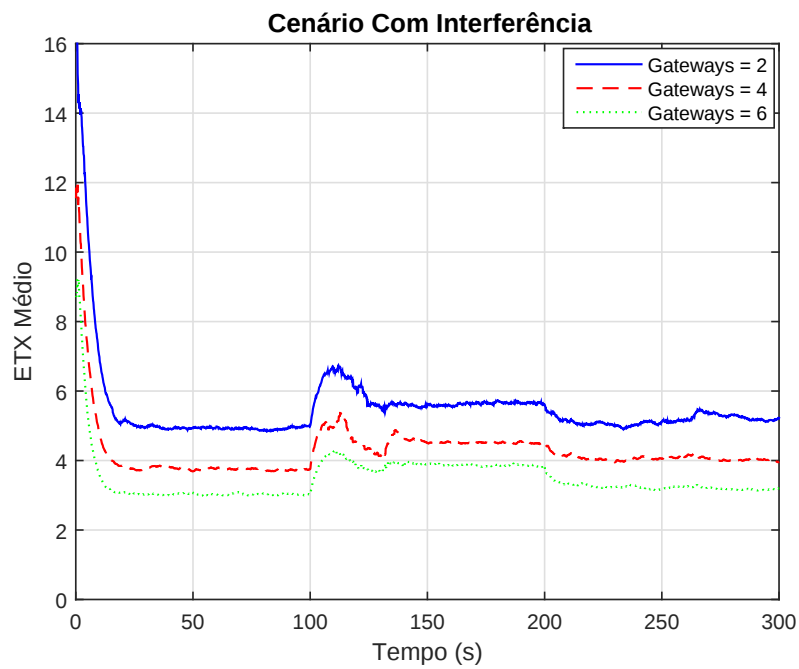


Figura 4.5: ETX médio dos caminhos de roteamento.

definir as melhores regras de projeto de NANs com aplicações de tempo crítico. Neste estudo foi utilizado um modelo de geração de topologias realista para NAN. A dinâmica RPL sob ataque empastelamento foi investigada. Os resultados mostram que em cenários NAN com uma densidade de 80 nós por gateway o tempo de recuperação do DODAG pode exceder significativamente o período de ataque, o que pode comprometer aplicações com limitações de tempo.

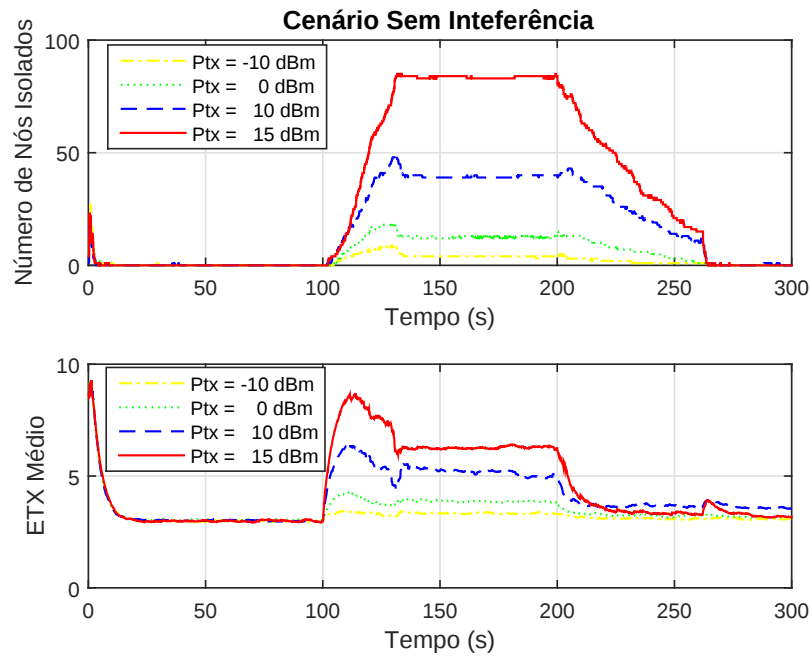


Figura 4.6: Influência da potência de transmissão do interferente.

