

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VICTOR HUGO OKABAYASHI

**Seleção Dinâmica de Gateway para Redes Elétricas  
Inteligentes**

NITERÓI

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VICTOR HUGO OKABAYASHI

# Seleção Dinâmica de Gateway para Redes Elétricas Inteligentes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Redes e Sistemas Distribuídos e Paralelos.

Orientador:

CÉLIO VINICIUS N. DE ALBUQUERQUE

NITERÓI

2014

Victor Hugo Okabayashi

Seleção Dinâmica de *Gateway* para Redes Elétricas Inteligentes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Redes e Sistemas Distribuídos e Paralelos.

Aprovada em novembro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Célio Vinicius N. de Albuquerque - Orientador, UFF

---

Prof. Diego Gimenez Passos, UFF

---

Prof. Igor Monteiro Moraes, UFF

---

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, UERJ

Niterói

2014

*À minha companheira Ada pela compreensão e apoio.*

# Agradecimentos

Minha companheira Ada sempre presente me dando forças nos momentos difíceis e comemorando comigo as minhas conquistas.

Ao meu orientador, Professor Célio Vinicius Neves de Albuquerque, que com seu apoio e conhecimento tornaram esta jornada muito tranquila. Professor Célio obrigado pela paciência e dedicação.

Meu coorientador, Professor Diego Passos, pela ajuda e pelas dicas valiosas que tornaram possível minhas simulações. Obrigado por compartilhar um pouco dos seus conhecimentos comigo e com este trabalho.

Ao Professor Igor que muito contribuiu para aumentar os meus conhecimentos, que me ajudaram muito em realizar este trabalho.

A todos os professores do Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense por compartilharem seus conhecimentos comigo.

Marister, obrigado por tudo, sempre muito prestativa e não vou esquecer o seu cafezinho.

Aos colegas do Laboratório Midiacom, sempre dispostos a ajudar com ideias e apoio. Obrigado pela amizade.

Aos amigos Nilson Vianna e Hélio Salmon que tornaram tudo isso possível.

A Deus que me guiou e me deu forças nesta jornada e me fez chegar ao final desta etapa tão gratificante da minha vida.

# Resumo

Redes Elétricas Inteligentes, também conhecidas por *Smart Grids*, são a evolução dos Sistemas Elétricos atuais para atender aos desafios de demandas crescentes por energia e resultam da integração do Sistema Elétrico atual com uma infraestrutura de comunicação para controle e aquisição de dados para torná-lo mais eficiente, confiável e resiliente. O principal desafio enfrentado por esta rede é cumprir os requisitos de confiabilidade e resiliência a fim de atender aos vários tipos de serviços e aplicações em Redes Elétricas Inteligentes [23, 9, 15].

No contexto de distribuição de energia, Rede Elétrica Inteligente é implementada através da infraestrutura de medição avançada (AMI - *Advanced Metering Infrastructure*), responsável pela comunicação de dados entre os equipamentos de medição e coleta com os Provedores de Serviços, tipicamente através de comunicação sem fio. . Redes em malha sem fio (WMN) podem prover a escalabilidade e resiliência necessárias a esta rede de dados, mas existem desafios que precisam ser resolvidos para que sejam usadas na prática em Redes Elétricas Inteligentes.

Devido à natureza instável dos enlaces sem fio e ao fato de que os equipamentos de rede estão instalados em locais públicos abertos e, portanto, são susceptíveis a falhas, acidentes, ataques ou desastres naturais, é necessário que o protocolo de roteamento seja robusto e resiliente o suficiente para lidar com falhas de nós e mitigar seus efeitos.

Este trabalho propõe um algoritmo de seleção dinâmica de *gateways* em redes de dados com múltiplos *gateways* para Redes Elétricas Inteligentes chamado Dynamic DAP Selection Algorithm (DDSA), que melhora o desempenho da rede quando ocorrerem falhas em *gateways*. O algoritmo DDSA usa uma abordagem probabilística para escolha de *gateways* com caminhos confiáveis. Os resultados indicam que o algoritmo proposto torna o protocolo de roteamento mais robusto e resiliente contra falhas de *gateway* se comparado com algoritmos existentes de seleção dinâmica de *gateway*.

**Palavras-chave:** redes em malha sem fio, seleção de *gateway*, comunicação em Redes Elétricas Inteligentes.

# Abstract

Smart Grids are the evolution of the current electrical power system to meet the challenge of increasing demands. Smart Grid is the result of a fully integration of the electrical power grid with data communication networks for data acquisition to make it more efficient, reliable and resilient. The challenge faced by this kind of network is to fulfill reliability and resilience requirements in order to meet various types of services and applications.

AMI (Advanced Metering Infrastructure) is a key step to deploy a Smart Grid and connects smart meters to the Utility's headend via communication network. Wireless mesh networks can provide scalability and resilience to this communication network, but there are issues that need to be addressed in order for them to be used in practical smart grids.

Due to the unstable nature of the wireless networks and to the fact that the network equipments are deployed in public venues and, thus, are susceptible to accidents, failure, attacks or natural disasters, it is imperative that the routing protocol be robust and resilient enough to cope with node failures and mitigate their effects.

This work proposes an algorithm for dynamic selection of gateways in a multihoming smart grid network called Dynamic DAP Selection Algorithm (DDSA), that improves network performance when a gateway's failure occurs. DDSA algorithm uses a probabilistic approach for choosing gateways with reliable paths. Our evaluations indicate that the proposed algorithm makes the routing protocol more robust and resilient against gateway failure compared to existing algorithms for dynamic gateway selection.

**Keywords:** wireless mesh networks, gateway selection, smart grid communications.

# Lista de Figuras

1.1	Arquitetura <i>mesh</i> AMI. . . . .	2
2.1	Modelo conceitual de Redes Eléctricas Inteligentes. Adaptado de [26] . . . .	5
2.2	Rede AMI típica. . . . .	7
4.1	Diagrama de funcionamento do DDSA . . . . .	13
5.1	Cenário em grade. . . . .	20
5.2	Taxa de entrega em função do tempo no cenário em grade. . . . .	21
5.3	Taxa de entrega por nó no cenário em grade. . . . .	21
5.4	Taxa de entrega dos nós 12-23 no cenário em grade. . . . .	22
5.5	Taxa de entrega do nó 16 no cenário em grade. . . . .	22
5.6	Chegada de pacotes do nó 16 por DAP no cenário em grade. . . . .	23
5.7	Porcentagem da escolha de DAP por cada nó no cenário em grade. . . . .	24
5.8	Período de indisponibilidade no cenário em grade. . . . .	25
5.9	Atraso no cenário em grade. . . . .	25
5.10	Chegada de pacotes por DAP do nó 18 no cenário em grade. . . . .	26
5.11	Cenário residencial sintético. . . . .	27
5.12	Taxa de entrega em função do tempo no cenário residencial sintético. . . .	28
5.13	Taxa de entrega por nó no cenário residencial sintético. . . . .	28
5.14	Taxa de entrega dos nós 10-19 no cenário residencial sintético. . . . .	29
5.15	Porcentagem da escolha de DAP por cada nó no cenário residencial sintético.	30
5.16	Período de indisponibilidade no cenário residencial sintético. . . . .	31
5.17	Atraso no cenário residencial sintético. . . . .	31
5.18	Cenário residencial real. . . . .	32

---

5.19	Taxa de entrega em função do tempo no cenário residencial real. . . . .	32
5.20	Taxa de entrega por nó no cenário residencial real. . . . .	33
5.21	Taxa de entrega dos nós 10-21 no cenário residencial real. . . . .	33
5.22	Porcentagem da escolha de DAP por cada nó no cenário residencial real. . .	34
5.23	Período de indisponibilidade no cenário residencial real. . . . .	35
5.24	Atraso no cenário residencial real. . . . .	35
5.25	Taxa de entrega. . . . .	36
5.26	Taxa de entrega para os nós 12-23. . . . .	37
5.27	Período de indisponibilidade. . . . .	38
5.28	Atraso. . . . .	38
5.29	Taxa de entrega. . . . .	39
5.30	Taxa de entrega para os nós 12-23. . . . .	40
5.31	Período de indisponibilidade. . . . .	40
5.32	Período de indisponibilidade dos nós 13 e 14. . . . .	41
5.33	Atraso. . . . .	41
5.34	Atraso médio. . . . .	42
5.35	Chegada de pacotes por DAP do nó 10. . . . .	42

# Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros do modelo de propagação <i>shadowing</i> utilizados na simulação. .	18
-----	--	----

# Lista de Abreviaturas e Siglas

AMI	:	Advanced Metering Infrastructure;
CBR	:	Constant Bit Rate;
DAP	:	Data Aggregation Point;
DDSA	:	Dynamic DAP Selection Algorithm;
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineers;
ISM	:	Industrial, Scientific and Medical;
HWMP	:	Hybrid Wireless Mesh Protocol;
MARA	:	Metric-Aware Rate Adaptation;
NIST	:	National Institute of Standards and Technology;
OLSR	:	Optimized Link State Routing Protocol;
PLC	:	Power Line Communication;
RF	:	Radio Frequency;
UDP	:	User Datagram Protocol;
TCP	:	Transmission Control Protocol;
T&D	:	Transmission & Distribution;
WiMAX	:	Worldwide Interoperability for Microwave Access;
WMN	:	Wireless Mesh Networks.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Redes Elétricas Inteligentes</b>	<b>4</b>
2.1	Aplicações de Redes Elétricas Inteligentes . . . . .	4
2.2	Infraestrutura Avançada de Medição - AMI . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Algoritmo de Seleção Dinâmica de DAP</b>	<b>13</b>
4.1	Cálculo da Probabilidade de Seleção . . . . .	14
4.2	Atualização de Topologia . . . . .	14
4.2.1	Encontrar Melhor DAP . . . . .	15
4.2.2	Excluir DAPs com Custo Abaixo do Limiar . . . . .	15
4.2.3	Atribuir Probabilidade de Seleção . . . . .	16
4.3	Enviar Pacote de Dados . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Avaliação de Desempenho</b>	<b>18</b>
5.1	Ambiente de Simulação . . . . .	18
5.2	Cenário em Grade . . . . .	20
5.3	Cenário Residencial Sintético . . . . .	27
5.4	Cenário Residencial Real . . . . .	32
5.5	Impacto das Retransmissões Redundantes . . . . .	36
5.6	Impacto do Parâmetro $\alpha$ . . . . .	39

Sumário	xi
<b>6 Conclusão</b>	<b>43</b>
<b>Referências</b>	<b>45</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O sistema elétrico atual tem uma arquitetura hierárquica ultrapassada, que não atende às demandas futuras de consumo de energia devido a várias limitações como a capacidade limitada de geração, fluxo unidirecional da energia e controle, capacidade de comunicação deficiente e problemas de confiabilidade [10]. A modernização para uma Rede Elétrica Inteligente visa sanar estes problemas, buscando maior eficiência e confiabilidade, integrando o uso de fontes renováveis de energia produzida pelos consumidores, saindo de um fluxo unidirecional para um fluxo bidirecional de energia e comunicação [23]. Uma infraestrutura de comunicação bidirecional é essencial para Redes Elétricas Inteligentes [16], pois possibilita enviar comandos e receber informações dos sensores e componentes em tempo real permitindo seu monitoramento, manutenção e controle.

Redes Elétricas Inteligentes possuem requisitos específicos de atraso, largura de banda, frequência de atualização, confiabilidade, segurança e tempo de resposta em cada aplicação nos diversos domínios [17, 34]. Os domínios serão detalhados na Seção 2.1. A Estrutura Avançada de Medição ou *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) é fundamental sendo o primeiro passo para tornar real Redes Elétricas Inteligentes [2, 22]. AMI é um sistema que integra a medição, a coleta e a análise do consumo de energia com uma rede de comunicação de dados possibilitando a comunicação bidirecional entre a Central de Processamento (*headend*) do Provedor de Serviços e os medidores inteligentes. Ela deve prover robustez e resiliência para se prevenir ou recuperar de problemas e falhas, proporcionando estabilidade e confiabilidade para as aplicações da AMI.

Esta comunicação pode empregar tanto as tecnologias cabeadas quanto as sem fio disponíveis que suportem a troca de informações entre os componentes da AMI [32, 6]. Existem variados tipos de tecnologias que podem ser empregadas: tecnologia celular, WiMAX, ZigBee [29], RF Mesh [19], IEEE 802.11 *Wireless Mesh Networks* (WMNs) e

PLC (*Power Line Communication*) [21].

PLC é a tecnologia cabeada promissora para uso na AMI [32], mas apresenta limitações. Em caso de falhas, como de rupturas físicas das linhas de energia, não seria possível manter comunicação entre os componentes da AMI [14]. As redes sem fio, segundo Parikh et al [29], oferecem mais benefícios que as redes cabeadas como custo mais baixo, facilidade de implantação e sinal disponível em uma grande área.

Dentre as tecnologias sem fio, o uso de WMN traz vantagens em relação às tecnologias infraestruturadas de único salto, por se comunicar em múltiplos saltos estendendo o alcance da rede e permitindo a comunicação por caminhos alternativos em caso de falhas de enlaces [19, 9].

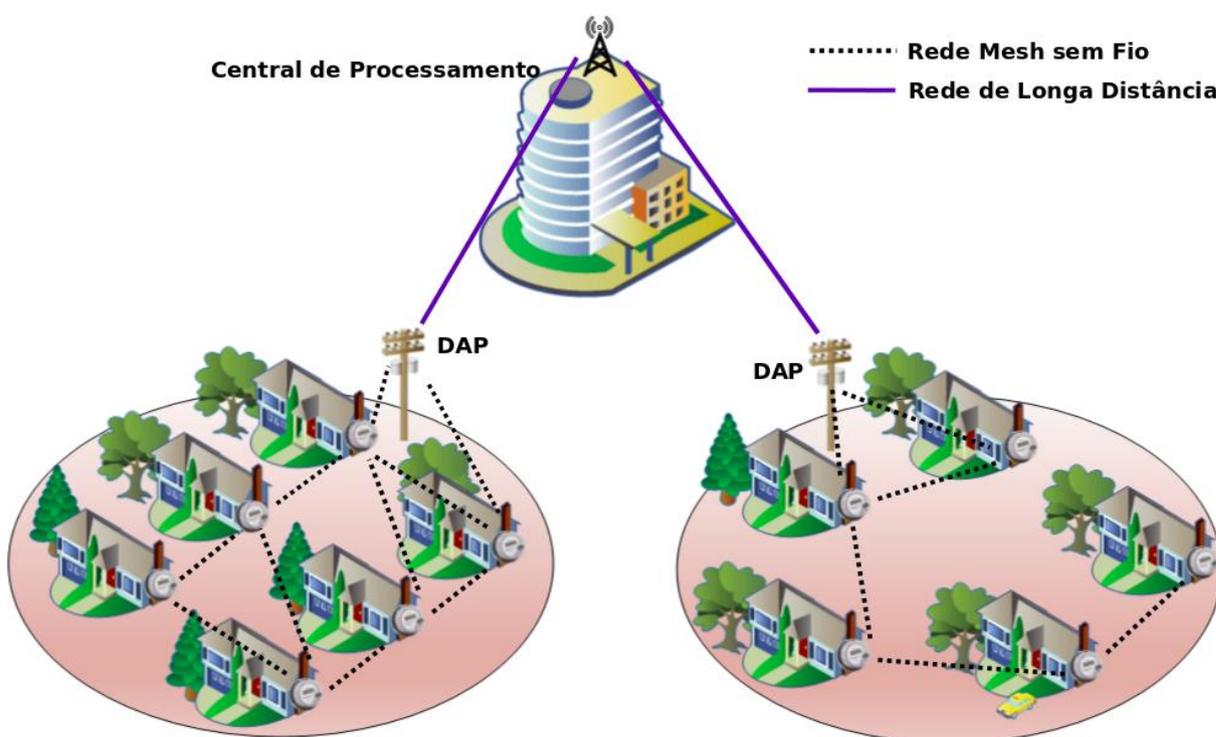


Figura 1.1: Arquitetura *mesh* AMI.

WMN, contudo, deve se adequar aos requisitos de comunicação requeridos pela AMI, onde medidores se comunicam com a Central de Processamento através dos DAP (*Data Aggregation Point*). DAPs são os *gateways* desta rede. Tipicamente, uma AMI, é composta de redes que conectam medidores inteligentes de uma mesma vizinhança a um único DAP. Cada DAP está conectado à Central de Processamento através da rede AMI de longa distância (Fig. 1.1). Entretanto, os DAPs podem ocasionalmente falhar devido a fatores externos como as condições de propagação do ambiente externo que proporcionam atenuações, interferências e variações, além de estarem sujeitas a ataques e acidentes [16].

Neste caso, os medidores irão perder conectividade com a Central de Processamento.

Uma forma de mitigar este problema é a utilização de múltiplos DAPs. O protocolo de roteamento tem que ser capaz de encontrar rotas confiáveis para melhorar o desempenho e se recuperar rapidamente de falhas dos DAPs sem sobrecarregar a rede com mensagens de controle, atendendo aos requisitos de rede da AMI. Dados estes problemas enfrentados pelo protocolo de roteamento em WMN para adequar-se aos requisitos da AMI, este trabalho propõe um algoritmo que seleciona DAPs dinamicamente para a comunicação entre medidores e a Central de Processamento (*headend*). Neste trabalho, assume-se que cada medidor pode se conectar, através de múltiplos saltos, a um conjunto de DAPs. O objetivo principal deste algoritmo, denominado *Dynamic DAP Selection Algorithm* (DDSA), é aumentar a confiabilidade e a resiliência, permitindo aos medidores a utilização de múltiplos DAPs, desta forma mitigando a queda de desempenho na ocorrência de falhas. Para isto, o DDSA envia as mensagens dos medidores de forma proativa, escolhendo um DAP, que será o *gateway* de saída da mensagem, utilizando um algoritmo probabilístico.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma. O Capítulo 2 descreve as características da rede de comunicação AMI, seus desafios e principais problemas enfrentados pelo protocolo de roteamento nesta rede. No Capítulo 3 são apresentados os principais trabalhos da literatura que utilizam um DAP, múltiplos *gateways* e os que utilizam múltiplos DAPs modificando o protocolo HWMP (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*) para implementar a rede AMI. O Capítulo 4 apresenta a descrição detalhada da proposta DDSA e seu funcionamento. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos em 3 cenários utilizados para avaliar a proposta. Além de avaliar a proposta nestes cenários foi estudado o impacto dos parâmetros utilizados pelo algoritmo. Finalmente, o Capítulo 6 conclui o presente trabalho e apresenta ideias para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Redes Elétricas Inteligentes

O aumento no uso de sistemas computadorizados e a grande quantidade de equipamentos eletrônicos que surgem a cada dia nas casas, comércio e indústria tem gerado a necessidade de se melhorar a confiabilidade, eficiência e qualidade da energia elétrica fornecida. A confiabilidade do Sistema Elétrico está associada a falhas no sistema, a eficiência está associada a perdas técnicas e não técnicas e a qualidade está associada a estatísticas sobre interrupções do fornecimento [13]. A fim de conseguir esta melhora nos padrões de fornecimento e geração de energia é necessário o emprego e a integração de diversas tecnologias de comunicação, sensores, medição e de controle. Redes Elétricas Inteligentes resultam da integração do Sistema Elétrico atual com uma infraestrutura de comunicação altamente eficiente para aquisição de dados para torná-lo mais eficiente, confiável e resiliente, minimizando investimentos para aumentar a capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia [1].

### 2.1 Aplicações de Redes Elétricas Inteligentes

O *National Institute of Standards and Technology* (NIST) criou um modelo conceitual de referência para Redes Elétricas Inteligentes [26]. Este modelo é composto por domínios cada qual com seus atores e que executam, geralmente, aplicações similares. Atores podem ser dispositivos, programas ou sistemas com a capacidade de promover a troca de informações de uma aplicação. São sete domínios criados pelo modelo do NIST: geração, transmissão, distribuição, consumidores, operação, provedores de serviço e mercado (Fig. 2.1).

