

HENRIQUE ZELAK LEITE BASTOS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROJETO DE UMA
INFRAESTRUTURA DE CIDADE INTELIGENTE PARA
TRANSPORTE PÚBLICO DE CURITIBA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Programa de Pós-Graduação em Informática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pessoa Albini

CURITIBA

2015

HENRIQUE ZELAK LEITE BASTOS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROJETO DE UMA
INFRAESTRUTURA DE CIDADE INTELIGENTE PARA
TRANSPORTE PÚBLICO DE CURITIBA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Programa de Pós-Graduação em Informática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pessoa Albini

CURITIBA

2015

B327a

Bastos, Henrique Zelak Leite

Análise de desempenho e projeto de uma infraestrutura de cidade inteligente para transporte público de Curitiba/ Henrique Zelak Leite Bastos. – Curitiba, 2015.

74 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Informática, 2015.

Orientador: Luiz Carlos Pessoa Albini .

Bibliografia: p. 63-68.

1. Transporte urbano - Planejamento - Curitiba (PR). 2. Transportes - Trânsito de passageiros. 3. Sistemas inteligentes de controle. I. Universidade Federal do Paraná. II. Albini, Luiz Carlos Pessoa. III. Título.

CDD: 388.41322



Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Informática

PARECER

Nós, abaixo assinados, membros da Banca Examinadora da defesa de Dissertação de Mestrado em Informática, do aluno Henrique Zelak Leite Bastos, avaliamos o trabalho intitulado, “Análise de Desempenho e Projeto de uma Infraestrutura de Cidade Inteligente para Transporte Público de Curitiba”, cuja defesa foi realizada no dia 20 de agosto de 2015, às 09:00 horas, no Departamento de Informática do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná. Após a avaliação, decidimos pela:
 aprovação do candidato. **reprovação** do candidato.

Curitiba, 20 de agosto de 2015.

Prof. Dr. Luiz Carlos Pessoa Albini
PPGInf - Orientador

Prof. Dr. Eduardo da Silva
IFC – Membro Externo

Prof. Dr. Carlos Alberto Mazieiro
PPGInf – Membro Interno



AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À Instituição pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

Ao professor Luiz Carlos Pessoa Albini, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

Aos meus pais, irmão, minha namorada Juliana Cristina Martins que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

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

RESUMO

O crescimento desenfreado das cidades causou uma redução na velocidade média dos veículos. Essa queda representa um aumento da emissão de gases poluentes e no tempo médio de deslocamento de pessoas e produtos, causando problemas diretos para diversos setores da economia. Com o objetivo de minimizar tais problemas, algumas cidades buscaram soluções baseadas em cidades inteligentes utilizando a Internet das Coisas. Através das aplicações idealizadas para essas cidades inteligentes será possível disponibilizar, em tempo real, a melhor rota de deslocamento, a localização das vagas de estacionamento disponíveis e manter informados os usuários do transporte coletivo sobre a localização do veículo, reduzindo o tempo de espera. Contudo, para suportar essa nova rede, é necessário implementar uma nova infraestrutura física, composta por cabos, sensores e dispositivos de diversos tipos. Neste trabalho projetou-se a infraestrutura necessária para implementar uma solução baseada em cidades inteligentes para atender o sistema público de transporte de Curitiba, Paraná, Brasil. Modelou-se quatro linhas de ônibus, com características diferentes, e foram alterados os parâmetros afim de encontrar o melhor custo-benefício para a implementação desta tecnologia.

ABSTRACT

The growth of cities caused a reduction in the average speed of vehicles, increasing the polluting gas emissions, the average commute time of habitants and commodities, directly affecting various sectors of the economy. Aiming to minimize such problems, some cities found a viable solutions based on the concept of Smart Cities, though Internet of Things. Applications envisioned for the Smart Cities will online provide the best displacement route, location of available parking spots and will keep public transport users informed about the location of the vehicles, reducing waiting time. However, to support this new network it is necessary to implement a new physical infrastructure, consisting of cables, sensors and many types of devices. The objective of this project is to design the necessary infrastructure to implement solutions based on smart cities to cover the public transportation system of Curitiba, Paraná, Brazil. Four Bus lines representations, with different characteristics, were implemented and parameters were changed in order to find the perfect cost benefit ratio to implement this technology.

LISTA DE FIGURAS

1.1 Exemplo do funcionamento da aplicação de Redwood City [40].....	3
1.2 Linhas de ônibus modeladas [38]	9
1.3 Exemplo da infraestrutura necessária em Curitiba.....	10
2.1 Exemplo da infraestrutura de Salamanca [4].....	13
2.2 Arquitetura macro proposta pelo projeto SmartSantander [34]	15
2.3 Exemplo da arquitetura da aplicação de monitoração de vagas de estacionamento.	17
2.4 Exemplo da arquitetura da aplicação de monitoração da intensidade do trânsito[34]	17
3.1 Modelo dos teste prévios.....	20
3.2 Mensagens transmitidas pela quantidade de saltos.....	22
3.3 Entrega por quantidade de saltos	23
3.4 Vazão(Kb/s) por quantidade de saltos	23
3.5 Causa da falha de transmissão de mensagens pelo AODV, acima de 14 pulos de distância.	24
3.6 Causa da falha de transmissão de mensagens pelo AOMDV, acima de 14 pulos de distância.	25
4.1 Modelo da linha Rui Barbosa / Pinhais no NS-2	30
4.2 Modelo da linha Circular centro no NS-2.....	31
4.3 Modelo da linha Universidades no NS-2.....	31
4.4 Modelo da linha Interbairros I centro no NS-2	31
4.5 Quantidade total de dispositivos.	32

4.6	Quantidade de dispositivos com acesso a Internet.....	32
4.7	Quantidade de mensagens transmitidas por linha.....	36
4.8	Taxa de entrega por linha.....	37
4.9	Vazão por linha.....	38
4.10	Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Circular-Centro	39
4.11	Taxa de entrega pela distância na linha Circular-Centro	39
4.12	Vazão pela distância na linha Circular-Centro	40
4.13	Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Circular-Centro	41
4.14	Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Circular-Centro ..	41
4.15	Vazão pela quantidade total de saltos na linha Circular-Centro	42
4.16	Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Universidades	43
4.17	Taxa de entrega pela distância na linha Universidades	44
4.18	Vazão pela distância na linha Universidades	44
4.19	Vazão pela distância na linha Universidades e Circular-Centro utilizando a velocidade média	45
4.20	Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Universidades	46
4.21	Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Universidades ...	46
4.22	Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Universidades e Circular-Centro utilizando a velocidade média	47
4.23	Vazão pela quantidade total de saltos na linha Universidades	48
4.24	Vazão pela quantidade total de saltos na linha Universidades e Circular-Centro utilizando a velocidade média.....	48
4.25	Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Interbairros I	50
4.26	Taxa de entrega pela distância na linha Interbairros I.....	50

4.27	Vazão pela distância na linha Interbairros I	51
4.28	Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Interbairros I.	52
4.29	Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Interbairros I	52
4.30	Vazão pela quantidade total de saltos na linha Interbairros I.	53
4.31	Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade de saltos e distância entre os dispositivos com a velocidade média entre 4 e 9 m/s na linha Rui Barbosa - Pinhais	54
4.32	Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Rui Barbosa- Pinhais.	55
4.33	Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade de saltos e distância entre os dispositivos com a velocidade média pela linha de ônibus.	56
4.34	Taxa de entrega pela distância na linha Rui Barbosa-Pinhais	56
4.35	Vazão pela distância na linha Rui Barbosa-Pinhais	57
4.36	Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Rui Barbosa-Pinhais	58
4.37	Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Rui Barbosa-Pinhais	58
4.38	Vazão pela quantidade total de saltos na linha Rui Barbosa-Pinhais	59
A.1	Estrutura do pacote Zigbee	70
A.2	Exemplificação do algoritmo AES	72
A.3	Bit do BPSK.	73
A.4	Exemplo de modulação utilizando o método BPSK.	73
A.5	Exemplo do funcionamento do CSMA/CA. Fonte: [14].	74

LISTA DE TABELAS

1.1	Informações sobre as linhas de ônibus (*considerando o tempo total, incluindo tempo de parada nos pontos) [38]	8
3.1	Quantidade total de mensagens transmitidas pelo protocolo de transporte .	27
3.2	Taxa de entrega (%) pelo protocolo de transporte	27
3.3	Vazão (Kb/s) pelo protocolo de transporte	27
3.4	Quantidade total de mensagens transmitidas pelo protocolo de aplicação ..	28
3.5	Taxa de entrega (%) pelo protocolo de aplicação	29
3.6	Vazão (Kb/s) pelo protocolo de aplicação	29
4.1	Infraestrutura necessária em cada uma das simulações simulações (primeira parte).	33
4.2	Infraestrutura necessária em cada uma das simulações simulações (segunda parte).	34
4.3	Cenários analisados.	35
5.1	Valores sugeridos para as linhas analisadas.	61
A.1	Frequência por região.	70

LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgment</i> (Confirmação de recebimento)
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> (Padrão avançado de criptografia)
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> (Deslocamento binário do período do sinal)
CBR	<i>Constant Bit Ratio</i>
CRC	<i>Cyclic redundancy check</i> (Verificação redundante cíclica)
CSMA/CA	<i>Carrier sense multiple access with collision avoidance</i> (Acesso múltiplo de acesso ao meio com prevenção de colisão)
dBm	<i>Decibel-miliwatt</i> (Decibel-miliwatt)
FCS	<i>Frame Check Sequence</i> (Verificação de sequência de janela)
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> (Protocolo de transmissão de arquivos)
GPRS	<i>General packet radio service</i> (Serviço geral de pacotes de rádio)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IPSO	<i>IP for Smart Objects</i> (IP para Objetos Inteligentes)
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> (União internacional de telecomunicações)
LR-WPAN	<i>low-rate wireless personal area networks</i> (redes sem fio pessoais com baixa taxa de transmissão)
NIST	<i>U.S. National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto nacional de padrões e tecnologias dos Estados Unidos)
PSK	<i>Phase Shift Keying</i> (Deslocamento do período do sinal)
QR	<i>Quick Response</i> (Resposta rápida)
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i> (Identificador por Frequência de Radio)

SC	<i>Smart Cities</i> (cidades inteligentes)
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (Sistema Móvel Universal de Telecomunicações)
W	<i>Watt</i> (Watts)

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SIGLAS	ix
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Internet das Coisas	4
1.2 Objetivo	7
2 PROPOSTAS DE CIDADES INTELIGENTES	11
2.1 Madrid	11
2.2 Zaragoza	12
2.3 Salamanca	12
2.4 Belgrado e Pancevo	13
2.5 Santander	14
2.6 Conclusão	18
3 METODOLOGIA E MÉTODOS	19
3.1 Protocolo de roteamento e quantidade de saltos	20
3.1.1 Conclusão	24
3.2 Protocolo de Transporte	26
3.2.1 Conclusão	27

	1
3.3 Protocolo de aplicação	28
3.3.1 Conclusão	29
4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE IOT NA CIDADE DE CURITIBA PARA O SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO	30
4.1 Velocidade	35
4.2 Circular-centro	38
4.2.1 Infraestrutura necessária	42
4.3 Universidades	43
4.3.1 Infraestrutura necessária	49
4.4 Interbairros I	49
4.4.1 Infraestrutura necessária	53
4.5 Rui Barbosa-Pinhais	53
4.5.1 Infraestrutura necessária	59
5 CONCLUSÃO	60
BIBLIOGRAFIA	63
A ZIGBEE	69
A.1 2.4 GHz	71
A.2 868/915 MHz	71
A.3 AES-128	71
A.4 BPSK	72
A.5 CSMA/CA	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Cidades ocupam somente 2% da superfície terrestre. Contudo aproximadamente 60% da população mundial vive em regiões urbanas, sendo responsáveis por 75% das emissões de gases que provocam o efeito estufa. Estima-se que em 2015 existam 1,2 bilhões de carros circulando no planeta, aproximadamente 1 para cada 6 pessoas [11].

Como exemplo de problemas causados pelo crescimento desenfreado das cidades, observou-se em uma cidade da China que a velocidade média dos veículos caiu de 20 km/h para 7 km/h. Essa queda representa um aumento da emissão de gases poluentes e no tempo médio de deslocamento de pessoas e produtos causando problemas diretos para diversos setores da economia [30]. Este tipo de problema aflige habitantes de diversas cidades ao redor do globo.

Para minimizar os problemas causados pelo trânsito, algumas cidades buscaram soluções para otimizar os meios de transportes, utilizando métodos tradicionais, como construção de novos modais ou novas infraestruturas. Algumas foram além, utilizando tecnologia para maior racionalização. Através delas foi possível aumentar a eficiência do trânsito, reduzindo o tempo gasto e custo do deslocamento, conseqüentemente reduzindo a poluição gerada. Uma das opções encontradas foi baseada em *Smart Cities* (SC).

O termo *Smart Cities* (SC), nasceu com o propósito de empregar as tecnologias existentes para resolver ou minimizar os problemas das cidades modernas. O sucesso nesse quesito representa um aumento na atração de empresas, criação de empregos, turismo e qualidade de vida dos habitantes da cidade. Cidades inteligentes, definidas em [19], são lugares onde existe uma forma particular de inteligência e inovação baseada em sensores e dispositivos embarcados gerando informações e respostas em tempo real.

As cidades de San Diego, San Francisco, Ottawa, Brisbane, Amsterdam, Kyoto, Bangalore, Southampton, Manchester, Newcastle, Edimburgo, Edmonton, Vancouver, Montreal, Redwood City [19], Madrid [21], são as primeiras a serem consideradas cidades inteligentes.

Um exemplo de cidade inteligente é Redwood City, Estados Unidos, que em 1995, implementou um sensor acústico nas ruas da cidade capaz de detectar tiros de armas de fogo e alertar a polícia local imediatamente aumentando sua velocidade de resposta. Este sistema usa um algoritmo de triangulação para identificar a localização dos disparos, exemplificado na figura 1.1. Testes realizados demonstraram uma precisão de 80% sendo que 72% dos erros foram por no máximo 7,62 metros [26]. Devido a essa eficiência, o sistema foi implantado em mais de 30 cidades, nos Estados Unidos.



Figura 1.1: Exemplo do funcionamento da aplicação de Redwood City [40]

O projeto *SmartSantander* (Santander Inteligente) [34] é o mais completo e concreto exemplo de cidade inteligente. Santander, Espanha, foi transformada em um laboratório de escala metropolitana. Neste cenário é possível implementar as aplicações idealizadas para as cidades inteligentes como: monitoramento de impacto ambiental, monitoramento de vagas de estacionamento em tempo real, monitoramento da intensidade do trânsito e monitoramento de irrigação de jardins e parques municipais.

Como visto nestes exemplos, é necessária uma infraestrutura para suportar as aplicações e requisitos demandados para as cidades inteligentes. Essa rede precisa de

infraestrutura física específica composta por cabos, sensores e dispositivos de diversos tipos. A tendência é que esta nova rede integre a Internet, compreendendo as seguintes questões sobre sua implementação [21]:

- Como criar uma rede que integre todos esses novos dispositivos?
- Como controlar a volatilidade e a imprecisão geradas pela dinâmica do *mundo real*?
- Como transformar os objetos existentes em objetos inteligentes?
- Como permitir que os dispositivos se adaptem em diversas situações e contextos?
- Como garantir segurança, confiança e privacidade?

A partir dessas questões, a utilização de um novo conceito de Internet foi desenvolvido, a Internet das Coisas. Também definida originalmente em inglês como *Internet of Things* (IoT), é um novo paradigma que revolucionará o conceito da Internet, pois fornecerá diversos novos serviços de forma inovadora, conectando não somente computadores, mas objetos do dia-a-dia, como celulares, relógios, garrafas de refrigerante, vassouras, máquinas de lavar entre outras [30]. Devido à sua versatilidade e adaptabilidade ela também já foi utilizada em cenários de cidades inteligentes.

1.1 Internet das Coisas

A Internet é um conjunto de redes diferentes que utilizam protocolos comuns e fornecem determinados serviços. É um sistema pouco usual no sentido de não ter sido planejado nem ser controlado por ninguém. Os elementos que formam a base da Internet são o modelo de referência TCP/IP. A definição desse modelo possibilita a criação de um serviço universal e pode ser comparado ao sistema telefônico, à adoção da bitola padrão pelas ferrovias no século XIX, ou a adoção de protocolos comuns de sinalização por todas as companhias telefônicas [37].

Por sua vez, a Internet das Coisas evoluiu do conceito de *Radio-Frequency identification* (RFID) [7] usado hoje em larga escala como uma forma de etiqueta digital. O RFID foi idealizado principalmente nas indústrias de manufatura, nas áreas de logística e cadeia de distribuição de recursos. O grande objetivo do RFID é aumentar a velocidade no transporte e manejo de produtos manufaturados e recursos [39]. Este dispositivo proporciona a identificação de um objeto à distância, sem necessitar de uma linha de visão, como seu precursor, o código de barras.

O RFID, devido à sua versatilidade, representou um avanço operacional em diversos contextos [22]. Hoje este dispositivo está presente em milhares de aplicações com o objetivo de prevenir roubos, em pedágios sem paradas, no controle do tráfico de automóveis, no gerenciamento da entrada de pessoas em prédios e na distribuição de produtos, entre diversas outras aplicações. Contudo, a etiqueta RFID é um dispositivo passivo, ou seja, somente envia dados a um leitor, não realizando nenhuma forma de processamento dos dados [22].

A IoT surge como uma evolução do RFID [7], citado pela primeira vez por Kevin Ashton em uma apresentação em 1998 [2]. Contudo, somente em 2001 o MIT apresentou o primeiro conceito de IoT e, logo após, em 2005, o conceito foi formalmente introduzido pela *International Telecommunication Union* (ITU) [31]. Nesse novo conceito, os dispositivos deixam de ser meramente passivos e se tornam ativos, interagindo com os demais objetos e elementos da rede.

Diversas utilizações são sugeridas para esse tipo de rede. No artigo [10], sugere-se que é possível aumentar a eficiência energética doméstica aplicando a IoT no controle de equipamentos domésticos como ar-condicionados, geladeiras, máquinas de lavar roupas, entre outros. Outras aplicações sugeridas por [45] é a simples monitoração de eletrodomésticos, como por exemplo, monitorar a temperatura do fogão mesmo estando no jardim.

Existem algumas características que fazem da Internet das Coisas uma rede especial.

Essa é uma rede essencialmente do tipo *Ad-Hoc*, ou seja, é uma rede sem fio que não possui infraestrutura. Esta rede poderá envolver um grande número de dispositivos de diversas naturezas, como RFID, ZigBee, NFC, WSN, DSL, UMTS, GPRS, Wi-Fi, WiMax, 3G entre outros, [36]. Segundo [44] e [41], é importante que o custo de produção de cada um desses dispositivos IoT seja baixo. Como a fonte energética é limitada, o processamento e a memória também são, por isto será fundamental um método eficiente de obtenção de energia de baixo custo [3].

Tais limitações geram problemas, citados em [3], [9] e [41], cujos não foram abordados até o momento, como os exemplos abaixo. Esse trabalho não pretende abordar todos os desafios citados.

- Roteamento numa rede dessa dimensão;
- O método com que a camada de transporte oferecerá um serviço confiável, eficiente e econômico;
- Implementação de soluções de segurança na rede;

Em [44] é exposta a necessidade de definir uma arquitetura base para a IoT, que permitirá interoperabilidade entre diversos dispositivos, pois esta ação resolveria vários dos problemas encontrados. Com a finalidade de determinar tal arquitetura base, o *IP for Smart Objects (IPSO) Alliance*, fórum criado em setembro de 2008 por vinte e cinco companhias, definiu o IPv6 como o protocolo de rede na IoT [3]. Segundo este fórum, o IP é um protocolo leve que já interliga uma grande quantidade de dispositivo, além de permitir o endereçamento único de $3,4 \times 10^{38}$ dispositivos.

Em 2003, foi também definido o conjunto de padrões IEEE 802.14.5 [15] para a comunicação entre dispositivos, uma das características marcantes desse padrão é o baixo consumo de energia e o baixo custo para produção, isso implica que também haverá um baixo poder de processamento e pouco consumo de memória. Por sua vez a Zigbee

Alliance, [1], complementou as definições da IEEE 802.14.5 adicionando os protocolos de rede (IPv6) e segurança (AES-128 e TLS1.2), tornando esse um dos padrões mais completo e próximo das necessidades da IoT.

No apêndice A são descritas com detalhes as características técnicas do Zigbee e do padrão IEEE 802.14.5.

1.2 Objetivo

Segundo a prefeitura de Curitiba, 45% da população de Curitiba usa o transporte coletivo [8]. O transporte público de Curitiba é constituído de 356 linhas de ônibus atendidas por uma frota de 1.945 veículos, integrando 14 cidades, proporcionando mobilidade a mais de 2,27 milhões de passageiros diariamente [38]. Tal frota é dividida em oito categorias, listadas abaixo [16]:

- Expressos: Ligam os terminais de integração ao centro da cidade, através de canaletas exclusivas;
- Alimentadores: Ligam os terminais de integração e bairros ao centro da cidade, utilizando vias compartilhadas;
- Interbairros: Linha circular que liga os diversos bairros e terminais sem passar pelo centro;
- Diretos: Ligam os bairros e municípios vizinhos ao centro;
- Circular-Centro: atende a região central de forma circular, passando pelos principais pontos atrativos da região central de Curitiba, tais como praças, shoppings, Rodoviária e Biblioteca Pública.
- Ensino especial: destinadas ao atendimento de escolares, portadores de necessidades especiais;

- Interhospitais: faz a ligação entre diversos hospitais;
- Turismo - faz a ligação entre os pontos de atração turística e os parques da cidade.

Afim de contemplar vários cenários presentes na cidade com características diferentes (velocidade, distância percorrida, tipo e tamanho do trajeto, percurso (central ou periférico)), foram escolhidas quatro linhas para avaliar desempenho de uma rede de cidade inteligente. Informações detalhadas sobre as linhas podem ser observadas na tabela 1.1.

- Circular-Centro: Linha roxa na figura 1.2 ;
- Universidades (Linha Alimentadora): Linha azul na figura 1.2;
- Interbairros I (Linha Interbairros): Linha verde na figura 1.2;
- Rui Barbosa-Pinhais (Linha expressa): Linha vermelha na figura 1.2.