Um ataque de interferência com potência máxima (15 dBm) pode comprometer quase 50% dos nós da NAN.

## 4.6 Trabalhos Futuros

As seguintes questões foram identificadas para a continuação deste trabalho:

- Explorar melhor os múltiplos canais no RPL;
- Explorar o algoritmo Trickle de forma a proporcionar ao protocolo de roteamento uma melhor resposta a ataques de interferência;
- Buscar uma relação entre a resiliência proposta no capítulo anterior e os resultados apresentados neste capítulo;

# Referências Bibliográficas

- [Atm, 2015] (2015). *Atmel AT86RF215 Device Family*. Atmel Corporation. Rev. 1.0.
- [Wor, 2015] (2015). "smart grid map".
- [Eur, 2015] (2015). "smart grid projects outlook 2014".
- [Abdullah et al., 2014] Abdullah, L., Baba, M., Ali, S., Lim, A., and Tan, Y. (2014). New graph colouring algorithm for resource allocation in large-scale wireless networks. *Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2014 IEEE 5th*, pages 233–238.
- [Alenazi and Sterbenz, 2015] Alenazi, M. and Sterbenz, J. (2015). Comprehensive comparison and accuracy of graph metrics in predicting network resilience. *Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2015 11th International Conference on the*, pages 157–164.
- [Ancillotti et al., 2012] Ancillotti, E., Bruno, R., and Conti, M. (2012). Rpl routing protocol in advanced metering infrastructures: An analysis of the unreliability problems. *Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT), 2012*, pages 1–10.
- [Ancillotti et al., 2013a] Ancillotti, E., Bruno, R., and Conti, M. (2013a). The role of the rpl routing protocol for smart grid communications. *Communications Magazine, IEEE*, 51(1):75–83.
- [Ancillotti et al., 2013b] Ancillotti, E., Bruno, R., and Conti, M. (2013b). The role of the rpl routing protocol for smart grid communications. *Communications Magazine, IEEE*, 51(1):75–83.
- [Aoun et al., 2006] Aoun, B., Boutaba, R., and Kenward, G. (2006). Analysis of capacity improvements in multi-radio wireless mesh networks. volume 2, pages 543–547.
- [Babar et al., 2013] Babar, S., Prasad, N., and Prasad, R. (2013). Jamming attack: Behavioral modelling and analysis. *Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems (VITAE), 2013 3rd International Conference on*, pages 1–5.
- [Bahaddur et al., 2013] Bahaddur, I., Triveni, C., and Srikanth, P. (2013). Novel defense mechanism against data flooding attacks in ad hoc network. *Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 2013 Fourth International Conference on*, pages 1–6.
- [Balmau et al., 2014] Balmau, O., Dzung, D., KaraagaÃ§, A., Nesovic, V., Paunovic, A., Pignolet, Y. A., and Tehrani, N. A. (2014). Evaluation of rpl for medium voltage power line communication. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 IEEE International Conference on*, pages 446–451.

