



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**FABRÍCIO LUCAS DE ALMEIDA**

**Análise de desempenho de junção à rede via OTAA e uso de ciclo útil em redes  
LoRaWAN**

UBERLÂNDIA, MG  
2021

## **FABRÍCIO LUCAS DE ALMEIDA**

### **Análise de desempenho de junção à rede via OTAA e uso de ciclo útil em redes LoRaWAN**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Redes de Computadores.

Orientador: Dr. Alan Petrônio Pinheiro

UBERLÂNDIA, MG

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

Reitor: Valder Steffen Junior

Pró-Reitor de Graduação: Armindo Quillici Neto

Pró-Reitor de Pós-graduação: Carlos Henrique de Carvalho

Diretor da Faculdade de Engenharia Elétrica: Sérgio Ferreira de Paula Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica: José Roberto Camacho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A447a      Almeida, Fabrício Lucas de, 1993-  
2021      Análise de desempenho de junção à rede via OTAA e uso de ciclo  
útil em redes LoRaWAN [recurso eletrônico] / Fabrício Lucas de  
Almeida. - 2021.

Orientador: Alan Petrônio Pinheiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.5527>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Pinheiro, Alan Petrônio, 1982-, (Orient.).  
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica. III. Título.

---

CDU:621.3

Glória Aparecida – CRB-6/2047  
Bibliotecária



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4707 - [www.posgrad.feelt.ufu.br](http://www.posgrad.feelt.ufu.br) - [cobel@ufu.br](mailto:cobel@ufu.br)



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	<a href="#">Dissertação de Mestrado Acadêmico, 757, PPGEELT</a>				
Data:	Vinte e oito de maio de dois mil e vinte um	Hora de início:	<a href="#">14:40</a>	Hora de encerramento:	<a href="#">17:40</a>
Matrícula do Discente:	<a href="#">11912EEL003</a>				
Nome do Discente:	<a href="#">Fabrício Lucas de Almeida</a>				
Título do Trabalho:	Análise de desempenho de junção à rede via OTAA e uso de ciclo útil em redes LoRaWAN				
Área de concentração:	Processamento da informação				
Linha de pesquisa:	Redes de computadores				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: "Proposta de estudo e desenvolvimento piloto de novos modelos de serviços e infraestrutura de TIC voltados ao uso de antenas de telecomunicações da rede de distribuição da CEB alinhados ao cenário de smart grids e IoT" Agência Financiadora: ANEEL Início 23/11/18 Término 23/05/21 No. do Projeto na agência: PD-05160-1805/2018 Professor Coordenador: ALAN PETRÔNIO PINHEIRO				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Marcelo Barros de Almeida - FEELT/UFU; Lorenço Santos Vasconcelos - FEELT/UFU, Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva - UFRN; Alan Petrônio Pinheiro - FEELT/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Alan Petrônio Pinheiro, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Alan Petronio Pinheiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/05/2021, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Barros de Almeida, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/05/2021, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lorencos Santos Vasconcelos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/05/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva, Usuário Externo**, em 28/05/2021, às 17:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2754564** e o código CRC **B7F593B0**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda minha trajetória e conquistas, a minha família pelo cuidado dedicado a mim desde sempre e pelos valores morais compartilhados que foram base fundamental para a minha formação pessoal. Agradeço a minha noiva, Franciely, pelo companheirismo, paciência e constante motivação que foram de suma importância para concluir este trabalho e continuar seguindo sempre em frente.

Agradeço especialmente aos professores Dr. Marcelo Barros e Dr. Alan Petrônio pela pré-disposição e auxílio na contribuição em todas as fases da pesquisa, auxiliando no planejamento, organização e desenvolvimento, o que contribuiu bastante para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todos os meus amigos e demais familiares que sempre acompanharam minha trajetória pessoal e profissional em busca do sucesso e satisfação em aprender e servir. A todos que torcem positivamente por mim, só tenho a agradecer pela força que me motiva a continuar sempre em frente.

*Pesquisa realizada na:*



Universidade Federal de Uberlândia  
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica



LRI - Laboratório de Redes Inteligentes  
[www.lri.ufu.br](http://www.lri.ufu.br)

*Financiamento e apoio:*



Agência Nacional de Energia Elétrica  
Programa de Pesquisa e Desenvolvimento



Coordenação de Aperfeiçoamento de  
Pessoal de Nível Superior

Esta pesquisa foi financiada pela Companhia Energética de Brasília por meio do projeto de P&D ANEEL nº 05160-1805/2018, e com suporte da CAPES, processo número 88882.429012/2019-01.

## RESUMO

Redes de comunicação sem fio com demandas por cobertura em longas distâncias e baixo consumo energético vem se tornando cada vez mais requisitadas e utilizadas em diversas aplicações. Dentre essas tecnologias, uma das mais promissoras é a tecnologia LoRa, juntamente com o protocolo LoRaWAN. No entanto, inúmeros parâmetros internos e fatores externos podem influenciar no desempenho da rede, incluindo no processo de associação dos dispositivos à rede LoRaWAN. Além disso, para redes com alta densidade de dispositivos, a adoção de limitações pelo uso do ciclo útil é essencial para seu bom funcionamento. Com o objetivo de mitigar esse problema, neste trabalho são propostas três estratégias diferentes para o uso do ciclo útil nas transmissões de quadros de junção à rede, ou *join request*, a saber: exponencial, linear e constante. Adicionalmente, também serão apresentadas mais duas propostas para melhoria no desempenho do processo de associação, com o uso de uma taxa de dados, ou *data rate*, adaptativo e a margem aleatória adaptativa do período do ciclo útil. Para validar os métodos serão alterados alguns parâmetros internos e externos da rede afim de avaliar o impacto das propostas quanto ao desempenho, analisados através de resultados experimentais, utilizando dispositivos reais e com foco no processo de associação à rede.

Palavras Chave: associação à rede, ciclo útil, LoRa, LoRaWAN.

## **ABSTRACT**

Wireless networks with demands for coverage over long distances and low power are became more requested and used in several applications. Among these technologies, one of the most promising is the LoRa technology, together with the LoRaWAN protocol. However, so many internal parameters and external factors may be influencing the network performance, including the device's joining procedure at the LoRaWAN network. Furthermore, for high density networks, the adoption of duty cycle limits are essential for a good operation. In order to mitigate this problem, three different strategies for duty cycle usage during transmissions of join request frames are proposed: exponential, linear and constant. Additionally, will be presented two additional strategies to improve the performance of join procedure, with the use of adaptative data rate and an adaptative random margin for duty cycle periods. For validation of the methods, internal and external network parameters will be evaluated, in order to assess the performance impact of the proposals, analyzed through experimental results, using real devices with focus on the join procedure.