Linha	Tipo da linha	Tipo do veículo	Tamanho do trajeto (km)	Quantidade de paradas	Velocidade média (km/h)*
Rui Barbosa Pinhais	Expressa	Bi-articulados	10.8 (Ida) 10.5 (Volta)	17	20,37
Circular Centro	Circular Centro	Micro ônibus	4.8	14	11,16
Universidades	Alimentadora	Comum	22.3	37	15,27
Interbairros I	Interbairros	Articulado	19,8	52	22.4

Tabela 1.1: Informações sobre as linhas de ônibus (*considerando o tempo total, incluindo tempo de parada nos pontos) [38]

O trajeto das linhas escolhidas podem ser observados na figura 1.2.

Para definir a infraestrutura necessária para implementar uma solução baseada em cidades inteligentes, cobrindo a totalidade das linhas, foi necessário testar a eficiência dos seguintes parâmetros: distância entre dispositivos (máxima de 10 metros [15]), e quantidade de saltos necessários para atingir a saída da rede.

A infraestrutura idealizada está exemplificada na figura 1.3. Os dispositivos em vermelho possuem acesso direto a um sistema integrado central, e os dispositivos em azul



Figura 1.2: Linhas de ônibus modeladas [38]

utilizam unicamente o protocolo ZigBee e precisam enviar os dados para o dispositivo vermelho mais próximo. Os círculos verdes representam o alcance dos dispositivos utilizando ZigBee.

Além disso, outros fatores não definidos pelo padrão IEEE 802.14.5, [15] também foram avaliados, como: protocolo de transporte, roteamento e aplicação. A infraestrutura otimizada obtida foi avaliada e quantificada.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, foi realizada uma revisão sobre a infraestrutura necessária em cidades consideradas inteligentes. A metodologia utilizada para definir as simulações executadas, assim como os métodos de avaliação dos resultados obtidos foram descritos no capítulo 3. Por fim nos capítulos 4 e 5 foram apresentados os resultados obtidos e a conclusão.



Figura 1.3: Exemplo da infraestrutura necessária em Curitiba

CAPÍTULO 2

PROPOSTAS DE CIDADES INTELIGENTES

Neste capítulo são expostas cidades que implementam soluções consideradas inteligentes, detalhando sua infraestrutura, funcionalidades e funcionamento.

2.1 Madrid

Madrid, Espanha, conta com 215 linhas de ônibus e uma frota de 2095 veículos. Em 2011 os ônibus circularam por 95 milhões de quilômetros durante 7,11 milhões de horas com uma velocidade média de 13,43 km/h. Todos os ônibus são equipados com o sistema de GPS, que enviam as informações sobre sua velocidade e localização para sensores instalados nas ruas. Além disso a cidade de Madrid também instalou sensores para obter informações referentes aos semáforos, condições climáticas e trânsito. Esse conjunto de informações geradas são utilizadas para identificar potenciais acidentes, otimizar o tempo de viagem dos ônibus e informar os passageiros sobre a estimativa de chegada no destino [21].

Para obter esse resultado, Madrid utilizou a tecnologia Wi-Fi (IEEE 802.11), instalando estes dispositivos em todos os ônibus, em 4500 pontos de ônibus e em 350 ruas e disponibilizou um aplicativo para consulta dos dados coletados, sendo acessado por mais de 3 milhões de usuários mensalmente. Contudo esse serviço custa aproximadamente 10 milhões de Euros por ano para a cidade de Madrid [29].

2.2 Zaragoza

Em Zaragoza, também na Espanha, [11], foi implementada uma solução similar para monitorar o trânsito, contudo os dados são alimentados de forma colaborativa pelos seus habitantes. Foram instalados 150 sensores na cidade e foi disponibilizado um aplicativo de celular para os cidadãos. Ao se aproximar desses sensores os celulares transmitem informações sobre localização e velocidade média do veículo do cidadão, através do Wi-Fi ou *bluetooth*. Estes dados consolidados são disponibilizados através da Internet em tempo real, para avaliar o trânsito atual e propor rotas alternativas aos cidadãos que estão circulando nas proximidades.

2.3 Salamanca

O Projeto RESCATAME [13] tem como objetivo alcançar um gerenciamento sustentável do trânsito da cidade. Foram instalado 52 dispositivos estáticos, divididos em 2 grupos: 50 sensores IoT e 2 Pontos de acesso IoT-GPRS. Tais sensores são responsáveis por coletarem informações de 7 parâmetros:

- Temperatura;
- Umidade relativa do ar;
- Nível de monóxido de carbono (CO);
- Nível de dióxido de nitrogênio (NO₂);
- Nível de Ozônio (O₃);
- Nível de ruído;
- Nível de partículas sólidas no ar;

Os dados coletados pelos sensores são enviados para o ponto de acesso mais próximo e transmitidos utilizando GPRS para um banco de dados central onde os dados são analisados. A infraestrutura utilizada em Salamanca pode ser observada na figura 2.1.

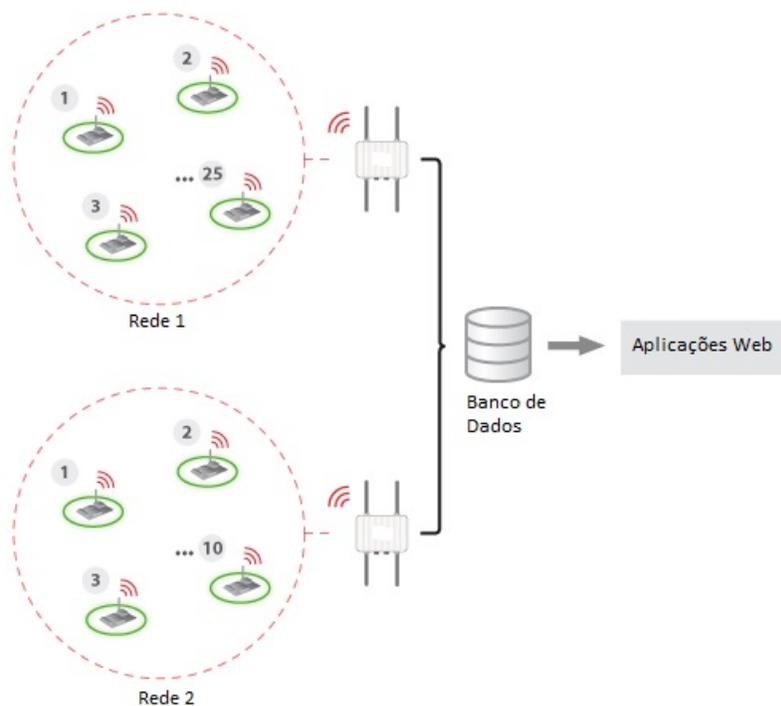


Figura 2.1: Exemplo da infraestrutura de Salamanca [4]

2.4 Belgrado e Pancevo

Através do projeto EkoBus [5], foram instalados 65 dispositivos nos ônibus das cidades de Belgrado e Pancevo na Servia, pela mesma empresa que realizou a implementação em Salamanca, ver seção 2.3. Diferentemente do projeto de Salamanca [13], todos os dispositivos possuem mobilidade. Estes dispositivos são responsáveis pela coleta das seguintes informações:

- Temperatura;
- Umidade relativa do ar;

- Localização;
- Nível de monóxido de carbono;
- Nível de dióxido de carbono;
- Nível de dióxido de nitrogênio;

Todos os dispositivos enviam os dados coletados para um banco de dados central utilizando GPRS.

2.5 Santander

O projeto SmartSantander nasceu a partir das discussões na Assembléia da Internet do Futuro (*Future Internet Assembly*) em Praga, 2009, na qual foi identificada a necessidade de um cenário real para testes da rede IoT. Uma proposta de arquitetura foi projetada obedecendo todos os requisitos especificados e implementada na cidade de Santander, Espanha. Mais tarde o projeto foi expandido para as cidades de Guildford na Inglaterra, Lübeck na Alemanha e Belgrado na Sérvia.

Nesta arquitetura a cidade funciona de forma integrada, utilizando a mesma plataforma central única para toda a cidade, na qual, os dados recolhidos por sensores e/ou enviados por outras aplicações são processados e interpretados. Os dados são coletados e enviados para o ponto de acesso mais próximo, onde são enviados para a plataforma central. Tal arquitetura está ilustrada na figura 2.2.

No total, mais de 20000 sensores compõem essas redes nas 4 cidades. Contudo, somente a cidade de Santander é responsável por 12000 desses sensores, sendo o melhor exemplo de cidade inteligente existente. Em Santander, durante o projeto, foram instalados mais de 5000 sensores, descritos abaixo, além disso foram disponibilizados aplicativos para aparelhos celulares que os transformavam em sensores participativos, desta forma os cidadãos ajudavam a coletar informações relevantes à cidade.

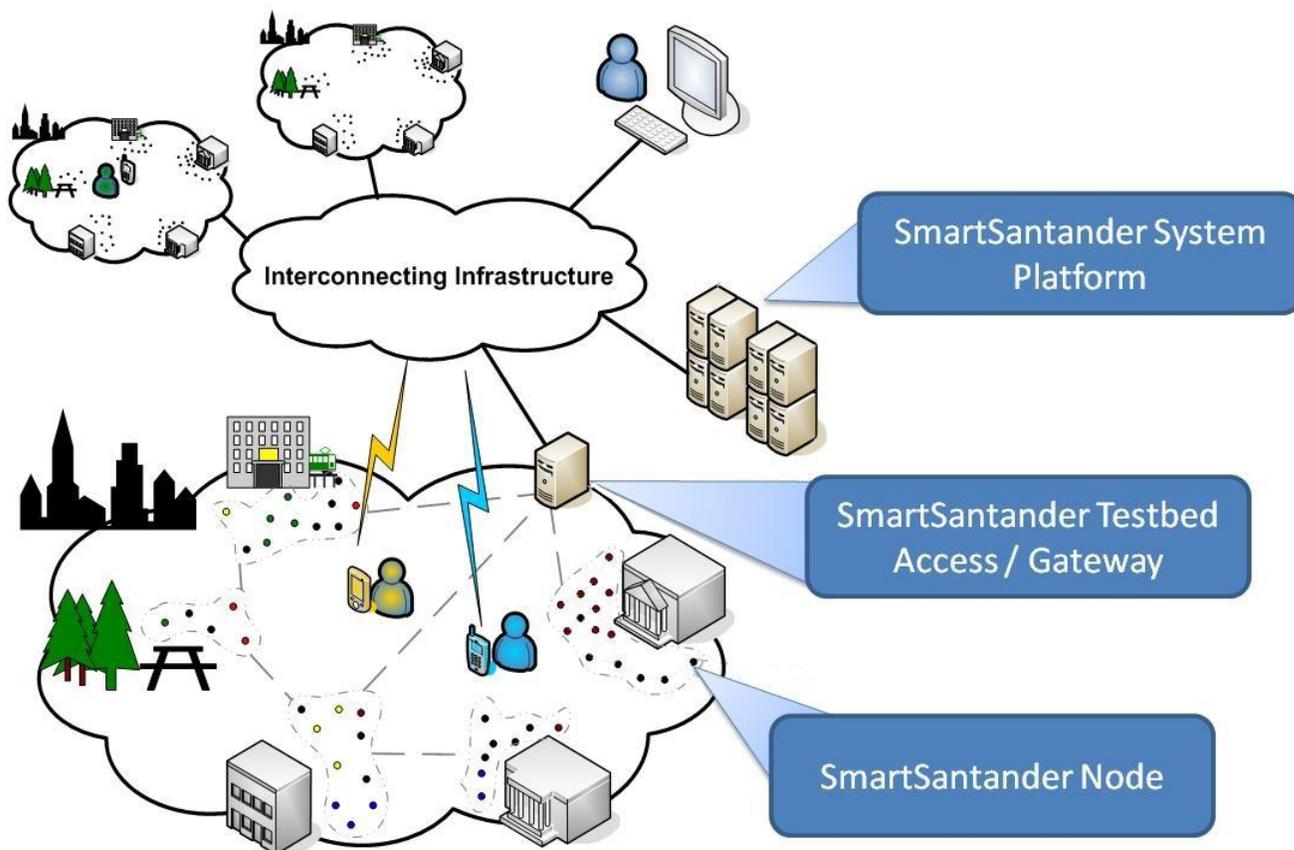


Figura 2.2: Arquitetura macro proposta pelo projeto SmartSantander [34]

- 2670 dispositivos IoT:
 - 2000 sensores de impacto ambiental;
 - 150 sensores de impacto ambiental móveis (instalados em veículos oficiais);
 - 60 sensores de monitoração de intensidade do trânsito;
 - 400 sensores monitoração de vagas de estacionamento;
 - 10 painéis de informações com informações em tempo real sobre disponibilidade de vagas de estacionamento;
 - 50 sensores de monitoração e controle do sistema de irrigação de parques e praças públicas;

- 200 dispositivos GPRS;
- 2000 etiquetas RFID/Código QR, que possibilitam interatividade através de aplicações de realidade aumentada;

Além dos sensores mencionados acima existem dois outros tipos de dispositivos:

- Repetidores: responsável por coletar e enviar dados para o ponto de acesso;
- Ponto de acesso à Internet: sensores e repetidores enviam dados ao ponto de acesso, no qual são re-enviados para um banco de dados para armazenamento e disponibilização através de um servidor web. Esses pontos de acesso podem usar tanto uma interface GPRS/UMTS quanto Ethernet.

Dois exemplos de como tais dispositivos estão organizados nas cidades são apresentados abaixo. A figura 2.3 é referente à aplicação de monitoração de vagas de estacionamento, já a 2.4 é da monitoração da intensidade do trânsito. Os círculos vermelhos nas figuras representam sensores, que coletam os dados e os transmitem para o repetidor mais próximo, representado por um triângulo cinza. Por sua vez, os repetidores enviam os dados para outros repetidores até atingir o ponto de acesso mais próximo, demarcado por um hexágono laranja.

Houveram mais de 50 publicações ou apresentações diretamente relacionadas ao projeto [33]. Entre as pesquisas sobre eficiência energética [32], métodos de autenticação [23], entre outros. Contudo, não foram apresentados resultados práticos do desempenho desta rede.



Figura 2.3: Exemplo da arquitetura da aplicação de monitoração de vagas de estacionamento.

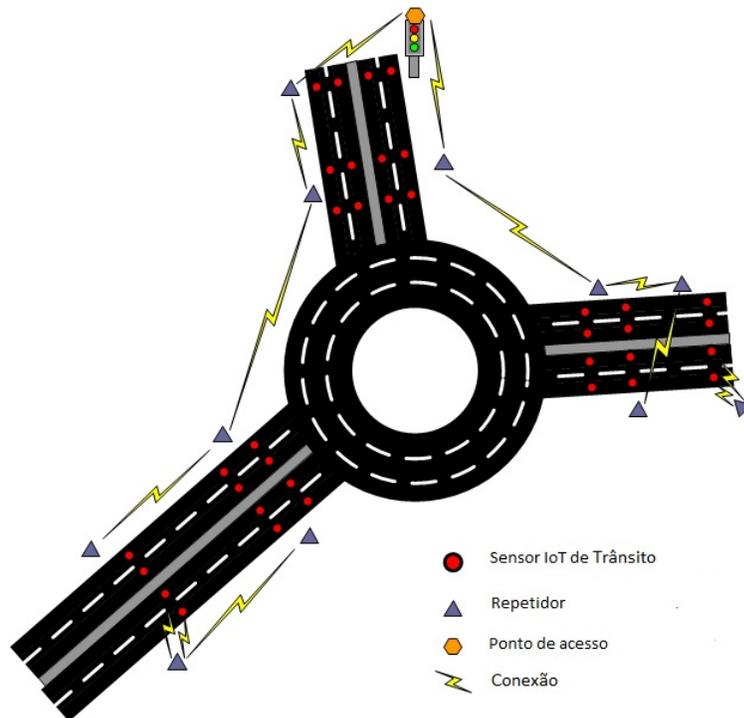


Figura 2.4: Exemplo da arquitetura da aplicação de monitoração da intensidade do trânsito[34]

2.6 Conclusão

As cidades inteligentes estudadas utilizaram diferentes abordagens para ambientes estáticos e móveis. Enquanto que em ambientes móveis usou-se GPRS ou Wi-Fi, em cenários estáticos foi possível utilizar a IoT. É optado por usar a tecnologia GPRS em cenários móveis, pois ela já é amplamente dominada e utilizada, contudo este serviço é comumente tarifado pela quantidade de dados utilizados e os custos resultantes podem ser elevados. Além disso, outra desvantagem é a não adaptabilidade, tais sensores não poderão ser integrados em outras aplicações.

Para otimizar gastos, seria possível utilizar a infraestrutura estática baseada em IoT para transportar os dados provenientes de dispositivos móveis. A rede IoT é adaptável e flexível, podendo ser expandida e utilizada por diversos tipos de aplicações, como as mencionadas em Zaragoza e Santander, na Espanha.

Por essas razões, no cenário proposto optou-se por utilizar uma infraestrutura baseada em IoT para suportar as aplicações demandadas pelo sistema de transporte público de Curitiba. A infraestrutura projetada poderá ser adaptada e utilizada para diversos outros tipos de aplicações, resultando em um menor custo e uma maior eficiência na gestão da sua administração

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E MÉTODOS

Com o objetivo de definir a infraestrutura necessária para implementar uma solução baseada em cidades inteligentes para o sistema de transporte público na cidade de Curitiba com uma infraestrutura em Internet das Coisas, foi utilizado o simulador de redes NS-2 com base nos scripts descritos em [25] obedecendo o padrão IEEE 802.15.4. Durante as simulações, os parâmetros abaixo foram variados para observar o desempenho da rede a fim de estabelecer uma rede mais eficiente.

- Quantidade de saltos necessários para o ponto mais distante atingir o ponto de acesso à Internet mais próximo;
- Distância entre os dispositivos IoT;
- Protocolo de roteamento;
- Protocolo de aplicação;
- Protocolo de transporte;

Para obter uma análise mais completa dos resultados, quando necessário, foi aplicado o método estatístico de análise de variância (ANOVA) [20], este é composto de um conjunto de modelos estatísticos usados para diferenciar grupos associados com variação de procedimentos. Esse método estatístico é usado para refutar a hipótese nula, ou seja, os dados são de uma mesma população não havendo distinção significativa entre os grupos. Ao rejeitar a hipótese nula, é possível concluir que cada grupo afeta o resultado obtido. Quanto menor o p-valor obtido, maior a diferença estatística entre os grupos, e maior a margem de confiança para rejeição da hipótese nula. Nos casos avaliados, foi utilizado

esse método para diferenciar os cenários conforme a quantidade de saltos, distância entre dispositivos e velocidade.

O padrão IEEE 802.15.4 define 3 faixas de frequência já regulamentadas, em todas as simulações executadas foram utilizadas a faixa de 868 MHz, conforme explicado com detalhes no apêndice A. Além disso, as simulações tem duração de 1000 segundos, sendo que as mensagens são enviadas utilizando entre os segundos 20 e 980.

Foram executados testes prévios com objetivo de analisar o desempenho da rede desconsiderando a mobilidade e limitar os parâmetros nas simulações futuras. Tais testes foram importantes para a definir a quantidade de saltos e o protocolo de roteamento utilizado nas simulações futuras.

3.1 Protocolo de roteamento e quantidade de saltos

Estes testes tinham como objetivo analisar o desempenho da rede desconsiderando a mobilidade. Tais testes foram importantes para a definir a quantidade de saltos e o protocolo de roteamento utilizado nas simulações futuras. Essas simulações foram feitas em uma rede estática com os dispositivos em linha separados por 10 metros, no qual somente o primeiro dispositivo envia mensagens para o último. Um modelo das simulações executadas pode ser observado na figura 3.1.

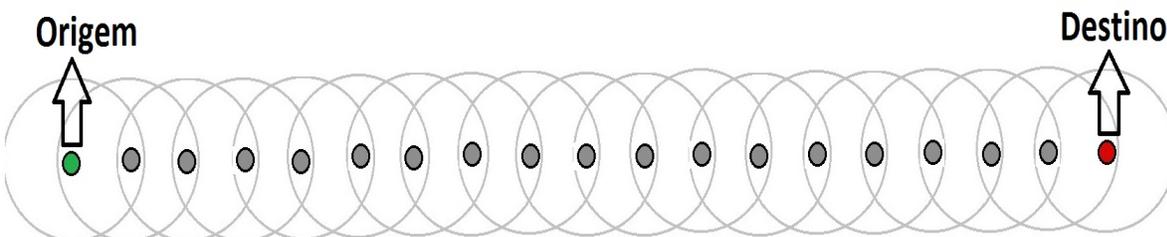


Figura 3.1: Modelo dos teste prévios

Foram utilizados os protocolos de roteamento que obtiveram os melhores resultados na avaliação de desempenho apresentada em [27], ou seja, AODV e AOMDV (Protocolos

reativos) [6] e DSDV (Protocolo pró-ativo) [12].

Nestes testes foi usada uma rede com distância entre os dispositivos de 10 metros, distância máxima entre dispositivos estabelecidos pelo padrão IEEE 802.14.5, [15]. Os dispositivos foram organizados em linha, onde o primeiro dispositivo é o originador das mensagens e o último é o receptor. O tempo de simulação foi de 3600 segundos, sendo que as mensagens foram criadas entre o segundo 20 até o 3580. Foi utilizado o protocolo de aplicação CBR [24], criando 10 mensagens por segundo de tamanho máximo (128 Bytes).

Foi alterada a quantidade de saltos entre 1 e 16 entre o originador e o receptor das mensagens, variando um por vez e foram utilizados diferentes protocolos de roteamento escolhidos, além do "Sem Roteamento", isto é, os dispositivos sabem previamente toda a tabela de roteamento em todos os momentos, desta forma o protocolo de roteamento não gera nenhuma sobrecarga na rede. Para cada conjunto de parâmetros foram executadas 50 simulações. Com esta quantidade de simulações foi possível ver uma tendência clara do comportamento da rede.