Os domínios da geração, transmissão, distribuição e consumidores são os responsáveis pelo fluxo elétrico do modelo conceitual e formam o sistema elétrico atual. A geração

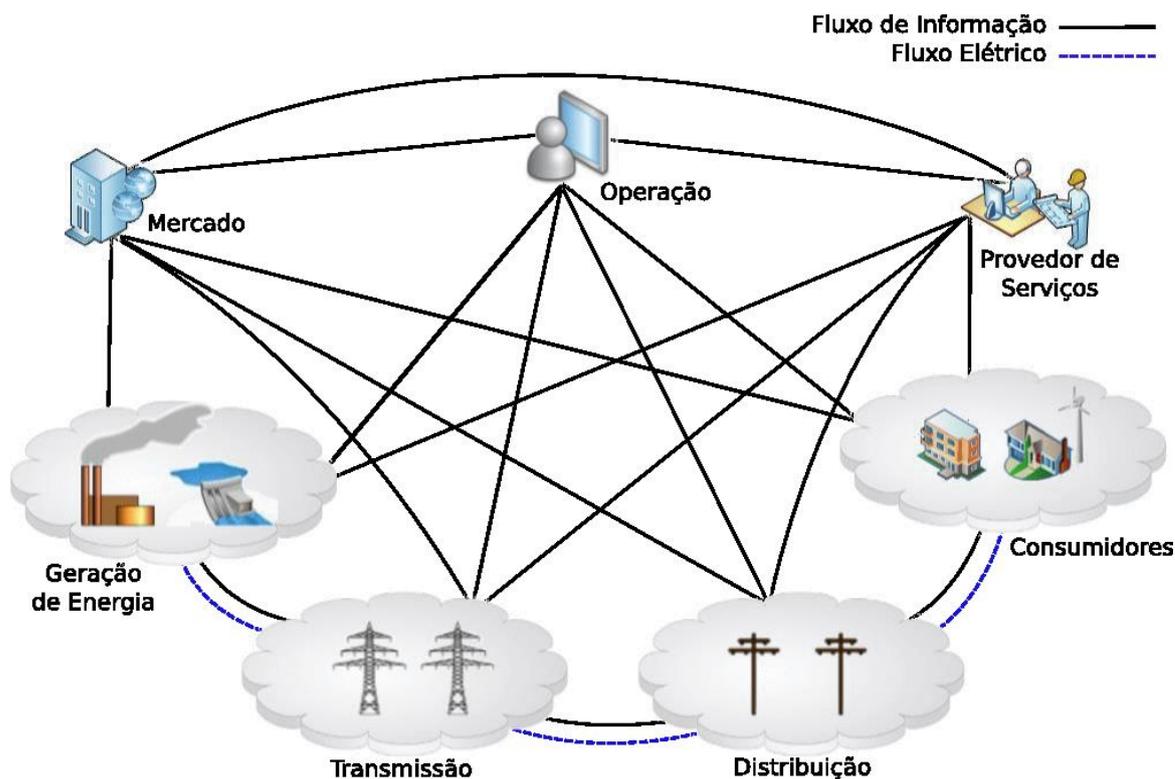


Figura 2.1: Modelo conceitual de Redes Elétricas Inteligentes. Adaptado de [26]

gera energia de fontes renováveis e não renováveis em grande quantidade e que é levada até os consumidores pela transmissão. A distribuição além de distribuir a energia para os consumidores também coleta as informações de consumo dos medidores inteligentes e de outros dispositivos inteligentes. Os consumidores são o domínio onde estão os usuários consumidores de energia e são conectados a rede de comunicação do domínio da distribuição através dos medidores inteligentes. Neste domínio, os consumidores podem gerar energia em pequena escala e armazenar o excesso produzido, que pode ser disponibilizado para a distribuição.

O domínio da operação controla e gerencia todo o fluxo de energia de todos os outros domínios. O domínio de mercado faz a gestão do mercado de atacado e varejo de energia controlando a sua oferta e demanda. Por fim, o domínio de provedores de serviço trata de todas as operações terceirizadas dos outros domínios e responde pela tarifação, manutenção, gerenciamento de falhas e resposta à demanda.

Potenciais aplicações em Redes Elétricas Inteligentes são divididas por fornecedor, T&D (*Transmission & Distribution*) e cliente [17]. São elas: recursos energéticos renováveis distribuídos e armazenamento, veículos elétricos, automação da distribuição, gestão da distribuição, gestão de falhas, automação de subestações, sistema de acompanhamento de sobrecarga da linha de transmissão, gestão de energia residencial, sistema de conheci-

mento situacional em longa distância, gestão de resposta à demanda, gestão de dados de medição e comunicação de dados da AMI.

Segundo Farhangi [10], de toda energia gerada, por volta de 8% é perdida ao longo das linhas de transmissão e 20% da capacidade total de geração é voltada para suprir somente as demandas de pico que representam apenas 5% do total da demanda. Aproximadamente 90% de todas as interrupções de energia e distúrbios são atribuídos ao domínio de distribuição de energia. Desta forma, o sucesso das Redes Elétricas Inteligentes depende da implantação de um sistema de distribuição interligado confiável. De todos os domínios, a distribuição e os consumidores necessitam de maiores investimentos em modernização e são os responsáveis pela transmissão de energia das subestações para os consumidores finais [20]. O principal sistema destes domínios é a AMI que é a responsável pela comunicação entre os equipamentos de medição e coleta com os Provedores de Serviços.

## 2.2 Infraestrutura Avançada de Medição - AMI

A AMI tem como objetivo melhorar a confiabilidade da distribuição e muda o paradigma para um onde as demandas dos clientes se ajustam à geração de energia. A rede de comunicação da AMI é composta basicamente por medidores inteligentes, DAPs e Central de Processamento (*headend*) do Provedor de Serviços, interligando a todos (Fig. 2.2). A Central de Processamento está conectada a vários DAPs, que por sua vez possuem conexões com vários medidores inteligentes. Os medidores enviam dados de medição para a Central de Processamento através de um DAP e este tráfego é caracterizado pela troca de mensagens curtas. Estas mensagens possuem uma carga útil que varia de dezenas a centenas de *bytes* [28] enviados de forma periódica, tipicamente com 15 minutos de intervalo [6]. Além disso, a Central de Processamento pode enviar comandos e requisições para os medidores também passando pelos DAPs. Um exemplo de comando é o desligamento remoto da energia de uma residência por falta de pagamento ou por requisição do consumidor, que pode ter uma latência de até 1 minuto e uma carga de dados de 25 B [28].

Segundo Gungor et al [17], cada medidor necessita de uma banda de 10 a 100 kbps e a latência deve ser menor que 2000 ms com uma confiabilidade maior que 99%. Como os investimentos no setor elétrico são de longa duração, é desejável que a AMI também deva suportar operações de longo prazo [22]. Novas demandas por informações podem surgir, tornando os requisitos mais restritos, como a da latência que pode ficar da ordem

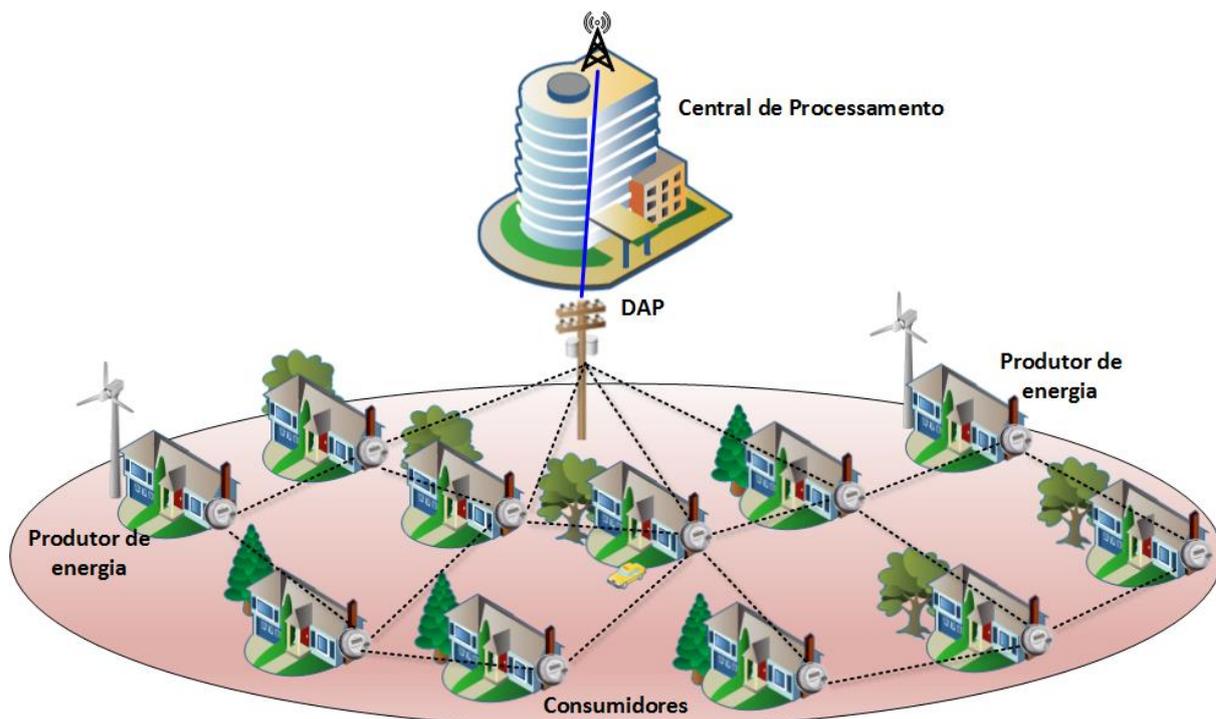


Figura 2.2: Rede AMI típica.

de centenas de milissegundos em aplicações que necessitem de informações em tempo real [22, 35], por exemplo, o controle mais preciso entre o fornecimento e o consumo de energia ou a identificação de componentes que estejam apresentando falhas.

O tráfego da AMI pode ser classificado em regular ou por demanda. O tráfego é dito regular quando os dados são enviados automaticamente pelos medidores em intervalos de tempo pré-determinados [25, 6] e este constitui a maioria do tráfego de dados que flui pela AMI [22]. O tráfego por demanda se constitui de mensagens de alertas dos medidores, de comando e controle enviadas pela Central de Processamento e pelas respostas a estes comandos [25]. Neste último tipo de tráfego pode ocorrer um aumento no congestionamento da rede devido ao pedido de envio de informações pela Central de Processamento para muitos medidores. O DAP é um agregador de dados e é um ponto único de falha, pois todo o tráfego entre os medidores e a Central de Processamento (ou vice-versa) flui através dele. Desta forma, uma eventual falha de DAP inibiria toda a rede de funcionar adequadamente.

A densidade residencial determina a quantidade de medidores por área, que segundo [25] pode ser classificada em cenário rural, suburbano ou urbano, com a densidade variando de 10 a 2000 medidores por  $\text{km}^2$ . As condições do ambiente externo em conjunto com a densidade de medidores irá determinar o nível de interferência e atenuações na

comunicação entre medidores e DAPs [11].

Devido à peculiaridade da rede para AMI e devido a sua grande quantidade de medidores, pode ocorrer degradação no seu desempenho levando a um não cumprimento dos requisitos de comunicação. Também há a possibilidade de ocorrerem problemas de *loop* e quebra de rotas [31]. Por operar em ambiente externo, DAPs e medidores são suscetíveis a acidentes, falhas, ataques e desastres naturais que podem interromper a comunicação da rede AMI. Assim o protocolo de roteamento deve lidar com estes problemas, se recuperar rapidamente de falhas e ter algum mecanismo que, durante o período que não esteja ciente da falha, possa auxiliar o protocolo a sofrer menos impacto em seu desempenho.

O principal requisito da rede AMI é a confiabilidade [16] e, como visto, os medidores formam uma rede WMN que está interligada com a rede da Central de Processamento (*headend*) do Provedor de Serviços por meio de um *gateway* denominado de DAP. Para garantir este requisito, é necessário que o DAP esteja sempre disponível para que os dados fluam entre medidores e a Central de Processamento. Desta forma, o uso de múltiplos DAPs pelo roteamento pode fazer com que os dados sejam enviados para DAPs que estejam acessíveis, evitando os que estejam apresentando falhas, proporcionando que a confiabilidade seja garantida. Para isso, é necessário que o protocolo de roteamento perceba a falha e se recupere de forma rápida sem sobrecarregar a rede com mensagens de controle. Embora os protocolos de roteamento tenham a capacidade de recuperação automática de falhas, o tempo de recuperação tem correlação forte com a frequência de envio das mensagens de controle, i.e., quanto mais baixa esta frequência, mais lento é o processo de recuperação. Por outro lado, o aumento da frequência de envio dos pacotes de controle resulta no aumento da sobrecarga de controle na rede, o que pode trazer problemas de escalabilidade em redes com grande número de nós [33].

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

Na AMI é fundamental que os medidores se comuniquem com a central de processamento por meio dos DAPs. Para prover esta conectividade uma classe de propostas utilizam um único DAP para implementar a rede de comunicação AMI [14, 19]. O trabalho de Gungor e Lambert [14] propõe a utilização de WMN onde os consumidores são agrupados em domínios que por sua vez são conectados a Central de Processamento por um *backbone* WiMAX formando uma rede híbrida. Os DAPs da rede WMN são equipados com múltiplas interfaces de rádio possibilitando a comunicação com redes 802.11, rede de sensores sem fio e WiMAX. O uso de WMN, pelos domínios, provê vários caminhos alternativos entre os medidores eliminando problemas como quebra de rotas e falhas de nós aumentando portanto a robustez na comunicação entre medidores de um domínio e o DAP. Contudo, como este trabalho considera somente um DAP atuando como *gateway* em cada domínio WMN, se ele ficar indisponível não haverá comunicação entre os medidores e a Central de Processamento.

O trabalho de Lichtensteiger et al [19] avalia um sistema para medição inteligente baseado em rádio frequência em malha (RF *mesh*) com roteamento geográfico. O trabalho faz uso do RF *mesh* aproveitando da frequência ISM (Industrial, Scientific and Medical) na faixa 902-928 MHz. O roteamento utiliza as coordenadas de latitude e longitude para localização dos nós da rede. Desta forma, quando um nó deseja transmitir uma mensagem, ele escolhe o seu vizinho que esteja mais próximo do destino minimizando o número de saltos e garantindo uma latência baixa. A arquitetura da rede é composta de medidores, roteadores e coletores. Cada um destes equipamentos possui um nível de potência que irá determinar sua área de cobertura e sua função dentro desta rede. Os medidores possuem o menor alcance, da ordem de centenas de metros. Já os roteadores têm uma cobertura maior, da ordem de 2 quilômetros. Os medidores podem se comunicar diretamente com os

coletores ou por meio dos roteadores. Os roteadores têm a função de formar um *backbone* para estender o alcance da rede controlada pelo coletor permitindo a sua comunicação com os medidores. Com isso, um controlador pode controlar até 25.000 medidores e roteadores em uma rede única. De forma similar, neste trabalho tem-se um único coletor e se ele ficar indisponível não haverá comunicação com a Central de Processamento.

Uma segunda classe de propostas utiliza múltiplos *gateways* para implementar uma rede de comunicação [5]. O trabalho de Silva et al [5], denominado de DynTun, faz uso de múltiplos *gateways* para aumentar a resiliência da WMN por meio de redundância de *gateways*, além de prover caminhos redundantes ente o cliente e os *gateways*. Para que uma mudança de *gateway* não encerre uma conexão TCP (*Transmission Control Protocol*) em andamento, todo pacote de um mesmo fluxo sempre é encaminhado para o mesmo *gateway* de saída. Para que isto ocorra, faz-se o uso de túneis dinâmicos entre o roteador e o *gateway*, criados quando um novo *gateways* é encontrado, por onde todos os pacotes do mesmo fluxo serão encaminhados. No momento do envio, o DynTun verifica se este é um pacote de abertura de conexão, e então o melhor *gateway* é escolhido e associado à nova conexão. todos os pacotes subsequentes desta conexão serão simplesmente encaminhados pelo túnel aberto para o *gateway* correspondente. É possível que conexões de um mesmo roteador se utilizem de *gateways* diferentes. Esta abordagem é aplicada em WMNs que servem de *backbone* para acesso à internet, mas utiliza somente o *gateway* que possui o melhor caminho. Manter estes túneis e o estado das conexões podem sobrecarregar o processamento do roteador e limitar a escalabilidade, mas segundo as avaliações dos autores o desempenho não foi comprometido. Por usar somente a métrica de roteamento para escolha do melhor *gateway*, utilizando o critério de melhor custo do caminho, pode ocorrer sempre a escolha de um mesmo *gateway* ou somente alguns poucos seriam escolhidos. Desta forma, haveria pouca variação na mudança de *gateway*. Além disto, em um mesmo fluxo todos os pacotes são enviados sempre para o mesmo *gateway*.

A terceira classe de propostas utiliza múltiplos DAPs modificando o protocolo HWMP (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*) para implementar a rede de comunicação AMI [12, 18]. O trabalho de Gharavi e Hu [12] é projetado para se adequar aos requisitos de redes AMI e faz uso de múltiplos DAPs para comunicação entre medidores e a Central de Processamento modificando o protocolo HWMP para aumentar a confiabilidade do protocolo. O protocolo HWMP sofre modificações para ter em sua tabela de roteamento entradas para vários DAPs e a adição de um *buffer* para armazenamento de pacotes gerados pelo próprio nó para, caso ocorra alguma notificação de quebra de rota, reenviá-los por outro caminho. Embora resolva algumas deficiências do protocolo HWMP, o trabalho ainda sofre com

outros problemas como instabilidade de rotas e *loops*. Segundo os autores, esta é uma característica do sistema distribuído de *backpressure* adotado por eles. O *backpressure* é uma técnica que faz o balanceamento do tráfego entre os DAPs direcionando os pacotes para os que tem menor congestionamento, baseado na observação das suas filas. No entanto, o trabalho não avaliou o comportamento do protocolo em um ambiente com falha de DAP, nem permitindo adaptação de taxa de transmissão, que aumenta o problema de instabilidade de rotas.

O trabalho sobre roteamento de Kim et al [18] denominado de HWMP-RE também foi projetado para redes AMI utilizando múltiplos DAPs. Eles propõem uma modificação do protocolo HWMP alterando o cálculo da taxa de perda da métrica *airtime* adicionando uma penalização por tamanho do pacote, onde quanto menor for o tamanho maior será a penalidade, pois pacotes pequenos são menos propensos a erros de bits. Segundo os autores, esta modificação tem por objetivo adequar o cálculo da métrica para o tráfego encontrado na AMI. Para o problema de instabilidade de rotas eles propõem uma alteração na tabela de rotas para armazenar múltiplas entradas, assim como informações prévias de um intervalo anterior. O objetivo é somente trocar de rota se a variação entre o custo atual e o anterior for menor que a variação da rota atual. O descarte da fila é um problema do protocolo HWMP que quando um nó intermediário não consegue encaminhar um pacote, devido a uma quebra de rota, ele gera uma mensagem de *path error*. Esta mensagem, informando aos vizinhos da quebra de rota, faz com que eles descartem todos os pacotes da fila destinados para aquele destino. Para este problema os autores propõem um mecanismo baseado em DTN (*Delay-Tolerant Networking*) [8] no qual é criado um *buffer* para armazenar pacotes importantes que, juntamente com a criação de uma tabela reserva de rotas, resolvem o problema de descarte da fila. Este trabalho também não avaliou o comportamento em um ambiente com falha de DAP, nem permitindo adaptação de taxa de transmissão. Tanto o trabalho de Kim et al [18] quanto o de Gharavi e Hu [12] utilizam como base um protocolo que tem problemas de escalabilidade devido ao congestionamento causado por mensagens de controle [3], dificultando seu uso em AMI.

No presente trabalho, o algoritmo proposto, DDSA, faz uso de múltiplos DAPs para comunicação entre medidores e a Central de Processamento e difere de [18] e [12] por ser projetado para melhorar o desempenho em ambientes com falhas de DAP. O DDSA é independente do protocolo de roteamento, podendo ser implementado em um protocolo mais adequado para a aplicação de AMI. No DDSA, a cada novo envio de dados, os medidores escolhem probabilisticamente um DAP, de um grupo de DAPs disponíveis com caminhos de boa qualidade. Desta forma, ele distribui o tráfego entre DAPs com boas

---

métricas de forma aleatória fazendo com que, em caso de falhas em DAPs, o desempenho não sofra um impacto grande amenizando os efeitos da falha enquanto o roteamento não estiver ciente dela. O DDSA, por auxiliar o roteamento durante o período em que a falha não foi percebida, permite um ajuste na quantidade de pacotes de controle de forma a minimizar a inundação da rede por estas mensagens.

# Capítulo 4

## Algoritmo de Seleção Dinâmica de DAP

Neste capítulo é proposto o algoritmo de seleção dinâmica de DAP (Dynamic DAP Selection Algorithm - DDSA) que visa aumentar a resiliência a falhas de DAP, enviando as mensagens dos medidores para múltiplos DAPs de forma pró-ativa. O DDSA é baseado em algoritmo probabilístico [24] e pode ser disparado por dois eventos: a chegada de uma mensagem de atualização de topologia (Atualização de Topologia) e a transmissão de um dado da aplicação (Enviar Pacote de Dados), como pode ser visto na Figura 4.1. Quando uma mensagem de atualização de topologia é recebida, o DDSA calcula um subconjunto de DAPs com os melhores custos de caminho e os armazena em sua tabela de roteamento. No processo de envio de cada pacote de dados da aplicação, o DDSA consulta a tabela de roteamento e probabilisticamente escolhe um DAP como *gateway* da mensagem.