Keywords: join, duty cycle, LoRa, LoRaWAN.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais tecnologias de comunicação <i>wireless</i> .....	23
Figura 2: Modelo OSI de camadas.....	29
Figura 3: <i>Stack</i> da tecnologia LoRaWAN.....	30
Figura 4: Topologia e elementos da rede LoRaWAN.....	30
Figura 5: Variação da frequência do <i>upchirp</i> na modulação LoRa.....	32
Figura 6: Janelas de transmissão e recepção para um dispositivo classe A.....	34
Figura 7: Quadros de <i>join request</i> e <i>join accept</i> .....	35
Figura 8: Descrição do processo de junção à rede via OTAA.....	37
Figura 9: Canais de frequência AU915.....	39
Figura 10: Espectrograma de transmissões LoRa.....	44
Figura 11: Relação entre PDR e distância de comunicação para diferentes SFs e ambientes.....	45
Figura 12: Taxa de ocupação com decaimento exponencial.....	52
Figura 13: Taxa de ocupação com decaimento linear.....	56
Figura 14: Taxa de ocupação com uso constante.....	58
Figura 15: Tempo de contenção entre retransmissões para todas as estratégias e janela na 1 <sup>a</sup> hora de uso.....	59
Figura 16: Tempo de contenção entre retransmissões para todas as estratégias e janela entre a 1 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> hora de uso.....	60
Figura 17: Tempo de contenção entre retransmissões para todas as estratégias e janela a partir da 11 <sup>a</sup> hora de uso até as 24hs subsequentes.....	60
Figura 18: Fluxograma do algoritmo de ADR proposto durante o processo de <i>Join</i> .....	63
Figura 19: Valores mínimo e máximo para RM (a) com a RM padrão e (b) com a estratégia de ARM proposta.....	66
Figura 20: Elementos do gráfico tipo <i>pirateplot</i> .....	75
Figura 21: Interface web do servidor LoRaWAN.....	79
Figura 22: Módulo <i>gateway</i> RAK2245 Pi HAT WisLink da RAKWireless.....	80
Figura 23: <i>Gateway</i> Wirnet Station 915 da Kerlink.....	80

Figura 24: PCB do dispositivo .....	81
Figura 25: Montagem da caixa com 8 dispositivos.....	82
Figura 26: Topologia do sistema LoRaWAN .....	82
Figura 27: Montagem do <i>gateway</i> 1 .....	83
Figura 28: Distância e relevo entre o <i>gateway</i> 2 e os EDs.....	83
Figura 29: Instante de tempo de publicação para os cinco primeiros quadros segundo a estratégia de ciclo útil.....	85
Figura 30: Comparativo o teste 1 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de <i>join request</i> e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.....	88
Figura 31: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 1 do cenário A.....	89
Figura 32: Comparativo para o teste 2 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de <i>join request</i> , (b) tempo de junção à rede, (c) volume de uso da rede. ....	90
Figura 33: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 2 do cenário A.....	91
Figura 34: Comparativo do teste 3 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de <i>join request</i> e volume de uso da rede, (b) tempo de juncão à rede.....	92
Figura 35: Divergência entre relógios para o caso N.E. entre 4 EDs. ....	93
Figura 36: Comparativo para o teste 4 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de <i>join request</i> , (b) tempo de junção à rede, (c) volume de uso da rede. ....	94
Figura 37: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 4 do cenário A.....	95
Figura 38: Comparativo de todo o cenário A referente ao número de transmissões.....	96
Figura 39: Comparativo de todo o cenário A referente ao tempo de associação.....	97
Figura 40: Comparativo de todo o cenário A referente ao volume de uso da rede. ....	97
Figura 41: Comparativo do teste 5 do cenário B quanto ao (a) número de transmissões de <i>join request</i> e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.....	103
Figura 42: Comparativo entre o teste 1 (GW 1) e 5 (GW 2) para o cenário B referente ao número de transmissões. ....	105

Figura 43: Comparativo entre o teste 1 (GW 1) e 5 (GW 2) para o cenário B referente ao tempo de associação.....	106
Figura 44: Comparativo entre o teste 1 (GW 1) e 5 (GW 2) para o cenário B referente ao volume de uso da rede.....	106
Figura 45: Comparativo do teste 6 do cenário C quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.....	110
Figura 46: Comparativo do teste 7 do cenário C quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.....	111
Figura 47: Comparativo entre o teste 1 (20 EDs), 6 (14 EDs) e 7 (8 EDs) para o cenário C referente ao número de transmissões.....	113
Figura 48: Comparativo entre o teste 1 (20 EDs), 6 (14 EDs) e 7 (8 EDs) para o cenário C referente ao tempo de associação.....	113
Figura 49: Comparativo entre o teste 1 (20 EDs), 6 (14 EDs) e 7 (8 EDs) para o cenário C referente ao volume de uso da rede.....	114
Figura 50: Comparativo do teste 8 do cenário D quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.....	117
Figura 51: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 8 do cenário D.....	118
Figura 52: Comparativo entre o teste 1 e 8 para o cenário D referente ao número de transmissões.....	119
Figura 53: Comparativo entre o teste 1 e 8 para o cenário D referente ao tempo de associação.....	120
Figura 54: Comparativo entre o teste 1 e 8 para o cenário D referente ao volume de uso da rede.....	121
Figura 55: Comparativo para o teste 9 do cenário E quanto ao (a) número de transmissões de <i>join request</i> , (b) tempo de junção à rede, (c) volume de uso da rede.....	124
Figura 56: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 9 do cenário E.....	125
Figura 57: Comparativo entre o teste 2 e 9 para o cenário E referente ao número de transmissões.....	126

Figura 58: Comparativo entre o teste 2 e 9 para o cenário E referente ao tempo de associação.....	126
Figura 59: Comparativo entre o teste 2 e 9 para o cenário E referente ao volume de uso da rede.....	127
Figura 60: Comparativo do teste 10 do cenário F quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.....	131
Figura 61: Comparativo entre o teste 3 e 10 para o cenário F referente ao número de transmissões.....	132
Figura 62: Comparativo entre o teste 3 e 10 para o cenário F referente ao tempo de associação.....	133
Figura 63: Comparativo entre o teste 3 e 10 para o cenário F referente ao volume de uso da rede.....	133
Figura 64: Comparaçao indireta entre as estratégias de ciclo útil, com relação à: (a) tempo de associação à rede e (b) número de transmissões.....	140
Figura 65: Proposta híbrida das três estratégias para uso do ciclo útil no processo de associação à rede.....	140
Figura 66: Chaves envolvidas no processo de associação OTAA.....	147

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre SFs, <i>bit rate</i> , tempo do quadro no ar e sensibilidade com BW de 125KHz .....	32
Tabela 2: Chaves e identificadores LoRaWAN. ....	35
Tabela 3: Tempo para retransmissão de quadros e ciclo útil .....	37
Tabela 4: Taxas de comunicação de dados AU915. ....	40
Tabela 5: Mapa de DR para <i>downlink</i> AU915. ....	41
Tabela 6: Erro percentual para diferentes números de termos na expansão de Taylor. ....	54
Tabela 7: Comparativo entre os data rates e número de possíveis quadros de <i>join request</i> para uso das estratégias de ciclo útil. ....	61
Tabela 8: Comparativo entre os tempos de contenção <i>tc</i> para os quatro primeiros quadros em relação ao período do ciclo, estratégia e uso do ADR. ....	63
Tabela 9: Agrupamento dos cenários e testes e seus parâmetros.....	70
Tabela 10: Valores de contenção <i>td</i> e <i>tc</i> para os cinco primeiros quadros. ....	84
Tabela 11: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 1 do cenário A....	88
Tabela 12: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 2 do cenário A....	90
Tabela 13: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 3 do cenário A....	92
Tabela 14: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 4 do cenário A....	94
Tabela 15: Teste de Kruskal-Wallis entre as estratégias de ciclo útil para o cenário A..	98
Tabela 16: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário A (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). ....	99
Tabela 17: Classificação das estratégias de ciclo útil para os testes do cenário A. ....	100
Tabela 18: Teste de Kruskal-Wallis entre as máscaras de canais para cada estratégia de ciclo útil.....	101
Tabela 19: Teste de Dunn entre todas as máscaras de canais para cada estratégia de ciclo útil (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). ....	101
Tabela 20: Classificação dos testes do cenário A segundo as estratégias de ciclo útil. ....	102
Tabela 21: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 5 do cenário B..	104