O DSDV, conforme proposto no [27] artigo, apesar de ser o único protocolo do tipo pró-ativo, sua aplicação foi sem sucesso. O protocolo do DSDV requer atualização frequente na tabela de roteamento. Foi verificado que em poucos segundos cada dispositivo necessita mais de uma mensagem para enviar sua da tabela de roteamento, em menos de um minuto tal sobrecarga inutilizou a rede como um todo. Tal fato se deve as características da rede proposta, em conjunto com o tamanho de pacote definido no padrão IEEE 802.15.4, 128 Bytes. Em um cenário real mesmo que a tabela seja inicialmente carregada, a quantidade e a velocidade dos ônibus causaram infinitas atualizações da tabelas de roteamento, impactando todo o desempenho da rede devido à sobrecarga causada pela atualização da tabela de roteamento. Portanto, é inviável utilizar o DSDV para o cenário proposto.

Os resultados obtidos a partir da variação da quantidade de saltos necessários foram separados de acordo com o protocolo de roteamento (AODV, AOMDV e "Sem Roteamento") utilizando um intervalo de confiança de 95%. A figura 3.2 mostra a

quantidade total de mensagens entre os protocolos testados com diferentes quantidades de saltos entre o originador e o receptor. Nota-se que em até 13 saltos o "Sem Roteamento" entrega mais mensagens que os outros, contudo a partir de 13 saltos nenhuma mensagem é entregue. Assim como no "Sem Roteamento", foi constatada uma queda significativa a partir 13 saltos utilizando o AODV. Já o AOMDV tem um desempenho aceitável somente quando há apenas 1 salto entre o originador e o receptor. É importante resaltar, que uma tendência de queda foi apresentada no protocolo AODV, à medida que a quantidade de saltos foi aumentada, contudo o "Sem Roteamento" apresentou um comportamento constante até 13 saltos.

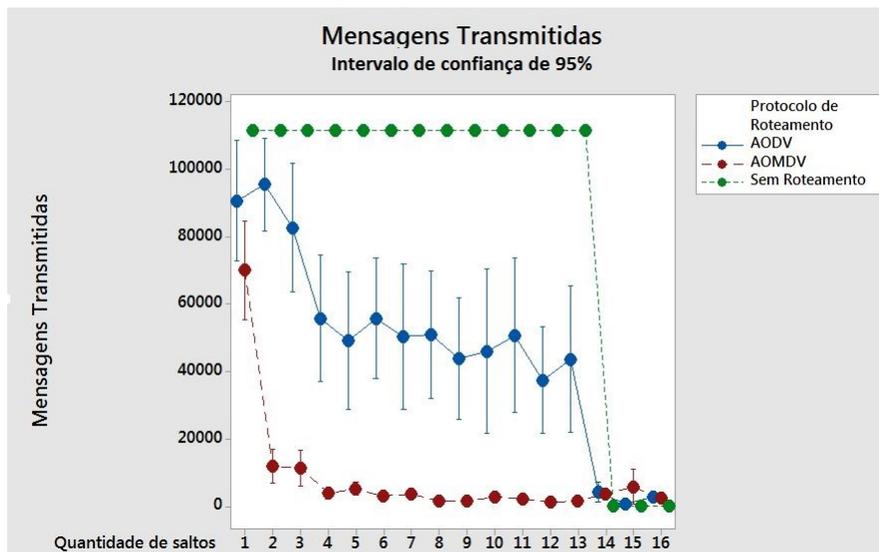


Figura 3.2: Mensagens transmitidas pela quantidade de saltos

Para não distorcer os resultados apresentados na figura 3.3, referente à taxa de entrega, os resultados das simulações do "Sem Roteamento" com 14 à 16 saltos de distância foram removidos. Assim como para a quantidade total de mensagens enviadas, o protocolo "Sem Roteamento" é superior ao demais e constante até 13 saltos de distância. A partir de 13 saltos se observa uma queda acentuada para os demais protocolos.

Ao observar a vazão, na figura 3.4, nota-se que o AODV é levemente superior ao "Sem Roteamento", contudo a diferença obtida não compromete o desempenho geral da

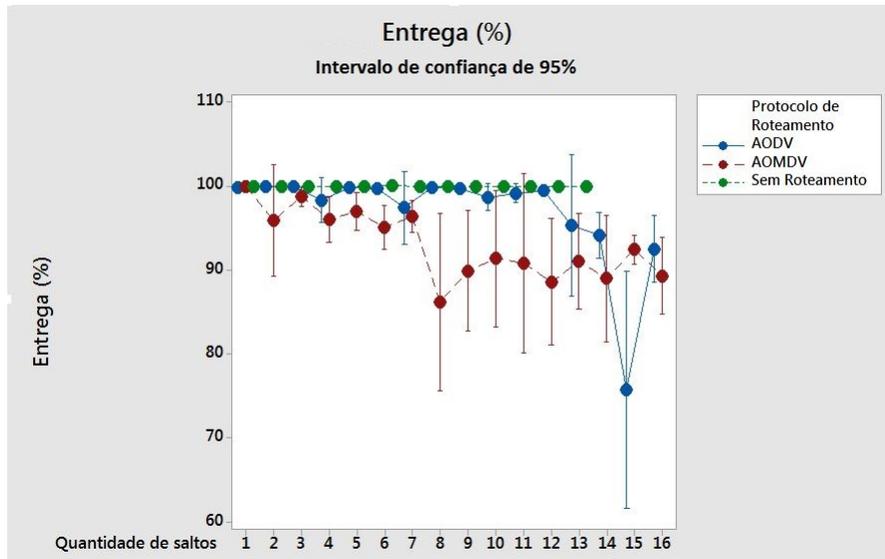


Figura 3.3: Entrega por quantidade de saltos

rede. Novamente, o protocolo AOMDV obteve o pior resultado, e a partir de 13 saltos, constatou-se uma queda acentuada para todos os protocolos analisados.

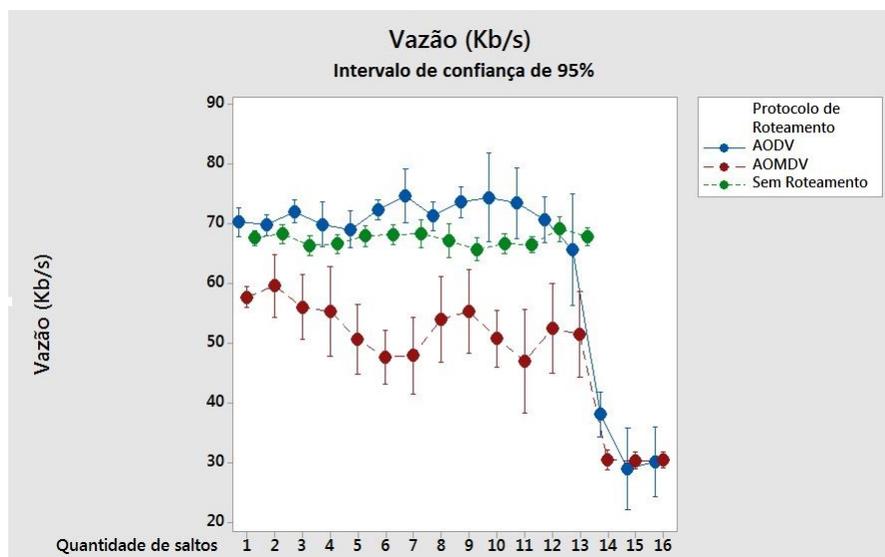


Figura 3.4: Vazão(Kb/s) por quantidade de saltos

3.1.1 Conclusão

Somente os protocolos AODV e AOMDV conseguem entregar para os dispositivos mais distantes, contudo seu desempenho também cai drasticamente a partir de 14 saltos. A não comunicação entre os saltos 14 e 16 utilizando o protocolo "Sem Roteamento" é causado exclusivamente pela não resolução do endereço MAC pelo protocolo ARP. Por definição do NS-2 [18], quando a camada de rede recebe uma mensagem endereçada para o mesmo destinatário do mesmo remetente ele exclui a mensagem anterior e utiliza a nova. Mesmo alterando o simulador para utilizar a primeira mensagem recebida, ignorando as subsequentes, não foi possível resolver o endereço MAC em tempo hábil.

Chama a atenção a queda acentuada a partir de 14 saltos. As principais causas de perda de mensagem estão ilustradas nas figuras 3.5 e 3.6.

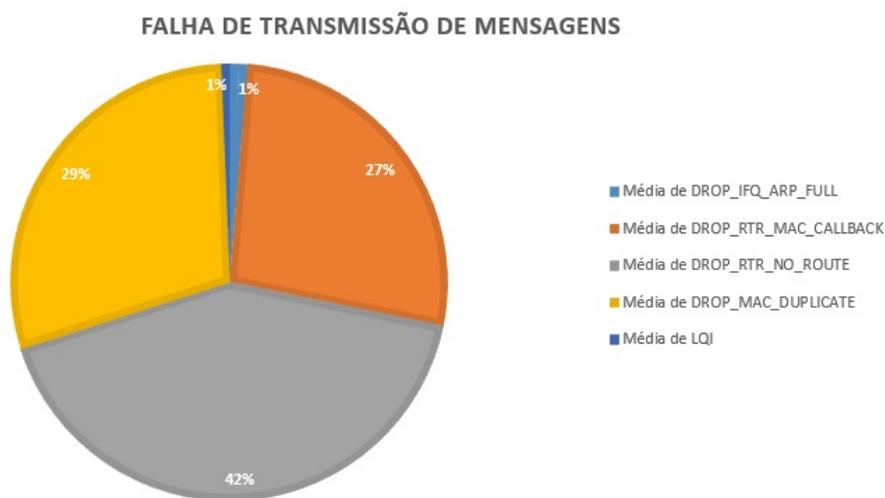


Figura 3.5: Causa da falha de transmissão de mensagens pelo AODV, acima de 14 pulos de distância.

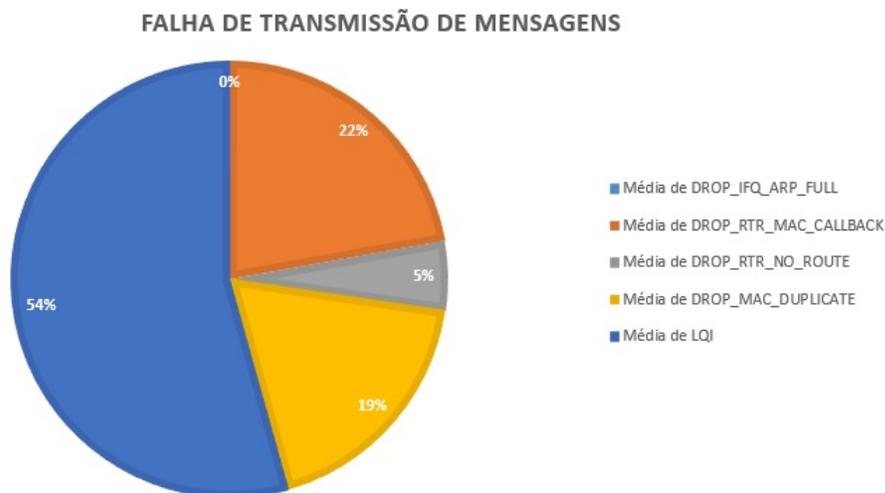


Figura 3.6: Causa da falha de transmissão de mensagens pelo AOMDV, acima de 14 pulos de distância.

- **DROP_RTR_MAC_CALLBACK**: entrega falhou devido à quebra de conexão. Após a primeira falha foi tentado restabelecer a conexão sete vezes, caso todas falharam este erro foi emitido;
- **DROP_RTR_NO_ROUTE**: impossibilidade de estabelecer rota entre o originador e o destinatário;
- **DROP_MAC_DUPLICATE**: já existe outro pacote com o um identificador idêntico na camada de enlace, ocorre devido a uma mensagem represada chegar após o recebimento da retransmissão;
- **DROP_IFQ_ARP_FULL**: foi recebido um pedido de resolução de endereço MAC para mesmo destinatário;
- **LQI**: perda de mensagem devido a baixa qualidade da conexão.

O desempenho do AOMDV só é comparável aos outros protocolos quando há somente um salto de distância entre o originador e o receptor, por isso ele se torna impraticável. As mensagens começam a não ser entregues devido ao alto custo do roteamento, não sendo possível estabelecer rotas funcionais.

Um comportamento em comum foi observado nos protocolos de roteamento AODV e "Sem Roteamento", o desempenho da rede cai drasticamente após 13 saltos. Contudo, utilizando o AODV, a partir de dois saltos de distância, o desempenho é metade das apresentadas pelo "Sem Roteamento".

Os protocolos de roteamento tendem a gerar maior sobrecarga na rede conforme cresce o cenário, sendo assim, é preciso observar características especiais do cenário que se pretende atender:

- Uma rede de grande dimensão;
- A grande maioria dos seus dispositivos são fixos;
- Os dispositivos móveis não se comunicam entre eles, todos os ônibus enviam mensagens para um dispositivo fixo.

Os protocolos de roteamento testados não atendem ao cenário proposto, portanto sugere-se a utilização de um método adaptado para o roteamento. Os dispositivos móveis enviam ao dispositivo fixo mais próximo, este lhe confirma o recebimento e ficará encarregado de enviar a mensagem até o destinatário final. Tais dispositivos utilizam protocolos de roteamento tradicionais para redes cabeadas.

Como não há a necessidade de remontar a tabela de roteamento ou redefinir rotas em nenhuma etapa da comunicação, foi utilizado o protocolo "Sem Roteamento", em todas as simulações subsequentes. Conforme os resultados obtidos, devido o baixo desempenho utilizando mais de 13 saltos, utiliza-se este como quantidade máxima de saltos utilizadas nas simulações futuras.

3.2 Protocolo de Transporte

Com objetivo de evitar distorções causadas pelo protocolo de transporte, foram realizados testes com os dois protocolos mais comuns, o TCP e o UDP. O cenário utilizado para

estes testes era composto por uma rede fixa com 10 saltos e distância de 10 metros entre os dispositivos, onde o primeiro dispositivo da rede envia mensagens para o último. Os testes foram repetidos 50 vezes para cada um dos protocolos de transporte.

O protocolo TCP garante não só a entrega dos pacotes como também a ordem que estes pacotes são recebidos, ao contrário do UDP. Portanto é esperado que a quantidade de mensagens enviadas pelo UDP seja maior que o TCP, contudo é também esperada uma taxa de entrega mais alta para o TCP devido a todas as garantias implementadas por ele. Tais hipóteses foram comprovadas durante as simulações.

Foi utilizado o protocolo de aplicação CBR [24], criando 10 mensagens por segundo de tamanho máximo (128 Bytes). A quantidade total de mensagens transmitidas ou enviadas pode ser observada na tabela 3.1 , sua respectiva taxa de entrega está representada na tabela 3.2, por fim a vazão pode ser observada na tabela 3.3

TCP	UDP
146.938	768.000

Tabela 3.1: Quantidade total de mensagens transmitidas pelo protocolo de transporte

TCP	UDP
99,96	27,49

Tabela 3.2: Taxa de entrega (%) pelo protocolo de transporte

TCP	UDP
26,69	0,01

Tabela 3.3: Vazão (Kb/s) pelo protocolo de transporte

3.2.1 Conclusão

Utilizando o protocolo UDP foram recebidas 30.43% mais mensagens se comparado com o protocolo TCP, contudo foi enviado 522.66% mais mensagens durante toda a simulação. Tamanha ineficiência pode comprometer o desempenho de toda a rede, devido à dimensão

do cenário que se deseja atender. Como não foi possível observar nenhuma indicação que o TCP possa comprometer o desempenho da rede, optou-se por utilizá-lo nas simulações futuras.

3.3 Protocolo de aplicação

Foram testados as aplicações, FTP e CBR utilizando sempre 8 saltos de distância entre o originador e o destinatário. O FTP é um protocolo que foi criado em 1971 e tem como objetivo transferir dados entre dois pontos de forma segura e eficiente, feito para funcionar exclusivamente sobre o protocolo de transporte TCP, [35], portanto o protocolo FTP não funciona através do UDP, pois ele requer uma conexão orientada e a garantia de entrega ordenada das mensagens. Já o CBR [24] foi criado para ser utilizado em simuladores, ele envia de forma constante bits entre um originador e um destinatário, portanto é esperado que seu desempenho seja superior.

Nas simulações foi usado o mesmo cenário proposto na seção 3.2, com o objetivo de observar isoladamente possíveis impactos que possam comprometer as simulações futuras. Tais testes foram repetidos 50 vezes, com esse número de repetições foi possível reduzir o desvio padrão dos resultados obtidos e observar uma clara tendência de comportamento.

Ao comparar os dois protocolos de aplicação nota-se que a taxa de entrega não é significativamente diferente para as aplicações que se deseja contemplar, tabela 3.5. Já a quantidade total de mensagens transmitidas é 23.98% superior no CBR, conforme tabela 3.4. Devido a menor quantidade de mensagens transmitidas a vazão do FTP é superior, tabela 3.6.

CBR	FTP
146.938	111.690

Tabela 3.4: Quantidade total de mensagens transmitidas pelo protocolo de aplicação

CBR	FTP
99,96	99.98

Tabela 3.5: Taxa de entrega (%) pelo protocolo de aplicação

CBR	FTP
26,69	67.76

Tabela 3.6: Vazão (Kb/s) pelo protocolo de aplicação

3.3.1 Conclusão

O CBR entrega mais mensagens que o FTP com uma taxa de entrega equivalente, conforme o esperado. Contudo essa diferença não comprometeu o funcionamento da rede. Tendo em vista que o CBR é protocolo usado exclusivamente para simulações e com o objetivo de retratar a realidade com maior precisão, foi utilizado o FTP nas simulações futuras.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE IOT NA CIDADE DE CURITIBA PARA O SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Durante os teste prévios foi possível determinar o melhor protocolo de transporte, aplicação e roteamento, além de limitar a variação da quantidade de saltos necessários. A partir desses dados foram simulados os cenários reais, alterando os seguintes parâmetros:

- Quantidade de dispositivos entre o dispositivo mais distante e o ponto de acesso à Internet mais próximo;
- Distância entre os dispositivos IoT;
- Velocidade média dos ônibus.

As linhas de ônibus descritas na seção 1.2 e exemplificadas na figura 1.2 foram modeladas no NS-2 de forma simplificada. Os cenários modelados são apresentados nas figuras: 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, conforme dados reais apresentados na tabela 1.1. Foram utilizadas distância diferentes entre os dispositivos fixos, 4, 6, 8 e 10 metros, distância máxima conforme o padrão IEEE 802.15.4. A quantidade de dispositivos necessários para criar a infraestrutura base para as linhas de ônibus pode ser observada na tabela 4.1 e 4.2.



Figura 4.1: Modelo da linha Rui Barbosa / Pinhais no NS-2

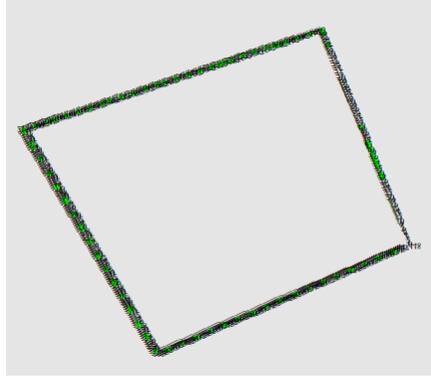


Figura 4.2: Modelo da linha Circular centro no NS-2

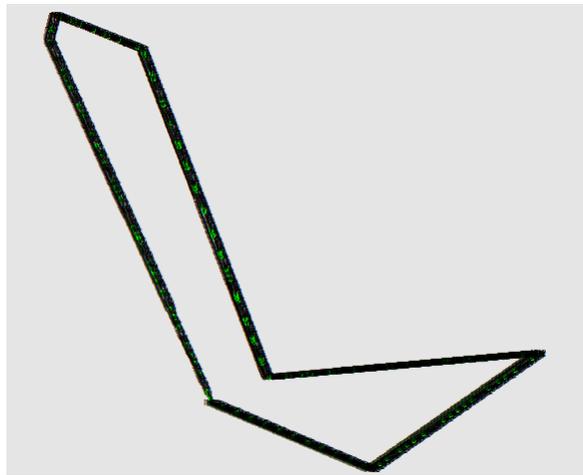


Figura 4.3: Modelo da linha Universidades no NS-2

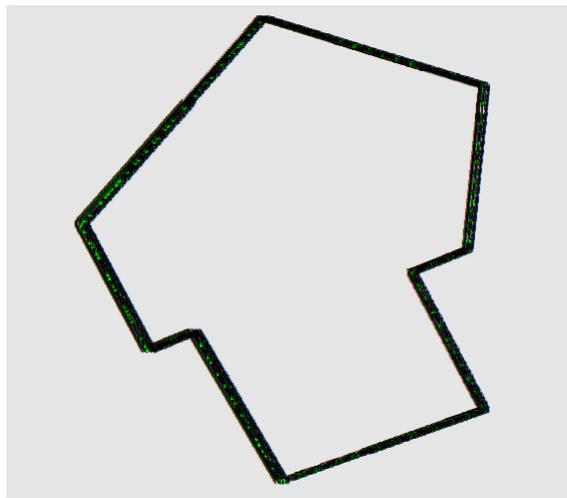


Figura 4.4: Modelo da linha Interbairros I centro no NS-2

Além disso, foram feitos testes com diferentes quantidades de saltos necessários para alcançar um dispositivo com acesso direto à Internet: 4, 6, 8, 10 e 13. Tal fator não impacta na quantidade de dispositivos necessários para construir a infraestrutura. Entretanto para cada um desses dispositivos ter um acesso direto a Internet será necessário que utilizem uma outra infraestrutura, seja GPRS como em Salamanca ou mesmo cabeada. Portanto, quanto menos dispositivos possuírem acesso direto, mais barata é a infraestrutura necessária e mais otimizada é a rede.

A quantidade de simulações executadas para cada cenário foi diferente com objetivo de reduzir o desvio padrão e observar uma clara tendência de comportamento. A infraestrutura necessária para os cenários podem ser estimadas com base nas equações 4.5 e 4.6 e listadas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

$$\text{Quantidade de dispositivos} = \frac{\text{Tamanho da linha}}{\text{Distância entre os dispositivos}}$$

Figura 4.5: Quantidade total de dispositivos.

$$\text{Dispositivos com acesso Internet} = \frac{\text{Quantidade de dispositivos}}{\text{Quantidade de saltos}}$$

Figura 4.6: Quantidade de dispositivos com acesso a Internet.