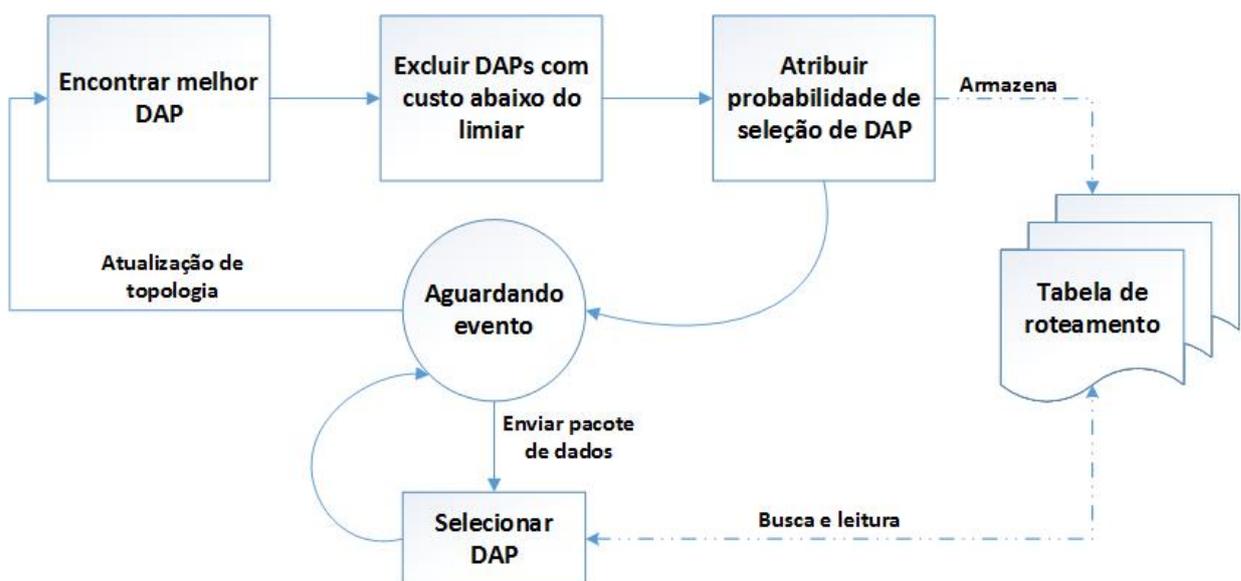


Figura 4.1: Diagrama de funcionamento do DDSA

Quanto melhor for o custo do caminho para um determinado DAP, maiores serão as

chances dele ser escolhido no processo de envio de cada pacote de dados da aplicação. Nas próximas seções serão descritos mais detalhadamente os mecanismos do algoritmo proposto.

## 4.1 Cálculo da Probabilidade de Seleção

O DDSA é um algoritmo probabilístico que tem a tarefa de escolher probabilisticamente um DAP de um subconjunto de DAPs com os melhores custos de caminho. Para efetuar esta escolha, o DDSA calcula uma probabilidade de seleção para cada um destes DAPs. Esta probabilidade está diretamente relacionada ao custo de caminho de cada DAP, onde um DAP com melhor custo de caminho terá uma maior probabilidade de ser escolhido que outro com pior custo de caminho. O cálculo da probabilidade de seleção é feita da seguinte forma:

Para cada DAP  $d_j$ , a probabilidade  $P_{(m_i, d_j)}$  é calculada pelo medidor  $m_i$  pela expressão:

$$P_{(m_i, d_j)} = \frac{M_{(m_i, d_j)}}{\sum_{k=1}^N M_{(m_i, d_k)}} , \quad (4.1)$$

onde,  $M_{(m_i, d_j)}$  é o valor do custo de caminho  $(m_i, d_j)$ . Este custo é dividido pelo somatório dos custos de caminho para cada DAP em relação ao medidor  $m_i$ .

Observe que esta expressão assume que a métrica de roteamento atribui valores maiores para melhores caminhos. Caso seja utilizada uma métrica com lógica reversa a seguinte expressão deve ser utilizada:

$$P_{(m_i, d_j)} = \frac{1/M_{(m_i, d_j)}}{\sum_{k=1}^N 1/M_{(m_i, d_k)}} . \quad (4.2)$$

Nos algoritmos descritos nas próximas seções foi empregado em sua lógica uma métrica de roteamento em que são atribuídos valores maiores para os melhores caminhos.

## 4.2 Atualização de Topologia

Quando o protocolo de roteamento atualiza sua topologia, o DDSA calcula a probabilidade de seleção para os DAPs com melhores custo de caminho. Para calcular esta probabilidade, o DDSA compara os custos de caminho entre o medidor corrente e cada

DAP conhecido da rede. Existem três processos principais que são executados pelo DDSA: Encontrar Melhor DAP, Excluir DAPs com Custo Abaixo do Limiar e Atribuir Probabilidade de Seleção para cada DAP.

### 4.2.1 Encontrar Melhor DAP

Encontrar o DAP com melhor custo de caminho é uma tarefa importante para o DDSA. Enquanto procura pelo melhor DAP, o somatório dos custos dos caminhos do medidor para todos os DAPs é calculado e será usado para o cálculo da probabilidade de seleção dos DAPs. O Algoritmo 1 mostra como o processo funciona para um medidor  $m_i$ . Primeiro, o custo de caminho  $M_{m_i d_k}$  para cada DAP  $d_k$  é encontrado (linha 3) e então ele é acumulado em  $Sum$  (linha 4). Neste laço, o melhor custo de caminho é armazenado em  $best\_M$  (linha 6).

---

#### Algoritmo 1 Encontrar Melhor DAP.

---

```

1:  $Sum \leftarrow 0, best\_M \leftarrow 0$ 
   //Calcula Somatório e encontra melhor DAP
2: para cada DAP  $d_k$  faça
3:    $M_{m_i d_k} \leftarrow procureMetrica(m_i, d_k)$ 
4:    $Sum \leftarrow Sum + M_{m_i d_k}$ 
5:   se  $best\_M < M_{m_i d_k}$  então
6:      $best\_M \leftarrow M_{m_i d_k}$ 
7:   fim se
8: fim para

```

---

### 4.2.2 Excluir DAPs com Custo Abaixo do Limiar

---

#### Algoritmo 2 Excluir DAPs com Custo Abaixo do Limiar.

---

```

1: //Calcula  $\gamma$ 
2:  $\gamma \leftarrow \alpha * \frac{best\_M}{Sum}$ 
   //Exclui piores DAPs
3: para cada DAP  $d_k$  faça
4:   se  $\frac{M(m_i, d_k)}{Sum} < \gamma$  então
5:      $desconsideraDAP(d_k)$ 
6:   fim se
7: fim para
   //Recalcula Somatório
8:  $Sum \leftarrow recalcula\_Sum$ 

```

---

Para evitar a seleção de DAPs com custo de caminho muito ruins, um valor de limiar  $\alpha \in [0, 1]$  é empregado pelo DDSA (Algoritmo 2). A probabilidade de seleção do melhor

DAP, dada por  $\frac{best\_M}{Sum}$ , é multiplicada pelo valor de  $\alpha$ , resultando no valor de  $\gamma$  (linha 2) para ser comparado com as outras probabilidades dos DAPs. Se a probabilidades de seleção do DAP  $d_k$ , dada por  $\frac{M(m_i, d_k)}{Sum}$ , for menor que  $\gamma$  (linha 4), então o DAP  $d_k$  é desconsiderado (linha 5) e não será utilizado no processo de seleção. O limiar  $\alpha$  é um parâmetro que afeta o desempenho e o comportamento da rede. Um valor baixo para  $\alpha$  implica em se ter um número maior de DAPs para seleção, o que melhora a resiliência em caso de falha de DAP, em contraste, um valor alto para  $\alpha$  resulta em um conjunto menor de DAPs com custos melhores, próximos do custo do melhor DAP, o que tende a resultar em melhor desempenho, porém com menor resiliência.

Com a eliminação dos DAPs de piores custos, o algoritmo recalcula o somatório (linha 8) utilizando somente os custos dos melhores DAPs, ou seja, os que possuem probabilidade de seleção maiores que  $\gamma$ . Isto é necessário para se redistribuir as probabilidades dos DAPs eliminados entre os que restaram trazendo justiça na seleção de DAPs durante o processo de envio de pacotes de dados da aplicação.

### 4.2.3 Atribuir Probabilidade de Seleção

---

**Algoritmo 3** Atribuir Probabilidade de Seleção.

---

```

1: //Calcula probabilidade dos melhores DAPs
2: para cada DAP  $d_m$  faça
3:    $Prob_{(m_i, d_m)} \leftarrow \frac{M(m_i, d_m)}{Sum}$ 
4:   atualizaProbabilidade( $m_i, Prob_{(m_i, d_m)}$ )
5: fim para

```

---

Para cada DAP que não foi desconsiderado, é recalculado sua probabilidades de seleção utilizando-se o novo valor de somatório (linha 3). Estes valores atualizados das probabilidades de seleção são armazenados na tabela de roteamento (linha 4) e poderão ser lidos durante o processo do evento Enviar Pacote de Dados.

## 4.3 Enviar Pacote de Dados

O evento Enviar Pacote de Dados é acionado sempre que houver dados para serem enviados do medidor para a Central de Processamento. O DDSA inicia o processo de seleção do DAP escolhendo probabilisticamente um dentre o conjunto de melhores DAPs armazenados na tabela de roteamento. No Algoritmo 4 a primeira tarefa é sortear aleatoriamente um valor entre zero e um (linha 2) que chamaremos de probabilidade de

---

**Algoritmo 4** Algoritmo de seleção de DAP.

---

```
1:  $Prob\_temp \leftarrow 0$ 
2:  $Prob\_sorteio \leftarrow randomUniform(0, 1)$ 
   //Selecioneando DAP
3: para cada DAP  $d_k$  faça
4:    $prob \leftarrow procuraProbabilidade(d_k)$ 
5:    $Prob\_temp \leftarrow Prob\_temp + prob$ 
6:   se  $Prob\_temp \geq Prob\_sorteio$  então
7:      $Selected\_DAP \leftarrow d_k$ 
8:     break
9:   fim se
10: fim para
11: retorna  $Selected\_DAP$ 
```

---

sorteio  $Prob\_sorteio$ , que irá ajudar a determinar para qual DAP será enviado o pacote de dados. O DDSA busca cada probabilidade de seleção de DAP da tabela de roteamento (linha 4) e que será acumulada na variável  $Prob\_temp$  (linha 5) e então a compara com  $Prob\_sorteio$  (linha 6). Se  $Prob\_temp$  for menor que  $Prob\_sorteio$  a próxima probabilidade de seleção de DAP é lida da tabela de roteamento e acumulada em  $Prob\_temp$ . Isto se repete até que  $Prob\_temp$  seja maior ou igual a  $Prob\_sorteio$ , então esse DAP é escolhido para essa mensagem da aplicação.

# Capítulo 5

## Avaliação de Desempenho

Neste capítulo será avaliado o desempenho do DDSA em cenários sintéticos e realistas baseados em ambientes urbanos típicos. Para tanto, utilizamos o conhecido simulador ns-2 [27]. Para simular o comportamento de uma rede AMI composta de medidores inteligentes e DAP nós configuramos o ns-2 para simular um cenário externo suburbano usando o modelo de propagação *shadowing* com os parâmetros apresentados na Tabela 5.1 e definidos em [25]. O desempenho do DDSA foi comparado com o de da Silva et al [5]. A sensibilidade do DDSA em relação ao parâmetro  $\alpha$  é verificada na Seção 5.6 .

Tabela 5.1: Parâmetros do modelo de propagação *shadowing* utilizados na simulação.

Perda do Sistema	1,0
Expoente de Perda	2,7
Desvio Padrão	7,4
Distância de Referência	1,0

### 5.1 Ambiente de Simulação

Para simular a troca de informações entre os medidores e os DAPs em uma aplicação típica de AMI utilizamos pacotes de tamanho fixo de 400B [25], transportados pelo protocolo UDP com fonte de dados CBR (*Constant Bit Rate*) à taxa de 20 pacotes por minuto. Nesta avaliação, optou-se pelo uso do protocolo UDP, que apesar de não confiável, possui menor latência do que o TCP e não necessita iniciar uma conexão para envio de dados. A confiabilidade pode ser tratada pela aplicação por meio de retransmissões redundantes ou implementando seu próprio serviço de transporte confiável que seja adequado para aplicação em AMI [7]. Nas simulações adotou-se implementação de confiabilidade através

de retransmissões redundantes. Desta forma, cada medidor envia 10 pacotes de dados de forma sincronizada em cada rodada de transmissão, a cada 3 segundos <sup>1</sup>.

Para a avaliação dos resultados empregou-se as métricas de taxa de entrega e atraso calculadas para a camada de aplicação. Na taxa de entrega foi computado como falha na entrega se nenhum dos pacotes, em uma rodada de transmissão, foi recebido por qualquer um dos DAPs. O atraso foi calculado medindo o intervalo de tempo entre o envio do primeiro pacote e o recebimento, por qualquer um dos DAPs, de um dos pacotes da mesma rodada de transmissão. A troca de informações se inicia no tempo de 150 segundos e aos 300 segundos ocorre a falha de um dos DAPs. Um total de 10 simulações foram executadas com a duração de 650 segundos cada e nos gráficos o intervalo de confiança empregado foi de 95%.

A proposta DDSA foi implementada no simulador ns-2 usando o OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) [4] como protocolo de roteamento. MARA (*Metric-Aware Rate Adaptation*) [30] foi empregado como métrica de roteamento e algoritmo de adaptação de taxa. O MARA é um mecanismo que une métrica de roteamento com adaptação de taxa de transmissão em WMN através do conceito de *cross-layer*. Ele utiliza informações estatísticas da métrica de roteamento para escolher a melhor taxa e por sua vez, com base nesta escolha, a métrica pode estimar qual o real custo do enlace. Desta forma, métrica e adaptação de taxa compartilham informações e tomam decisões em conjunto resultando em melhores escolhas de rotas por parte do roteamento. O cálculo da métrica de um enlace se baseia em um processo de conversão no qual primeiro é estimado o SNR (*Signal-to-noise ratio*) do enlace a partir da probabilidade de sucesso de pacotes de *probe* em uma dada taxa de transmissão que pode ser de 1 Mbps, 18 Mbps, 36 Mbps ou 54 Mbps. Com a estimativa deste SNR, é possível, por meio de uma função de probabilidade de perda estimar o PER (*Packet Error Rate*) para outras taxas. Sua vantagem é que ele resolve o problema em que métrica e escolha de taxa são estudadas em separado, embora elas sejam fortemente relacionadas.

Na avaliação dos resultados as seguintes soluções foram avaliadas:

- (1) DDSA utilizando o parâmetro  $\alpha = 0,3$  referenciada com DDSA-30%; e
- (2) o mecanismo DynTun modificado para seleção dinâmica de *gateway* que escolhe o melhor *gateway* de acordo com a métrica de roteamento no momento do envio do

---

<sup>1</sup>Observe que a taxa de transmissão para aplicações AMI é baixa e o parâmetro 10 é ajustável e representa o nível de redundância introduzido pela aplicação.

pacote de dados. Esta modificação muda a forma como o DynTun escolhe o *gateway* de saída não tendo mais a necessidade de enviar pacotes de mesmo fluxo para o mesmo *gateway*. Desta forma, a cada envio de pacotes será escolhido um melhor *gateway* independentemente de qual fluxo pertença. Esta solução foi referenciada como Multi-DAP.

Foram utilizados 3 cenários de simulação para avaliar o DDSA: Cenário em Grade, Cenário Residencial Sintético e Cenário Residencial Real.

## 5.2 Cenário em Grade

Este cenário de simulação é composto de 36 nós dispostos em grade e por 3 DAPs como pode ser visto pela Figura 5.1. Neste cenário é no DAP2 onde ocorrerá a falha no tempo de 300 segundos.

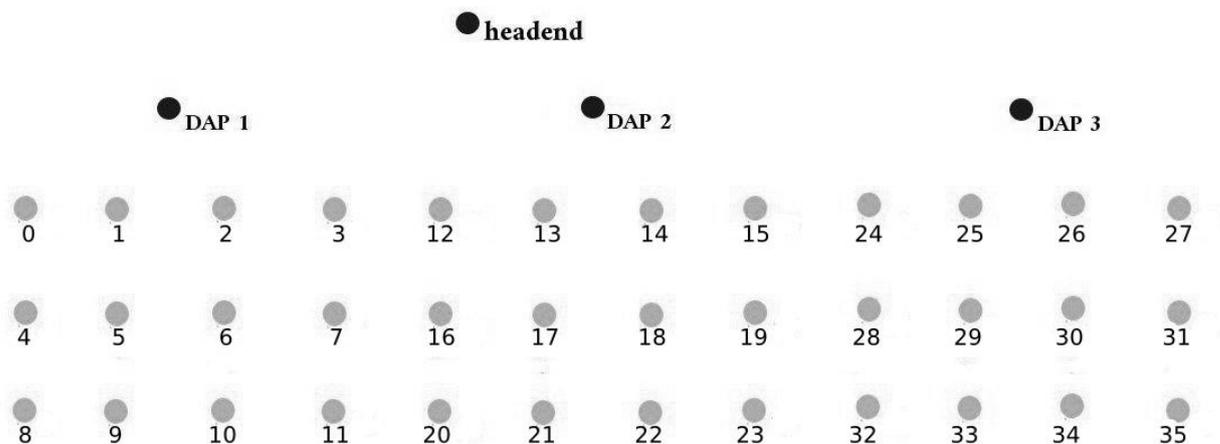


Figura 5.1: Cenário em grade.

A Figura 5.2 mostra o gráfico da taxa de entrega para todos os nós em função do tempo, considerando-se a média dos últimos 60 segundos. Pode-se notar que o DDSA-30% se recupera, após a ocorrência da falha, voltando a ter o desempenho inicial mais rapidamente. O Multi-DAP sofre um impacto maior no desempenho e se recupera mais lentamente demonstrando ter baixa capacidade de recuperação. No tempo de 363 segundos o DDSA-30% tem aproximadamente 93% de taxa de entrega enquanto o Multi-DAP tem 67% de taxa. O DDSA-30% volta a ter novamente mais de 99% de taxa de entrega no tempo de 468 segundos enquanto o Multi-DAP somente no tempo de 528 segundos.

Este comportamento acontece porque o DDSA-30%, principalmente na região central da rede (nós 12 ao 23), é menos afetado pela falha do DAP2 do que o Multi-DAP como

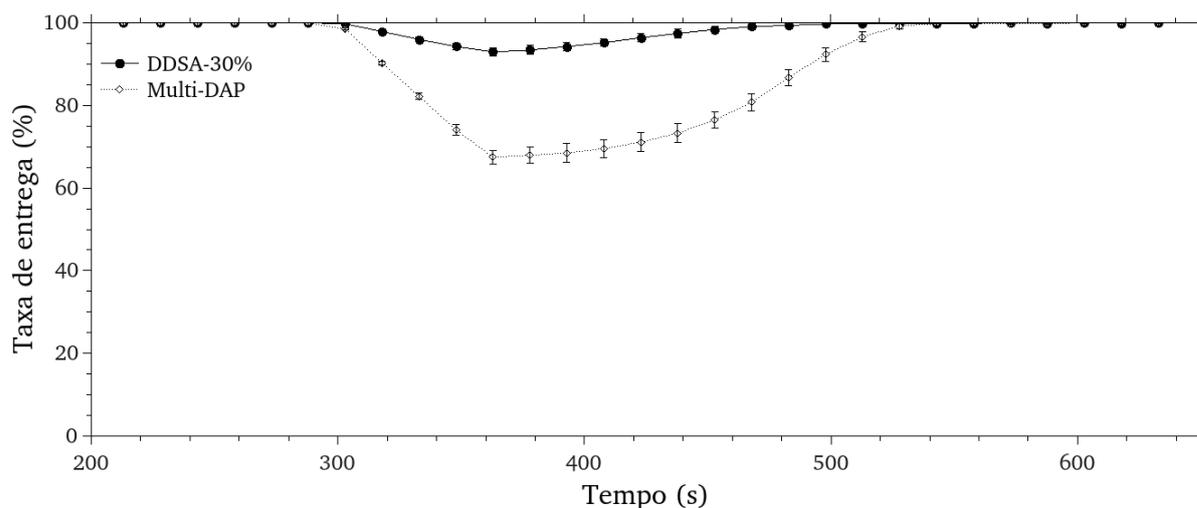


Figura 5.2: Taxa de entrega em função do tempo no cenário em grade.