Tabela 22: Teste de Kruskal-Wallis entre as estratégias de ciclo útil para o teste 5 do cenário B .....	107
Tabela 23: Teste de Dunn entre todas as estratégias de ciclo útil para o teste 5 do cenário B (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).....	107
Tabela 24: Classificação das estratégias de ciclo útil para o teste 5 do cenário B.....	108
Tabela 25: Teste de Kruskal-Wallis entre a distância dos EDs e o GW no cenário B..	108
Tabela 26: Teste de Dunn entre a distância dos EDs e o GW no cenário B (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). .....	109
Tabela 27: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 6 do cenário C.	110
Tabela 28: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 7 do cenário C.	111
Tabela 29: Teste de Kruskal-Wallis entre as estratégias de ciclo útil do cenário C.....	114
Tabela 30: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário C (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%) .....	115
Tabela 31: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário C .....	115
Tabela 32: Teste de Kruskal-Wallis entre o número de EDs no cenário C.....	116
Tabela 33: Teste de Dunn entre o número de EDs no cenário C (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).....	116
Tabela 34: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 8 do cenário D.	118
Tabela 35: Teste de Kruskal-Wallis entre todas as estratégias de ciclo útil para o cenário D.....	121
Tabela 36: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário D (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). .....	122
Tabela 37: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário D .....	122
Tabela 38: Teste de Kruskal-Wallis para o ciclo útil no cenário D.....	122
Tabela 39: Teste de Dunn para o ciclo útil no cenário D(valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). .....	123
Tabela 40: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 9 do cenário E..	124
Tabela 41: Teste de Kruskal-Wallis entre todas as estratégias de ciclo útil para o cenário E.....	128

Tabela 42: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário E (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). .....	128
Tabela 43: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário E. ....	129
Tabela 44: Teste de Kruskal-Wallis para o ADR proposto no cenário E. ....	129
Tabela 45: Teste de Dunn para o ADR proposto no cenário E (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).....	130
Tabela 46: Valores de média, mediana e desvio padrão do teste 10 do cenário F. ....	131
Tabela 47: Teste de Kruskal-Wallis entre todas as estratégias de ciclo útil para o cenário F. ....	134
Tabela 48: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário F (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%). .....	134
Tabela 49: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário F. ....	135
Tabela 50: Teste de Kruskal-Wallis para o ARM proposto no cenário F. ....	135
Tabela 51: Teste de Dunn para o ARM proposto no cenário F (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).....	135

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ADR – Adaptive Data Rate  
ARM – Adaptive Random Margin  
BW – Bandwidth  
CR – Code Rate  
DR – Data Rate  
ED – End Device  
LoRa – Long Range  
LoRaWAN – Lora Range Wide Area Network  
LoS – Line-Of-Sight  
LPWAN – Low-Power Wide-Area Network  
nLoS – Non-Line-Of-Sight  
OTAA – Over-the-Air Activation  
PDR – Packet Delivery Rate  
PRNG – Pseudo Random Number Generator  
RF – Radio Frequency  
RM – Random Margin  
RSSI – Received Signal Strength Indication  
SF – Spreading Factor  
SNR – Signal-to-noise ratio  
ToA – Time on Air  
TRNG – True Random Number Generator

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1 OBJETIVOS .....	24
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	26
1.3 CONTRIBUIÇÕES .....	26
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	27
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>29</b>
2.1 LORA .....	31
2.2 ESPECIFICAÇÃO LORAWAN .....	33
<b>2.2.1 Classes de dispositivos.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2 Procedimento de associação à rede.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.3 Retransmissões e ciclo útil .....</b>	<b>37</b>
2.3 PARÂMETROS REGIONAIS LORAWAN .....	38
<b>2.3.1 Canais de Frequência .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.2 Taxa de comunicação de dados e potência.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.3 Janela de Recepção .....</b>	<b>41</b>
2.4 GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS .....	42
2.5 ESTUDOS RELACIONADOS.....	43
<b>3 MELHORIAS NO DESEMPENHO DE JUNÇÃO À REDE.....</b>	<b>49</b>
3.1 PROPOSTA DE EQUACIONAMENTO PARA O CICLO ÚTIL .....	49
<b>3.1.1 Definições gerais e nomenclatura aplicada .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.2 Uso da rede com decaimento exponencial .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.3 Uso da rede com decaimento linear .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1.4 Uso constante da rede .....</b>	<b>58</b>

<b>3.1.5 Considerações gerais .....</b>	<b>58</b>
3.2 PROPOSTA DE TAXA DE DADOS ADAPTATIVA .....	62
3.3 PROPOSTA DE MARGEM ALEATÓRIA ADAPTATIVA .....	64
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>67</b>
4.1 DEFINIÇÕES DE ESCOPO DOS TESTES.....	67
<b>4.1.1 Variáveis.....</b>	<b>68</b>
4.1.1.1 Variáveis independentes.....	68
4.1.1.2 Variáveis dependentes .....	68
<b>4.1.2 Cenários .....</b>	<b>69</b>
4.1.2.1 Cenário A.....	70
4.1.2.2 Cenário B.....	71
4.1.2.3 Cenário C.....	71
4.1.2.4 Cenário D.....	72
4.1.2.5 Cenário E.....	72
4.1.2.6 Cenário F .....	73
<b>4.1.3 Coleta dos dados .....</b>	<b>73</b>
4.2 ANÁLISE DESCRIPTIVA.....	74
4.3 ESTATÍSTICA NÃO PARAMÉTRICA.....	76
4.4 INFRAESTRUTURA PARA OS TESTES.....	78
<b>4.4.1 Servidor.....</b>	<b>78</b>
<b>4.4.2 Gateway.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.3 Dispositivos .....</b>	<b>81</b>
<b>4.4.4 Montagem do sistema.....</b>	<b>81</b>
4.5 CONSIDERAÇÕES PARA A PROPOSTA DE USO DO CICLO ÚTIL ..	84

4.6	SOFTWARES UTILIZADOS.....	85
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
5.1	Cenário A .....	87
<b>5.1.1</b>	<b>Análise descritiva.....</b>	<b>87</b>
5.1.1.1	Teste 1.....	87
5.1.1.2	Teste 2.....	89
5.1.1.3	Teste 3.....	91
5.1.1.4	Teste 4.....	93
5.1.1.5	Comparativo dos testes do cenário A .....	95
<b>5.1.2</b>	<b>Análise não paramétrica .....</b>	<b>98</b>
5.1.2.1	Estratégias de ciclo útil .....	98
5.1.2.2	Máscara de seleção de canais.....	100
5.2	Cenário B .....	103
<b>5.2.1</b>	<b>Análise descritiva.....</b>	<b>103</b>
5.2.1.1	Teste 5.....	103
5.2.1.2	Comparativo do teste do cenário B.....	104
<b>5.2.2</b>	<b>Análise não paramétrica .....</b>	<b>107</b>
5.2.2.1	Estratégias de ciclo útil .....	107
5.2.2.2	Distância entre os dispositivos e o <i>gateway</i> .....	108
5.3	Cenário C .....	109
<b>5.3.1</b>	<b>Análise descritiva.....</b>	<b>109</b>
5.3.1.1	Teste 6.....	109
5.3.1.2	Teste 7.....	111
5.3.1.3	Comparativo dos testes do cenário C .....	112