Linha	Distância entre (metros) dispositivos (metros)	Quantidade de dispositivos necessários	Quantidade de saltos	Quantidade de dispositivos com Internet
Circular Centro	10	448	4	50
			6	35
			8	27
			10	22
			13	17
	8	569	4	64
			6	44
			8	34
			10	28
			13	22
	6	757	4	85
			6	59
			8	45
			10	37
			13	29
	4	1198	4	134
			6	93
			8	71
			10	58
			13	45
Universidades	10	1624	4	181
			6	125
			8	96
			10	78
			13	61
	8	2059	4	229
			6	159
			8	122
			10	99
			13	77
	6	2810	4	313
			6	217
			8	166
			10	134
			13	105
	4	4471	4	497
			6	344
			8	263
			10	213
			13	166

Tabela 4.1: Infraestrutura necessária em cada uma das simulações (primeira parte).

Linha	Distância entre dispositivos (metros)	Quantidade de dispositivos necessários	Quantidade de saltos	Quantidade de dispositivos com Internet
Interbairros I	10	1600	4	178
			6	124
			8	95
			10	77
			13	60
	8	2022	4	225
			6	156
			8	119
			10	97
			13	75
	6	2690	4	299
			6	207
			8	159
			10	129
			13	100
	4	4219	4	469
			6	325
			8	249
			10	201
			13	157
Rui Barbosa Pinhais	10	1088	4	121
			6	84
			8	64
			10	52
			13	41
	8	1352	4	151
			6	104
			8	80
			10	65
			13	51
	6	1805	4	201
			6	139
			8	107
			10	86
			13	67
	4	2746	4	306
			6	212
			8	162
			10	131
			13	102

Tabela 4.2: Infraestrutura necessária em cada uma das simulações (segunda parte).

Por mais que esse trabalho não tenha pretensão de alterar a velocidade dos ônibus, diferentes velocidades foram utilizadas com o objetivo de observar como variações do trânsito na cidade de Curitiba podem impactar o comportamento da rede. Dependendo do novo cenário mudanças na infraestrutura podem ser feitas a fim de restabelecer a qualidade do serviço. Durante as simulações foram utilizadas velocidades de 2 (somente para a linha Circular-Centro), 3, 4, 5, 7 e 9 m/s (7.2 , 11, 14.4, 20, 25 e 32.4 km/h) tais velocidades foram escolhidas com base nas velocidades médias atuais indicadas na Tabela 1.1. Além disso utilizamos as velocidades 11 e 15 m/s (39.6 e 54 km/h) forma utilizados na seção 4.1, onde foi avaliado o impacto da velocidade individualmente.

Na seção 4.1 é analisado como a velocidade afeta o comportamento da rede, em seguida são discutidos os resultados das simulações para cada uma das linhas de ônibus individualmente observando os demais parâmetros. Com o objetivo de estabelecer o melhor conjunto de parâmetros, as simulações foram divididas em três cenários: acima, abaixo e na velocidade média, a partir dos dados reais apresentado nas Tabelas 4.1 e 4.2. Na Tabela 4.3 constam os valores de velocidade utilizados para cada um dos cenários.

Linha de ônibus	Abaixo da velocidade média	Na velocidade média	Acima da velocidade média
Circular-Centro	2 e 3 m/s	3 e 4 m/s	4 e 5 m/s
Universidades	4 e 5 m/s	5 e 7 m/s	7 e 9 m/s
Interbairros I	3 e 4 m/s	4 e 5 m/s	5 e 7 m/s
Rui Barbosa-Pinhais	4 e 5 m/s	5 e 7 m/s	7 e 9 m/s

Tabela 4.3: Cenários analisados.

4.1 Velocidade

A velocidade é uma fator crítico para determinar a infraestrutura da rede. Como os dispositivos IEEE 802.14.5 têm um alcance limitado, quanto mais rápido os ônibus se deslocam menos tempo em contato com o dispositivo fixo eles terão. Desta forma, mais tempo se gasta proporcionalmente para estabelecer as conexões. Portanto, espera-se que

quanto mais rápido, pior o desempenho geral da rede, pois haverá menos tempo para enviar mensagens e maior a chance de perder mensagens.

A quantidade total de mensagens transmitidas por velocidade, ilustrado na figura 4.7. Ao contrário do esperado, não há diferença estatisticamente significativa ao alterar a velocidade (Circular-Centro $p=0,955$, Interbairros I $p=0,477$ e Universidades $p=0,646$), com exceção da linha Rui Barbosa-Pinhais. Esta rota difere das outras pois é a que tem menos curvas. Além da queda acentuada foi observada, também, uma acentuada variação no desvio padrão. A variação na quantidade total de mensagens transmitidas pode chegar até a 7,31%. Os fatores que levaram a esta queda acentuada são descritos na seção 4.5.

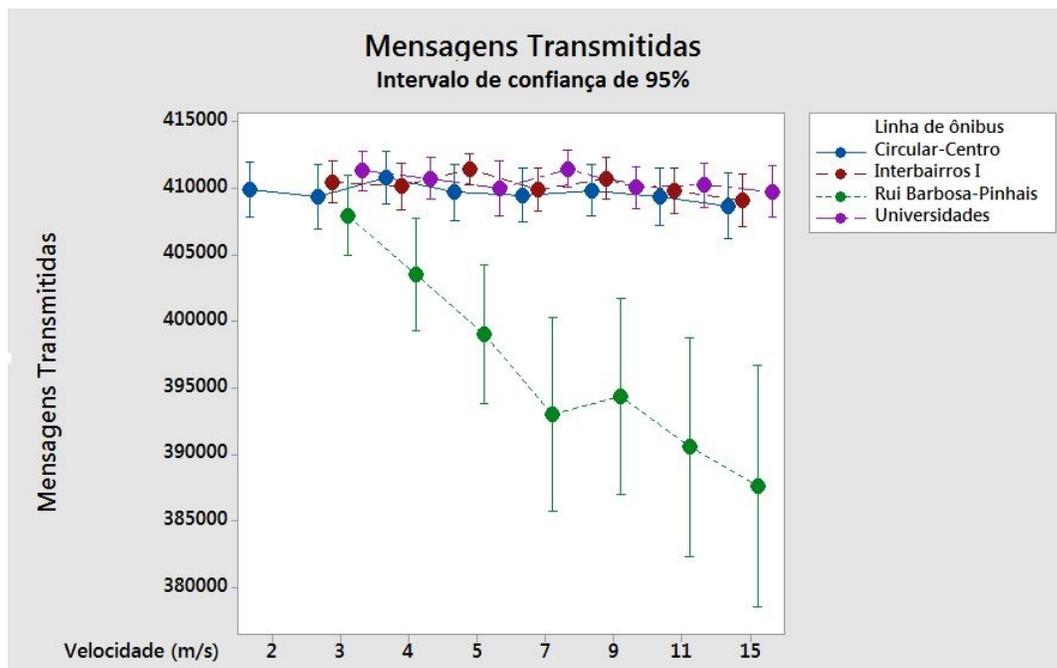


Figura 4.7: Quantidade de mensagens transmitidas por linha.

Conforme esperado quanto maior a velocidade menor a taxa de entrega independente da linha específica, tal fato é apresentado na figura 4.8. A queda verificada é de aproximadamente 0,2%. Pode-se constatar que cerca de 56 KBytes deixaram de ser entregues a cada uma hora, o que não compromete o desempenho geral da rede. Ainda assim, chama a atenção o fato da queda do desempenho ser mais acentuada na linha Rui

Barbosa-Pinhais, tal comportamento é analisado detalhadamente na seção 4.5.

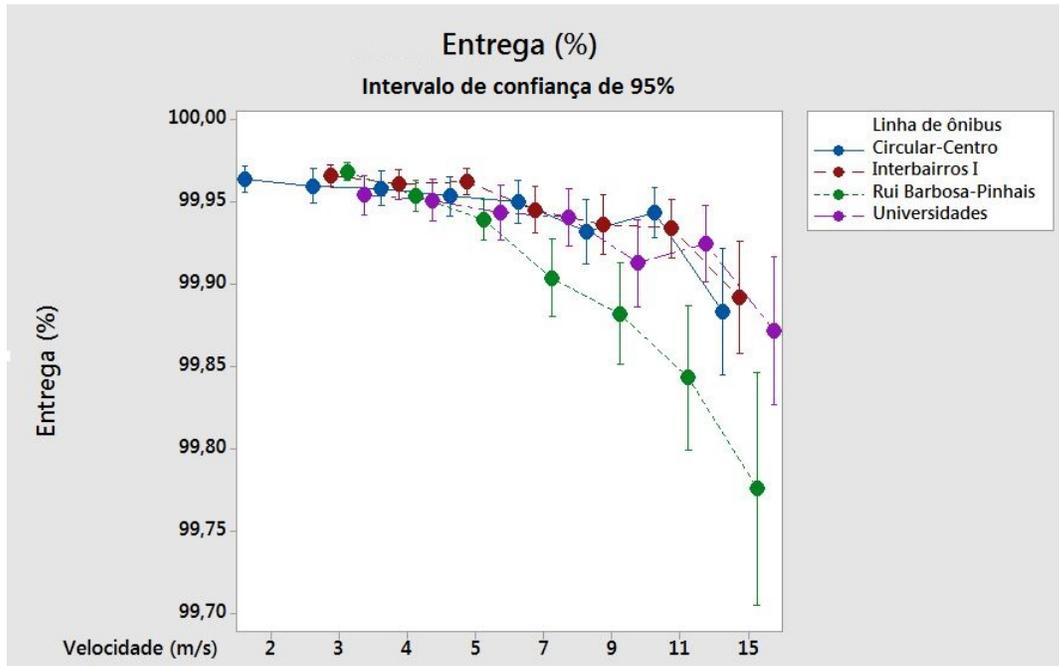


Figura 4.8: Taxa de entrega por linha.

A queda na taxa de entrega se reflete nos resultados referentes à vazão considerando somente mensagens entregues com sucesso, na figura 4.9. Como a taxa de entrega cai, a maior parte das mensagens são entregues por dispositivos mais próximos aos dispositivos com acesso direto à rede externa, portanto foi verificado um acréscimo na vazão. Contudo é importante ressaltar que essa melhora não é significativa, verifica-se uma melhora de somente 3 Kb/s entre o melhor e o pior caso.

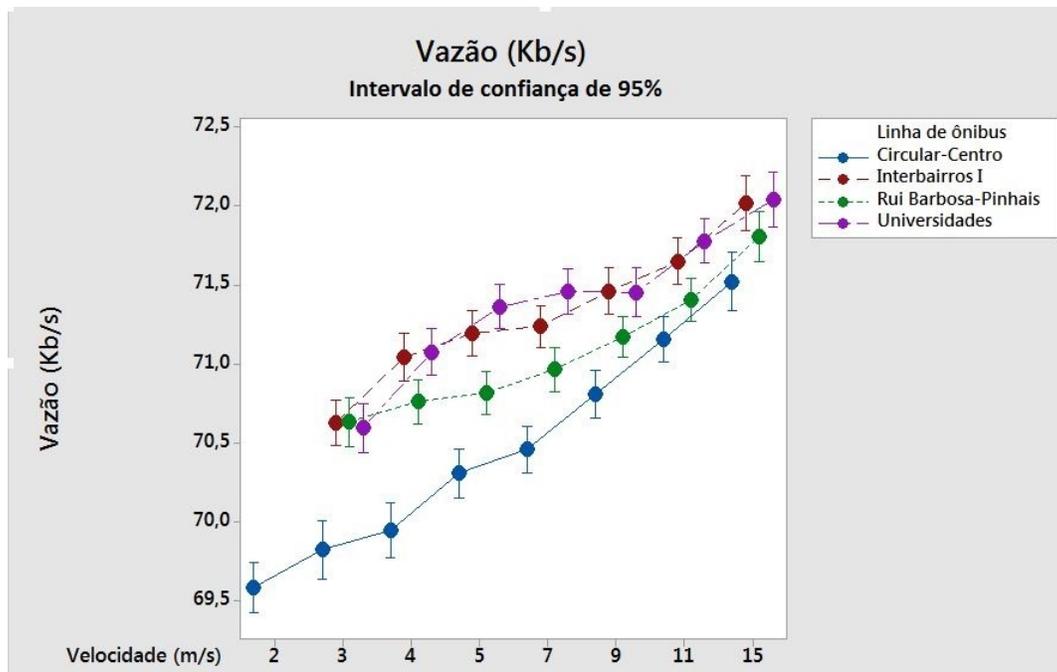


Figura 4.9: Vazão por linha.

4.2 Circular-centro

Entre as linhas avaliadas a Circular-Centro é a mais lenta. Ela circula somente em um trecho restrito da região central da cidade.

Ao aumentar a distância entre os dispositivos, espera-se um menor desempenho, ou seja uma queda na quantidade total de mensagens transmitidas e na taxa de entrega. Assim como ao avaliar a velocidade, quanto menor a distância, menos tempo os ônibus ficam em contato com um dispositivo fixo, portanto mais tempo é usado proporcionalmente para estabelecer a conexão.

Nas figuras 4.10 e 4.11 observa-se que a taxa de entrega e a quantidade de mensagens transmitidas decrescem conforme a distância entre os dispositivos aumenta. Para ambos os fatores verifica-se que só há uma diferença significativa acima de 8 metros. Mesmo assim, a taxa de entrega cai no máximo 0.1%, não sendo significativa. Contudo 20.000 mensagens a menos são entregues no pior caso, em números absolutos isso representa 1,33 MB a menos.

Além disso, observa-se que não há diferença estatisticamente significativa ($p=0,874$) entre as velocidades (nos cenários abaixo, acima e na velocidade média, conforme a Tabela 4.3).

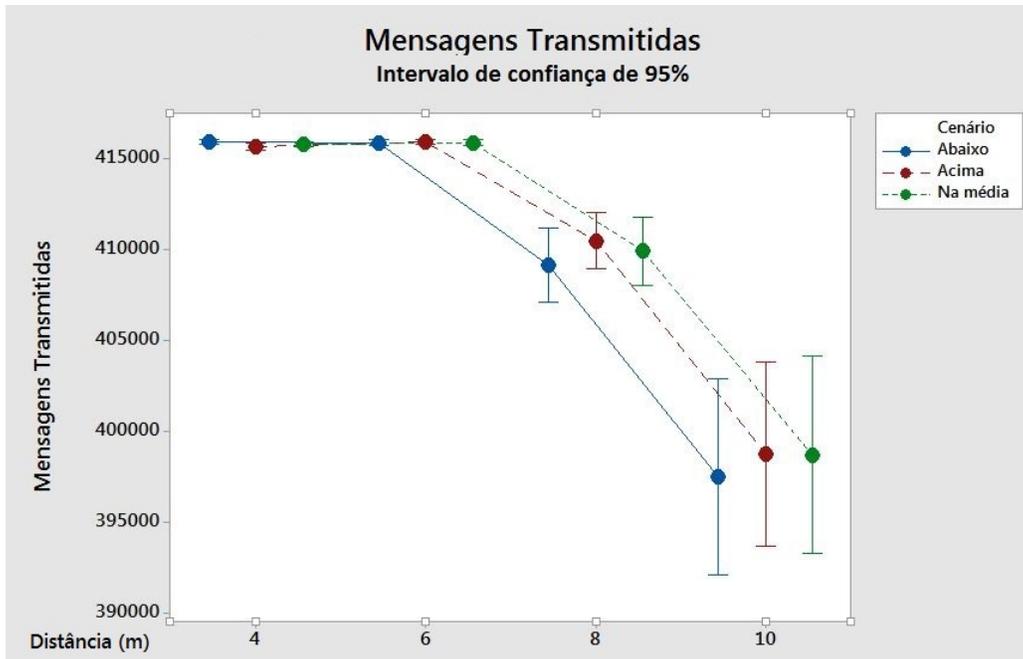


Figura 4.10: Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Circular-Centro

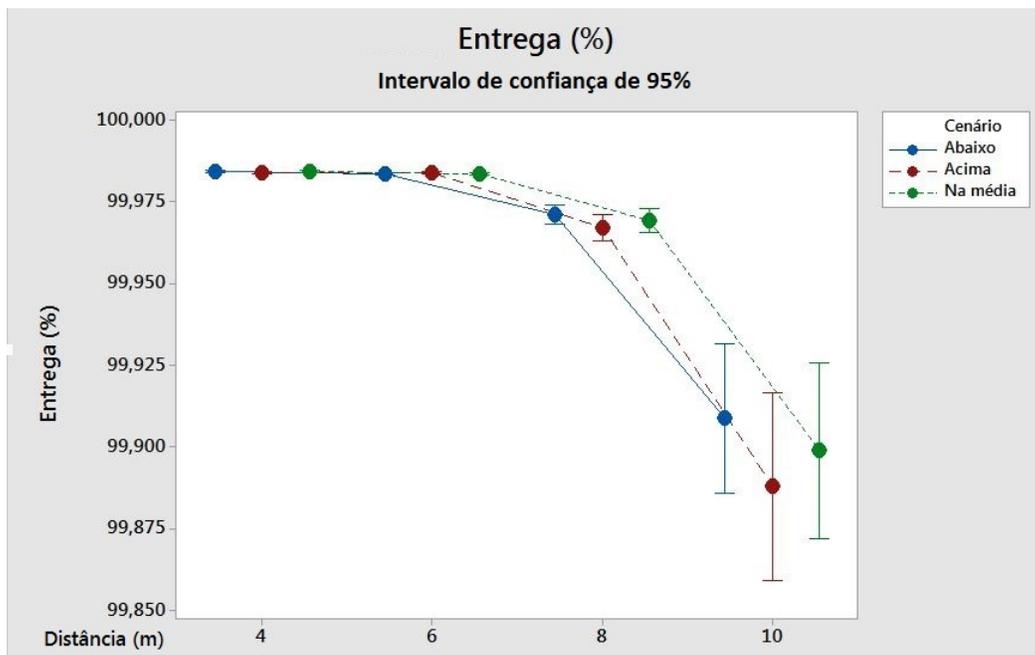


Figura 4.11: Taxa de entrega pela distância na linha Circular-Centro

Assim como na seção 4.1, onde foi avaliado o impacto da velocidade, observa-se que a vazão (figura 4.12) também é superior quanto maior a velocidade, contudo essa diferença é de somente 1.5 Kb/s no pior cenário, esta diferença não é significativa para as aplicações que pretendem utilizar esta rede. Além disso, foi constatado que a variação da distância não impacta a vazão de forma estatisticamente significativa ($p=0,744$).

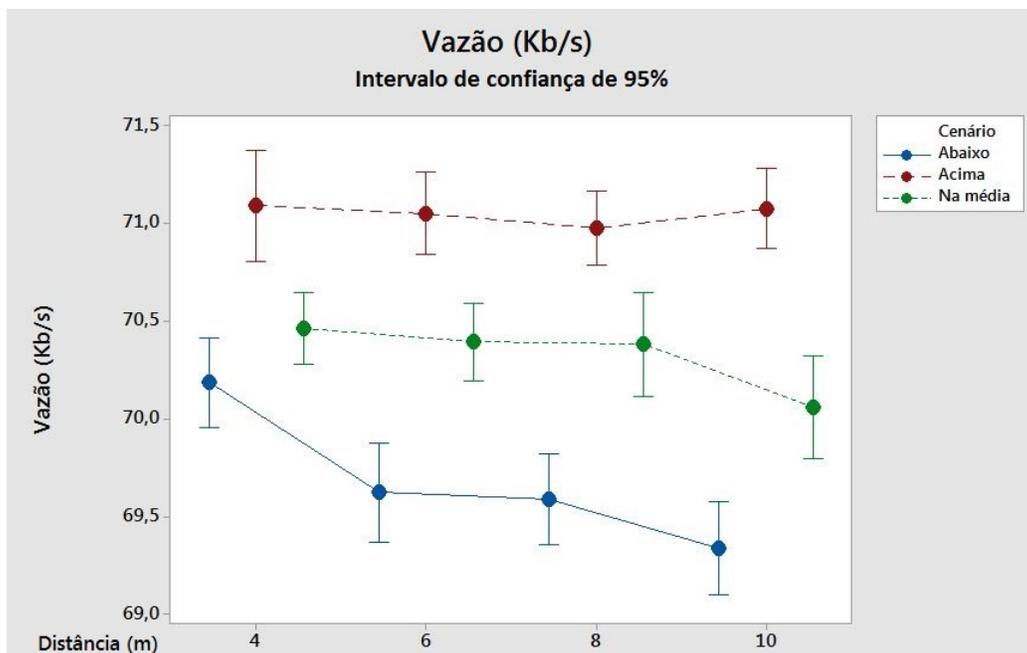


Figura 4.12: Vazão pela distância na linha Circular-Centro

Assim como ao alterar o espaçamento, quanto maior a quantidade de saltos menor o desempenho da rede. Quanto maior a quantidade de saltos necessários, mais tempo se gasta para estabelecer uma conexão, por consequência menos tempo se tem para enviar dados, e maior é a chance de perder alguma mensagem entre as retransmissões.

Na quantidade total de mensagens e na taxa de entrega, figuras 4.13 e 4.14, verifica-se uma diferença estatisticamente significativa ($p<0,001$) quando a quantidade de saltos é superior a 8, além disso a queda se torna mais acentuada quando é igual a 13 saltos. Contudo, não foi observada diferença estatística entre os três cenários analisados.