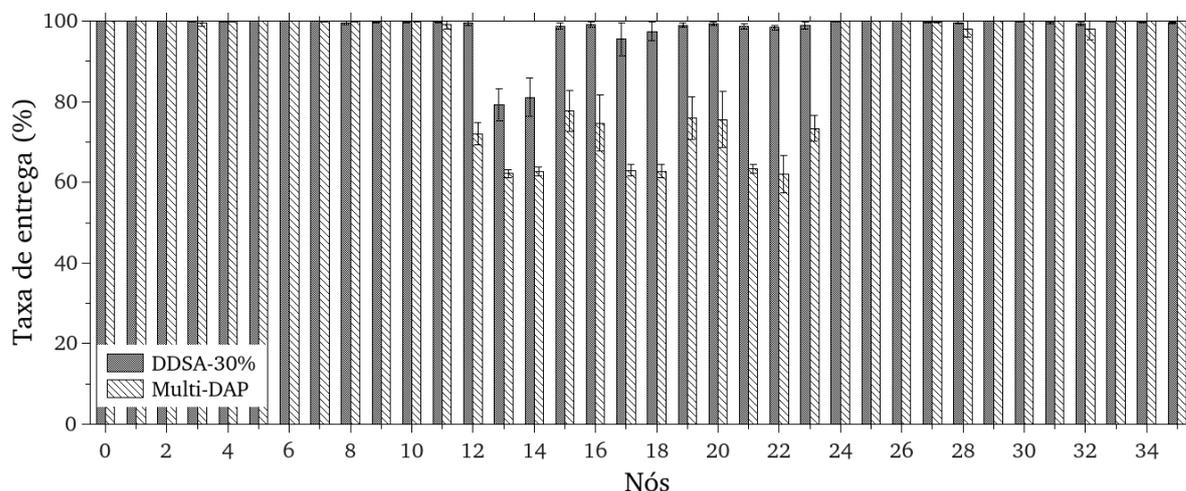


Figura 5.3: Taxa de entrega por nó no cenário em grade.

pode ser visto no gráfico da Figura 5.3. Nota-se que os nós localizados na região central são os que mais sofrem com a falha e no Multi-DAP são os que apresentam as menores e mais baixas taxas de entrega. Isto é explicado pelo fato de que estes nós estão mais próximos geograficamente do DAP2. Por isto, este DAP tem a melhor métrica e sempre será escolhido pelo Multi-DAP até que a sua falha comece a ser percebida e sua métrica não seja a melhor dentre todas. Como o DDSA foi projetado para distribuir pacotes entre os DAPs, isso faz com que ele seja mais robusto e resiliente quando ocorre a falha, pois em uma mesma rodada de transmissão é enviado o mesmo pacote para vários DAPs aumentando as chances de entrega. Isto pode ser visto em detalhes na Figura 5.4 onde é mostrado o gráfico da taxa de entrega para os nós 12 ao 23 em função do tempo. Os menores valores ocorrem no tempo 363 segundos, com o DDSA-30% entregando aproximadamente 80%

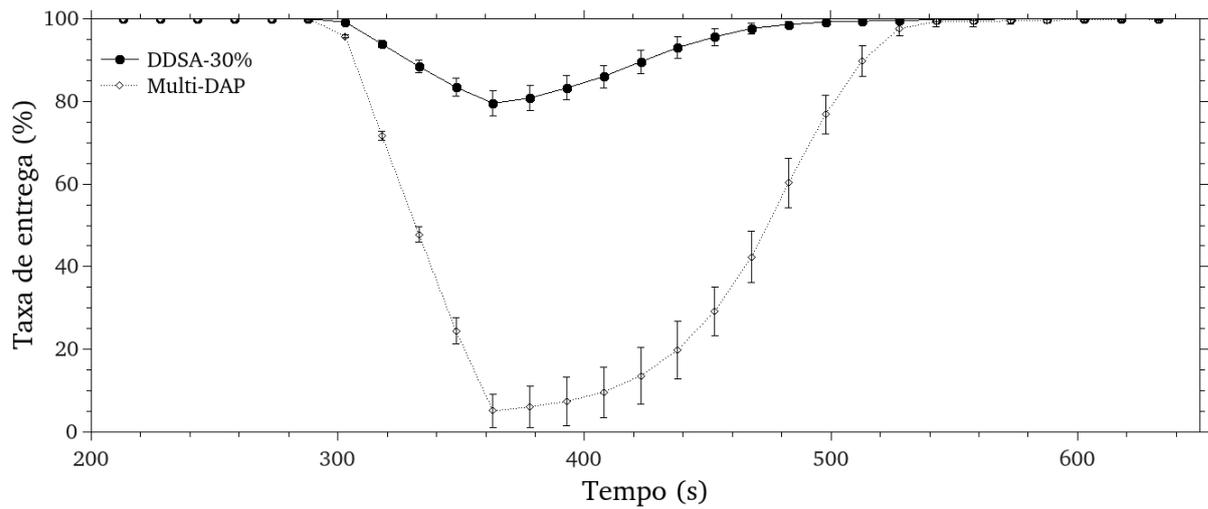


Figura 5.4: Taxa de entrega dos nós 12-23 no cenário em grade.

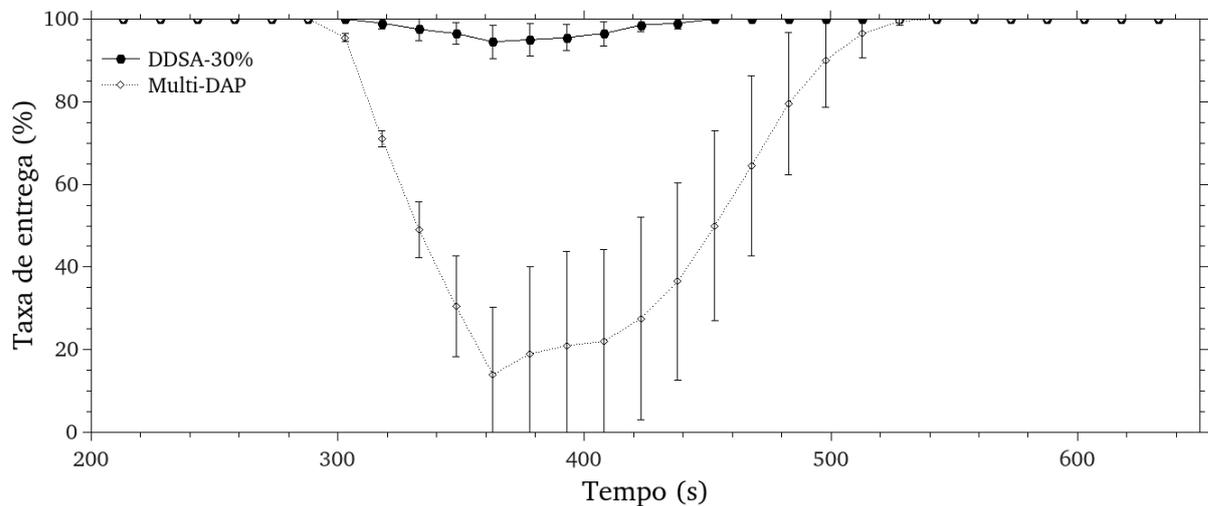


Figura 5.5: Taxa de entrega do nó 16 no cenário em grade.

dos pacotes enquanto o Multi-DAP obtém taxa de entrega de 5%. Embora o resultado obtido pelo DDSA seja muito bom comparado com o Multi-DAP, ele poderia ter sido melhor. Na Figura 5.2 pode-se observar que os nós 13 e 14 ficaram com uma taxa de entrega muito abaixo dos outros nós com uma diferença de 15,5% se comparado com a menor taxa obtida pelos outros nós. Isto pode ser explicado por estes nós serem os mais próximos geograficamente do DAP2. Portanto, sofrem mais influência da falha, pois o seu custo de caminho é muito melhor se comparado com dos outros DAPs fazendo com que sua probabilidade de seleção nestes nós seja muito alta.

A Figura 5.5 analisa o comportamento da taxa de entrega para um único nó em função do tempo. O nó 16 foi o escolhido por estar localizado geograficamente entre dois DAPs e com isto os valores de suas métricas são próximos. Observou-se que com o DDSA-30%,

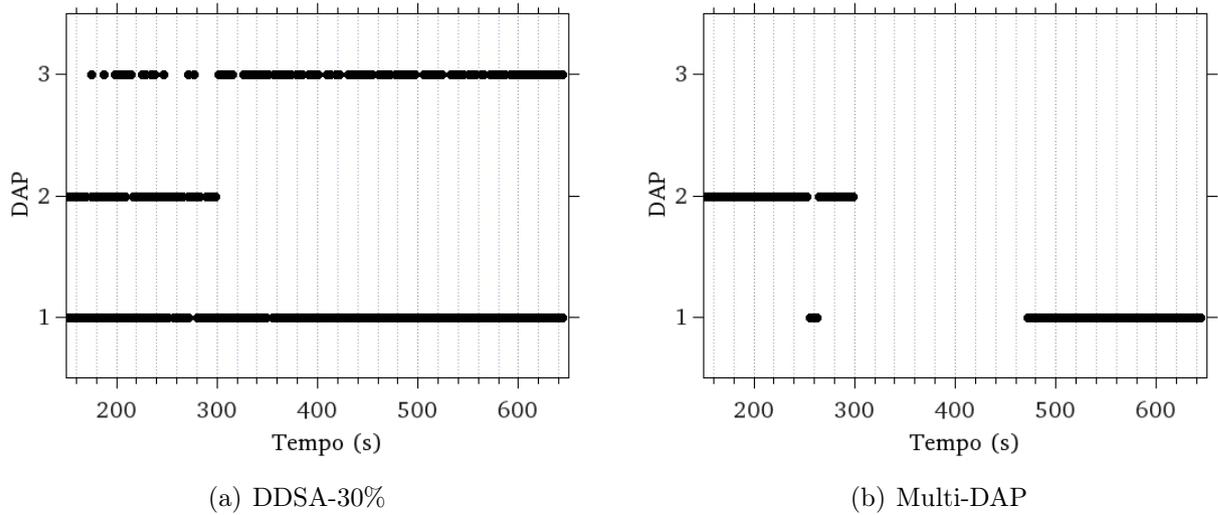
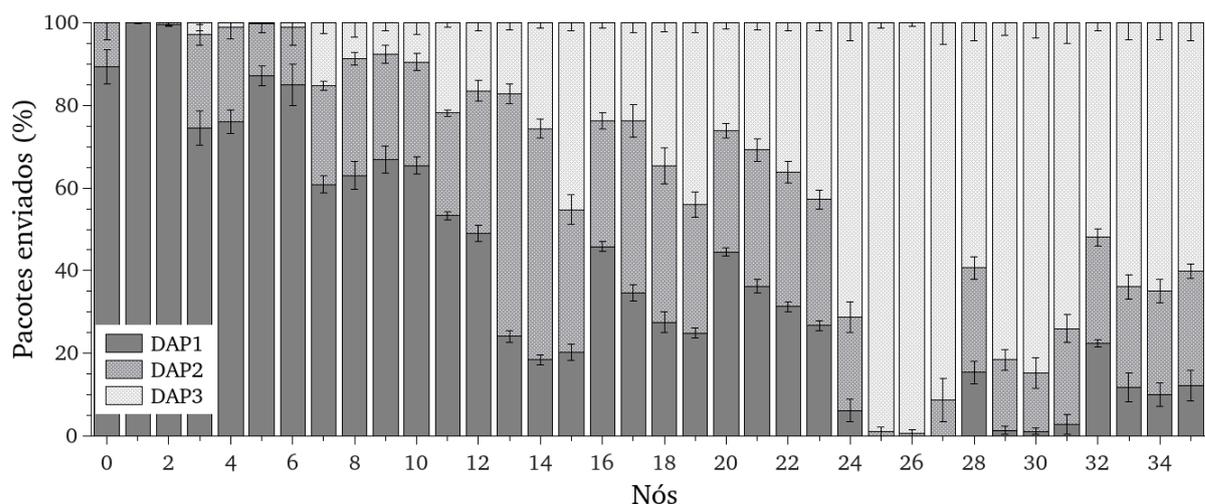


Figura 5.6: Chegada de pacotes do nó 16 por DAP no cenário em grade.

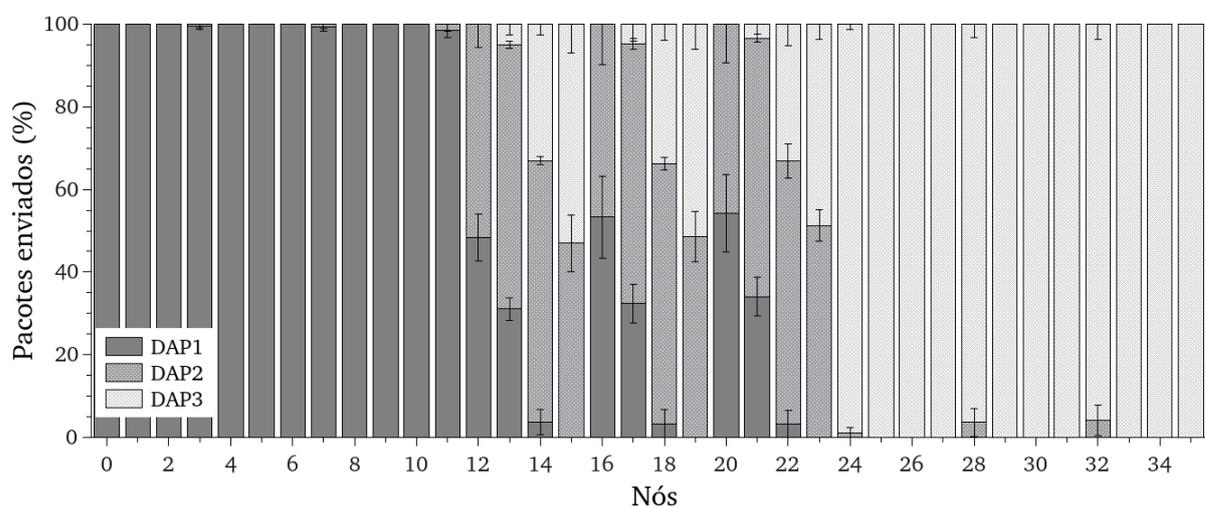
quando o DAP2 falha, a redução na taxa não foi tão acentuada como no Multi-DAP, sendo melhor 80,5% no tempo 363 segundos.

Para compreender como o comportamento do DDSA difere do comportamento do Multi-DAP em termos de seleção de DAPs, na Figura 5.6 vamos mostrar o resultado das escolhas feitas pelo nó 16 durante as simulações para uma única semente. O gráfico mostra a chegada dos pacotes do nó 16 em cada DAP e foi observado que com o DDSA-30% o DAP mais distante também foi escolhido (Fig. 5.6(a)) e sempre houve recebimento de pacotes por, pelo menos, um dos DAPs. Com o Multi-DAP (Fig. 5.6(b)) raramente houve uma troca na escolha de DAP até o momento da falha e após sua ocorrência não houve recebimento de pacotes por um longo período por qualquer um dos DAPs. Este *gap* foi de aproximadamente 171 segundos e ocorreu porque, após a falha, o Multi-DAP enviou pacotes somente para o DAP2. Foi observado que para o DDSA-30% não houve um *gap* perceptível porque o nó 16 balanceou a carga entre todos os DAPs.

Para verificar se este comportamento é compartilhado por outros nós, foram compiladas as informações mostradas na Figura 5.7. O gráfico de colunas empilhadas mostra a porcentagem na escolha de DAP para cada nó da rede. A finalidade é mostrar a diversidade na escolha de DAP para cada solução e que isso é determinante para aumentar a robustez e resiliência. Para o DDSA-30% (Fig. 5.7(a)) observou-se que ele teve uma seleção muito mais balanceada de DAP com exceção dos nós 1, 2, 25 e 26 por estarem mais próximos do DAP1 (nós 1 e 2) ou do DAP3 (nós 25 e 26) onde os custos de caminho deles são muito melhores que para os outros DAPs. Para o Multi-DAP (Fig. 5.7(b)) observou-se que, excluindo os nós da região central, praticamente só houve escolha do



(a) DDSA-30%



(b) Multi-DAP

Figura 5.7: Porcentagem da escolha de DAP por cada nó no cenário em grade.

DAP mais próximo do nó e nenhuma escolha de nós mais distantes. Com exceção dos nós 13 e 14, para o DDSA-30% todos os valores na região central ficaram abaixo 41% para o DAP2, enquanto no Multi-DAP ficaram acima de 47%. Isto denota que o DDSA-30% distribui de maneira mais uniforme os pacotes entre os DAPs na região central, melhorando a robustez e resiliência.

A Figura 5.8 mostra o período de indisponibilidade de cada nó com respeito à Central de Processamento, isto é, a soma dos períodos durante os quais a Central de Processamento não recebe informações transmitidas pelos nós através de algum DAP. Foi observado que o longo *gap* na entrega de novos pacotes, como visto para o nó 16, se repetiu para os outros nós da região central da rede. No Multi-DAP, os nós sofreram longos períodos

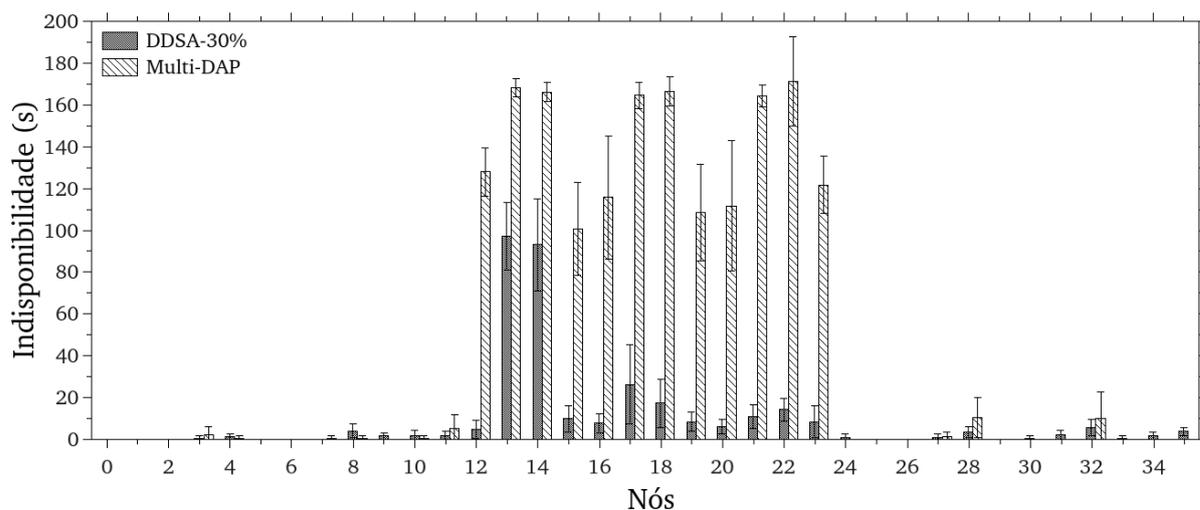


Figura 5.8: Período de indisponibilidade no cenário em grade.

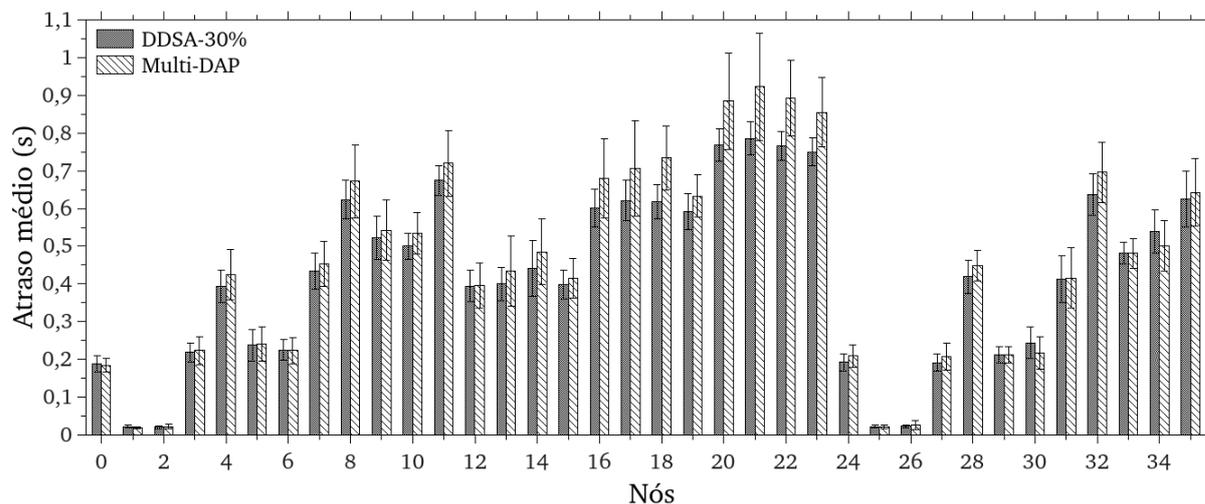


Figura 5.9: Atraso no cenário em grade.

de indisponibilidade na entrega de pacotes para qualquer DAP enquanto o DDSA-30% manteve valores bem mais baixos para a indisponibilidade. Nota-se que para os nós 13 e 14 tanto no DDSA-30% quanto no Multi-DAP os valores para o período de indisponibilidade foram os mais altos. Exceto por estes dois nós, a média de indisponibilidade para DDSA-30% foi de 4,2 segundos e o valor máximo foi de 26 segundos. Para o Multi-DAP a média foi de 40,7 segundos e o valor máximo foi de 171 segundos.