- [Baronti et al., 2007] Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., and Hu, Y. F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards. *Computer Communications*, 30(7):1655 – 1695. Wired/Wireless Internet Communications.
- [Boushaba et al., 2014] Boushaba, M., Hafid, A., and Gendreau, M. (2014). Source-based routing in wireless mesh networks. *Systems Journal, IEEE*, PP(99):1–9.
- [Brandt et al., 2012] Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J., and Alexander, R. (2012). Rpl: Ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks. *Internet Requests for Comments*, (6550):1–157.
- [Chai et al., 2014] Chai, B., Yang, Z., and Chen, J. (2014). Impacts of unreliable communication and regret matching based anti-jamming approach in smart grid. *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*, pages 1–5.
- [Chan and Perrig, 2003] Chan, H. and Perrig, A. (2003). Security and privacy in sensor networks. *Computer*, 36(10):103–105.
- [Chang and Mason, 2012] Chang, K.-H. and Mason, B. (2012). The ieee 802.15.4g standard for smart metering utility networks. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*, pages 476–480.
- [Chang et al., 2013] Chang, S.-H., Chen, Y.-S., and Cheng, S.-M. (2013). Detection of sybil attacks in participatory sensing using cloud based trust management system. *Wireless and Pervasive Computing (ISWPC), 2013 International Symposium on*, pages 1–6.
- [Chiaradonna et al., 2014] Chiaradonna, S., Di Giandomenico, F., and Murru, N. (2014). On a modeling approach to analyze resilience of a smart grid infrastructure. *Dependable Computing Conference (EDCC), 2014 Tenth European*, pages 166–177.
- [Das and Das, 2012] Das, A. and Das, S. (2012). Cost optimization of wireless-enabled metering infrastructures. *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2012 IEEE 13th Annual*, pages 1–6.
- [De Couto et al., 2003] De Couto, D. S. J., Aguayo, D., Bicket, J., and Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 134–146.
- [DOE, 2010] DOE, U. (2010). Communications requirements of smart grid technologies. *US Department of Energy, Tech. Rep*, pages 1–69.
- [Erseghe et al., 2013] Erseghe, T., Tomasin, S., and Vigato, A. (2013). Topology estimation for smart micro grids via powerline communications. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 61(13):3368–3377.
- [Fang et al., 2012] Fang, X., Misra, S., Xue, G., and Yang, D. (2012). Smart grid - the new and improved power grid: A survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 14(4):944–980.

- [Gan et al., 2013] Gan, W., Shi, Z., Zhang, C., Sun, L., and Ionescu, D. (2013). Merpl: A more memory-efficient storing mode in rpl. *Networks (ICON), 2013 19th IEEE International Conference on*, pages 1–5.
- [Goldsmith, 2005] Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- [Gungor et al., 2011] Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., and Hancke, G. (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 7(4):529–539.
- [Gupta et al., 2012] Gupta, A., Nayyar, A., Langbort, C., and Basar, T. (2012). A dynamic transmitter-jammer game with asymmetric information. *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*, pages 6477–6482.
- [Hartmann et al., 2014] Hartmann, T., Fouquet, F., Klein, J., Le Traon, Y., Pelov, A., Toutain, L., and Ropitault, T. (2014). Generating realistic smart grid communication topologies based on real-data. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 IEEE International Conference on*, pages 428–433.
- [Ho et al., 2015] Ho, Q. D., Gao, Y., Rajalingham, G., and Le-Ngoc, T. (2015). Robustness of the routing protocol for low-power and lossy networks (rpl) in smart grid’s neighbor-area networks. *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 826–831.
- [IEEE, 2011] IEEE (2011). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std. 1516-2000*, pages 1–314.
- [IEEE, 2012a] IEEE (2012a). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 1: MAC sublayer. *IEEE Std. 1516-2000*, pages 1–225.
- [IEEE, 2012b] IEEE (2012b). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 2: Active Radio Frequency Identification (rfid) System Physical Layer (PHY). *IEEE Std. 1516-2000*, pages 1–225.
- [IEEE, 2012c] IEEE (2012c). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for LowData-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks. *IEEE Std. 1516-2000*, pages 1–252.
- [Jun and Sichitiu, 2003] Jun, J. and Sichitiu, M. (2003). The nominal capacity of wireless mesh networks. *Wireless Communications, IEEE*, 10(5):8–14.
- [Karimi and Namboodiri, 2012] Karimi, B. and Namboodiri, V. (2012). Capacity analysis of a wireless backhaul for metering in the smart grid. *Computer Communications Workshops (INFOCOM WORKSHOPS), 2012 IEEE Conference on*, pages 61–66.