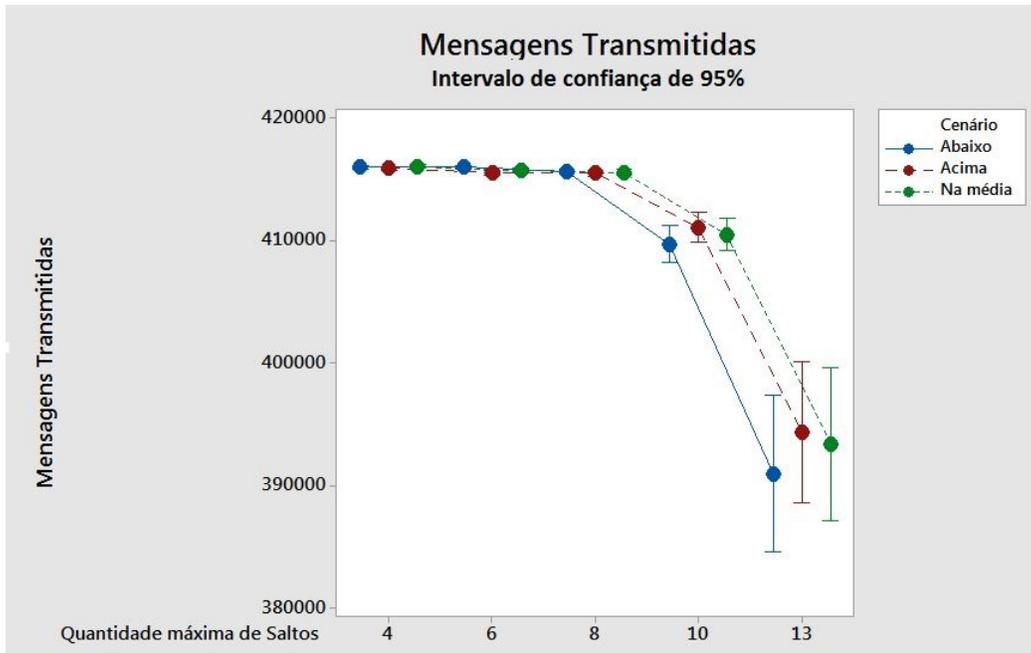


Figura 4.13: Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Circular-Centro

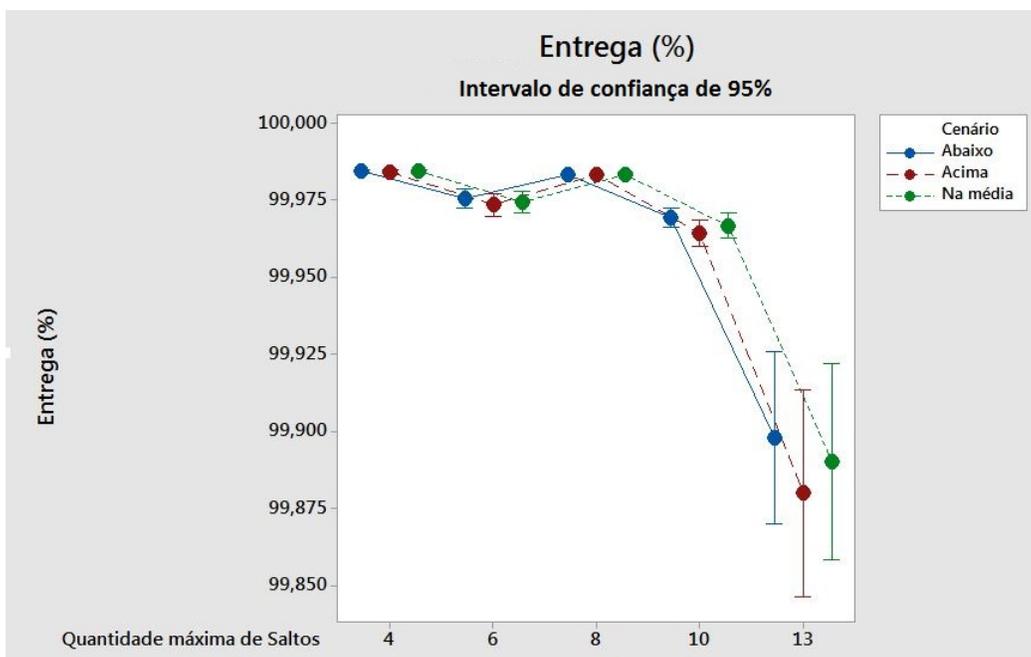


Figura 4.14: Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Circular-Centro

Devido à maior quantidade de saltos utilizados, observou-se uma leve tendência de queda da vazão na figura 4.15 . Contudo como o ônibus está em constante movimento, a

diferença apresentada não foi estatisticamente significativa ($p=0,692$).

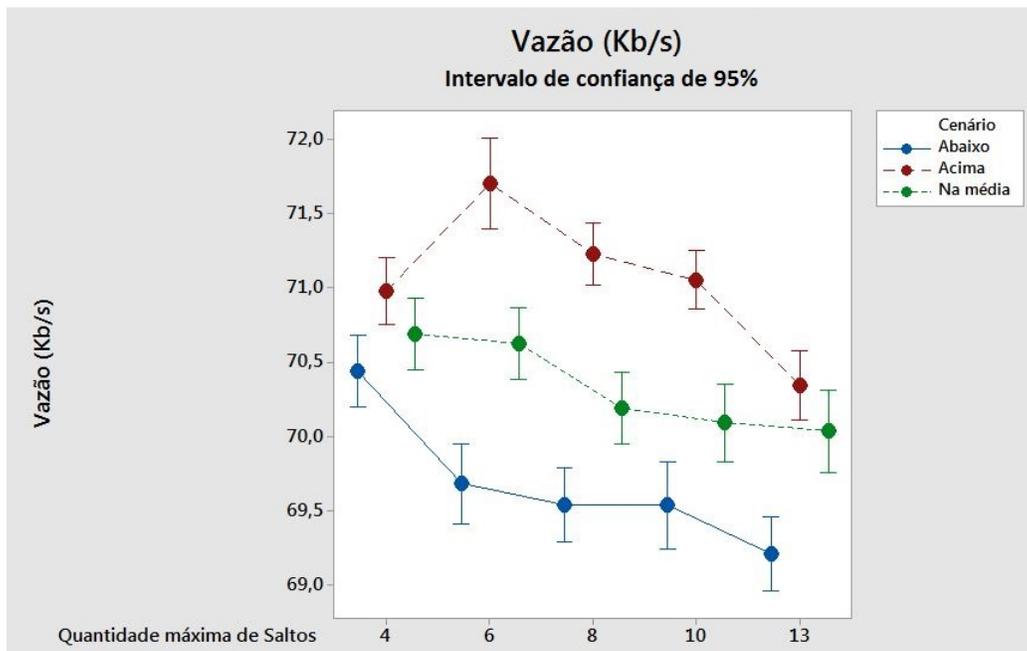


Figura 4.15: Vazão pela quantidade total de saltos na linha Circular-Centro

4.2.1 Infraestrutura necessária

Conforme os resultados que foram apresentados nesta seção, quanto maior a distância e a quantidade máxima de saltos utilizados, pior o desempenho da rede. Além disso constatou-se que para as velocidades analisadas, não houve diferença significativa. Portanto, para otimizar os recursos sugere-se a utilização da distância máxima entre os dispositivos de 10 metros e 10 saltos entre os dispositivos até um ponto de acesso à Internet, devido à queda acentuada quando a quantidade de saltos é igual a 13. Desta forma, são necessários 448 dispositivos no total e 22 pontos de acesso à Internet para prover uma infraestrutura eficiente para a linha Circular-Centro.

4.3 Universidades

A linha de ônibus Universidades liga bairros e terminais ao centro da cidade utilizando vias compartilhadas, portanto a velocidade média da linha é superior a linha Circular-Centro. Contudo um comportamento mais próximo a linha Circular-Centro é esperado nos trechos centrais da cidade. Na realização dos testes tais variações de velocidade foram ignoradas, utilizando-se somente a velocidades média da linha.

Assim como a linha Circular-Centro quando a distância é alterada (seção 4.2), foi constatado o mesmo comportamento com relação a taxa de entrega e a quantidade total de mensagens transmitidas (figuras 4.16 e 4.17). A vazão média é apresentada na figura 4.18 e ao contrário da linha Circular-Centro verifica-se uma tendência de queda de vazão, conforme se aumenta a distância entre os dispositivos, figura 4.19. Contudo a queda não impacta o desempenho geral da rede, pois a variação máxima de vazão observada foi de 1.5 Kb/s.

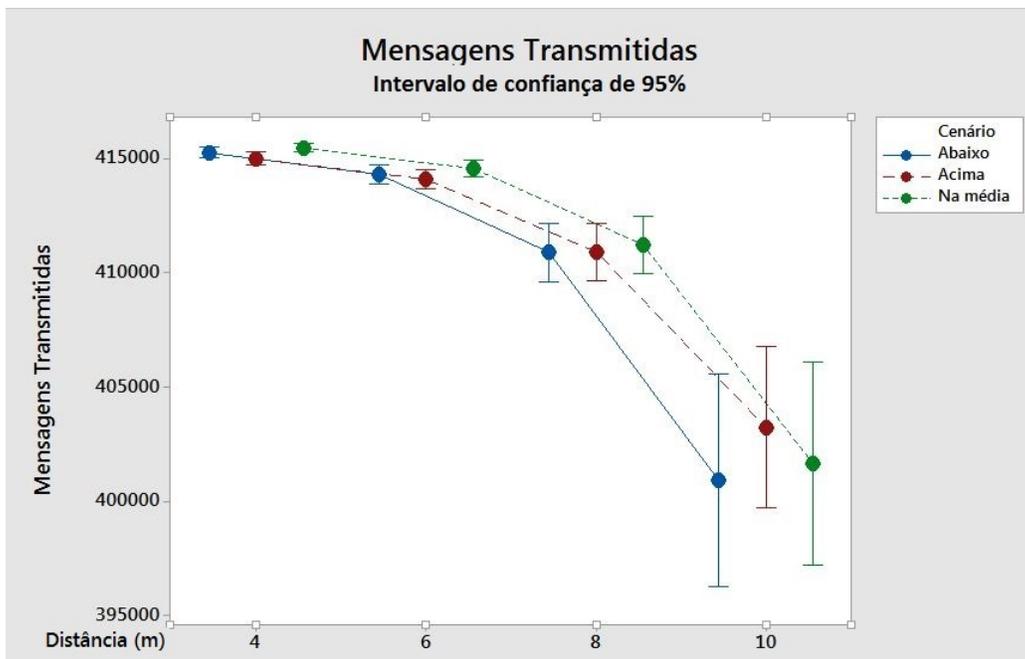


Figura 4.16: Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Universidades

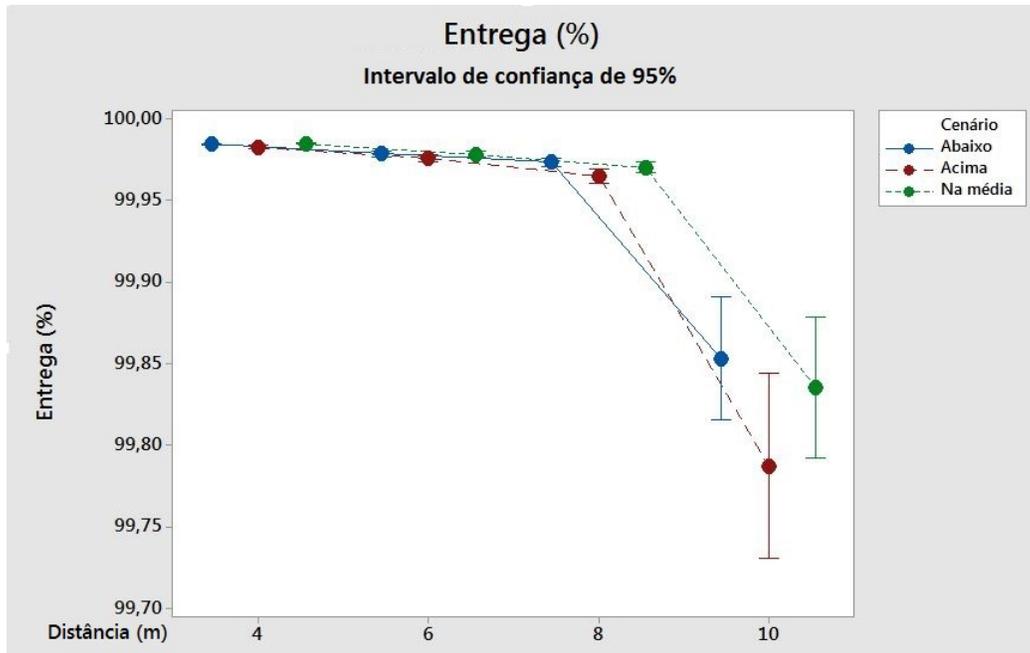


Figura 4.17: Taxa de entrega pela distância na linha Universidades

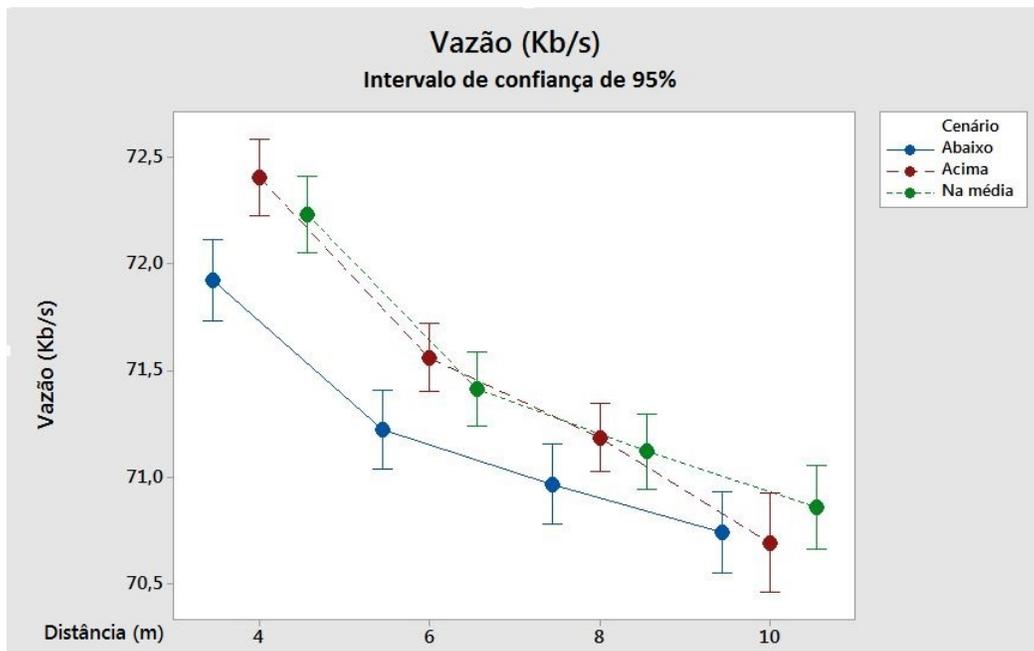


Figura 4.18: Vazão pela distância na linha Universidades

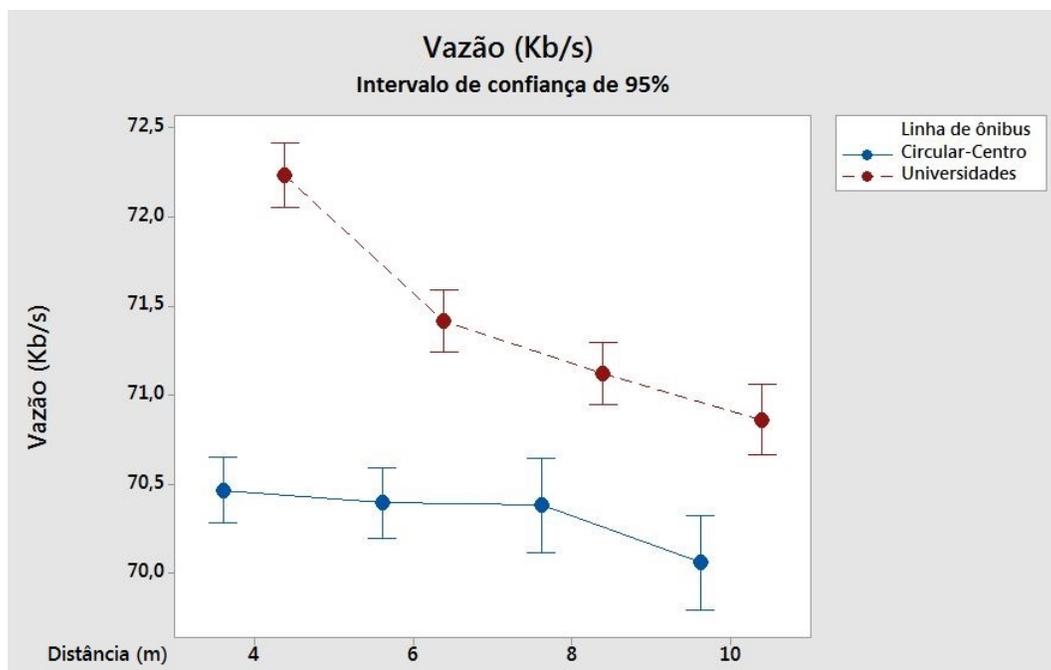


Figura 4.19: Vazão pela distância na linha Universidades e Circular-Centro utilizando a velocidade média

Ao analisar a quantidade total de mensagens transmitidas pela variação da quantidade máxima e saltos (figura 4.20), constatou-se novamente um comportamento similar a linha Circular-Centro, contudo um desempenho superior quando a quantidade máxima de saltos é igual a 10 foi observado, mas não de forma significativa ($p < 0,001$). Já com relação a taxa de entrega (figura 4.21) notou-se uma queda mais acentuada de desempenho a partir de 10 saltos, figura 4.22. Tal queda chega até a 0.1%, não impactando o comportamento geral da rede.

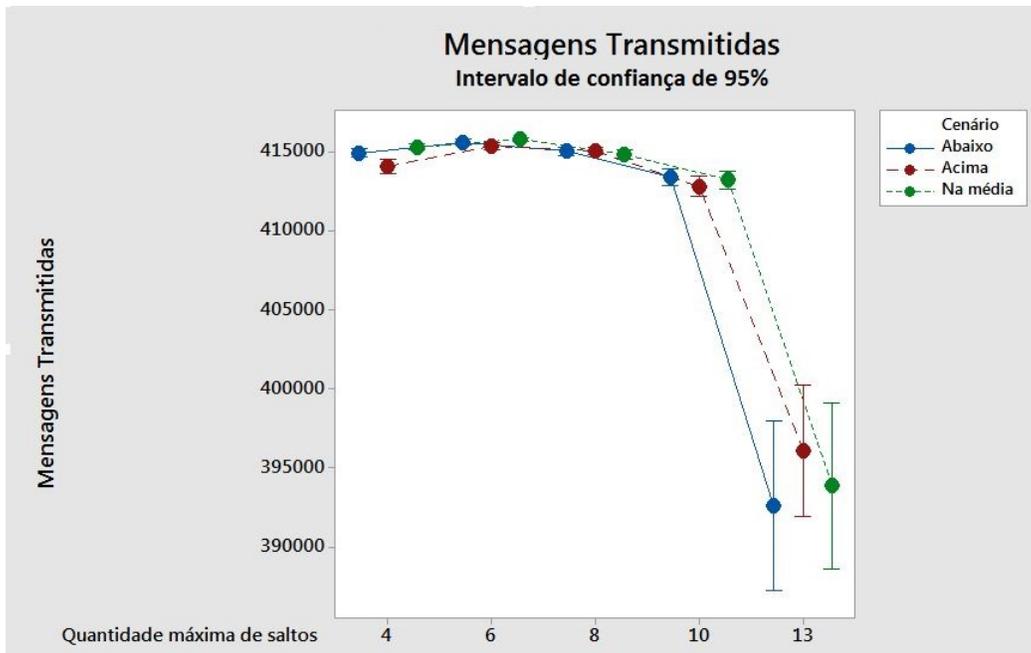


Figura 4.20: Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Universidades

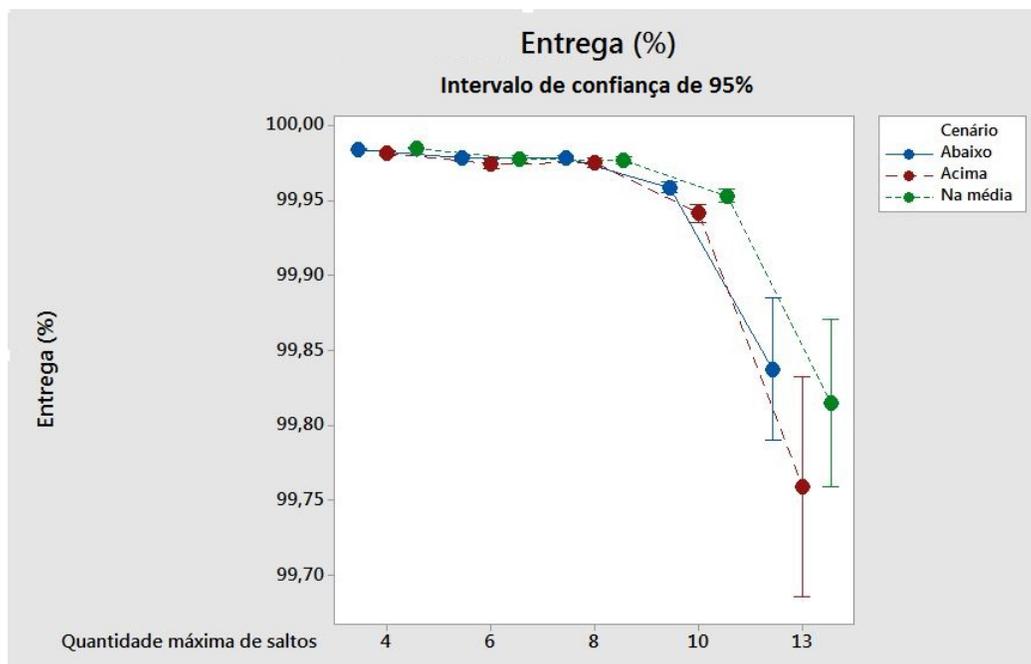


Figura 4.21: Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Universidades

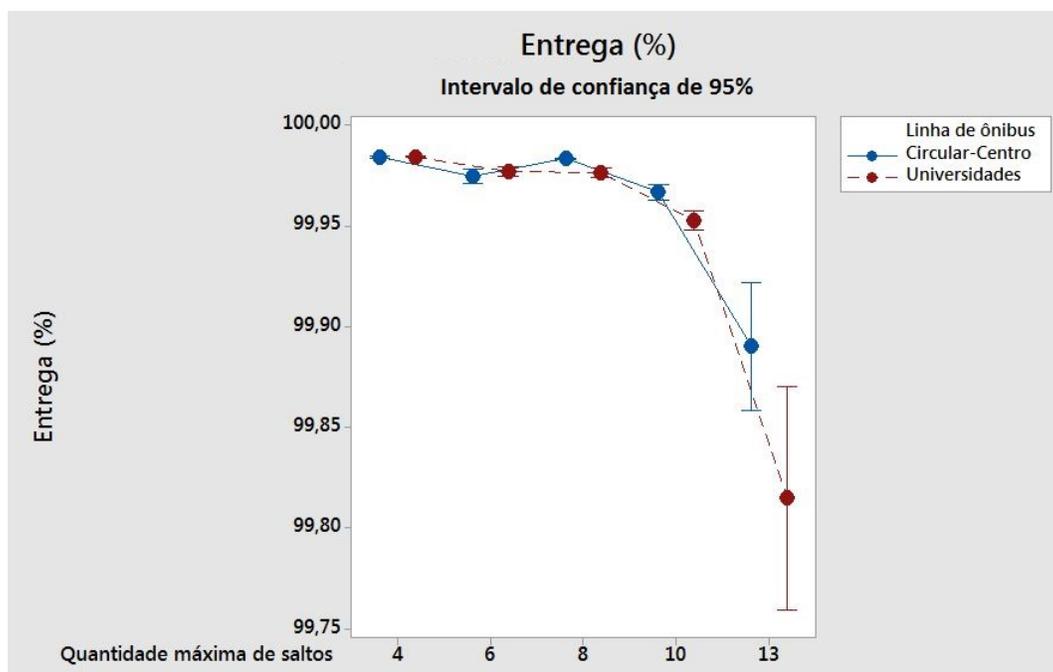


Figura 4.22: Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Universidades e Circular-Centro utilizando a velocidade média

Por fim ao analisar a vazão obtida pela variação da quantidade máxima de saltos utilizadas, observou-se um desempenho inferior, conforme a figura 4.24, se comparado com a linha Circular-Centro. No pior cenário a queda chega a 2 Kb/s, tal resultado ainda não é considerado significativo para as aplicações que se pretende atender.