A Figura 5.9 mostra o atraso médio para cada nó da rede. Para os nós da primeira fileira da grade os valores de atraso ficaram muito próximos. Para os outros nós o DDSA-30% obteve melhores resultados que o Multi-DAP o que pode ser explicado por estes nós necessitarem muitos saltos para chegar ao DAP. O fato do DDSA-30% escolher DAPs

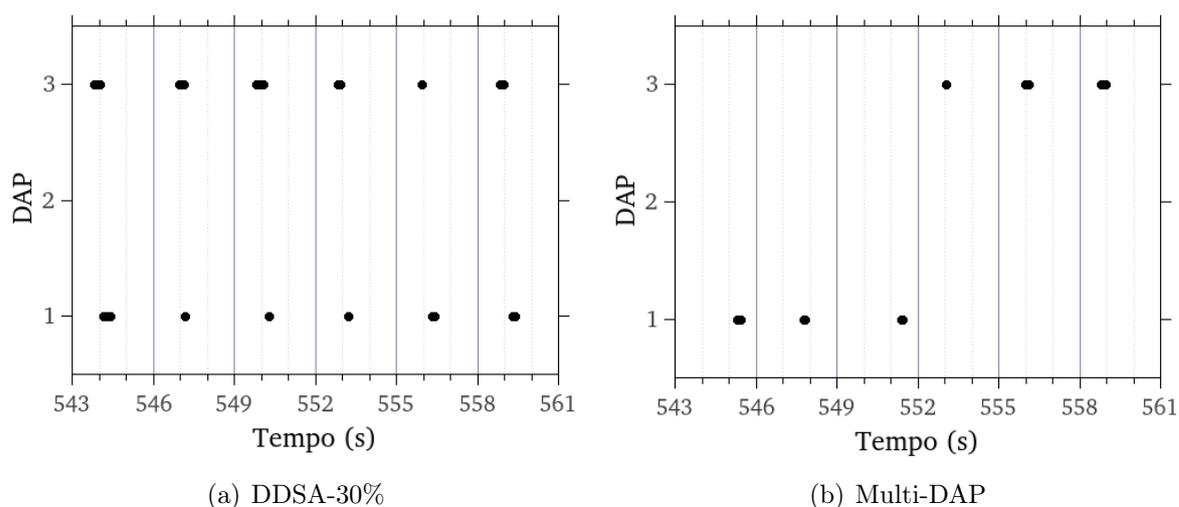


Figura 5.10: Chegada de pacotes por DAP do nó 18 no cenário em grade.

mais distantes que o Multi-DAP não traz impacto negativo no desempenho. Desta forma, como o DDSA-30% envia o mesmo pacote para vários DAPs é possível a escolha de um caminho menos congestionado e que tenha uma taxa mais alta fazendo com que o atraso seja baixo, pois o atraso é contabilizado pelo primeiro pacote recebido. O Multi-DAP, por utilizar somente a métrica como critério de escolha de DAP, resulta no envio de todos os pacotes da rodada para o mesmo DAP, o qual durante períodos de congestionamento e antes da troca de seleção de DAPs, resulta em maior atraso.

A Figura 5.10 mostra um trecho da simulação com o comportamento do nó 18 em relação à escolha de DAP. Neste caso, é possível visualizar a diferença no atraso para enviar os pacotes entre os DAPs. Os nós enviam pacotes nos tempos 543, 546, 549, 552, 555, 558 e 561 segundos e no gráfico os pontos representam o tempo de chegada dos pacotes nos DAPs. Pode-se observar que no DDSA-30% os pacotes são enviados para diferentes DAPs, o que não acontece com o Multi-DAP. No Multi-DAP (Figura 5.10(b)) a troca do DAP1, que apresenta atrasos bem altos, pelo DAP3 no tempo de 552 segundos faz com que ocorra uma diminuição no atraso. No DDSA-30% pode-se notar que existe uma distribuição de maneira mais uniforme dos pacotes entre os DAPs fazendo com que o atraso tenha valores muito parecidos. Pode-se ver isto na Figura 5.10(a) no tempo 549 segundos em que os pacotes enviados para o DAP3 chegaram antes do que os que foram enviados para o DAP1. Assim, a informação enviada no tempo 549 segundos teve um atraso menor do que se tivesse sido encaminhado somente para o DAP1. Uma vantagem do DDSA-30% em distribuir mais pacotes entre os DAPs é que um caminho pode ter atraso menor que outros, desta maneira o seu atraso será o do melhor caminho. No Multi-DAP, por ele enviar uma maior quantidade de pacotes para um dos DAP, existe a

possibilidade de que isso também contribua para que o controle de taxa faça uso de taxas mais robustas para transmissão aumentando o atraso. Este comportamento necessita de uma análise mais aprofundada a fim de se identificar as possíveis causas deste desempenho do DDSA e que ficará para um trabalho futuro.

### 5.3 Cenário Residencial Sintético

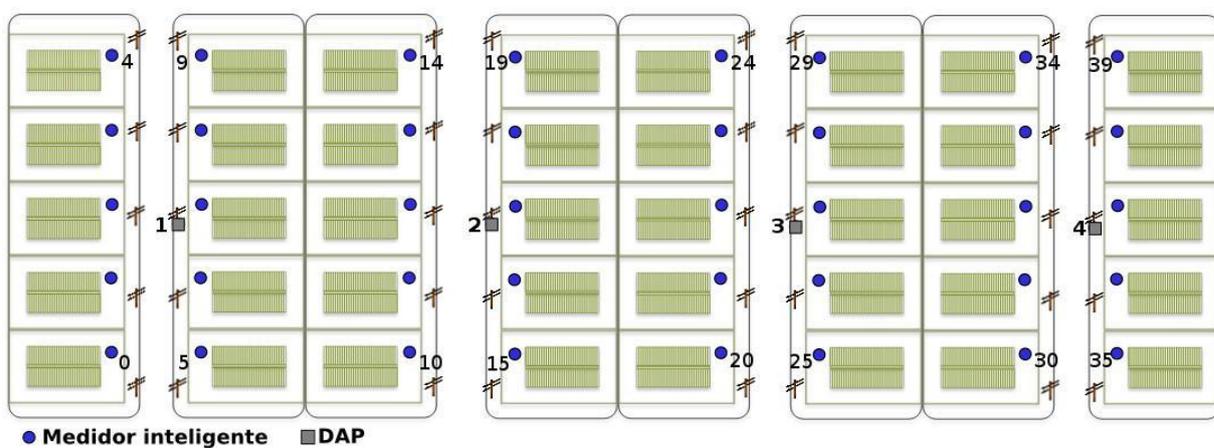


Figura 5.11: Cenário residencial sintético.

Este cenário de simulação é composto de 40 nós e por 4 DAPs como pode ser visto pela Figura 5.11. Ele reproduz uma área residencial hipotética com as casas dispostas de forma regular em terrenos de mesmas dimensões resultando em um cenário em grade com as distâncias entre nós variáveis e os DAPs posicionados no seu interior. Neste cenário a falha ocorrerá no tempo de 300 segundos no DAP2.

A Figura 5.12 mostra a taxa de entrega para todos os nós em função do tempo. Pode-se notar que o DDSA-30% se recupera mais rápido, após a ocorrência da falha, retornando ao desempenho inicial enquanto o Multi-DAP tem uma recuperação mais lenta demonstrando que, neste cenário, possui baixa resiliência. No tempo de 393 segundos o DDSA-30% tem aproximadamente 90% de taxa de entrega enquanto o Multi-DAP tem 75% de taxa. O DDSA-30% volta a ter novamente mais de 99% de taxa de entrega no tempo de 453 segundos enquanto o Multi-DAP não conseguiu ter mais de 89,7% de taxa até o final da simulação e teve uma recuperação lenta após a falha. Este cenário não favorece o Multi-DAP por ter nós alinhados nas proximidades de um DAP e muito distantes dos outros DAPs fazendo com que o custo de caminho do DAP mais próximo geograficamente seja muito melhor que dos outros DAPs. Desta forma, uma troca na escolha de DAP demora

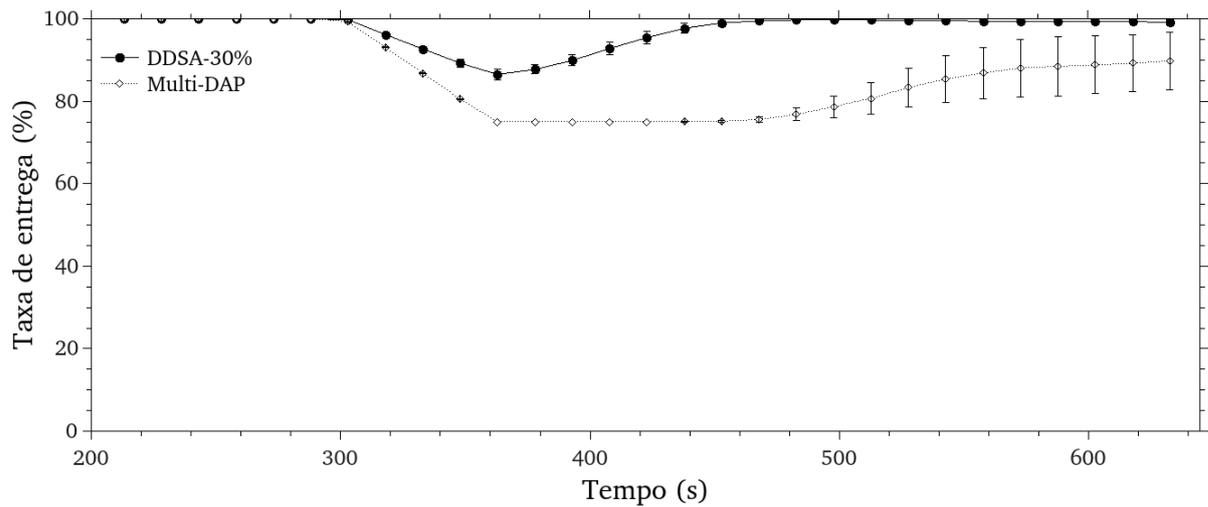


Figura 5.12: Taxa de entrega em função do tempo no cenário residencial sintético.

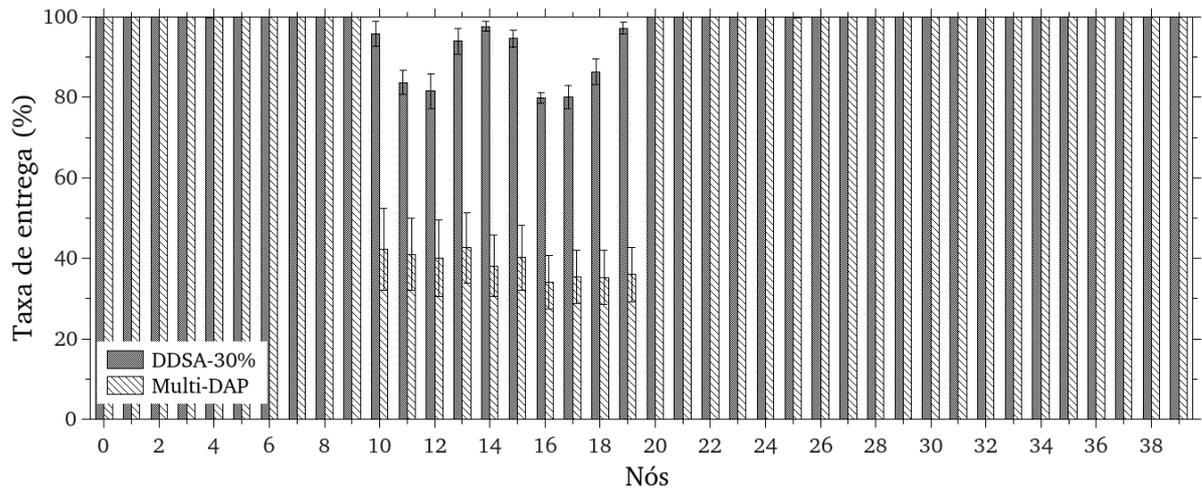


Figura 5.13: Taxa de entrega por nó no cenário residencial sintético.

muito para acontecer o que faz com que a recuperação da falha seja muito lenta. Por distribuir mais os pacotes entre os DAPs, o DDSA-30% se recuperou mais rapidamente mostrando ser mais robusto e resiliente neste ambiente que é muito próximo de um cenário real.

A Figura 5.13 mostra o gráfico da taxa de entrega por nó. Nota-se neste gráfico que o impacto na performance do Multi-DAP mostrado anteriormente se deve aos baixos valores de taxa obtidos pelos nós 10 ao 19 localizados na rua onde está o DAP2. Para estes nós da rua do DAP2, usando o DDSA-30% a menor taxa obtida foi de 79,8% (nó 16) e maior taxa foi de 97,6% (nó 14) e usando o Multi-DAP a menor taxa obtida foi de 34,1% (nó 16) e a maior taxa foi de 42,5% (nó 13). Para o DDSA-30% os nós que estão mais próximos ao DAP2 (11, 12, 16 e 17) são os que mais sofreram com a falha e isto é explicado por terem

custo de caminho para o DAP2 muito melhor que para outros DAPs fazendo com que a probabilidade de seleção dele seja bem mais alta. Já as altas taxas dos nós 10, 13, 14, 15 e 19, entre 94% e 97%, são explicadas pela sua maior distância do DAP2 fazendo com que seu custo de caminho seja mais próximo dos valores de outros DAPs consequentemente isto faz com que a seleção seja mais distribuída.

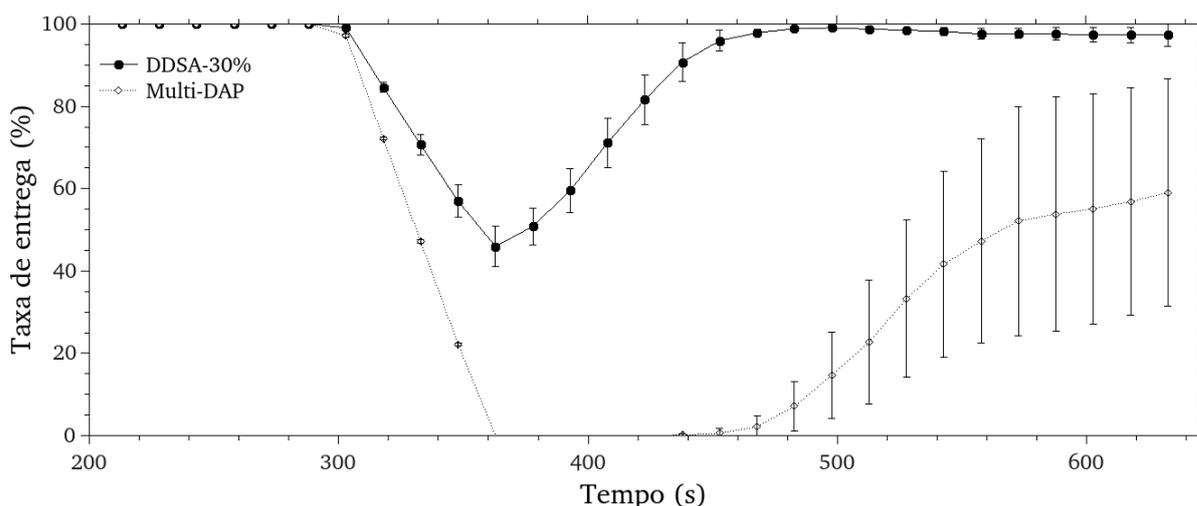
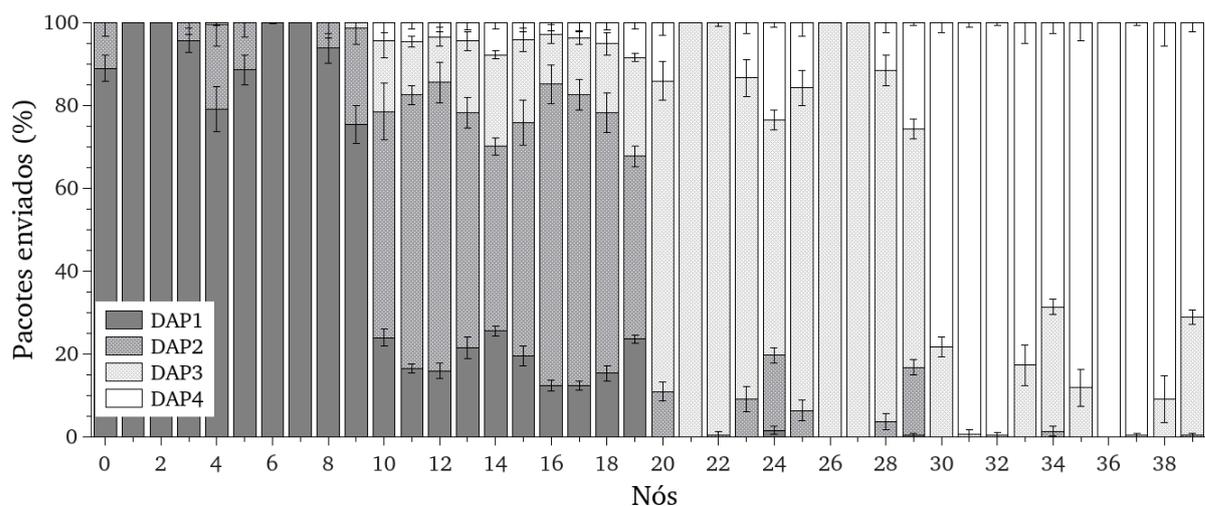


Figura 5.14: Taxa de entrega dos nós 10-19 no cenário residencial sintético.

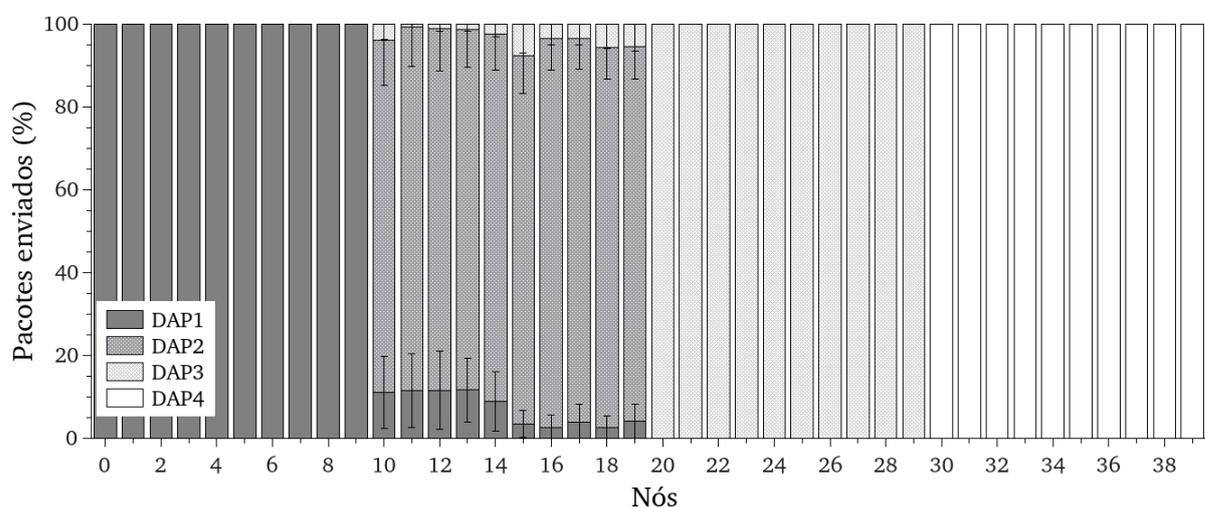
A Figura 5.14 mostra o gráfico da taxa de entrega em função do tempo. Pode-se notar que o Multi-DAP chega a ficar sem entregar pacotes por um período de tempo. O Multi-DAP por depender somente da atualização da métrica para visualizar a falha do DAP não consegue entregar nenhum pacote até que ela comece a ser percebida pelos nós. O DDSA-30%, por outro lado, distribui pacotes entre os DAPs fazendo com que continue conseguindo entregar pacotes mesmo com a falha voltando a ter taxa média maior que 97% no tempo de 468 segundos. Os nós 11, 12, 16 e 17 contribuem muito para que a taxa fique com o valor mínimo de aproximadamente 46% no DDSA-30%.

A Figura 5.15 mostra o gráfico de colunas empilhadas da porcentagem na escolha de DAP para cada nó da rede. Pode-se notar neste cenário que no Multi-DAP, excetuando os nós da rua do DAP2, só houve escolha do DAP mais próximo ao nó e nenhuma escolha de DAPs mais distantes. Para os nós da rua do DAP2, no Multi-DAP a menor porcentagem de escolha do DAP2 foi de 85,1% pelo nó 10 contrastando com o DDSA-30% cujo maior valor foi de 72,8% pelo nó 16. O nó 16 obteve a menor taxa de entrega no DDSA-30% e o nó 13 foi a maior taxa no Multi-DAP entre os nós da rua do DAP2, mostrando que quanto mais distribuída for a seleção entre os DAPs melhor será a resiliência da rede.

A Figura 5.16 mostra o período de indisponibilidade de cada nó da rede. Como espe-



(a) DDSA-30%



(b) Multi-DAP

Figura 5.15: Porcentagem da escolha de DAP por cada nó no cenário residencial sintético.

rado, no Multi-DAP, os nós da rua do DAP2 sofreram longos períodos de indisponibilidade na entrega de pacotes enquanto o DDSA-30% manteve valores bem mais baixos. Nota-se que no DDSA-30% os nós 11, 12, 16 e 17 se destacam dos outros nós da mesma rua com valores mais altos de indisponibilidade, o que é consistente com os valores que eles obtiveram de taxa de entrega. Ainda assim, a diferença entre estes resultados com os obtidos pelo Multi-DAP foi bem grande. Exceto por estes nós, a média de indisponibilidade para DDSA-30% foi de 6,3 segundos e o valor máximo foi de 69,5 segundos. Para o Multi-DAP a média foi de 48,7 segundos e o valor máximo foi de 304,6 segundos.