- [Karimi and Namboodiri, 2014] Karimi, B. and Namboodiri, V. (2014). On the capacity of a wireless backhaul for the distribution level of the smart grid. *Systems Journal, IEEE*, 8(2):521–532.
- [Karlof and Wagner, 2003] Karlof, C. and Wagner, D. (2003). Secure routing in wireless sensor networks: attacks and countermeasures. *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pages 113–127.
- [Kathuria et al., 2013] Kathuria, V., Mohanasundaram, G., and Das, S. (2013). A simulation study of routing protocols for smart meter networks. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013 IEEE International Conference on*, pages 384–389.
- [Khelifi et al., 2014] Khelifi, N., Kammoun, W., and Youssef, H. (2014). Efficiency of the rpl repair mechanisms for low power and lossy networks. pages 98–103.
- [Kulkarni et al., 2012] Kulkarni, P., Gormus, S., Fan, Z., and Ramos, F. (2012). Ami mesh networks - a practical solution and its performance evaluation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3):1469–1481.
- [Lichtensteiger and Bjelajac, 2010] Lichtensteiger, B. and Bjelajac (2010). Rf mesh systems for smart metering: System architecture and performance. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pages 379–384.
- [Lighari et al., 2014] Lighari, S., Hussain, D., Shaikh, A., and Jensen, B. (2014). Attacks and their defenses for advanced metering infrastructure. *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2014 6th International Congress on*, pages 148–151.
- [Lo and Ansari, 2012] Lo, C.-H. and Ansari, N. (2012). The progressive smart grid system from both power and communications aspects. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 14(3):799–821.
- [Lu et al., 2012] Lu, Z., Wang, W., and Wang, C. (2012). Hiding traffic with camouflage: Minimizing message delay in the smart grid under jamming. *INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE*, pages 3066–3070.
- [Lu et al., 2014] Lu, Z., Wang, W., and Wang, C. (2014). Modeling, evaluation and detection of jamming attacks in time-critical wireless applications. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 13(8):1746–1759.
- [Mishra et al., 2015] Mishra, A., Tayal, H., Khan, M. A., and Raza, M. (2015). Suitable phy layer of narrow-band power line carrier communication in emerging advanced metering infrastructure scenario. *Standards for Communications and Networking (CSCN), 2015 IEEE Conference on*, pages 235–239.
- [Moulema et al., 2014] Moulema, P., Yu, W., Xu, G., Griffith, D., Golmie, N., Lu, C., and Su, D. (2014). On effectiveness of mesh-based protocols for smart grid communication networks. *SIGAPP Appl. Comput. Rev.*, 14(2).