<b>5.3.2 Análise não paramétrica .....</b>	<b>114</b>
5.3.2.1 Estratégias de ciclo útil .....	114
5.3.2.2 Número de dispositivos na rede.....	115
5.4 Cenário D .....	117
<b>5.4.1 Análise descritiva.....</b>	<b>117</b>
5.4.1.1 Teste 8.....	117
5.4.1.2 Comparativo do teste do cenário D.....	119
<b>5.4.2 Análise não paramétrica .....</b>	<b>121</b>
5.4.2.1 Estratégias de ciclo útil .....	121
5.4.2.2 Redução do ciclo útil.....	122
5.5 Cenário E .....	123
<b>5.5.1 Análise descritiva.....</b>	<b>123</b>
5.5.1.1 Teste 9.....	123
5.5.1.2 Comparativo do teste do cenário E.....	125
<b>5.5.2 Análise não paramétrica .....</b>	<b>128</b>
5.5.2.1 Estratégias de ciclo útil .....	128
5.5.2.2 ADR proposto .....	129
5.6 Cenário F.....	130
<b>5.6.1 Análise descritiva.....</b>	<b>130</b>
5.6.1.1 Teste 10.....	130
5.6.1.2 Comparativo do teste do cenário F .....	131
<b>5.6.2 Análise não paramétrica .....</b>	<b>134</b>
5.6.2.1 Estratégias de ciclo útil .....	134
5.6.2.2 ARM proposto .....	135

5.7	Discussões .....	136
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>139</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	141
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>142</b>
	<b>APÊNDICE A – Possibilidade de <i>Joins</i> inválidos na rede .....</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE B - Estabilidade do relógio e sua influência nos testes .....</b>	<b>149</b>

# 1 INTRODUÇÃO

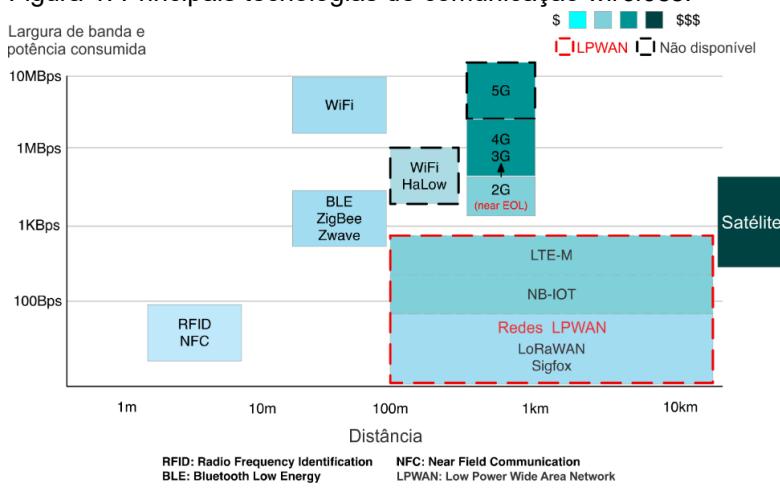
Com o crescimento da tecnologia IoT (*Internet of Things*) e comunicação M2M (*machine to machine*) um aumento massivo no número de sensores conectados é aguardado em breve. Segundo CHAUDHARI e ZENNARO (2020 apud ERICSSON, 2016) é aguardado até 2022 um número de dispositivos conectados à internet próximo a 29 bilhões (CHAUDHARI; ZENNARO, 2020).

Considerando as tecnologias de comunicação *wireless* é comum utilizar terminologias em relação a sua distância de cobertura, descritas a seguir. Existem as redes de proximidade ou contato (0 – 10 m) com o uso de tecnologias como o RFID (*Radio Frequency Identification*) e o NFC (*Near Field Communication*). Entre uma área de 10 a 100 metros estão as WPANs (*Wireless Personal Area Network*), compostas pelo padrão IEE802.15.4, Zigbee, Wireless-HART, 6LowPAN, Bluetooth LE, entre outros. Seguindo para uma distância entre 100 e 1000 metros estão as WLANs (*wireless local area network*), representadas principalmente pelas variações do padrão IEE802.11. Até 10 km estão as WNANs (*wireless neighborhood area network*) com as tecnologias Wi-Sun, Zigbee-NAN e Wireless M-bus. Por último, em um raio de até 100 km, se encontram as WWANs (*wireless wide area network*), representadas pelas tecnologias de dados, Sigfox, LoRa (*Long Range*) e LoRaWAN (*Lora Range Wide Area Network*), NB-IoT, LTE-M, DASH7, NB-Fi, entre outras. Uma nova terminologia surgiu mais recentemente, denominada de LPWAN (*low power wide area network*), com o intuito de prover baixo consumo, alta eficiência energética e longa capacidade de cobertura. Algumas tecnologias citadas anteriormente podem ser classificadas como redes LPWAN como o LoRa e LoRaWAN e SigFox. (CHAUDHARI; ZENNARO, 2020; GU *et al.*, 2020). Segundo MCCLELLAND (2020) as principais tecnologias de comunicação sem fio podem ser relacionadas conforme visto na Figura 1, classificadas conforme a distância de alcance e a taxa de dados da comunicação.

As principais características e objetivos das redes LPWAN são: longo alcance, baixa taxa de dados, baixo consumo, baixo custo dos dispositivos, escalabilidade de nós

na rede, utilização de espectro de frequência não licenciado e topologia de rede simplificada. Para alcançar esses objetivos várias técnicas são utilizadas como o uso de bandas de sub 1GHz, esquemas diversos de modulação do sinal, adoção do uso de ciclo útil durante a operação, simplificação da camada MAC (*Media Access Control*), simplificações de *hardware* e utilização de diversas técnicas adaptativas. A diversidade nas tecnologias LPWAN se dão principalmente pelas diferenças entre as especificações da camada física (PHY) e MAC utilizadas pelos mais diversos fabricantes, como: Semtech, SixFox, Ingenu, Silver Spring, Telensa entre outros (GU *et al.*, 2020; QADIR *et al.*, 2018).

Figura 1: Principais tecnologias de comunicação wireless.



Fonte: Adaptado de (MCCLELLAND, 2020).

Segundo ALLIANCE e WBA (2019), no início de 2019, a tecnologia LoRaWAN assumiu a liderança das redes LPWAN não licenciadas, com mais de 100 milhões de dispositivos instalados em mais de 100 países. A estimativa para o mercado global é que até 2021 o padrão LoRaWAN esteja presente em mais de 50% das redes LPWAN.

A tecnologia de modulação RF LoRa, criada pela Semtech, provê comunicações de até 5 km em áreas urbanas e até 15 km em áreas rurais com visada direta. Outra característica principal é o requisito de ultra baixo consumo, podendo ter dispositivos alimentados a bateria com duração de até 10 anos. O protocolo LoRaWAN, empregado em enlaces LoRa é ideal para aplicações de longo alcance, com alta densidade de dispositivos, baixo consumo e baixo volume de dados trafegados (SEMTECH, 2020).