A Figura 5.17 mostra o atraso médio para cada nó da rede. O comportamento para o atraso do DDSA-30% foi o esperado, pois ele distribuiu mais pacotes entre os DAPs e alguns pacotes necessitaram de mais saltos para chegar aos DAPs mais distantes. Contudo, não

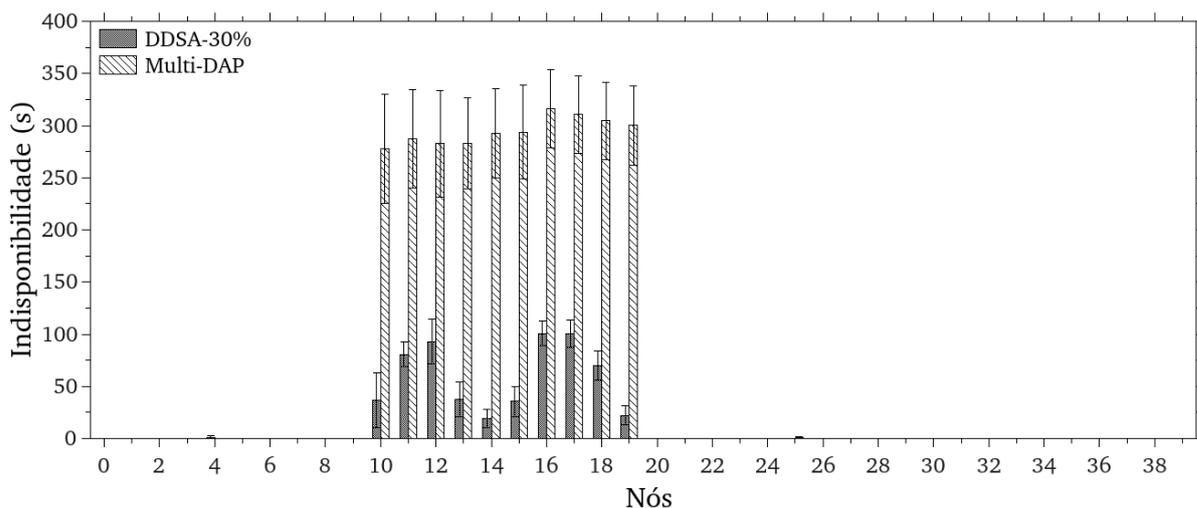


Figura 5.16: Período de indisponibilidade no cenário residencial sintético.

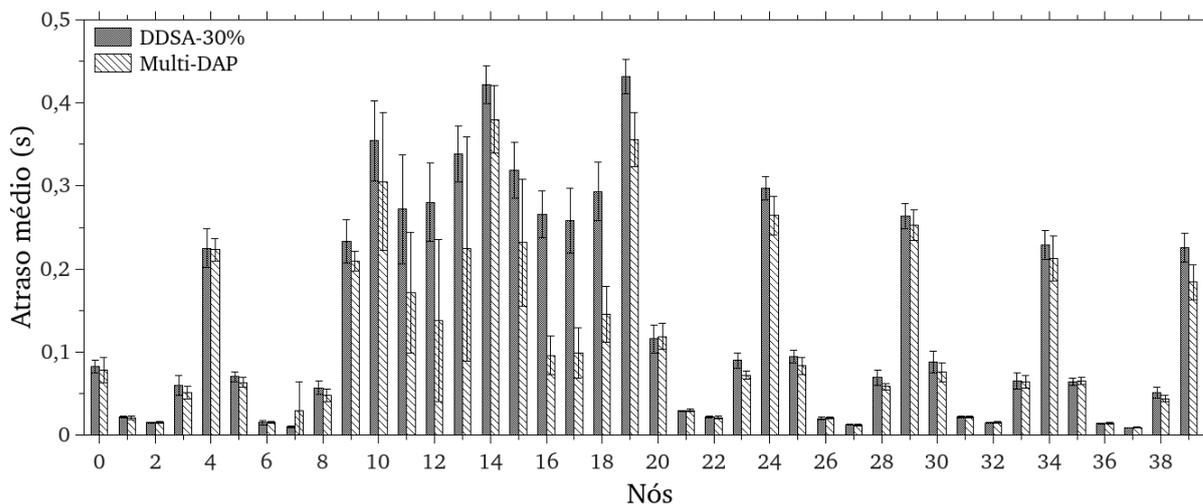


Figura 5.17: Atraso no cenário residencial sintético.

ocorreu um aumento significativo no atraso ficando com valores bem próximos dos obtidos pelo Multi-DAP exceto para os nós 10 ao 19. No Multi-DAP, estes nós, por entregarem bem menos pacotes após a falha do que o DDSA-30%, têm médias de atraso mais baixas. Explicando, as médias de atraso antes da falha são mais baixas do que após a falha, pois o número de saltos para alcançar o DAP2 é menor do que para alcançar os outros DAPs. Some-se a isso o aumento de colisões e congestionamento nas proximidades destes DAPs devido a este tráfego. Como estes nós entregam menos pacotes após a falha, o peso dos valores de atraso antes da falha na média total é bem maior no Multi-DAP.

## 5.4 Cenário Residencial Real

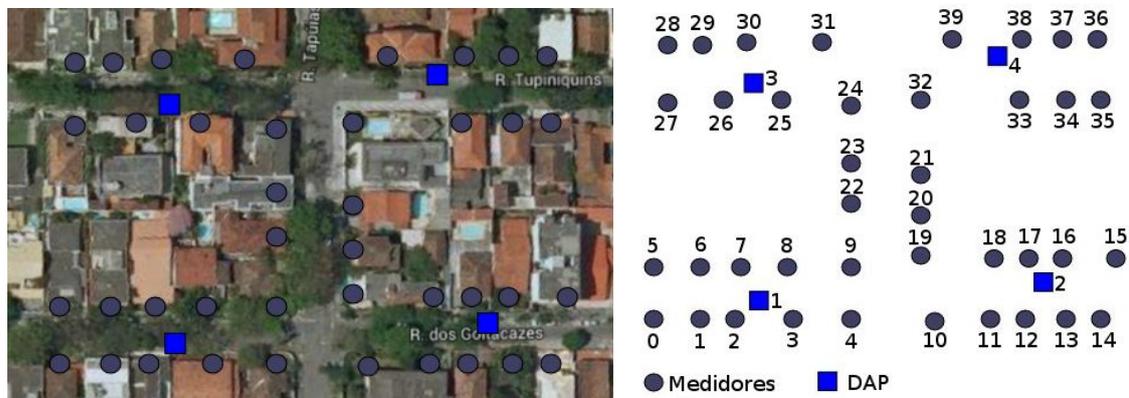


Figura 5.18: Cenário residencial real.

O cenário foi baseado no bairro residencial de São Francisco da cidade de Niterói. Ele é composto de 40 nós e por 4 DAPs como pode ser visto na Figura 5.18. O DAP2 foi o escolhido como o DAP onde ocorrerá a falha no tempo de 300 segundos. Este cenário é diferente do apresentado na Seção 5.3 por não permitir a comunicação entre nós de ruas paralelas por estarem muito distantes e por estarem distribuídos geograficamente de forma assimétrica.

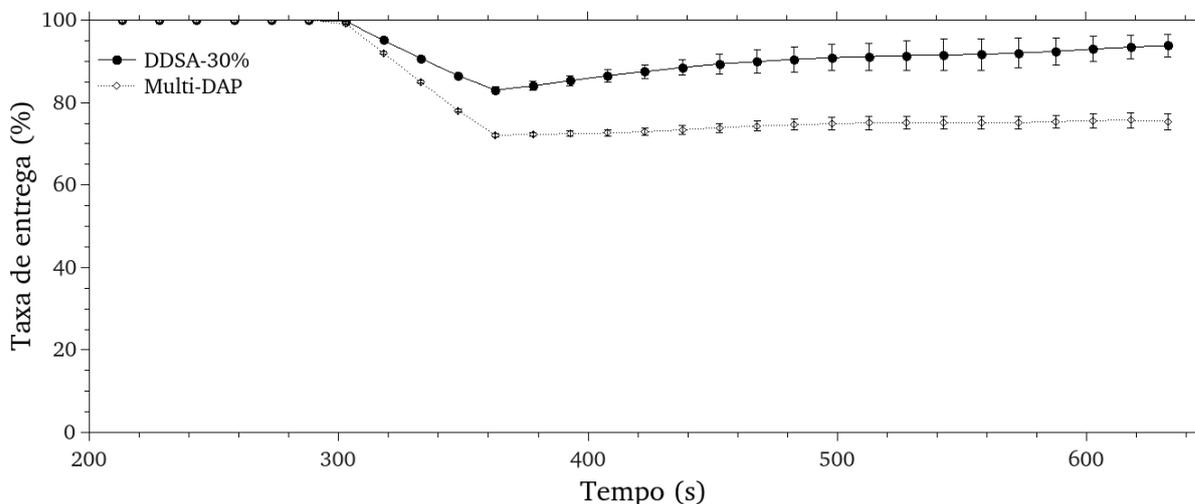


Figura 5.19: Taxa de entrega em função do tempo no cenário residencial real.

A Figura 5.19 mostra a taxa de entrega para todos os nós em função do tempo. O DDSA-30% apresentou uma recuperação mais suave que nos cenários anteriores com taxa de aproximadamente 94% ao final da simulação. O Multi-DAP apresentou uma recuperação muito lenta após a falha apresentando uma taxa de aproximadamente 75%

no final da simulação. Este baixo desempenho pode ser explicado pela localização dos nós 13 ao 17 em relação ao DAP2, por estarem no final da rua e muito próximos dele fazendo com que sua probabilidade de seleção seja muito alta. Além disso, como não é possível a comunicação direta com os nós de ruas paralelas isto aumenta bastante a distância, em saltos, dos outros DAPs diminuindo as suas probabilidades de seleção. Com isto a porcentagem de escolha do DAP2 é muito alta para estes nós influenciando diretamente nos resultados de taxa de entrega com impacto na resiliência da rede. Este caso indica a necessidade de um planejamento mais criterioso de instalação de DAPs em cada vizinhança de forma a possibilitar a conectividade entre medidores e múltiplos DAPs.

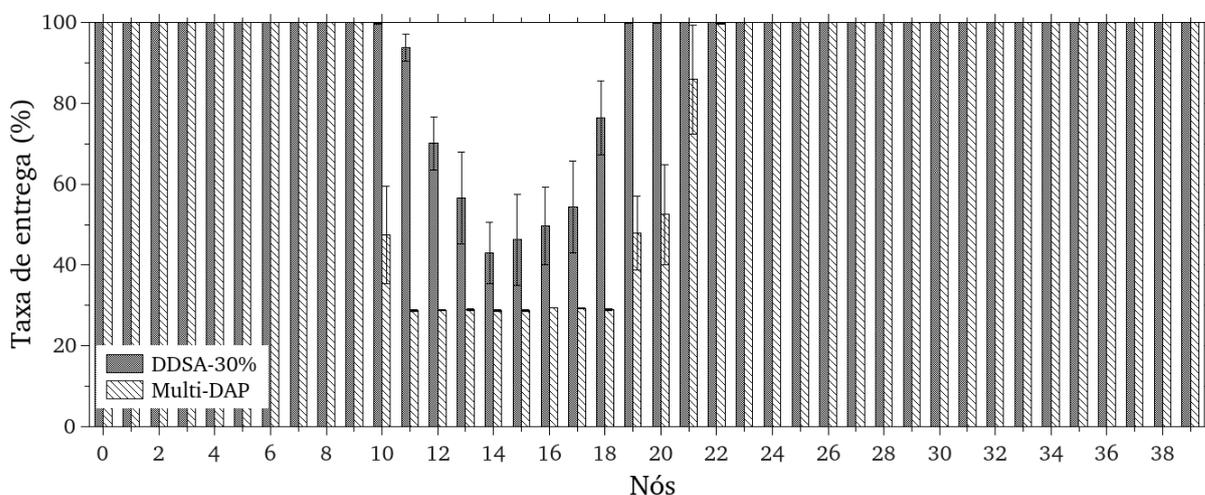


Figura 5.20: Taxa de entrega por nó no cenário residencial real.

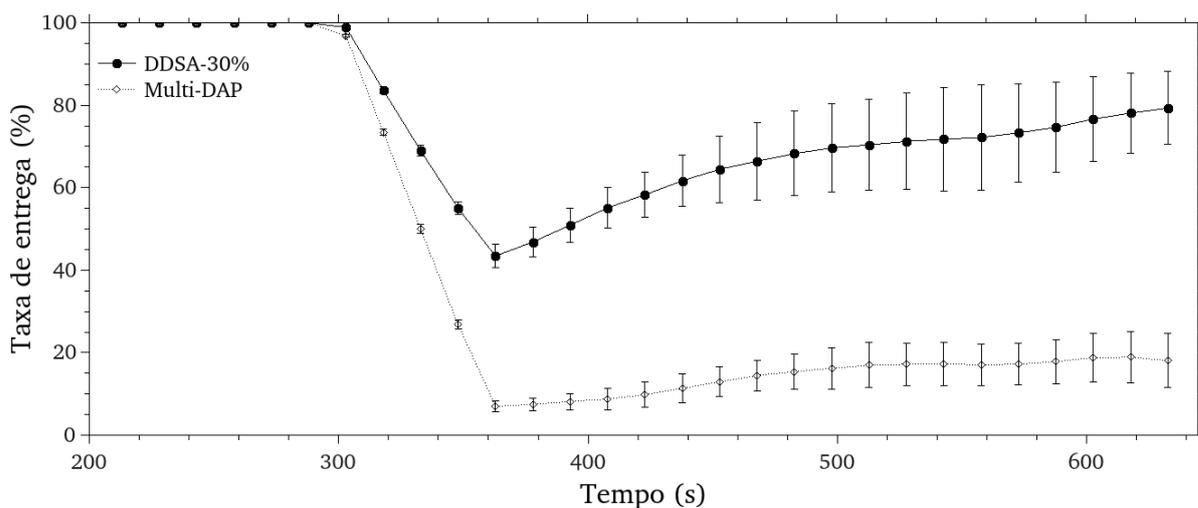
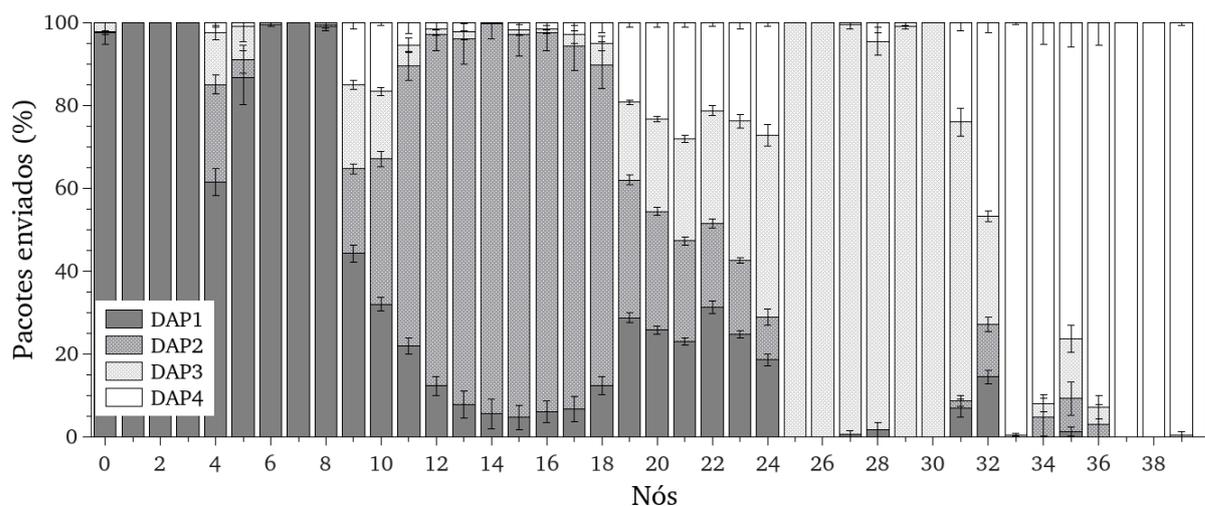
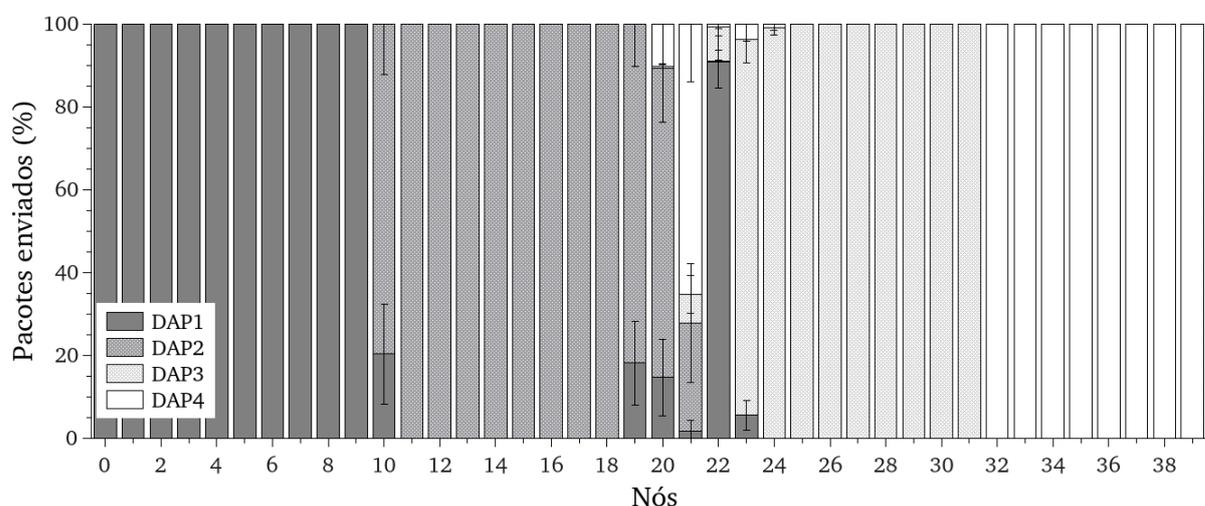


Figura 5.21: Taxa de entrega dos nós 10-21 no cenário residencial real.

A Figura 5.20 mostra o gráfico da taxa de entrega para cada nó da rede. Ele mostra que os nós mais afetados pela falha são os nós 13 ao 17 com taxas abaixo de 57% no



(a) DDSA-30%



(b) Multi-DAP

Figura 5.22: Porcentagem da escolha de DAP por cada nó no cenário residencial real.

DDSA-30% e abaixo de 30% no Multi-DAP. Para estes nós o custo de caminho do DAP mais próximo geograficamente é muito melhor que dos outros DAPS o que causa impacto negativo no desempenho. No Multi-DAP, além destes nós, outros apresentam taxas muito baixas mostrando que uma falha afeta uma área bem maior que no DDSA-30%, sendo que os nós 11 ao 18 não conseguiram entregar pacotes após a falha.

A Figura 5.21 mostra o gráfico da taxa de entrega para os nós onde a taxa de entrega médio ficou abaixo de 90%, que no Multi-DAP foram os nós 10 ao 21. No DDSA-30% o menor valor de taxa foi de 43,4% e o maior valor foi de 79,3% ao final da simulação enquanto no Multi-DAP o menor valor de taxa foi de 6,9% e o maior valor foi de 18,1% também ao final da simulação. Embora a recuperação do DDSA-30%, neste cenário, seja mais lenta a diferença de 61,2% em relação ao Multi-DAP no final da simulação foi a mais

alta dentre todos os cenários avaliados. A conclusão que se chega é que a localização do DAP é um fator que afeta o desempenho da rede de forma significativa.

A Figura 5.22 mostra o gráfico de colunas empilhadas da porcentagem na escolha de DAP para cada nó da rede. No Multi-DAP, neste cenário, exceto por alguns poucos nós, só foi escolhido o DAP mais próximo ao nó e para os nós 11 ao 18 explicam o motivo por não conseguirem entregar pacotes após a falha. No DDSA-30% estes mesmos nós (11 ao 18) tem valores entre 94,2% (nó 14) e 67,5% (nó 11) de porcentagem de escolha do DAP2 com taxas de entrega variando entre 42,9% (nó 14) e 93,7% (nó 11) mostrando que quanto mais se distribui os pacotes entre os DAPs melhor será o desempenho e a resiliência do nó.

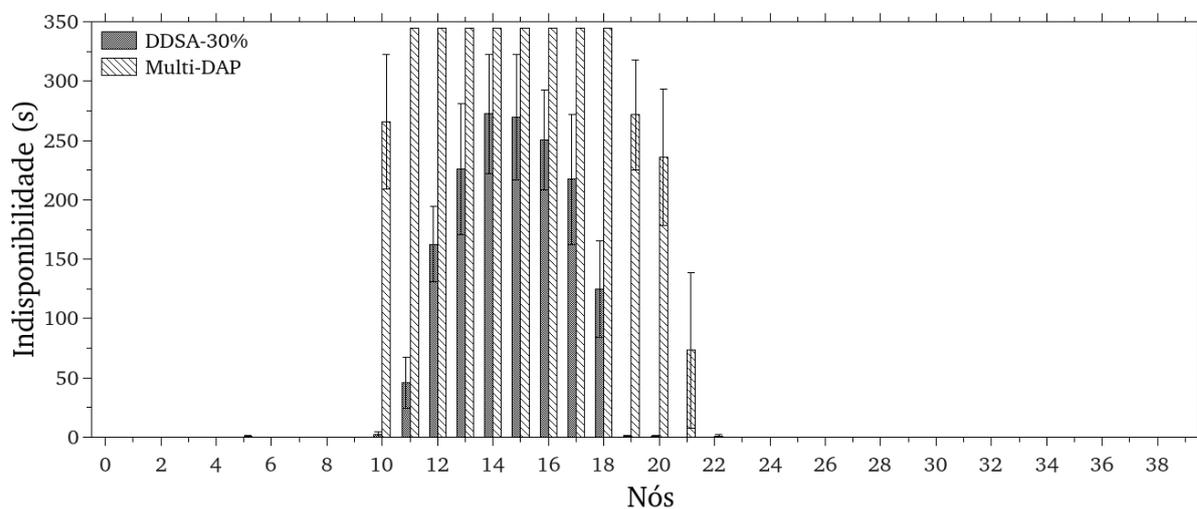


Figura 5.23: Período de indisponibilidade no cenário residencial real.