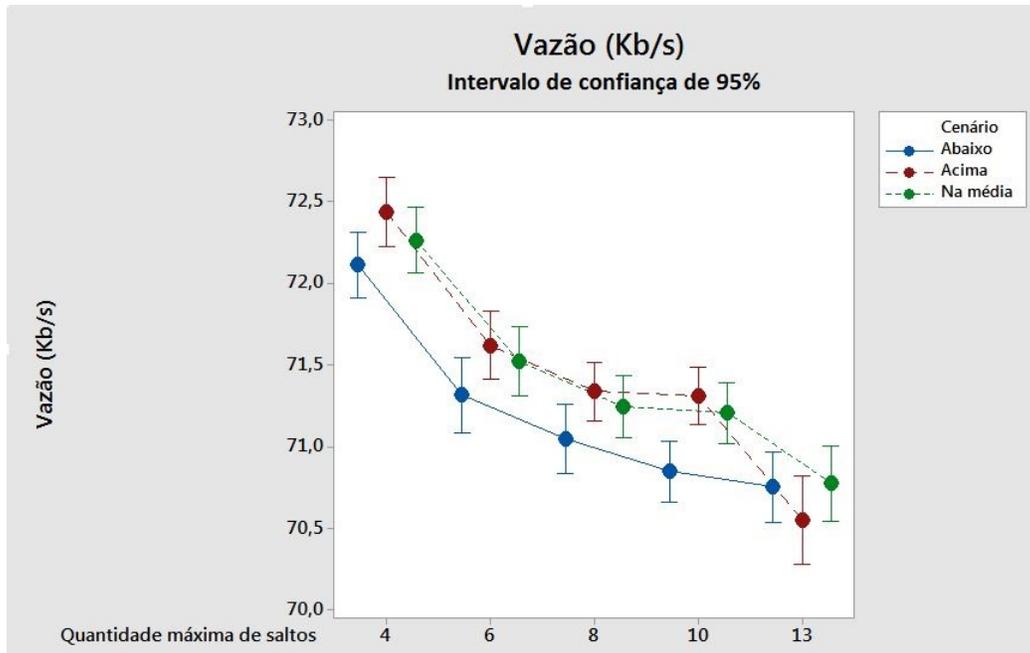


Figura 4.23: Vazão pela quantidade total de saltos na linha Universidades

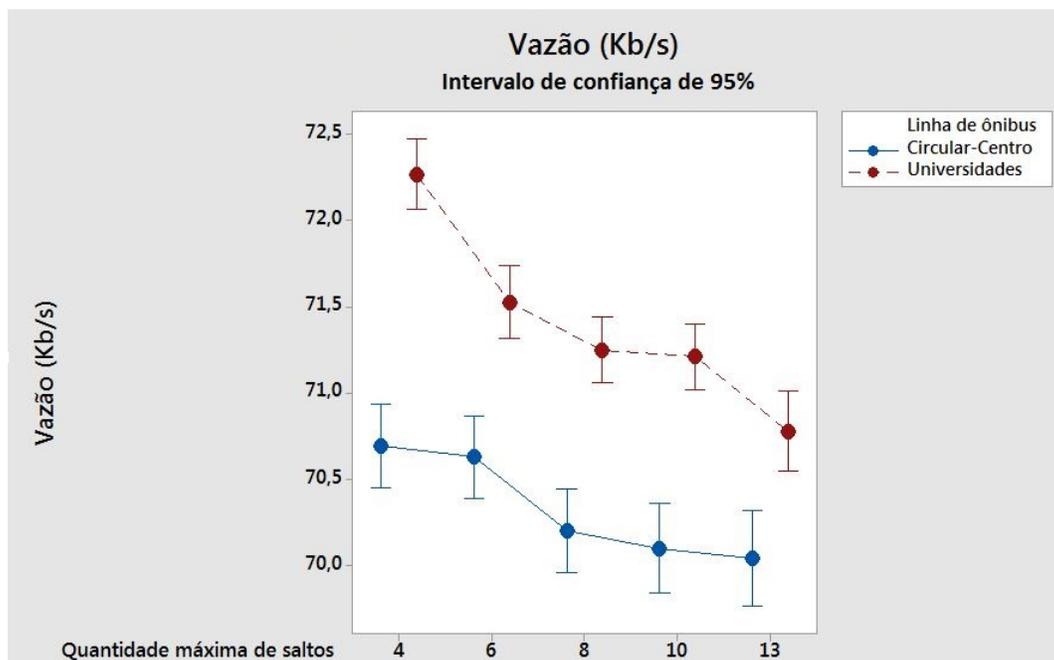


Figura 4.24: Vazão pela quantidade total de saltos na linha Universidades e Circular-Centro utilizando a velocidade média

4.3.1 Infraestrutura necessária

Devido a queda de desempenho acentuado quando a quantidade de máximo de saltos é igual a 13 e a distância é igual a 10 metros observa-se que a rede é mais eficiente ao utilizar 10 saltos de distância com a implementação de dispositivos cada 8 metros. Sendo assim, seriam necessários 2059 dispositivos e 99 pontos de acesso a Internet, conforme a tabela 4.2.

4.4 Interbairros I

As linhas do tipo Interbairros ligam bairros evitando o centro da cidade, portanto a velocidade média dos ônibus nesta linha são superiores a linha Circular-Centro. Portanto, espera-se que o comportamento seja similar as outras duas linhas apresentadas.

Ao analisar como a variação da distância entre os dispositivos impacta o desempenho da rede, verificou-se que a quantidade total de mensagens (figura 4.25), a taxa de entrega (figura 4.29) e vazão (4.30) apresentaram o mesmo comportamento que as linhas Circular-Centro e Universidade.

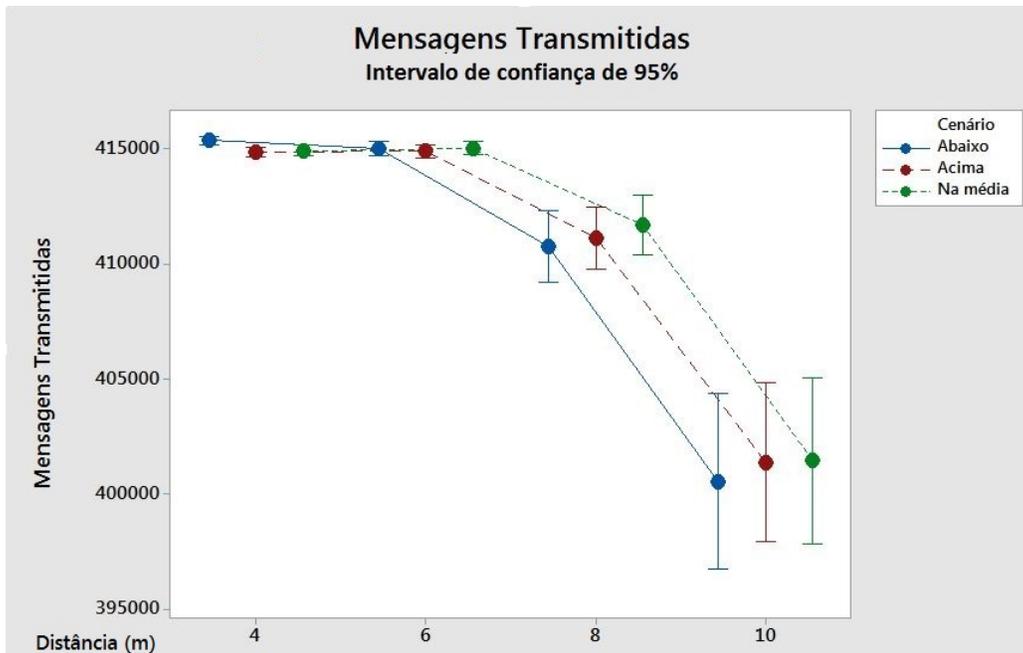


Figura 4.25: Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Interbairros I

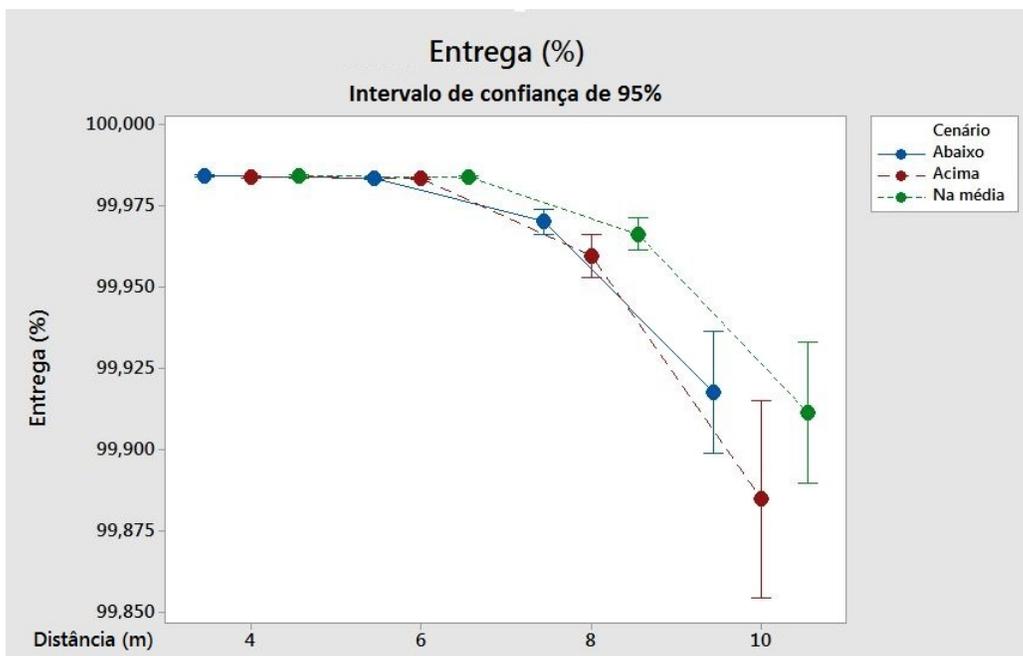


Figura 4.26: Taxa de entrega pela distância na linha Interbairros I

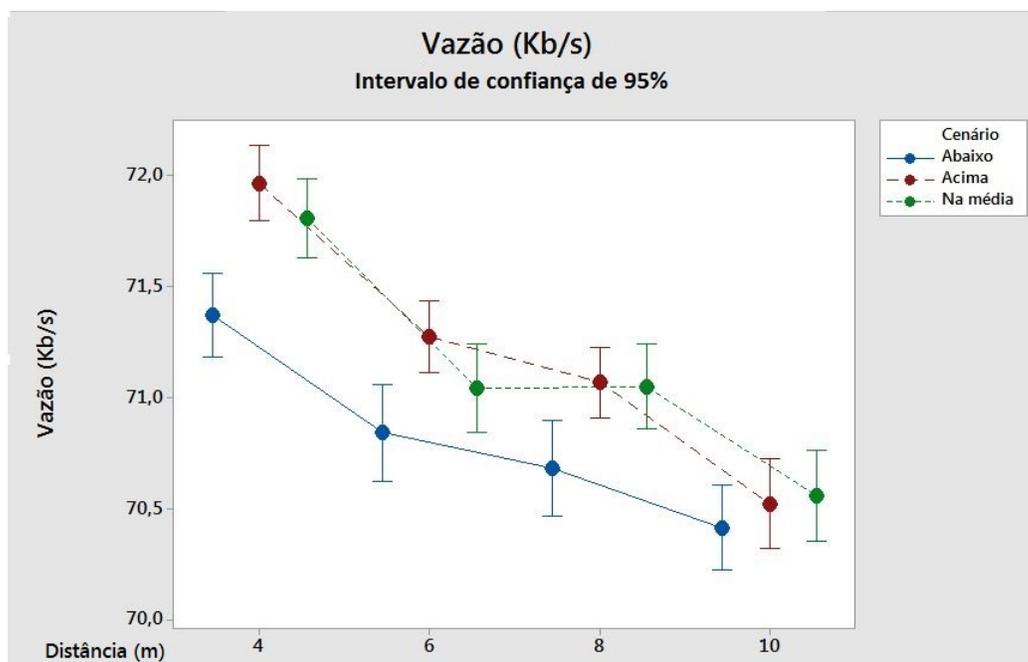


Figura 4.27: Vazão pela distância na linha Interbairros I

Assim como observado anteriormente, ao variar a distância entre os dispositivos, quando analisado os impactos da mudança na quantidade de saltos máxima utilizada, não foi constatada nenhuma variação significativa se comparado com as outras linhas analisadas. Na figura 4.28, estão os dados obtidos com relação a quantidade total de mensagens transmitidas. Sua respectiva taxa de entrega pode ser observada na figura 4.29. Por fim na figura 4.30 são apresentados os valores referentes a vazão obtida.

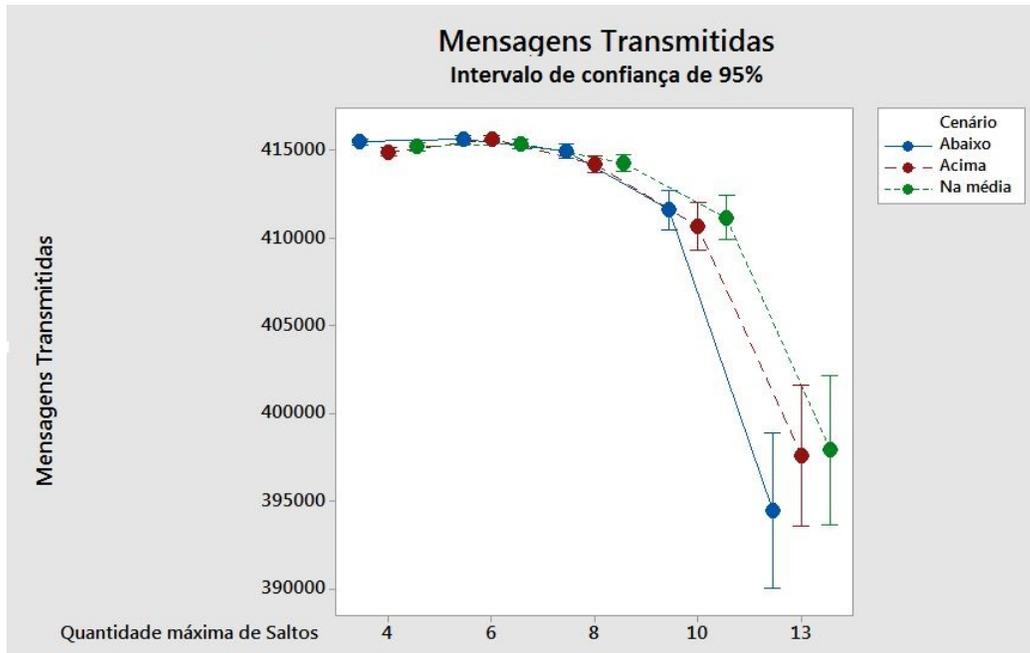


Figura 4.28: Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Interbairros I

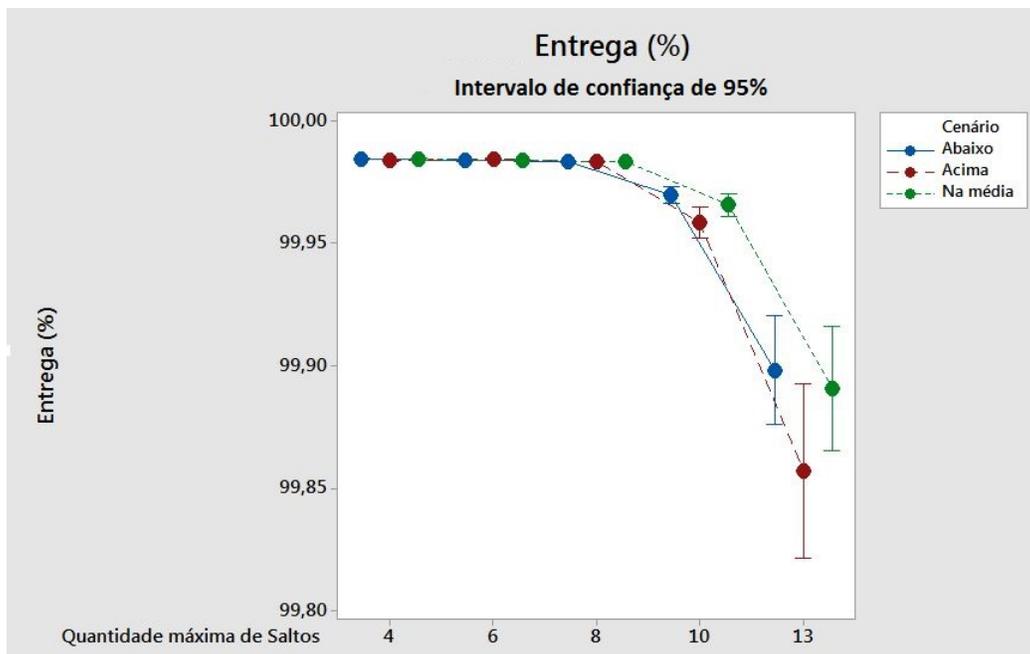


Figura 4.29: Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Interbairros I

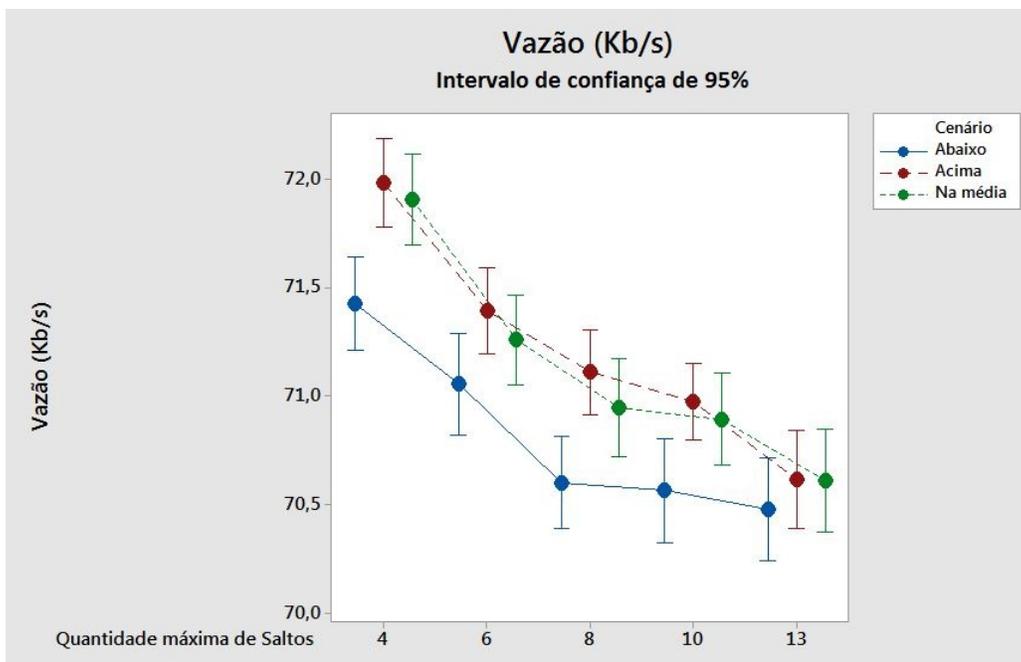


Figura 4.30: Vazão pela quantidade total de saltos na linha Interbairros I

4.4.1 Infraestrutura necessária

Assim como nas outras linhas simuladas, o desempenho obtido ao simular com 13 saltos de distância e 10 metros de espaçamento entre os dispositivos ainda é significativamente pior que as demais. Portanto, os recursos são otimizados utilizando a quantidade máxima de saltos entre dispositivos é de até 10 metros e dispositivos são separados por 8 metros. Desta forma, seriam necessários 2022 dispositivo sendo que 97 deles devem ter acesso a Internet.

4.5 Rui Barbosa-Pinhais

A linha Rui Barbosa-Pinhais tem uma velocidade mais constante por se tratar de uma linha expressa, ou seja os ônibus desta linha trafegam por faixas exclusivas. Diferente das outras linhas ela contém poucas curvas em sua rota total.

Devido aos resultados discrepantes apresentados na seção 4.1, tem-se a necessidade de

analisar a variação da distância e da quantidade de saltos necessários em conjunto com o objetivo de encontrar quais cenários específicos causam a piora do desempenho, conforme se aumenta a velocidade. Na figura 4.31 são apresentadas a variação da quantidade total mensagens transmitidas, pela quantidade de saltos, englobando todos as simulações com as velocidades médias entre 4 e 9 m/s. Nela se observa que o desempenho cai abruptamente quando a quantidade de saltos é igual a 13 e a distância entre os dispositivos é 10 metros. Nos outros cenários não se percebe nenhuma alteração extremamente significativa. Como observado na figura 4.7, tal tendência de queda se intensifica conforme a velocidade aumenta. Devido ao baixo desempenho apresentado neste cenários este foi removido das análises futuras, para evitar distorções na análise dos resultados.