As redes LoRaWAN são utilizadas em diferentes aplicações como saúde e bem estar, monitoramento na agricultura, redes de sensores sem fio, monitoramento de tráfego, localização, aplicações em cidades inteligentes, *smart grids*, entre outras. LoRaWAN é utilizado em casos de aplicações com assimetria na comunicação, onde o volume de mensagens de *uplink* (do dispositivo para o *gateway*) é maior que o tráfego do volume de dados de *downlink* (do *gateway* para o dispositivo) (HAXHIBEQIRI *et al.*, 2018).

Dentre as desvantagens da tecnologia LoRa tem-se: tempo de latência relativamente alto, baixa taxa de comunicação, não existe uma banda universal, fazendo com que existam uma grande variedade de produtos no mercado global e a falta de capacidade de *roaming*, não permitindo que um dispositivo possa fazer parte de várias redes (CLARKE, 2021). Outro fator é que a camada física LoRa não possui padrão aberto, utilizando uma tecnologia proprietária, adquirida e patenteada pela Semtech (SELLER; SORNIN, 2016). Portanto só é possível utilizar fornecedores aprovados pela própria Semtech.

Com a perspectiva de crescimento da tecnologia LoRa e LoRaWAN segundo (ALLIANCE; WBA, 2019), levando em consideração o fato do protocolo LoRaWAN ser mantido pela LoRa Alliance, organização sem fios lucrativos, é de suma importância para a comunidade de usuários e para a organização que estudos sejam realizados e novas propostas sejam feitas, a fim de nortear a evolução de novas versões do protocolo, ocasionando assim em melhorias na eficiência e desempenho da rede. Com esse objetivo em mente, o presente trabalho será desenvolvido, propondo estratégias e avaliando na prática seus impactos, assim como a avaliação dos impactos de alguns parâmetros da rede quanto ao desempenho do processo de associação à rede LoRaWAN.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é analisar, quanto ao desempenho da rede LoRaWAN, o processo de associação à rede via OTAA (*over-the-air activation*) através da implantação do ciclo útil. Para esse fim, são propostas diversas estratégias para o uso

do ciclo útil no dispositivo, todas descritas matematicamente e posteriormente testadas experimentalmente. Adicionalmente, ainda na tentativa de ter uma maior eficiência no projeto de junção à rede, foram criadas duas propostas adicionais, não pertencentes ao protocolo LoRaWAN original:

- Proposta de taxa de dados adaptativa durante a associação à rede;
- Proposta de margem aleatória adaptativa;

Finalmente, essas propostas foram avaliadas utilizando o desempenho do processo de associação à rede como referência, através da variação de parâmetros do rádio LoRa, do stack LoRaWAN ou parâmetros físicos, a depender da característica modificada.

A proposta de uso do ciclo útil na rede apresenta três estratégias distintas que ditam a disponibilidade, no tempo, para envio dos quadros. São elas: uso com decaimento exponencial, decaimento linear e uso constante. O intuito principal com essa proposta é avaliar o uso de cada estratégia independente para vários cenários diferentes de testes.

A proposta de taxa de dados adaptativa, ou *data rate* adaptativo (ADR), no processo de associação tem como intuito contribuir com a diminuição do número de colisões no processo de partida dos dispositivos, pois inicia-se com uma maior taxa de dados, consequentemente, um menor tempo do quadro no ar. Em contrapartida, se for o caso, após poucos quadros retransmitidos a taxa de dados é ajustada no seu valor máximo permitido, atendendo assim dispositivos mais longes do *gateway*.

Por fim, a proposta de margem aleatória adaptativa acrescenta um comportamento linear crescente no valor mínimo e máximo dessa margem, prevista na especificação LoRaWAN de forma fixa. O objetivo dessa proposta é diminuir a chance de colisões de quadros, linearmente de acordo com o tempo. Fazendo com que em uma rede muito densa e com muitas colisões, à medida que o tempo ir aumentando a probabilidade de colisões possa diminuir.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Enquanto o padrão europeu EU868 impõe valores de ciclo útil variando entre 0,1% a 10% e potência de transmissão de 14 a 27dBm, a norma regional AU915, utilizada no Brasil, não impõe regras quanto ao ciclo útil da rede permitido para uso (ALLIANCE, 2018a). Mesmo assim, independente da norma regional, é pertinente que empresas operando com um grande número de dispositivos já implementem estratégias de ciclo útil, visando um melhor uso da rede e uma possível futura rigidez maior para o uso do referido protocolo no Brasil.

Com esse possível cenário de implantação de ciclo útil e com um foco em testes com dispositivos reais, o presente trabalho apresenta diversas contribuições propostas de uso da rede durante o processo de associação via OTAA e seu respectivo resultado de implantação, em termos de tempo de junção à rede, número de tentativas de junção e o tempo de ocupação no ar durante a transmissão, ou seja, o volume ocupado.

Através dos diversos testes nos diferentes cenários, o presente trabalho poderá ser utilizado como um guia prático do uso do protocolo LoRaWAN na região AU915. Além de posicionar-se como referência para implementações futuras na região AU915.

## 1.3 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições do presente trabalho foram:

- Montagem do sistema de uma rede LoRaWAN e coleta de dados em diversos cenários;
- Comparações entre os resultados de desempenho de associação à rede com relação a máscara de canais, distância entre os dispositivos e o gateway, número de dispositivos na rede e ciclo útil utilizado;
- Criação, implementação e testes de um novo modelo com três estratégias de ciclo útil distintas para uso nos dispositivos;
- Criação, implementação e testes de um novo modelo de taxa de dados adaptativa no procedimento de associação;

- Criação, implementação e testes de um novo modelo de margem aleatória adaptativa, compondo o ciclo útil.

## 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A presente dissertação é dividida em seis capítulos onde a descrição geral de cada capítulo é apresentada a seguir.

Capítulo 1: neste capítulo fez-se a apresentação do tema da pesquisa e o contexto no qual está inserido, e tem a função de apresentar a importância e a relevância do tema que justifica a realização do trabalho, esclarecendo as vantagens no uso de redes LoRaWAN. Além disso é definido de forma clara quais são os objetivos e justificativas para o presente trabalho.

Capítulo 2: nesse capítulo são definidos, em detalhes, os conceitos básicos e princípios de funcionamento da camada física LoRa, da especificação LoRaWAN v1.0.3 e aspectos regionais do AU915. Também é realizada uma vasta revisão na literatura, acerca de outros trabalhos, sejam formulados matematicamente, simulados ou com testes práticos, também com o objetivo de se avaliar o desempenho de redes LoRaWAN.

Capítulo 3: no presente capítulo todas as três contribuições propostas no trabalho serão explanadas. As estratégias de uso do ciclo útil terão todo o equacionamento matemático descrito e desenvolvido. A proposta de taxa de dados adaptativa será detalhada e seu algoritmo devidamente discutido. Por fim a proposta de margem aleatória adaptativa também terá sua conceituação e equacionamento também definidos.

Capítulo 4: neste capítulo é onde a metodologia e todo o escopo dos testes a serem realizados será definida, com cada cenário devidamente identificado através da elaboração de um roteiro de testes. Também será definido e explicado de qual forma os dados a serem colhidos serão analisados. Por fim, toda a infraestrutura utilizada para realização dos testes é definida e detalhada.