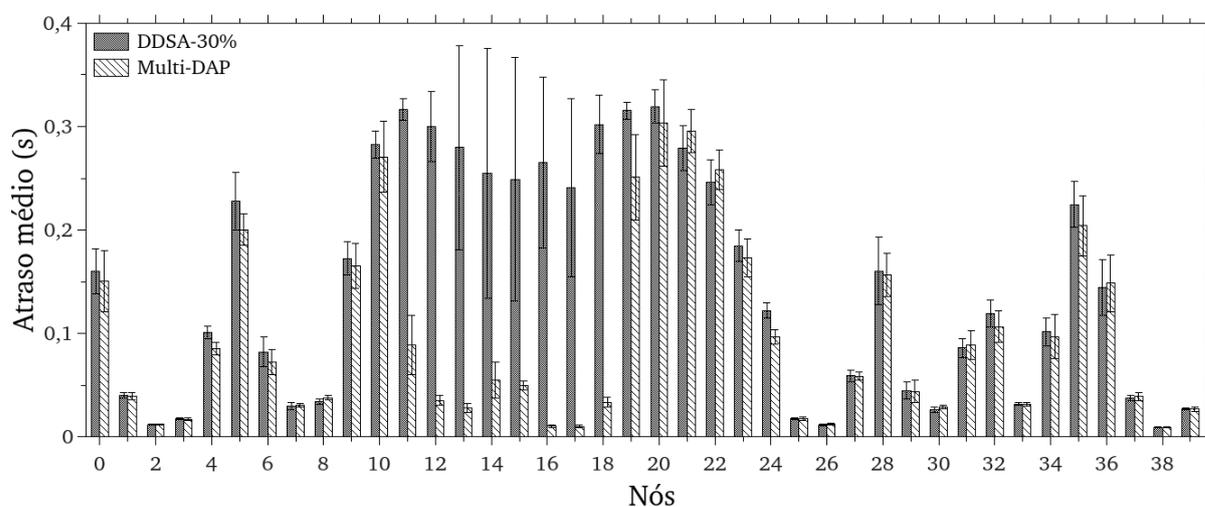


Figura 5.24: Atraso no cenário residencial real.

A Figura 5.23 mostra o período de indisponibilidade de cada nó da rede e percebe-se que, para o Multi-DAP, os nós 11 ao 18 ficaram sem conseguir entregar pacotes após a falha. No DDSA-30% os nós que tiveram perdas significativas de pacotes foram os nós 11 ao 18 com no mínimo 45,7 segundos de indisponibilidade no nó 11 e o maior valor de 272 segundos no nó 14. O nó 14, juntamente com o nó 15, está localizado no final da rua, muito próximo do DAP2 e muito longe dos outros DAPs, explicando o baixo desempenho destes dois nós.

A Figura 5.24 mostra o atraso médio para cada nó da rede. Nota-se que os valores obtidos para atraso pelo DDSA-30% e pelo Multi-DAP foram muito parecidos para os nós próximos de um dos DAP e com uma pequena perda de desempenho no DDSA-30% para os nós mais afastados devido à seleção de DAPs mais distantes. No Multi-DAP, os nós 11 ao 18 apresentaram valores de atraso no gráfico muito baixos isto é explicado pelo resultado anterior (Figura 5.23), pois estes nós não conseguiram entregar pacotes após a falha. Desta forma, os valores de atraso apresentados no gráfico, para estes nós, são os valores médios obtidos antes da ocorrência da falha.

## 5.5 Impacto das Retransmissões Redundantes

Nesta seção será avaliado o impacto das retransmissões redundantes no desempenho da proposta DDSA. Para isto se variou o número de retransmissões em 2, 5, 10 e 25 para  $\alpha=30\%$  utilizando o cenário em grade.

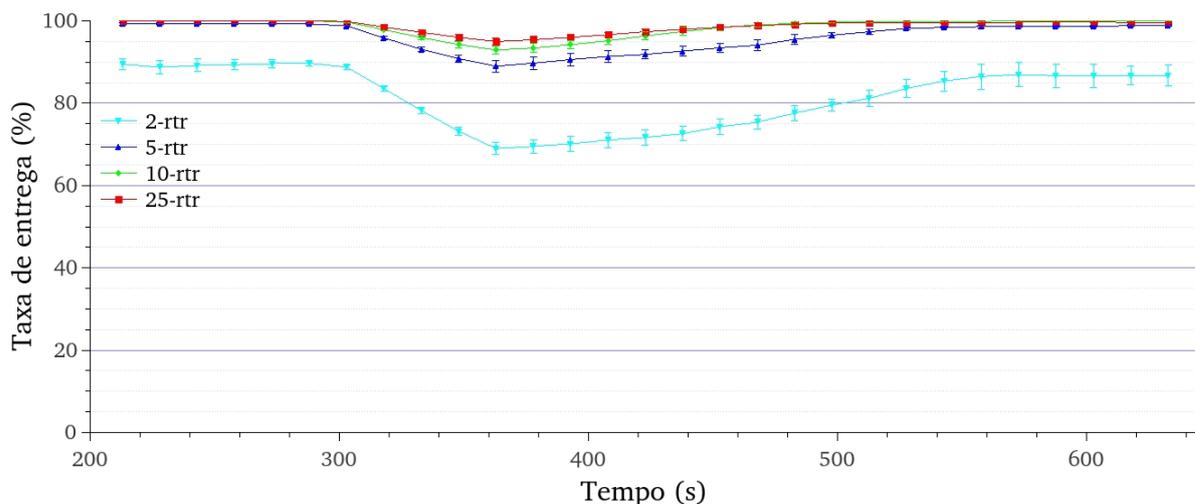


Figura 5.25: Taxa de entrega.

A Figura 5.25 mostra a taxa de entrega em função do tempo para cada valor de

retransmissão. Pode-se observar que com 2 retransmissões o DDSA obteve uma taxa de entrega de 89,34% em média antes da falha enquanto os outros valores de retransmissões obtiveram média acima de 99,3%. Após a falha a curva para 2 retransmissões obteve como pior resultado o valor de 68,98%, para 5 retransmissões foi de 88,98%, para 10 retransmissões foi de 92,94% e para 25 retransmissões foi de 94,98%. O pequeno ganho de desempenho obtido com valores de retransmissões acima de 10 pode não ser muito vantajoso, pois este aumento nas retransmissões faz com que o atraso seja 104% maior quando se passa de 10 para 25 retransmissões (Fig. 5.28).

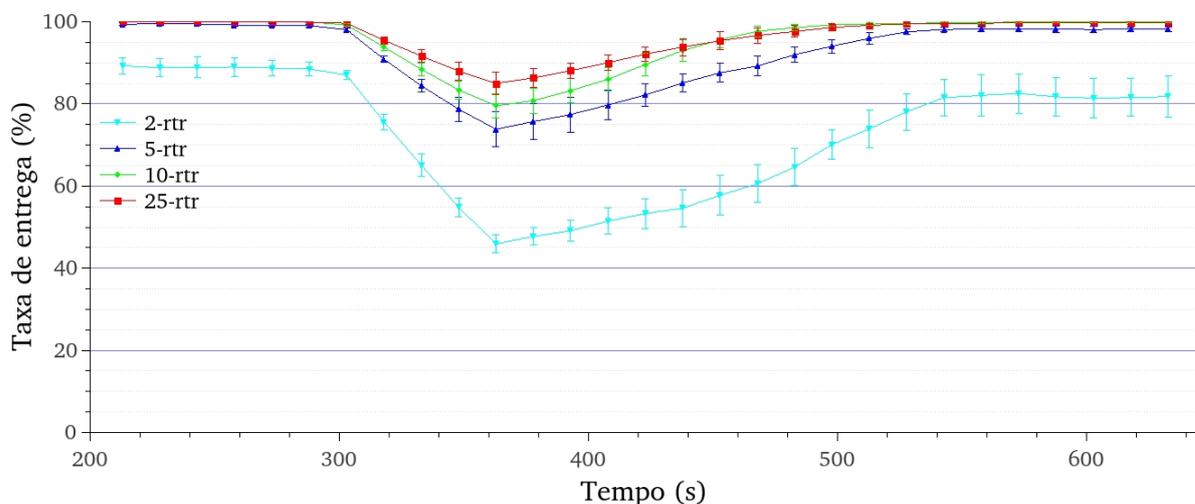


Figura 5.26: Taxa de entrega para os nós 12-23.

A Figura 5.26 mostra a taxa de entrega em função do tempo para cada valor de retransmissão na região central da rede (nós 12 ao 23). O pior valor de taxa após a falha foi de 45,91% para 2 retransmissões, 73,83% para 5 retransmissões, 79,54% para 10 retransmissões e 85% para 25 retransmissões. Por ter mais chance de enviar pacotes para os DAPs com piores custos após a falha, o número de retransmissões influenciou nos resultados com um aumento de 5,71%, no tempo de 363 segundos, quando se aumenta de 5 para 10 retransmissões e de 5,46% de 10 para 25 retransmissões.

A Figura 5.27 mostra os resultados de indisponibilidade para cada valor de retransmissão. Com o aumento do número de retransmissões de 2 para 5 os resultados melhoram muito, mas quando se passa de 10 para 25 retransmissões esta melhora não é tão significativa.

A Figura 5.28 mostra os resultados de atraso para cada valor de retransmissão. No gráfico a cada variação no número de retransmissões ocorre um aumento equivalente no atraso que foi de aproximadamente 100%. Este aumento no atraso possivelmente se deve

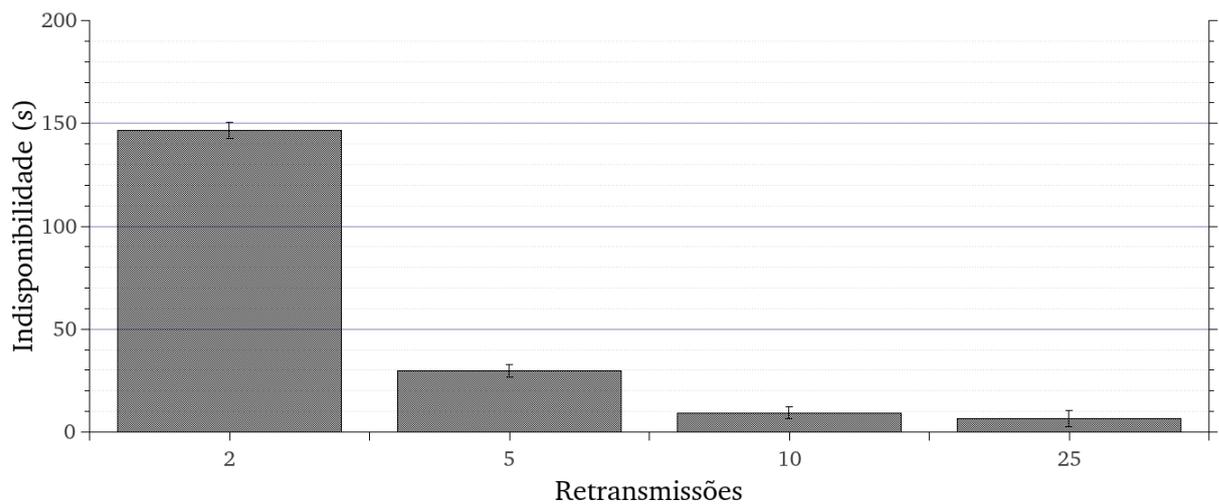


Figura 5.27: Período de indisponibilidade.

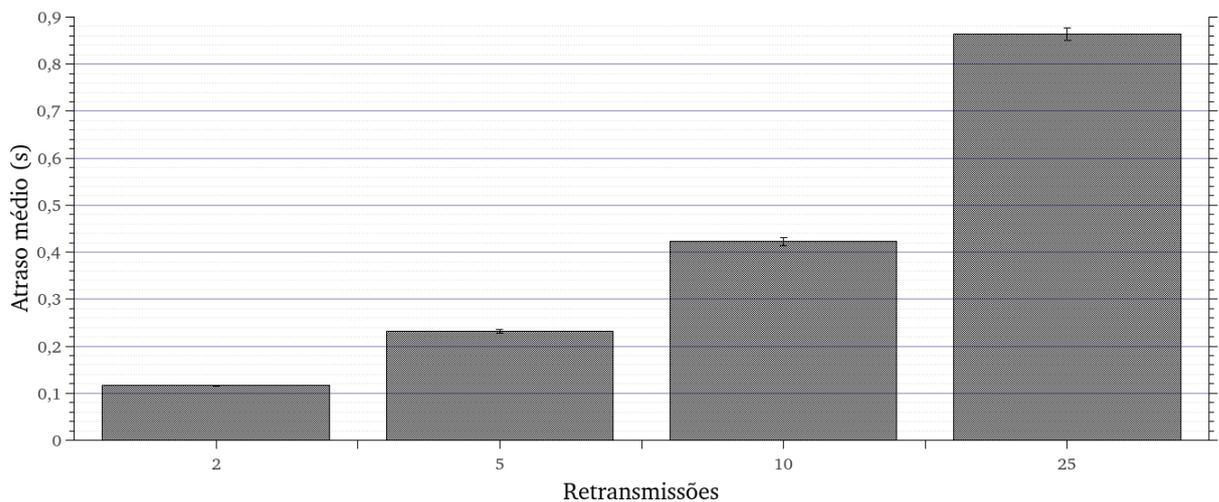


Figura 5.28: Atraso.

ao aumento nas colisões e no congestionamento devido ao aumento na quantidade de pacotes quando se aumenta o número de retransmissões. Também existe a possibilidade de que isso contribua para que o controle de taxa faça uso de taxas mais robustas para transmissão. Este comportamento necessita de uma análise mais aprofundada para se identificar as possíveis causas deste desempenho do DDSA e ficará para um trabalho futuro.

Existe uma relação entre o número de retransmissões com a taxa de entrega e o atraso, onde a melhora de um implica na piora do outro. Deve-se, então, encontrar um ponto de equilíbrio entre a taxa de entrega e o atraso desejado para atribuir qual o número de retransmissões ideal para uma determinada rede.

## 5.6 Impacto do Parâmetro $\alpha$

Nesta seção será avaliado o impacto do parâmetro  $\alpha$  no desempenho da proposta DDSA, onde o uso de um valor baixo de  $\alpha$  implica um conjunto maior de DAPs e, conseqüentemente, na seleção de mais DAPs, o que melhora a resiliência. Já o uso de valores mais altos de  $\alpha$  resultam na seleção de um número menor de DAPs piorando a resiliência. Para a avaliação utilizou-se o mesmo cenário da Seção 5.2 composto de 36 nós dispostos em grade e por 3 DAPs conforme a Figura 5.1.

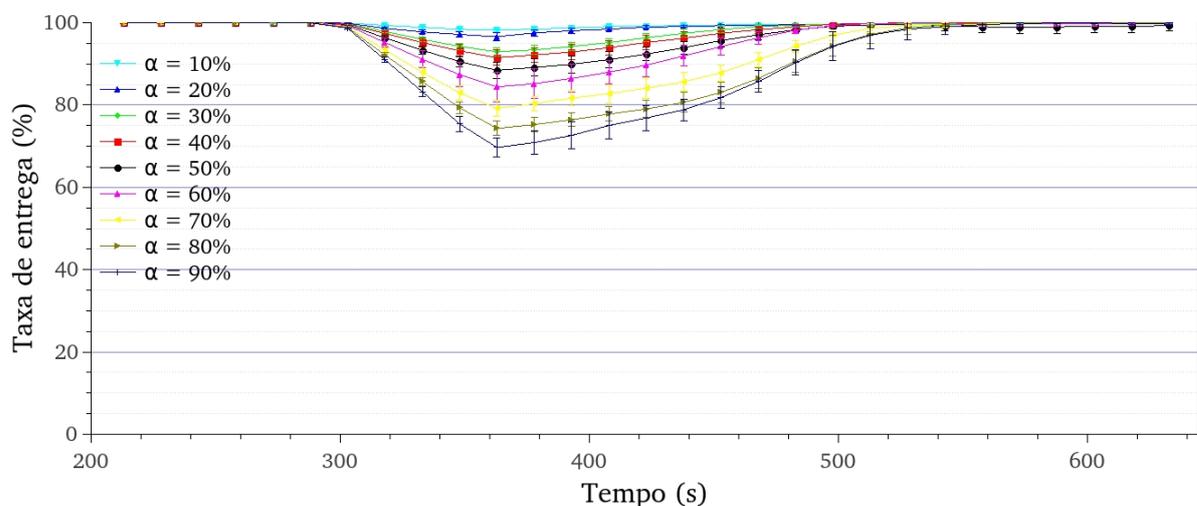


Figura 5.29: Taxa de entrega.

A Figura 5.29 mostra o gráfico da taxa de entrega médio para valores de  $\alpha$  variando de 10% a 90% em passos de 10%. Dentre todas as curvas da Figura 5.29 as que possuem valores de taxa acima de 90% são as de  $\alpha=10\%$  a  $\alpha=40\%$ . É possível notar que quanto menor o valor de  $\alpha$  melhor a resiliência o que comprova que quanto mais se distribuiu os pacotes entre os DAPs mais robusta e resiliente será a rede.

A Figura 5.30 mostra o gráfico da taxa de entrega variando-se  $\alpha$  para os nós da região central da rede (nós 12 ao 23). Observa-se que para estes nós o comportamento do parâmetro  $\alpha$  quanto à resiliência da rede fica mais acentuado com os valores maiores de  $\alpha$  impactando negativamente no desempenho da rede. Para  $\alpha=30\%$  a taxa média foi de 90% e a taxa para os nós da região central foi de 79,5% enquanto para  $\alpha=90\%$  a taxa média foi de 69,7% e para os nós da região central foi de 10,9%. Esta grande variação na taxa mostra a influência do parâmetro  $\alpha$  na resiliência da rede onde quanto maior for o valor de  $\alpha$  pior será a resiliência.

Na Figura 5.31, onde é mostrado o período de indisponibilidade para cada  $\alpha$ , pode-se

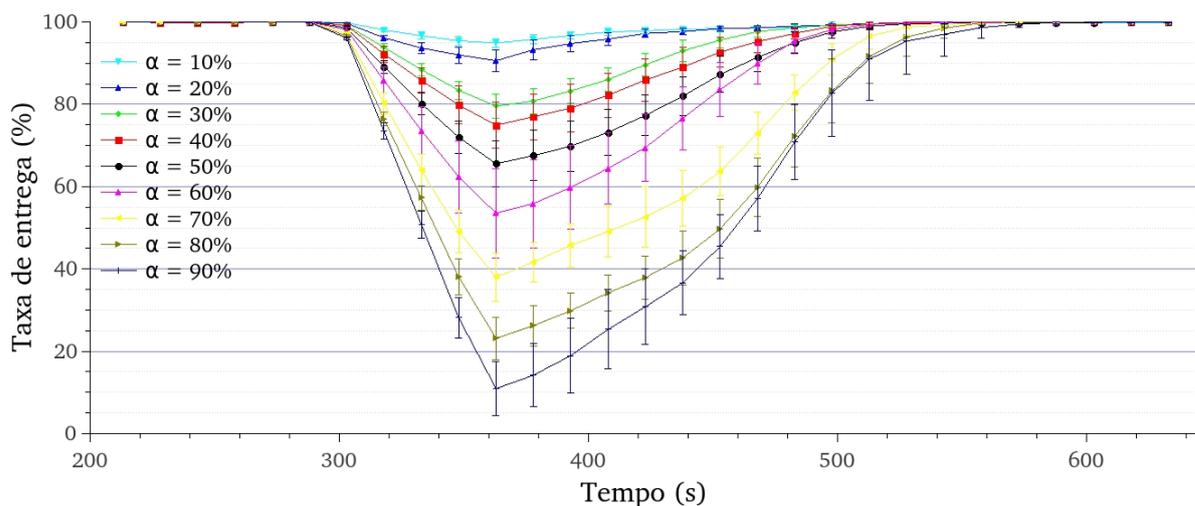


Figura 5.30: Taxa de entrega para os nós 12-23.