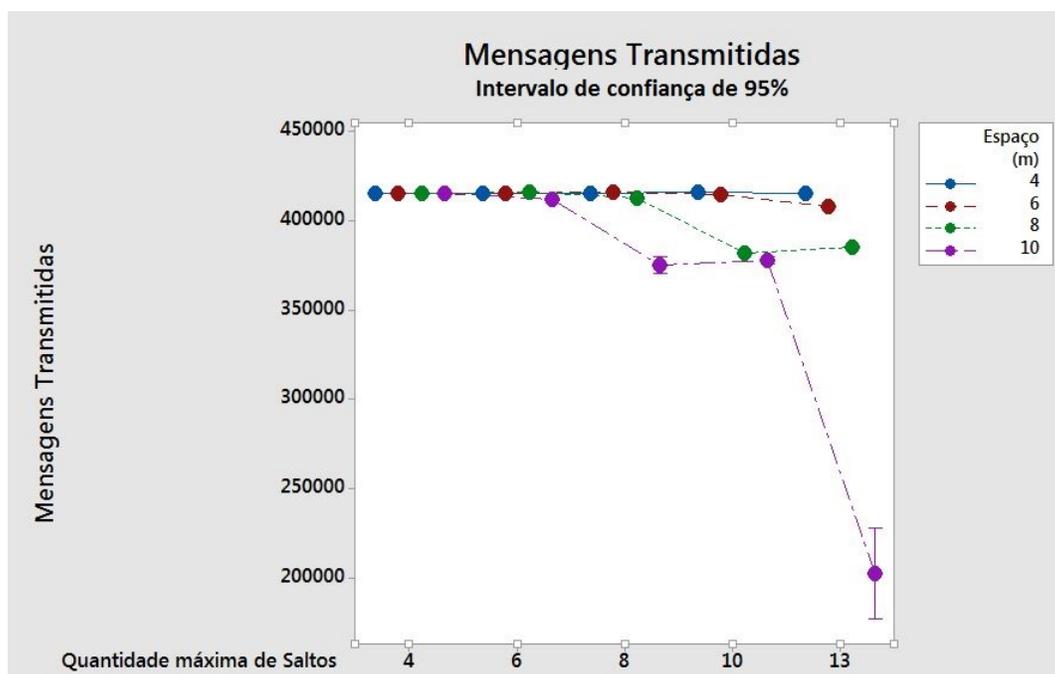


Figura 4.31: Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade de saltos e distância entre os dispositivos com a velocidade média entre 4 e 9 m/s na linha Rui Barbosa - Pinhais

Na figura 4.32, são apresentadas as variações da quantidade total de mensagens transmitidas. Ao comparar esse resultado com os equivalentes das outras linhas já apresentadas, observa-se uma leve queda da quantidade de mensagens transmitidas, cerca

de 0.25%, conforme figura 4.33. Ao verificar a taxa de entrega obtida na figura 4.34, nota-se um comportamento similar as outras linhas, com exceção de quando a distância é igual a 10 metros, na qual ela se mantém estável enquanto as outras mostram uma tendência de queda.

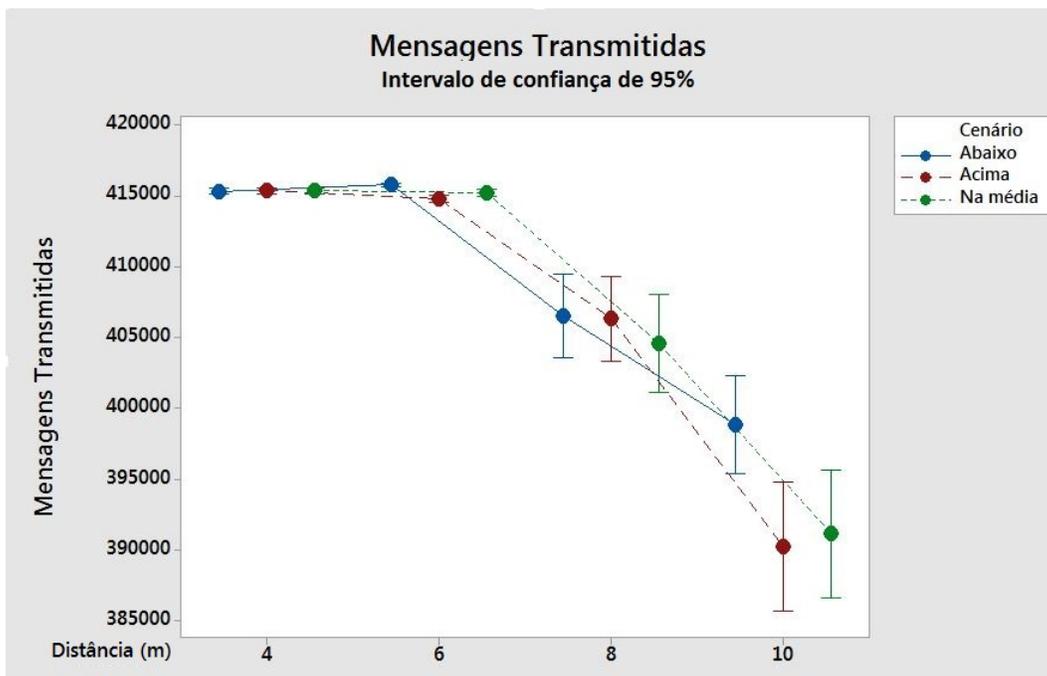


Figura 4.32: Quantidade de mensagens transmitidas pela distância na linha Rui Barbosa-Pinhais

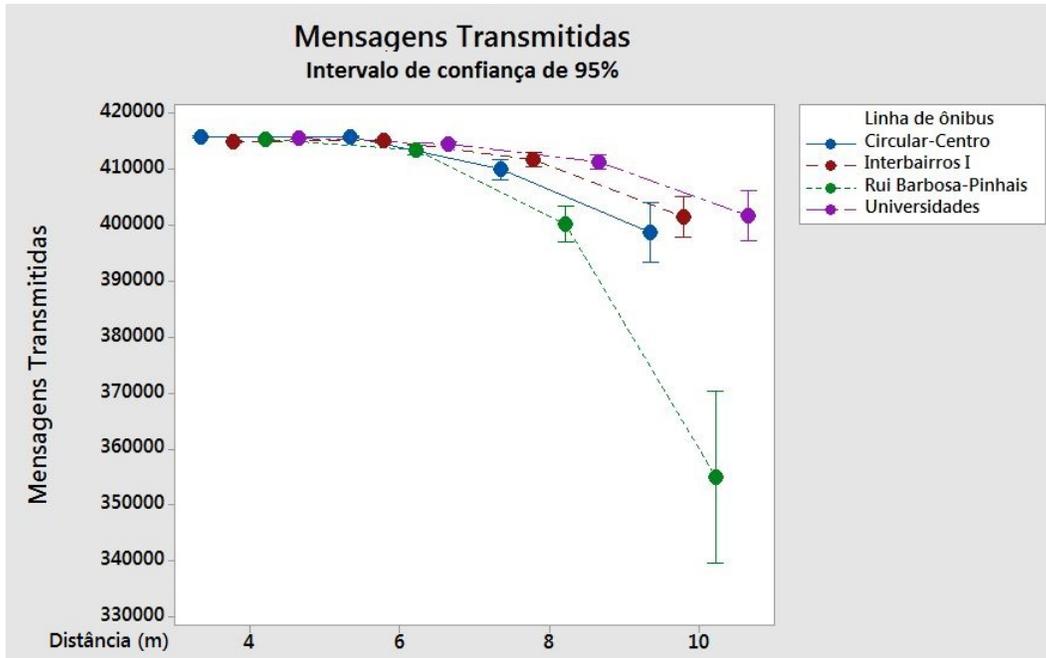


Figura 4.33: Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade de saltos e distância entre os dispositivos com a velocidade média pela linha de ônibus.

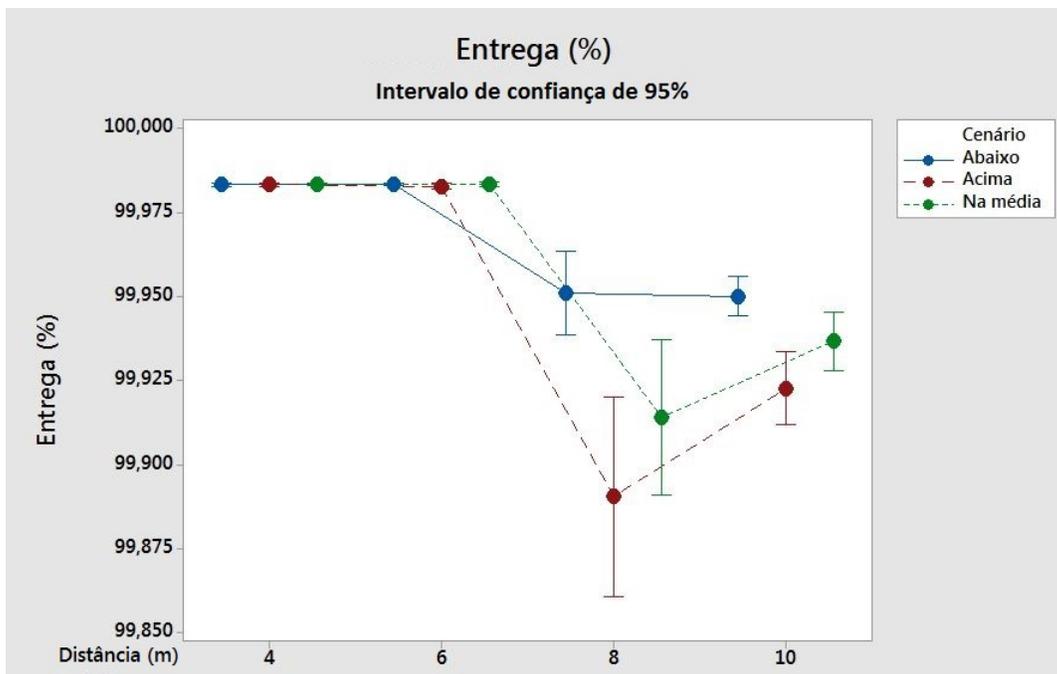


Figura 4.34: Taxa de entrega pela distância na linha Rui Barbosa-Pinhais

Os resultados obtidos ao observar a vazão média caem conforme aumenta a distância

entre os dispositivos, na figura 4.35. A aparente melhora ao verificar o cenário utilizando a velocidade média acima da atual e distância igual a 10 metros, é um reflexo do aumento da taxa de entrega e da diminuição da quantidade total de mensagens entregues, neste caso, a maioria das mensagens foram entregues por dispositivos mais próximos. Este fato, levou a essa aparente melhora, contudo a rede foi subutilizada por dispositivos mais distantes.

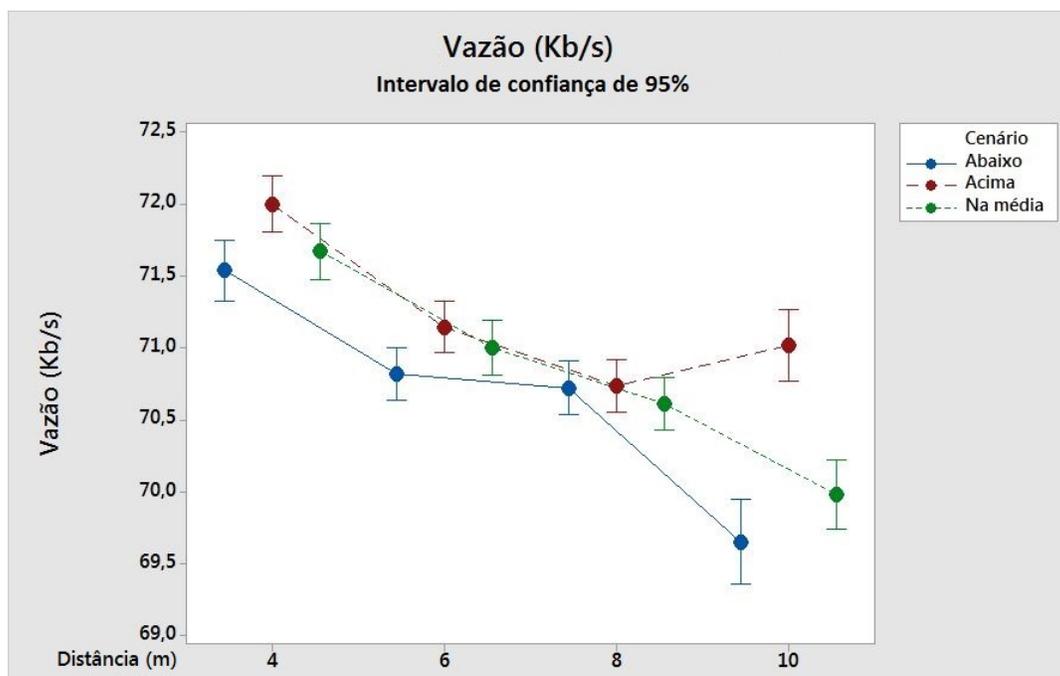


Figura 4.35: Vazão pela distância na linha Rui Barbosa-Pinhais

Ao verificar os resultados quando se altera a quantidade máxima de saltos, foram retirados os cenários nos quais a distância é igual a 10. A figura 4.36 é referente a quantidade total de mensagens transmitidas, observou-se uma queda de desempenho quando a distância é igual a 8 metros. Já a taxa de entrega e a vazão, nas figuras 4.37 e 4.38, apresentaram um comportamento similar as demais linhas, ambas caem conforme se aumenta a quantidade máxima de saltos utilizados.

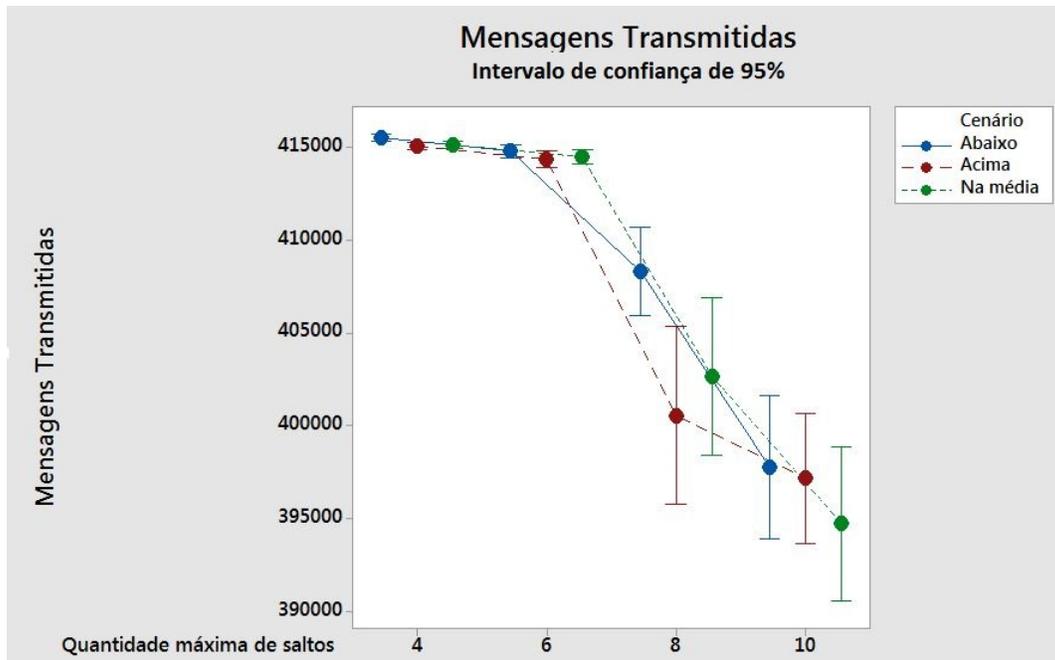


Figura 4.36: Quantidade de mensagens transmitidas pela quantidade total de saltos na linha Rui Barbosa-Pinhais

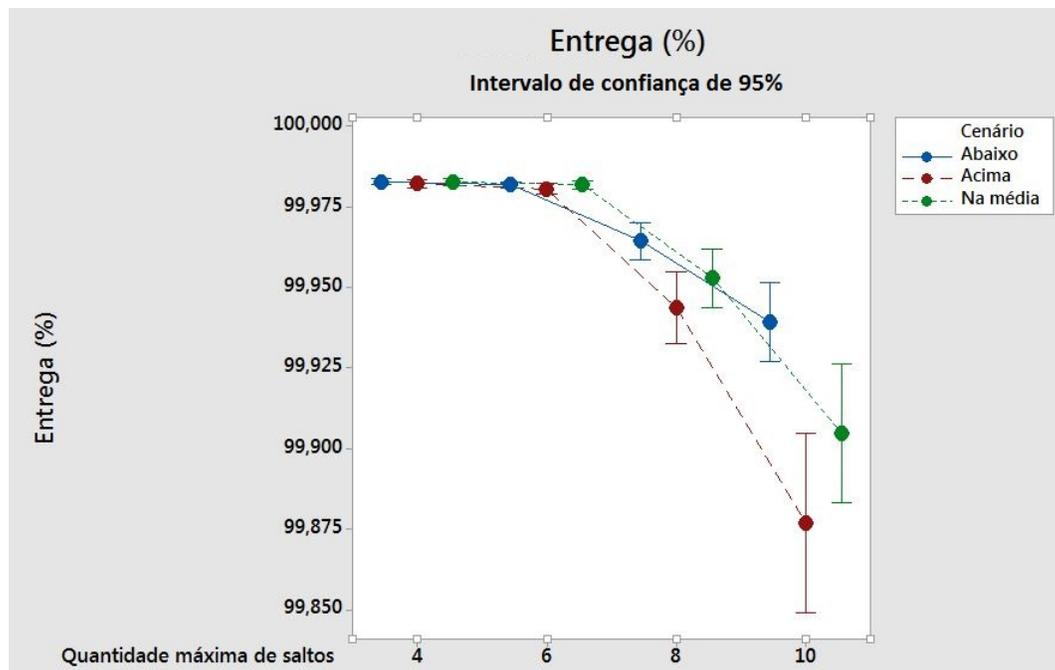


Figura 4.37: Taxa de entrega pela quantidade total de saltos na linha Rui Barbosa-Pinhais

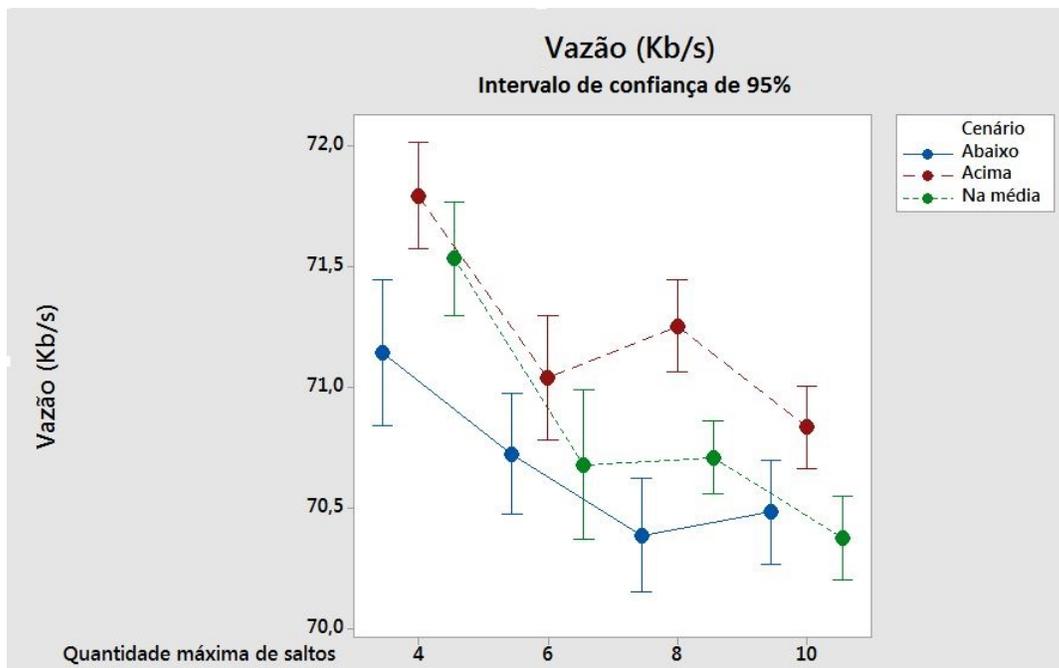


Figura 4.38: Vazão pela quantidade total de saltos na linha Rui Barbosa-Pinhais

4.5.1 Infraestrutura necessária

Novamente foi constatado que quanto menor a quantidade de saltos e espaçamento melhor o desempenho. Contudo uma queda abrupta foi observada no cenário onde a distância é igual a 10 e quantidade máxima de saltos de 13. Além disso, nesta linha de ônibus, foi observada uma queda mais acentuada, quando a quantidade de saltos é igual a 10. Levando em conta a quantidade de pessoas transportadas nesta linha, portanto sua criticidade, sugere-se para implementar dispositivos a cada 8 metros e no máximo 6 saltos entre o dispositivo mais distante ao ponto de acesso. Com isso são necessários 1352 dispositivos e 80 pontos com Internet.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O crescimento desenfreado das metrópoles combinado com a falta de planejamento no último século causa prejuízo as indústrias e queda de qualidade de vida de todos os habitantes. Com o objetivo de usar a tecnologia existente para minimizar os problemas surgiu o conceito de cidades inteligentes.

Um dos problemas específicos que se deseja minimizar é o trânsito desordenado e ineficiente das grandes cidades por meio das cidades inteligentes, baseada em Internet das Coisas. As aplicações idealizadas serão capazes, de em tempo real, disponibilizar as melhores rotas de deslocamento e manter os usuários do transporte público informados sobre a localização dos veículos, reduzindo o tempo de espera. Contudo é preciso uma nova infraestrutura para suportar tais aplicações. Neste trabalho foi projetada a infraestrutura necessária para atender o sistema público de transporte em Curitiba, com o objetivo de comprovar sua viabilidade técnica e financeira.