Capítulo 5: nesse capítulo são discutidos, através de análises descritivas, os dados obtidos nos diversos testes realizados. Também são utilizados testes não paramétricos

com o objetivo de analisar estatisticamente a influência de certos fatores nas variáveis dependentes. Por fim uma discussão global de todos os testes e análises realizadas é efetuada.

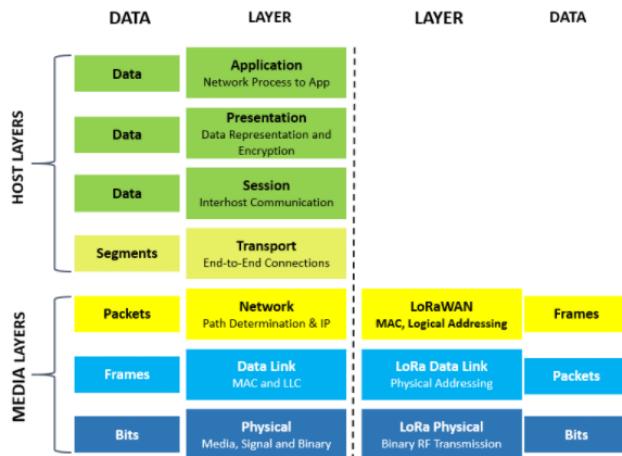
Capítulo 6: neste capítulo é verificado o atendimento entre os objetivos e resultados encontrados. Por fim são feitas algumas recomendações para trabalhos futuros no tema.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A arquitetura do sistema e protocolo LoRaWAN são desenvolvidos pela organização LoRa Alliance<sup>1</sup>, aberta e sem fins lucrativos. A associação facilita a produção e a interoperabilidade entre as especificações que são publicadas e estão disponíveis de forma totalmente gratuita (CHAUDHARI; ZENNARO, 2020).

O LoRa consiste puramente na camada física (PHY), como definido pelo modelo OSI de sete camadas, visto na Figura 2. Existem padrões regionais de utilização da banda, conforme visto na Figura 3, que ditam alguns parâmetros, como banda de frequência para os canais disponíveis, tempos de abertura de janela para o protocolo, ciclo útil, entre outros (SEMTECH, 2020).

Figura 2: Modelo OSI de camadas.



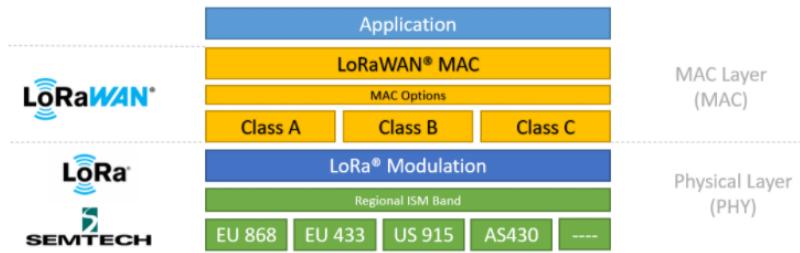
Fonte: (SEMTECH, 2020).

Já o LoRaWAN consiste em um protocolo de rede aberto com comunicação bidirecional segura padronizado e mantido pela associação LoRa Alliance. O LoRaWAN é equivalente a camada MAC (*Medium Access Control*) entre a aplicação e a camada física (PHY), vide Figura 3. Dentro do protocolo existem três classes distintas de dispositivos, denominadas de classes A, B e C onde cada qual possui suas

<sup>1</sup> As marcas LoRa Alliance e LoRaWAN são licenciadas pela associação LoRa Alliance. A marca LoRa é uma marca comercial utilizada pela Semtech Corporation e suas subsidiárias.

particularidades e aplicações específicas, principalmente com relação ao consumo energético e a disponibilidade e latência da comunicação (SEMTECH, 2020).

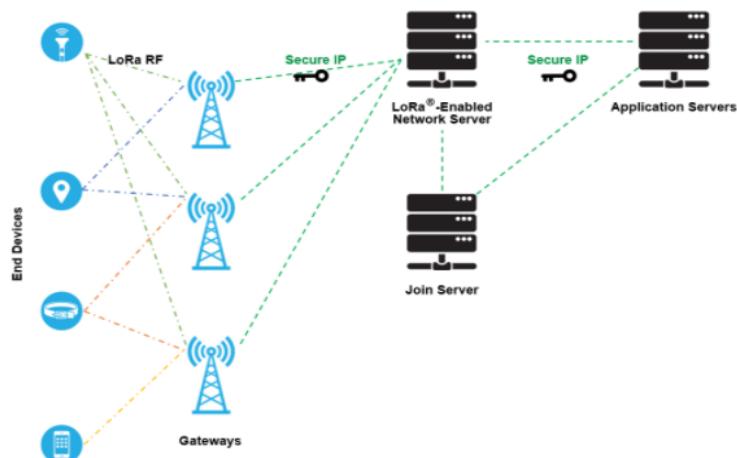
Figura 3: Stack da tecnologia LoRaWAN.



Fonte: (SEMTECH, 2020).

A rede LoRaWAN é composta por três elementos básicos: *end device* (ED), ou dispositivo, *gateway* e servidor (rede, aplicação), conforme visto na Figura 4. Os EDs são os sensores e atuadores, participantes da rede sem fio LoRa, trocando mensagens diretamente com o *gateway*. O *gateway*, por sua vez recebe as mensagens LoRa provindas dos EDs e encaminham para o servidor de rede através do protocolo IP (*Internet Protocol*) utilizando Wi-Fi, ethernet cabeada ou 3G/4G. Vale ressaltar que o fluxo contrário também é válido. Já o servidor de rede é responsável pelo gerenciamento e controle dinâmico dos parâmetros da rede. O servidor de aplicação gerencia e interpreta os dados de aplicação dos EDs. (SEMTECH, 2020).

Figura 4: Topologia e elementos da rede LoRaWAN.



Fonte: (SEMTECH, 2020).

A rede LoRaWAN não define nenhum controle de acesso de canal e é bem similar a um sistema ALOHA puro onde os dispositivos podem transmitir quadros a qualquer momento, resultando em uma baixa eficiência da rede (CHAUDHARI; ZENNARO, 2020).

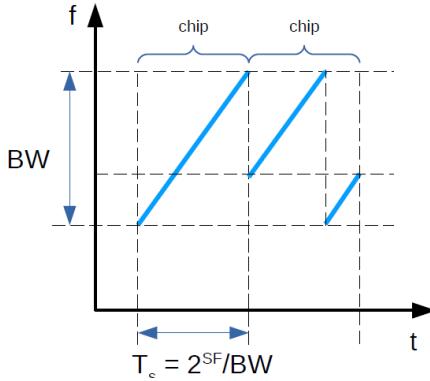
Com o intuito de detalhar o funcionamento básico da tecnologia LoRa e LoRaWAN, quanto aos pontos chaves pertinentes a este trabalho, serão apresentadas as seguintes subseções: modulação LoRa, aspectos da especificação LoRaWAN e os parâmetros regionais LoRaWAN. Por fim, uma análise sobre os trabalhos correlatos ao tema terá sua investigação e detalhamento.

## 2.1 LORA

LoRa utiliza uma variação da modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*). O *chirp* é um sinal que incrementa ou decrementa constantemente a frequência ao longo de uma largura de banda, ou *bandwidth* (BW) pré-definida, chamados de *upchirps* e *downchirps*, como pode ser visto na Figura 5. Para os *upchirps*, a frequência do sinal aumenta, e já para os *downchirps*, a frequência diminui, ambos de acordo com a largura de banda e com duração que dependem do SF e BW (SEMTECH, 2015).