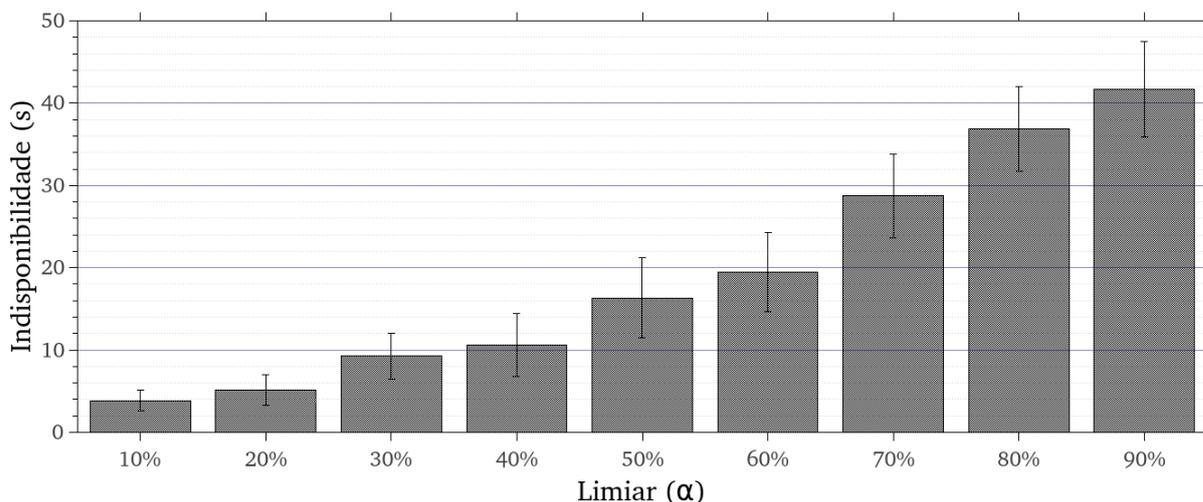


Figura 5.31: Período de indisponibilidade.

observar que o comportamento de  $\alpha$  quanto à resiliência segue a tendência de que quanto mais alto seu valor, pior será a resiliência. Os nós 13 e 14, como visto na Seção 5.2, são os que obtiveram os piores resultados nesta métrica e este comportamento se repetiu para todos os valores de  $\alpha$ .

Na Figura 5.32 podem ser vistos os resultados de indisponibilidade para os nós 13 e 14. O nó 14 teve um período de indisponibilidade de 22,19 segundos para  $\alpha=10\%$  e o nó 13 um período de 161,2 segundos para  $\alpha=90\%$ . Estes nós, por estarem muito próximos geograficamente do DAP que falha, são os que tem o pior desempenho neste cenário. As diferenças observadas no gráfico entre cada  $\alpha$  é o tempo em que os DAPs, que não o DAP2, levam para ser selecionados pelo algoritmo e quanto maior o valor de  $\alpha$  maior será este tempo. Este tempo está relacionado com a percepção da falha pelo roteamento e a

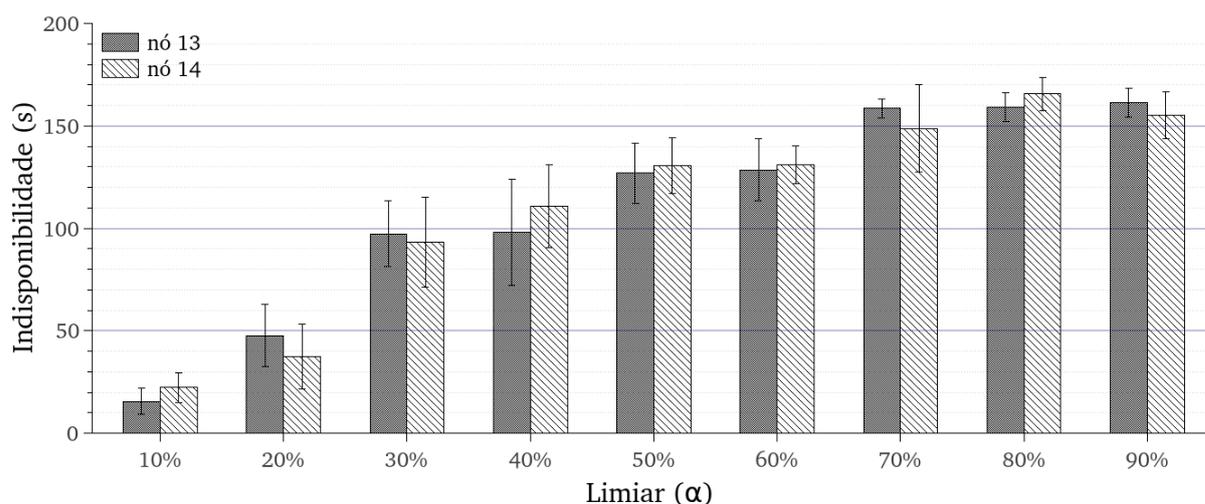


Figura 5.32: Período de indisponibilidade dos nós 13 e 14.

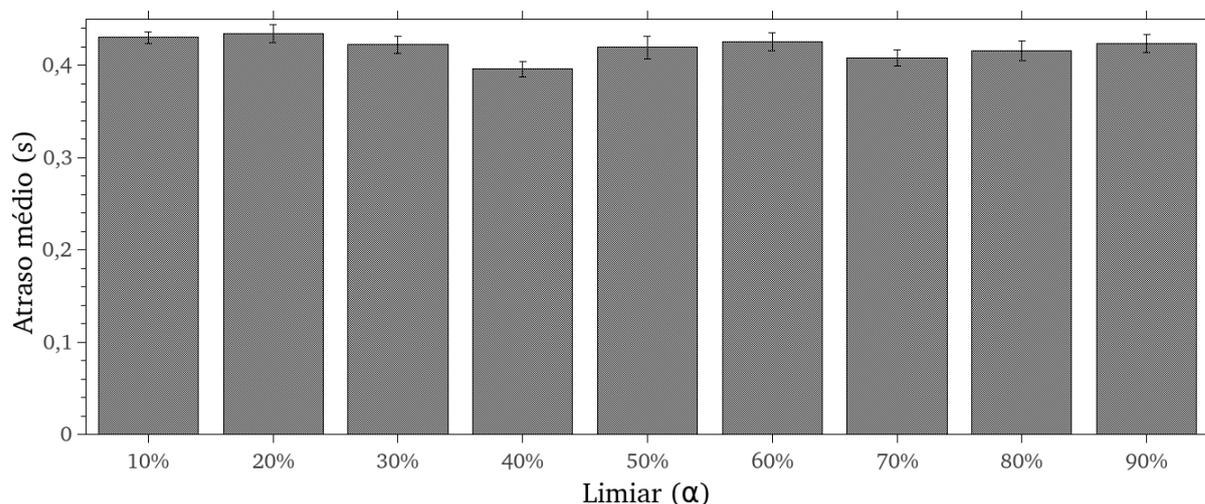


Figura 5.33: Atraso.

medida que a métrica do DAP2 vai piorando os outros DAPs passam a ser selecionados já que não são mais desconsiderados.

A Figura 5.33 mostra o atraso médio para cada valor de  $\alpha$ . Pode-se observar que não houve uma variação muito grande no atraso entre os valores de  $\alpha$ , com uma diferença entre o menor e o maior atraso de 9,7%. Esta diferença mostra que a influência do valor de  $\alpha$  no desempenho de atraso é pequena.

Como a metodologia adotada para calcular a métrica de atraso não mostrou grande diferença nas variações de  $\alpha$  decidiu-se analisar melhor este comportamento. Na Figura 5.34 o atraso mostrado foi calculado considerando todos os pacotes recebidos pelos DAPs e não somente os primeiros pacotes que eram considerados na Figura 5.32. Pode-se notar que

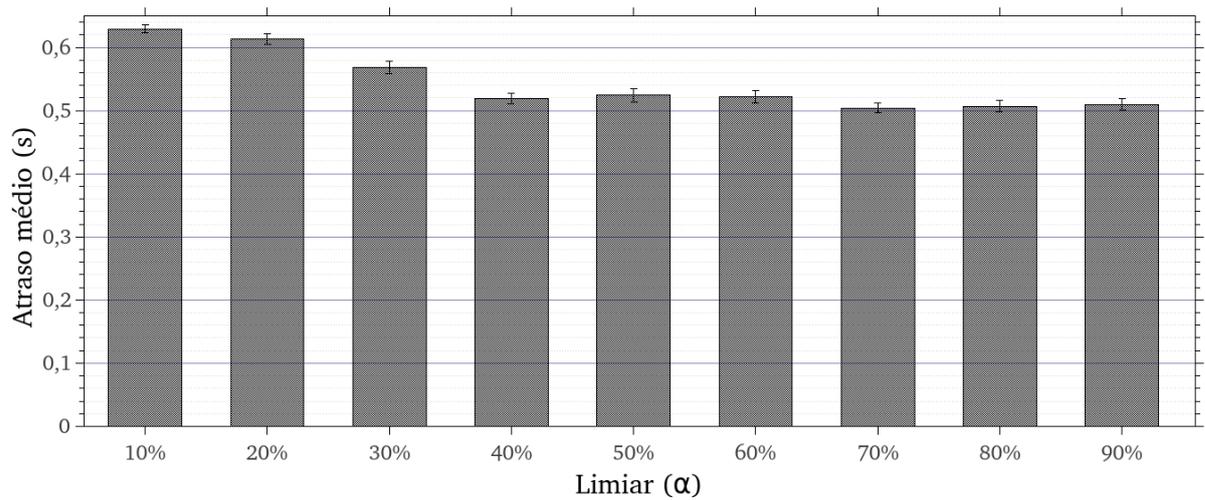


Figura 5.34: Atraso médio.

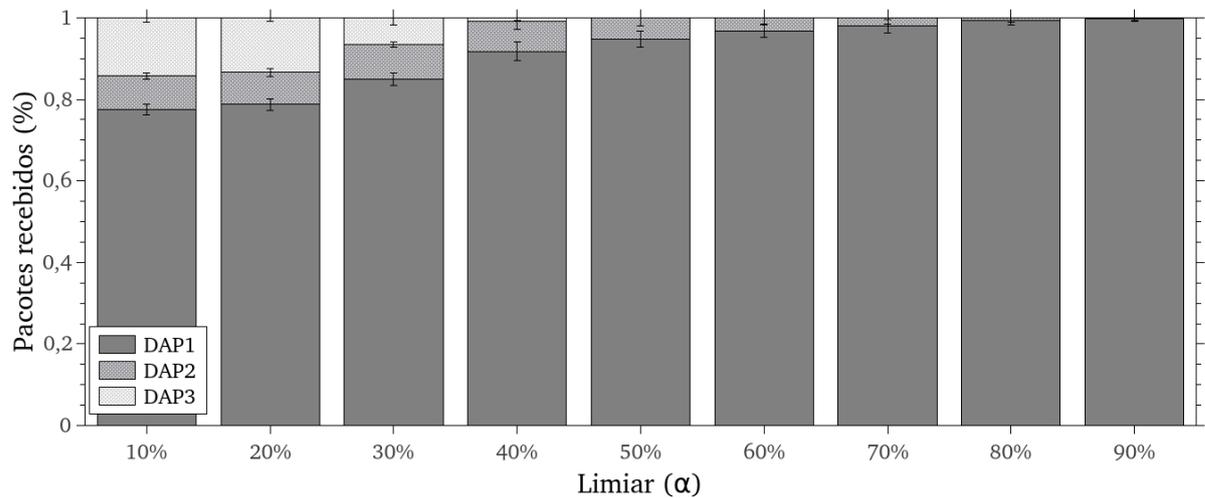


Figura 5.35: Chegada de pacotes por DAP do nó 10.

a influência do valor de  $\alpha$  no desempenho de atraso é significativa com uma diferença de 24,9% entre o menor e o maior atraso. Esta diferença é devido ao número de saltos para alcançar os DAPs mais distantes, que são escolhidos quando valores de  $\alpha$  menores são usados. Há uma estabilização do atraso a partir de  $\alpha=40\%$  e isto ocorre devido às escolhas de DAPs pelos nós tenderem para os DAPs com melhores custos de caminho à medida que o valor de  $\alpha$  aumenta. Esta tendência pode ser vista na Figura 5.35 que mostra como o nó 10 distribui os pacotes entre os DAPs. Observa-se que a partir de  $\alpha=40\%$  a escolha do DAP mais próximo do nó 10 (DAP1) fica acima de 90% enquanto para  $\alpha=10\%$  é de 77,5%.

# Capítulo 6

## Conclusão

Este trabalho apresentou o DDSA, um algoritmo de seleção dinâmica de DAP para aumentar a confiabilidade e a resiliência de aplicações de AMI através do uso de múltiplos DAPs em redes WMN. Pela rede de distribuição estar em um ambiente externo, sujeita a interferências e ruídos, aumenta o desafio para o roteamento em manter a performance e em indicar rotas confiáveis e estáveis, sendo agravado por ser uma rede extensa composta por elevada quantidade de medidores.

Neste tipo de ambiente podem ocorrer falhas nos vários componentes causados por ataques, acidentes ou falhas. Assim o protocolo de roteamento deve ter uma capacidade de recuperação de forma a suportar a falha destes componentes sem comprometer sua capacidade de comunicação. Em redes AMI, o DAP tem um importante papel na troca de informação entre os medidores inteligentes e a Central de Processamento, pois todo tráfego flui através dele. Uma falha em um DAP compromete a troca de informações na rede AMI. Esta dissertação propõe que, nesta condição de falha, rotas alternativas utilizando outros DAPs sejam usadas após a falha para manter a comunicação entre medidores inteligentes e a Central de Processamento. Na solução Multi-DAP, a eficiência na capacidade de recuperação de falha é extremamente dependente da rapidez com que a falha é detectada. Ela só é percebida quando se recebe mensagens de controle com informações sobre falhas. Esta capacidade de recuperação esbarra no *trade-off* entre a rapidez com que a falha é detectada e a sobrecarga causada pelo número de mensagens de controle do protocolo de roteamento. Os resultados obtidos mostram que o DDSA aumenta a resiliência do protocolo de roteamento evidenciado pela baixa queda no desempenho em situações de falha de DAP. O DDSA mostrou sua eficiência como mecanismo de recuperação de falha sem a necessidade de sobrecarregar a rede com mensagens de controle nos vários cenários utilizados para avaliação.

Para avaliar o desempenho do DDSA foram utilizados 3 cenários para simulação: cenário em grade, cenário residencial sintético e cenário residencial real. Estes 3 cenários são variações possíveis de serem encontradas para áreas residenciais nas cidades. Também avaliou-se o impacto do parâmetro de limiar  $\alpha$  e do número de retransmissões no desempenho da proposta DDSA. Foi observado que a topologia de rede influencia muito no desempenho durante a falha de DAP com o cenário em grade tendo os melhores resultados e os piores aconteceram no cenário real. Neste último, no Multi-DAP não houve comunicação entre alguns nós, próximos do DAP com falha, com a Central de Processamento. Conclui-se que a localização dos DAPs é uma questão importante a ser analisada e que influencia muito o desempenho da rede de comunicação, e que é fundamental um planejamento criterioso na instalação de DAPs, possibilitando a conectividade entre medidores e múltiplos DAPs.

Na avaliação do impacto do parâmetro de limiar  $\alpha$ , a escolha deste valor influenciou o comportamento do roteamento. Valores mais baixos favorecem a resiliência já que o DDSA distribui os pacotes entre mais DAPs enquanto valores mais altos distribuem pacotes somente entre os melhores DAPs e a resiliência diminui. Embora o desempenho da métrica de atraso adotada indique que a variação seja pequena é necessário um estudo mais aprofundado para avaliar melhor o impacto de  $\alpha$  no desempenho.

Para trabalhos futuros pretende-se estudar mais profundamente o impacto do parâmetro  $\alpha$  para outros cenários que os propostos neste trabalho e observar o comportamento do DDSA encontrando valores que possam trazer mais resiliência e desempenho ao roteamento. Desta forma, saber qual o melhor valor a ser empregado de  $\alpha$  para cada tipo de topologia que otimize o desempenho e a capacidade de recuperação do roteamento.

Também pode-se estudar uma forma de utilizar adaptação dinâmica do parâmetro  $\alpha$  para que os medidores analisem as condições da rede e escolham o melhor  $\alpha$  de acordo com os critérios adotados.

Outro trabalho futuro é o estudo para encontrar um equilíbrio entre os parâmetros que controlam as mensagens de controle e os parâmetros do DDSA para otimizar o desempenho e a resiliência da rede de comunicação.

Uma outra análise que ficou como trabalho futuro foi uma melhor avaliação do atraso e seu comportamento nas simulações do cenário em grade e do impacto do parâmetro  $\alpha$ .

# Referências

- [1] ARNOLD, G. W. Challenges and opportunities in smart grid: A position article. *Proceedings of the IEEE* (2011).
- [2] BENNETT, C.; HIGHFILL, D. Networking AMI smart meters. In *IEEE Energy 2030 Conference*. (2008).
- [3] CARRANO, R.; MAGALHÃES, L.; SAADE, D. C. M.; ALBUQUERQUE, C. V. N. IEEE 802.11s multihop MAC: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 13, 1 (First 2011), 52–67.
- [4] CLAUSEN, T.; JACQUET, P.; ADJIH, C.; LAOUITI, A.; MINET, P.; MUHLETHALER, P.; QAYYUM, A.; VIENNOT, L., ET AL. Optimized link state routing protocol (OLSR). *RFC 3626, Oct.* (2003).
- [5] DA SILVA, C.; PASSOS, D.; DUARTE, J.; MORAES, I.; DE ALBUQUERQUE, C. V. N. Dyntun: A tool for providing multihoming support in wireless mesh networks. In *International Information and Telecommunication Technologies Symposium* (2010).
- [6] DECONINCK, G. An evaluation of two-way communication means for advanced metering in flanders (belgium). In *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. (2008).
- [7] F. BAKER, D. M. Internet protocols for the smart grid. Rfc 6272, Cisco Systems, 2011.
- [8] FALL, K. R. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. In *ACM SIGCOMM Conference* (2003).
- [9] FANG, X.; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. Smart grid - the new and improved power grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 14, 4 (Fourth 2012), 944–980.
- [10] FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine* 8, 1 (2010), 18–28.
- [11] FAROOQ, H.; TANG JUNG, L. Energy, traffic load, and link quality aware ad hoc routing protocol for wireless sensor network based smart metering infrastructure. *International Journal of Distributed Sensor Networks v.2013* (2013).
- [12] GHARAVI, H.; HU, B. Multigate communication network for smart grid. *Proceedings of the IEEE* 99, 6 (2011), 1028–1045.

- 
- [13] GUIMARAES, P. H. V.; MURILLO, A.; ANDREONI, M.; MATTOS, D. M.; FERRAZ, L. H. G.; PINTO, F. A. V.; COSTA, L. H. M.; DUARTE, O. C. M. Comunicação em redes elétricas inteligentes: Eficiência, confiabilidade, segurança e escalabilidade. *XXXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos* (2013).
- [14] GUNGOR, V.; LAMBERT, F. A survey on communication networks for electric system automation. *Computer Networks* 50, 7 (2006), 877–897.
- [15] GUNGOR, V. C.; LU, B.; HANCKE, G. P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57 (2010).
- [16] GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G. P. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7, 4 (Nov 2011), 529–539.
- [17] GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G. P. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9, 1 (Feb 2013), 28–42.
- [18] KIM, J.; KIM, D.; LIM, K.; KO, Y.; LEE, S. Improving the reliability of IEEE 802.11s based wireless mesh networks for smart grid systems. *Journal of Communications and Networks* 14, 6 (Dec 2012), 629–639.
- [19] LICHTENSTEIGER, B.; BJELAJAC, B.; MULLER, C.; WIETFELD, C. RF Mesh systems for smart metering: System architecture and performance. In *IEEE International Conference on Smart Grid Communications* (2010).
- [20] LINE, M. B. Why securing smart grids is not just a straightforward consultancy exercise. *Security and Communication Networks* (2013).
- [21] LIU, J.; ZHAO, B.; WANG, J.; ZHU, Y.; HU, J. Application of power line communication in smart power consumption. In *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications* (2010).
- [22] LUAN, W.; SHARP, D.; LANCASHIRE, S. Smart grid communication network capacity planning for power utilities. In *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* (April 2010).
- [23] MOSLEHI, K.; KUMAR, R. A reliability perspective of the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid* 1, 1 (2010).
- [24] MOTWANI, R.; RAGHAVAN, P. Randomized algorithms. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28, 1 (1996), 33–37.
- [25] NIST. NISTIR 7761 - Guidelines for assessing wireless standards for smart grid applications, 2011.
- [26] NIST-1108R2. Roadmap for smart grid interoperability standards release 2.0, 2012.
- [27] NS-2. The network simulator - ns-2, 2013.
- [28] OPENSG, O. S. G. Smart grid network system requirements specification, 2013.

- 
- [29] PARIKH, P.; KANABAR, M.; SIDHU, T. Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications. In *IEEE Power and Energy Society General Meeting* (2010).
- [30] PASSOS, D.; ALBUQUERQUE, C. V. N. A joint approach to routing metrics and rate adaptation in wireless mesh networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 20, 4 (Aug 2012), 999–1009.
- [31] RAMACHANDRAN, K.; SHERIFF, I.; BELDING, E.; ALMERTH, K. Routing stability in static wireless mesh networks. In *Passive and Active Network Measurement*, vol. 4427 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 73–82.
- [32] SAPUTRO, N.; AKKAYA, K.; ULUDAG, S. A survey of routing protocols for smart grid communications. *Computer Networks* 56, 11 (2012), 2742 – 2771.
- [33] VASSEUR, J. Overview of existing routing protocols for low power and lossy networks.
- [34] WANG, W.; XU, Y.; KHANNA, M. A survey on the communication architectures in smart grid. *Computer Networks* 55, 15 (2011).
- [35] YAN, Y.; QIAN, Y.; SHARIF, H.; TIPPER, D. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *Communications Surveys Tutorials, IEEE* 15, 1 (2013).