Outras infraestruturas propostas, visto na seção 2, são normalmente baseadas em tecnologia GPRS em cenários móveis. A infraestrutura proposta baseada em IoT, pode ser facilmente expandida e não depende única e exclusivamente das operadoras de telefonia. O acesso à internet pode ser concedido através de cabeamento físico.

Além disso, a infraestrutura baseada em IoT abre as portas para diversos tipos de aplicações, não somente na área de mobilidade urbana, mas de qualquer natureza. Como por exemplo, essa infraestrutura poderia ser combinada com o sensor de detecção de disparos de armas de fogo utilizada em Redwood City, EUA, seção 1, e desta forma ajudar o combate a criminalidade.

Para determinar a infraestrutura mais otimizada, foram executados testes com diversas

variações da infraestrutura necessária e os resultados mostram que sua implementação é possível e que o trajeto da linha impacta pouco na sua viabilidade. É possível observar um comportamento similar para todas as linhas independentemente da velocidade média de cada linha específica.

Pode-se afirmar conforme testes realizados que em todos os casos analisados quanto menos saltos forem utilizados e quando menor a distância entre os dispositivos melhor o desempenho. No entanto ao analisar o custo X benefício, é possível constatar que outras variações são aproximadamente equivalentes para as aplicações que pretendem utilizar tal infraestrutura.

Portanto é sugerida a implementação da rede utilizando os seguintes parâmetros, como na seção 4.

Linha	Distância entre dispositivos (m)	Quantidade de saltos	Quantidade de dispositivos necessários	Quantidade de dispositivos com Internet
Circular-Centro	10	10	448	22
Universidades	8	10	2059	99
Interbairros I	8	10	2022	97
Rui Barbosa Pinhais	8	6	1352	80
Total			5881	298

Tabela 5.1: Valores sugeridos para as linhas analisadas.

Alguns resultados secundários também foram obtidos através de testes iniciais utilizando uma rede estática. Foi verificada a eficiência dos protocolos de roteamento, transporte e aplicação, se eles atingem a mínima demanda exigida pelas aplicações sem comprometer a utilização da rede.

- Devido à alta mobilidade dos dispositivos que compõe essa rede, não é possível utilizar os protocolos de roteamento convencionais de rede sem fio como o AODV, AOMDV e DSDV, conforme descrito na seção 3.1;
- A rede é completamente ineficiente acima de 13 saltos de distância, seção 3.1;

- O protocolo de transporte UDP gera uma sobrecarga na rede e pode comprometer a utilização da mesma. Portanto, o TCP, devido as garantias implementadas por ele, é mais adequado ao cenário, seção 3.2.

A infraestrutura projetada pode ser facilmente adaptada em outros contextos e aplicações, sendo ela flexível e resiliênte. Tais fatores reforçam a favorabilidade para a utilização de uma infraestrutura baseada em IoT no cenário urbano, cujo demanda uma série de aplicações com diversas finalidades.

A robustez, resiliência, adaptabilidade e flexibilidade dessa infraestrutura são os elementos fundamentais para responder às mudanças e interferências do ambiente socioeconômico urbano através dos tempo e desafios. Essa exigência de sobrevivência a faz uma ideal para atender este cenário que se encontra em constante mudança.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zigbee Alliance. **Zigbee Alliance.** Disponível em: <<https://www.zigbee.org/About/FAQ.aspx>> Acesso em: 04/2014.
- [2] K. Ashton. **That 'internet of things' thing in the real world, things matter more than ideas.** *RFID Journal*, 2009.
- [3] L. Atzori, A. Lera, e G. Morabito. **The Internet of Things: A survey.** *ELSEVIER Computer Networks*, 2010.
- [4] A. Bielsa. **Smart City project in Salamanca to monitor Air Quality and Urban Traffic.** Disponível em: <http://www.libelium.com/smart_city_air_quality_urban_traffic_waspnote> Acesso em: 12/2014.
- [5] A. Brkovic e V. Sretovic. **SMART SOLUTIONS FOR URBAN DEVELOPMENT: POTENTIAL FOR APPLICATION IN SERBIA.** *Congress Proceedings. Regional Development, Spatial Planning and Strategic Governance (RESPAG) 2nd International Scientific Conference*, 2013.
- [6] M. Chadha e R. Sandeep. **Simulation and Comparison of AODV, DSR and AOMDV Routing Protocols in MANETs.** *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2012.
- [7] L. Chen, M. Tseng, e X. Lian. **Development of foundation models for Internet of Things.** *Frontiers of Computer Science*, 2010.

- [8] Prefeitura de Curitiba. **Sistema de transporte coletivo de Curitiba.** Disponível em: <<http://www.biocidade.curitiba.pr.gov.br/biocity/33.html>> Acesso em: 03/2015.
- [9] S. Dominikus, M. Aigner, e S. Kraxberger. **Passive RFID Technology for the Internet of Things.** *Internet Technology and Secured Transactions (ICITST), 2010 International Conference for*, 2010.
- [10] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, e M. Palaniswami. **Internet of Things(IoT): A vision, architectural elements, and future directions.** *Future Generation Computer Systems*, 2013.
- [11] O. Haubensak. **Smart Cities and Internet of Things.** *Business Aspects of the Internet of Things, Seminar of Advanced Topics, ETH Zurich, FS2011, Florian Michahelles (ed.)*, 2011.
- [12] G. He. **Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) Protocol.** *Helsinki University of Technology*, 2002.
- [13] D. Hidalgo. **Final technical report.** Disponível em: <<http://www.rescatame.eu/FileFromDatabase.aspx?id=156>> Acesso em: 03/2013.
- [14] C. Holanda, G. Xavier, e M. Sales. **Redes de Sensores Sem fio.** Disponível em: <<http://www.gta.ufrj.br/grad/11.1/rssf/Protocolos.html>> Acesso em: 07/2011.
- [15] J. Hui. **Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks.** RFC 6282, RFC Editor, sep de 2011. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>>.
- [16] IPPUC. **Transporte Coletivo.** Disponível em: <<http://www.ippuc.org.br/default.php>> Acesso em: 03/2015.

- [17] IPv6. **IPv6**. Disponível em: <<http://ipv6.br/>> Acesso em: 04/2014.
- [18] T. Issariyakul e E. Hossain. **Introduction to Network Simulator NS2**. Springer Science & Business Media, 2011.
- [19] N. Komninos, M. Pallot, e H. Schaffers. **Special Issue on Smart Cities and the Future Internet in Europe**. *Journal of the Knowledge Economy*, 2012.
- [20] P. Krishnaiah. **Handbook of Statistics 1: Analysis of Variance**. Elsevier, 1984.
- [21] D. Kyriazis, V. Varvarigou, D. White, A. Rossi, e J. Cooper. **Sustainable smart city IoT applications: Heat and electricity management and Eco-conscious cruise control for public transportation**. *IEEE*, 2013.
- [22] J. Landt. **The history of RFID**. *Potentials, IEEE*, 2005.
- [23] Y. Law, Z. Gong, T. Luo, S. Marusic, e M. Palaniswami. **Comparative Study of Multicast Authentication Schemes with Application to Wide-Area Measurement System**. *ASIA Conference on Computer and Communications Security 13*, 2013.
- [24] G. Lucio, M. Paredes-Farrera, E. Jammeh, M. Fleury, e M. Reed. **OPNET Modeler and Ns-2: Comparing the Accuracy Of Network Simulators for Packet-Level Analysis using a Network Testbed**. *WSEAS Transactions on Computers 2.3*, 2003.
- [25] D. Marandin e V. Prakash Rao. **ZigBee Tutorial**. Disponível em: <<http://goo.gl/zbPVqD>> Acesso em: 01/2015.
- [26] L. Mazerolle. **Using Gunshot Detection Technology in High Crime Areas**. *Research in Progress Preview*, 1998.

- [27] A. Moravejosharieh, H. Modares, R. Salleh, e E. Mostajeran. **Performance Analysis of AODV, AOMDV, DSR, DSDV Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Network**. *Research Journal of Recent Sciences*, 2013.
- [28] National Institute of Standards e Technology. **Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)**. Relatório técnico, novembro de 2001.
- [29] El Pais. **Las marquesinas antiguas de la EMT se reutilizaran en otras ciudades**. Disponível em: <<http://goo.gl/daKbqk>> Acesso em: 09/2014.
- [30] C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, e D. Georgakopoulos. **Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of Things**. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2013.
- [31] C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, e D. Georgakopoulos. **Context Aware Computing for The internet of Things: A Survey**. *IEEE Communications Survey and Tutorials*, 2014.
- [32] R. Pozza, A. Gluhak, e M. Nati. **SmartEye: An energy-efficient Observer Platform for Internet of Things Testbeds**. *ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds 12*, 2012.
- [33] Smart Santander Publications. **Santander on Fire: Future Internet Research and Experimentation - Publications**. Disponível em: <<http://goo.gl/CzuAkj>> Acesso em: 07/2014.
- [34] Smart Santander. **Santander on Fire: Future Internet Research and Experimentation**. Disponível em: <<http://www.smartsantander.eu/>> Acesso em: 06/2014.

- [35] M. Syme e P. Goldie. *Optimizing Network Performance with Content Switching: Server, Firewall and Cache Load Balancing: Server, Firewall, and Cache Load Balancing*. Prentice Hall, 2003.
- [36] L. Tan e N. Wang. **Future Internet: The Internet of Things**. *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICAETE)*, 2010.
- [37] A. Tanenbaum e D. Wetherell. *Computer Networks*. Pearson, 2011.
- [38] URBS. **Itinerários**. Disponível em: <<http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br>> Acesso em: 12/2014.
- [39] R. Want. **An Introduction to RFID Technology**. *Pervasive Computing, IEEE*, 2006.
- [40] Washington-Post. **Shots heard around the District**. Disponível em: <<http://www.washingtonpost.com/wp-srv/special/local/dc-shot-spotter/>> Acesso em: 07/2015.
- [41] R. Weber. **Internet of Things: New security and privacy challenges**. *ELSEVIER computer law and security review*, 2010.
- [42] G. Xue, J. Feng, e M.Li. **A Passive Geographical Routing Protocol in VANET**. *IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference*, 2008.
- [43] G. Xue, J. Feng, e M.Li. **A Passive Geographical Routing Protocol in VANET**. *IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference*, 2008.
- [44] M. Zorzi, A. Gluhak, e S. Lange. **From today's intranet of things to a future internet of things: a wireless- and mobility-related view**. *IEEE Wireless Communications*, 2010.

- [45] I. Zualkernan, A. Al-Ali, M. Jabbar, I. Zabalawi, e A. Wasfy. **InfoPods: Zigbee-Based Remote Information Monitoring Devices for Smart-Homes.** *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009.

APÊNDICE A

ZIGBEE

”A ZigBee Alliance é uma associação aberta, sem fins lucrativos, de membros que criou um ecossistema global próspero desenvolvimento de normas que, finalmente, oferecer maior liberdade e flexibilidade para um mundo mais sustentável mais esperto. Nossos membros são empresas, universidades e agências do governo e eles trabalham juntos criando soluções sem fio para uso em aplicações comerciais e industriais residenciais.” - [1].

A ZigBee Alliance define o uso do IEEE 802.14.5, descrito detalhadamente na seção abaixo, como padrão, adicionado o protocolo de redes (IPv6), [17] e segurança (AES-128), conforme exemplificado abaixo, [42].

IEEE 802.15.4, [15], padroniza a camada física e o controle de acesso ao meio para uma LR-WPAN. Este padrão é mantido pelo grupo de trabalho IEEE 802.15 e publicado em 2003 [15].

A LR-WPAN é uma rede de comunicação simples, de baixo custo, que permite conectividade sem fio em aplicações com poder e requisitos de produção limitados. Os principais objetivos de uma LR-WPAN são a facilidade de instalação, transferência confiável de dados, operação de curto alcance, custo extremamente baixo e uma autonomia razoável, mantendo ao mesmo tempo um protocolo simples e flexível. Essas características são de grande valia para a definição de uma infraestrutura base para as aplicações das cidades inteligentes.

Nesta seção estão definidas todas as limitações técnicas para o desenvolvimentos dos dispositivos IoT. Estas limitações impactam diretamente o desempenho geral da rede, e somente a partir dela pode-se definir os melhores cenários para uma rede IoT.

Para garantir a robustez, o padrão estabelece o uso do CSMA/CA, conforme exemplificado na figura A.5. Além disso quando uma recepção e validação dos dados é feita corretamente é enviado um sinal ACK. Caso o originador da mensagem não receba esse sinal após um certo período, pode-se concluir que a mensagem não foi recebida e será reenviada a mensagem. Para confirmar a integridade dos dados é usando o mecanismo FCS empregando o CRC, definida em [43].

Ainda segundo o padrão [15] o tamanho máximo de cada pacote enviado é de 133 Bytes sendo 6 deles reservados conforme figura A.1. Um dispositivo IoT tem alcance máximo de 10 metros e utiliza uma das três faixas de frequência estabelecidas. Cada uma das frequências tem potência máxima de condutividade conforme o órgão regulador de cada região, conforme tabela A, ainda não existe regulamentação específica vigente no Brasil.

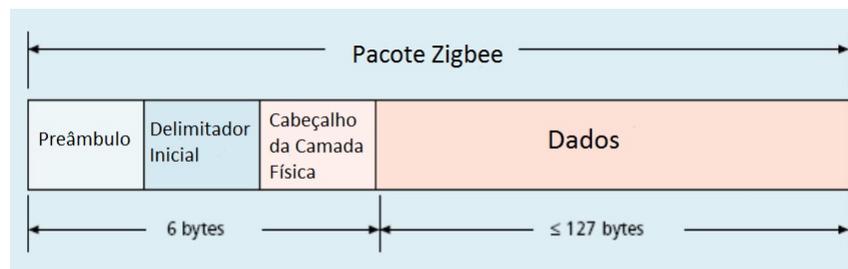


Figura A.1: Estrutura do pacote Zigbee

Frequência	Região	Potência máxima de condutividade
2.4 GHz	Japão	10 mW/MHz
	Europa (exceto Espanha e França)	100 mW ou 10 mW/MHz
	Estados Unidos	1000 mW
	Canada	1000 mW (com limitações de instalação)
902-928 MHz	Estados Unidos	1000 mW
868 MHz	Europa	25 mW

Tabela A.1: Frequência por região.

Contudo no [15] não foi definido um protocolo de rede, nem roteamento padrão. Além disso nenhum esquema de segurança.

Nas próximas seções será descrito cada uma das faixas de frequência e outros protocolos definidos pelo ZigBee.

A.1 2.4 GHz

A taxa máxima de transmissão de dados na camada física é de 250 Kb/s com 16 canais, utilizando uma técnica de modulação quasi-ortogonal 16-ária.

Os dispositivos devem ser capazes de receber sinais com sensibilidade de -85 dBm ($3.1622776602 \times 10^{-12}$ W) ou melhor.

A.2 868/915 MHz

Quando operando em 868 MHz a taxa máxima de transmissão de dados na camada física é de 20 Kb/s e utiliza apenas 1 canal para a transmissão, enquanto que operando a 915 MHz a taxa máxima de transmissão passa a ser de 40 Kb/s utilizando até 10 canais.

As frequências 868/915 MHz utiliza o BPSK, definido na seção A.4, para modulação e codificação dos dados, além disso ele deve ser capaz de receber sinais com até -92 dBm ($6.3095734448 \times 10^{-13}$ W). O padrão IEEE 802.15.4 também define a potência máxima de transmissão de -3 dBm (0.00050118723363), contudo este valor está sujeito a alterações conforme órgão reguladores locais.

A.3 AES-128

O AES foi publicado pela NIST em novembro de 2001, [28], substituindo o DES criado em 1977.

O AES é baseado na cifra de Rijndael e desenvolvida por dois criptógrafos belgas Joan Daemen e Vincent Rijmen. No padrão definido pela NIST foi selecionado três tamanhos possíveis de chave 128, 192 e 256 bits, o protocolo zigbee utiliza a chave de tamanho 128

(AES-128).

Este algoritmo é de chave simétricas, ou seja, a mesma chave usada para criptografar é a mesma para descriptografar. O funcionamento do algoritmo está exemplificado na figura A.2.

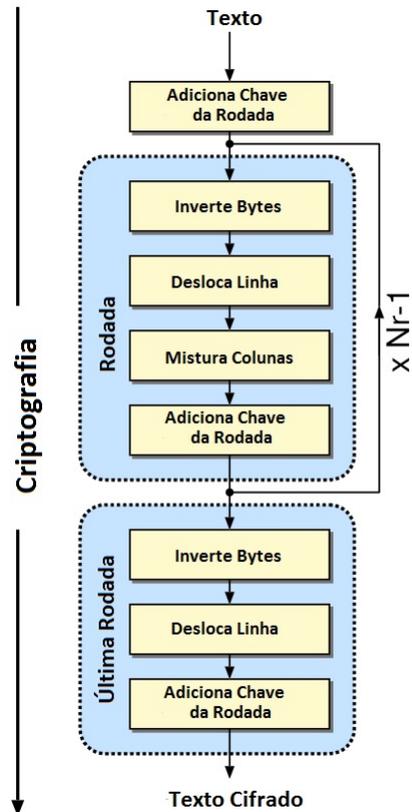


Figura A.2: Exemplificação do algoritmo AES

A.4 BPSK

Considerado o mais simples de PSK, *Phase Shift Keying* (Deslocamento do período do sinal). O BPSK é um método de modulação digital de sinal. De acordo com esse método o valor do sinal pode ser somente 0 ou 1 (0° ou 180°).

O mais robusto (mais tolerante a ruído) pois só existem dois valores possíveis e estes estão separados por 180° , exemplificado na figura A.3, contudo essa característica é

negativa para aplicações que requerem uma vazão elevada pois neste método só é enviado um bit por período°. A modulação do sinal esta exemplificada na figura A.4.

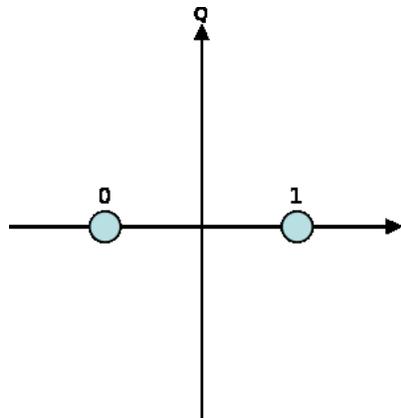


Figura A.3: Bit do BPSK.

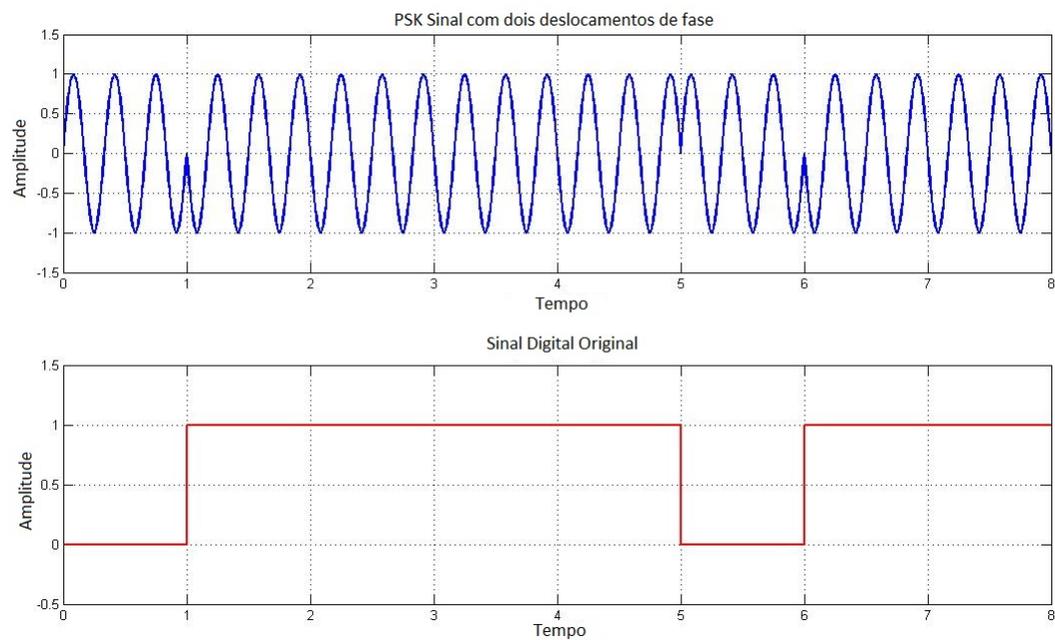


Figura A.4: Exemplo de modulação utilizando o método BPSK.

A.5 CSMA/CA

CSMA/CA é um método usado em redes de tecnologia sem fio com o objetivo de evitar a colisão de mensagens, já que meio de transmissão é compartilhado por todos os dispositivos da rede.

Utilizando esse método o dispositivo que quer transmitir dados primeiro deve monitorar um canal por um período determinado de tempo para verificar se outro dispositivo está usando a rede no seu raio de alcance. Se não houver transições ocorrendo o dispositivo começa a transmitir dados. Caso contrário, o dispositivo espera por um período de tempo aleatório, até que ninguém esteja transmitindo no canal, o funcionamento deste método está exemplificado em A.5.

Um dos problemas é que enquanto utilizando o CSMA/CA o originador não consegue verificar o canal ao enviar dados, por isso não é possível detectar colisões.

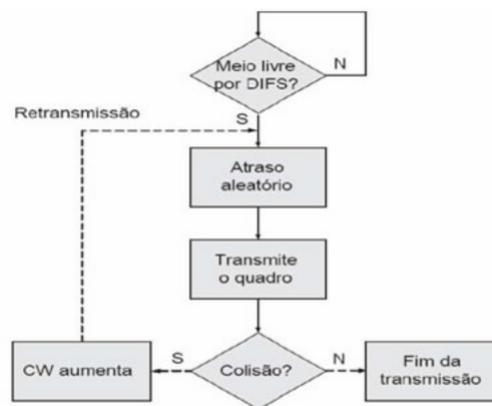


Figura A.5: Exemplo do funcionamento do CSMA/CA. Fonte: [14].

HENRIQUE ZELAK LEITE BASTOS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROJETO DE UMA
INFRAESTRUTURA DE CIDADE INTELIGENTE PARA
TRANSPORTE PÚBLICO DE CURITIBA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Programa de Pós-Graduação em Informática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pessoa Albini

CURITIBA

2015