A modulação LoRa apresenta quatro principais parâmetros, a saber: canal, largura de banda, fator de espalhamento, ou *spreading factor* (SF) e potência de transmissão. A modulação LoRa suporta sete valores para o SF, variando do SF6 até o SF12. O SF6 possui a maior taxa de dados, ou *data rate* (DR) e também necessita da maior relação sinal ruído (SNR) para a demodulação correta do sinal. Em contrapartida, o SF12 possui a menor DR, requerendo o menor SNR do sinal. Em relação aos valores existentes para largura de banda em KHz tem-se: 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.2, 41.7, 62.5, 125, 250 e 500. Todavia, a recomendação, segundo a especificação LoRaWAN, (ALLIANCE, 2018b), os valores utilizados são do SF7 ao SF12 e para BW tem-se 125KHz, 250KHz e 500KHz (LIANDO *et al.*, 2019).

Figura 5: Variação da frequência do *upchirp* na modulação LoRa.



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2015).

A taxa de código, ou *code rate* (CR) define o número de bits adicionais para correção de erro, ou *forward error correction* (FEC) em cada transmissão onde os valores disponíveis são: 0, 1, 2, 3 e 4. Para isso, cada grupo de quatro bits pode ser codificado em 4, 5, 6, 7 e 8 bits, respectivamente. Levando-se em conta o SF, BW e CR a taxa nominal de dados (*bit rate*), representado em bits por segundo, pode ser calculada segundo a Equação 1 (CHAUDHARI; ZENNARO, 2020).

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{4 + CR} \quad (1)$$

A Tabela 1 reuni os principais SFs utilizados para mensagens de *uplink* com largura de banda de 125KHz e seu respectivo *bit rate*, tempo do quadro no ar, ou *time on air* (ToA) (considerando um *payload* de 11 bytes) e a sensibilidade mínima para correta demodulação do sinal recebido.

Tabela 1: Relação entre SFs, *bit rate*, tempo do quadro no ar e sensibilidade com BW de 125KHz.

SF	Bit Rate [bps]	ToA (11 bytes payload) [ms]	Sensibilidade [dBm]
SF10	980	371	-132
SF9	1760	185	-129
SF8	3125	103	-126
SF7	5470	61	-123

Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2015) e (SEMTECH, 2020).

Outro fator importante acerca da modulação LoRa é o uso de SFs ortogonais, o que permite que múltiplos sinais sejam transmitidos ao mesmo tempo e no mesmo canal, desde que com SFs diferentes, com a mínima degradação na sensibilidade do receptor.

Isso permite uma maior pluralidade na rede, resultando na possibilidade de um menor número de colisões entre os quadros no ar (SEMTECH, 2015).

## 2.2 ESPECIFICAÇÃO LORAWAN

O documento de especificação LoRaWAN, mantido pela LoRa Alliance, define os parâmetros da camada física LoRa para a infraestrutura de rede e o protocolo de rede LoRaWAN em específico, incluindo os comandos MAC, conteúdo dos quadros, classes de dispositivos, taxa de envio, segurança, entre outros. Segundo a associação, existem diversas versões para a especificação LoRaWAN, sendo as mais recentes, a v1.0.4, lançada em outubro de 2020 (ALLIANCE, 2021a) e a v1.1, lançada em outubro de 2017 (ALLIANCE, 2017). Contudo a especificação do protocolo utilizada no presente trabalho é a v1.0.3 (ALLIANCE, 2018b).

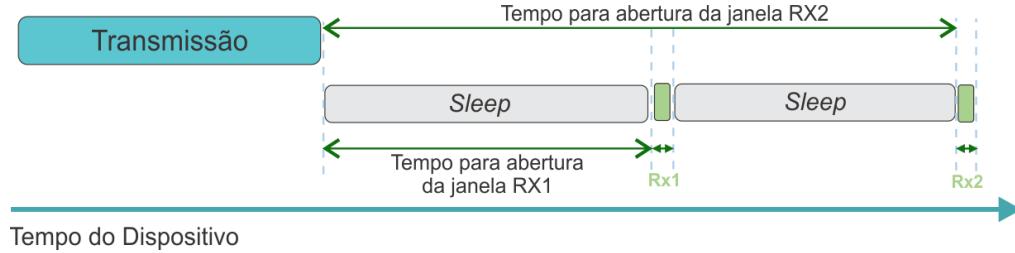
### 2.2.1 Classes de dispositivos

Os dispositivos baseados em LoRa podem operar em três modos distintos, retratando a maneira como eles irão comunicar na rede. O dispositivo LoRaWAN básico é chamada de classe A e todos os EDs devem possuir suporte a ele. Outros dois modos adicionam funcionalidades ao dispositivo, que são: classe B e classe C. Dispositivos classe A realizam transmissões seguidas de duas janelas curtas de recepção e são recomendados para sensores mantidos por baterias, devido ao baixo consumo. Já dispositivos classe B possuem janelas de recepção em *slots* de tempo agendados, recomendados também para atuadores a bateria, mas com a necessidade adicional de comunicação periódica com a rede. Dispositivos classe C permanecem com a recepção sempre ativa, exceto no momento da transmissão e são indicados para atuadores diretamente alimentados e que necessitam de baixa latência (ALLIANCE, 2018b; SEMTECH, 2020).

Dispositivos classe A permanecem a maior parte do tempo em modo de baixo consumo (*sleep*), essencial para dispositivos à bateria. Após a transmissão do quadro, visto na Figura 6, podendo existir duas janelas de recepção, denominadas de RX1 e RX2.

Após o tempo de espera, pré-definido pelos parâmetros regionais LoRaWAN (ALLIANCE, 2018a), haverá a abertura da primeira janela de recepção. Se houver a recepção de um quadro vindo do *gateway*, a janela RX2 não é aberta e o ED pode transmitir novamente após respeitar seu ciclo útil, se houver. Caso contrário, se não houver a recepção na janela RX1, uma segunda janela será aberta após o tempo pré-definido. Essa característica de funcionamento não permite que a aplicação em alto nível consiga acordar um dispositivo classe A, não sendo assim aconselhada para o uso como atuadores (ALLIANCE, 2018b; SEMTECH, 2020).

Figura 6: Janelas de transmissão e recepção para um dispositivo classe A.



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2020).

Dispositivos classe B possuem um processo chamado de *beaconing*, onde o *gateway* envia periodicamente em *broadcast* um comando para sincronização de tempo de todos os dispositivos da rede. Dessa forma, cada dispositivo abre e fecha sua janela de recepção periodicamente, fazendo com que o servidor consiga iniciar a comunicação. Já os dispositivos classe C sempre estão com a janela de recepção aberta, com exceção do período de transmissão. Ele é semelhante ao classe A, porém durante todo o período de *sleep*, o classe C está com a janela RX2 aberta e, a janela RX1 continua sendo aberta com a mesma base de tempo de abertura que o classe A (SEMTECH, 2020).

Os parâmetros quem envolvem as janelas de recepção RX1 e RX2 serão discutidos em detalhes na Seção 2.3.3, pois dependem da norma regional de cada país.