- [Mussmann et al., 2014] Mussmann, S., Moore, J., Pfeiffer, J. J., and Neville, J. (2014). Assortativity in Chung-Lu random graph models. *Proceedings of the 8th Workshop on Social Network Mining and Analysis*, pages 3:1–3:8.
- [Noldus and Van Mieghem, 2015] Noldus, R. and Van Mieghem, P. (2015). Assortativity in complex networks. *Journal of Complex Networks*.
- [Nowak et al., 2014] Nowak, S., Nowak, M., and Grochla, K. (2014). Properties of advanced metering infrastructure networks' topologies. *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE*, pages 1–6.
- [Otani and Miyashita, 2013] Otani, T. and Miyashita, M. (2013). Characteristics of AMI using DLMS/COSEM and IEEE 802.15.4g multi-hop wireless communication. *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013 IEEE International Conference on*, pages 324–329.
- [P. Levis, 2011] P. Levis, T. Clausen, J. H. O. G. J. K. (2011). The trickle algorithm. *Internet Requests for Comments*, (6206):1–157.
- [Palensky, 2011] Palensky, P.; Dietrich, D. (2011). "demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, pages 381–388.
- [Parno et al., 2005] Parno, B., Perrig, A., and Gligor, V. (2005). Distributed detection of node replication attacks in sensor networks. *Security and Privacy, 2005 IEEE Symposium on*, pages 49–63.
- [Popovic and Cackovic, 2014] Popovic, Z. and Cackovic, V. (2014). Advanced metering infrastructure in the context of smart grids. *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*, pages 1509–1514.
- [Renofio et al., 2016a] Renofio, J. R. R., Pellenz, M. E., Jamhour, E., Santin, A., Penna, M. C., and Souza, R. D. (2016a). On the dynamics of the RPL protocol in AMI networks under jamming attacks. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6.
- [Renofio et al., 2016b] Renofio, J. R. R., Pellenz, M. E., Santin, A., Jamhour, E., Penna, M. C., and Souza, R. D. (2016b). Insights on the resilience and capacity of AMI wireless networks. pages 610–615.
- [Sasikumar and Khara, 2012] Sasikumar, P. and Khara, S. (2012). K-means clustering in wireless sensor networks. *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2012 Fourth International Conference on*, pages 140–144.
- [Shi et al., 2011] Shi, L. Y., Peng, J., and Wang, Y. (2011). Dominating tree construction in wireless networks using all-pair shortest paths in graph. *Electronics Letters*, 47(18):1048–1049.
- [Tang et al., 2012] Tang, C.-M., Zhang, Y., and Wu, Y.-P. (2012). The p2p-rpl routing protocol research and implementation in Contiki operating system. *Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2012 Second International Conference on*, pages 1472–1475.

- [Thulasiraman, 2013] Thulasiraman, P. (2013). Rpl routing for multigateway ami networks under interference constraints. *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 4477–4482.
- [Toor and Ma, 2015] Toor, G. S. and Ma, M. (2015). Neighborhood area network security in smart grid using security enhanced key updating. pages 1–5.
- [Tsado et al., 2014] Tsado, Y., Lund, D., and Gamage, K. (2014). Resilient wireless communication networking for smart grid ban. *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*, pages 846–851.
- [Vasseur et al., 2012] Vasseur, J., Kim, M., Pister, K., Dejean, N., and Barthel, D. (2012). Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks. *Internet Requests for Comments*, (6551):1–30.
- [Vijayakumar et al., 2014] Vijayakumar, R., Selvakumar, K., Kulothungan, K., and Kannan, A. (2014). Prevention of multiple spoofing attacks with dynamic mac address allocation for wireless networks. *Communications and Signal Processing (ICCSP), 2014 International Conference on*, pages 1635–1639.
- [Vineetha and Babu, 2014] Vineetha, C. and Babu, C. (2014). Smart grid challenges, issues and solutions. *Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), 2014 International Conference on*, pages 1–4.
- [Wang et al., 2010] Wang, Z., Scaglione, A., and Thomas, R. (2010). Generating statistically correct random topologies for testing smart grid communication and control networks. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(1):28–39.
- [Xu and Wang, 2013] Xu, Y. and Wang, W. (2013). Wireless mesh network in smart grid: Modeling and analysis for time critical communications. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 12(7):3360–3371.
- [Yan et al., 2013] Yan, Y., Hu, R., Das, S., Sharif, H., and Qian, Y. (2013). An efficient security protocol for advanced metering infrastructure in smart grid. *Network, IEEE*, 27(4):64–71.
- [Ye et al., 2015] Ye, F., Qian, Y., and Hu, R. (2015). Design for reliable and self-sustaining neighborhood area network in smart grid. *Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2015 11th International Conference on the*, pages 251–254.
- [Zhao et al., 2013] Zhao, J., Yagan, O., and Gligor, V. (2013). Secure k-connectivity in wireless sensor networks under an on/off channel model. *Information Theory Proceedings (ISIT), 2013 IEEE International Symposium on*, pages 2790–2794.
- [Zhou et al., 2014] Zhou, H., Lai, J., Hu, W., and Deng, Q. (2014). Demand-side energy management: Fth-based mode for smart homes. *American Control Conference (ACC), 2014*, pages 1704–1709.