## 2.2.2 Procedimento de associação à rede

Para poder participar da rede LoRaWAN cada ED deve passar por um processo de ativação, a fim de se associar à rede. Existem duas formas de ativação, a *over-the-air activation* (OTAA) e a *activation by personalization* (BSP) (ALLIANCE, 2018b).

Segundo ALLIANCE (2018b), para a ativação OTAA, os EDs necessitam passar no processo de *join* antes de poder trocar mensagens de dados com o servidor de rede. Sempre que o ED perder as informações acerca do contexto da sessão atual, ele deverá fazer um novo procedimento de *join*.

Existem chaves e identificadores no ED que necessitam estar salvas antes e após o procedimento de *join*, conforme visto na Tabela 2 (HAXHIBEQIRI et al., 2018).

Tabela 2: Chaves e identificadores LoRaWAN.

Chave	Descrição	OTAA	ABP	Característica
AppKey	Utilizado para derivar a AppSKey e NwkSKey e calcular o MIC da mensagem de <i>join request</i>	Sim	Não	Armazenada previamente
NwkSKey	Utilizado na criptografia de pacotes MAC e cálculo do MIC	Sim	Sim	Gerada a partir da AppKey e da mensagem de <i>join accept</i>
AppSKey	Utilizado para criptografia do <i>payload</i> de dados	Sim	Sim	Gerada a partir da AppKey e da mensagem de <i>join accept</i>
AppEUI	64-bit ID único da aplicação	Sim	Não	Armazenada previamente
DevEUI	64-bit ID único do dispositivo	Sim	Não	Armazenada previamente
DevAddr	32-bit endereço único do dispositivo na rede	Sim	Sim	Recebida na mensagem de <i>join accept</i>

Fonte: Adaptado de (HAXHIBEQIRI et al., 2018).

O processo de associação via OTAA, do ponto de vista do ED, é composto por duas mensagens MAC, trocadas entre o ED e o servidor, denominadas de *join request* e *join accept*, vistas na Figura 7 (ALLIANCE, 2018b).

Figura 7: Quadros de *join request* e *join accept*.

Tamanho (bytes)	8	8	2			
Join Request	AppEUI	DevEUI	DevNonce			
Tamanho (bytes)	3	3	4	1	16 (Opcional)	
Join Accept	AppNonce	NetID	DevAddr	DLSettings	RXDelay	CFList

Fonte: Adaptado de (ALLIANCE, 2018b).

Segundo a Figura 7, o quadro de *join request* é composto pelos campos: AppEUI, DevEUI (vistos na Tabela 2) e o DevNonce, gerado aleatoriamente pelo ED, e mantido pelo servidor com o principal objetivo de se evitar ataques através da captura de dados trafegando na rede. Já o quadro de *join accept* é formado pelo AppNonce, valor aleatório e único provido pelo servidor de rede e usado pelo ED para derivar as chaves de sessão, o NetID, endereço da rede, DevAddr, endereço do dispositivo na rede, DLSettings: especifica o offset do RX1 e o DR do RX2, visto na Tabela 5, o RXDelay que configura o tempo de espera para abertura da janela RX após a associação à rede e o CFList, contendo a lista dos canais especificados pelo gateway (ALLIANCE, 2018b).

Para todos os dados dos quadros, o MIC (*message integrity code*) é calculado e adicionado, a fim de validar a assinatura daquele pacote. Vale ressaltar que a mensagem de *join request* não possui criptografia. O cálculo do MIC para o quadro de *join request* pode ser visto na Equação 2 onde, são utilizados os 4 primeiros bytes do valor de cmac (ALLIANCE, 2018b).

$$cmac = aes128_{cmac}(AppKey, MHDR|AppEUI|DevEUI|DevNonce) \quad (2)$$

Após o envio da mensagem de *join request*, o servidor irá responder com um quadro de *join accept*, caso o respectivo ED tenha permissão para se associar a aquela rede, caso contrário, nenhuma mensagem é retornada. Recebido o quadro de aceite da associação, o ED ainda deve validar o MIC da mensagem, conforme Equação 3, e estando tudo em ordem, o ED irá derivar as chaves de sessão locais, a *network session key* (NwkSKey) e a *application session key* (AppSKey), que serão utilizadas como criptografia para os *payloads* de todas as mensagens de dados trocadas a partir deste instante e podem ser vistas nas Equações 4 e 5 (ALLIANCE, 2018b).

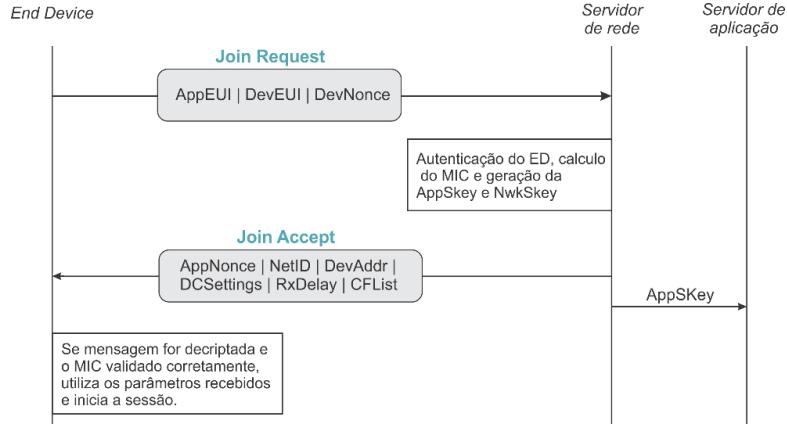
$$cmac = aes128_{cmac}(AppKey, MHDR|AppNonce|NetID|DevAddr|&DLSettings|RxDelay|CFList) \quad (3)$$

$$NwkSKey = aes128_{encrypt}(AppKey, 0x01|AppNonce|NetID|DevNonce|pad_{16}) \quad (4)$$

$$AppSKey = aes128_{encrypt}(AppKey, 0x02|AppNonce|NetID|DevNonce|pad_{16}) \quad (5)$$

Todo esse processo de associação à rede via OTAA descrito pode ser visto, com maior clareza, através da Figura 8, com os devidos papéis do ED, servidor de rede e aplicação.

Figura 8: Descrição do processo de junção à rede via OTAA.



Fonte: Adaptado de (BENKAHLA; BELGACEM; FRIKHA, 2019).

### 2.2.3 Retransmissões e ciclo útil

A norma do protocolo LoRaWAN não possui regras de como deve ser escalonada as publicações de quadros ao longo do tempo, todavia, ela possui limites em relação ao volume de dados na Seção 7, *Retransmissions back-off* de (ALLIANCE, 2018b), onde, para mensagens confirmadas e eventos externos que provoquem um alto volume de dados sincronizados, com um número maior que 100 EDs na rede, deve haver limitações com a adoção do ciclo útil. A Tabela 3 resume as recomendações presentes na especificação e será explicada em detalhes a seguir. As retransmissões de quadros devem assumir um intervalo de tempo entre o final da janela RX2 e a próxima transmissão, de acordo com o uso do ciclo útil e da margem sorteada aleatoriamente (ALLIANCE, 2018b).

Tabela 3: Tempo para retransmissão de quadros e ciclo útil

Tempo total (h)	Próxima retransmissão (s)	Tempo de uso (s)	Ciclo útil (%)
$t_t < 1$	$t < t_r < t + 1$	< 36	1
$1 \leq t_t \leq 11$	$t + 1 < t_r < t + 11$	< 36	0,1
$t_t > 11$	$t + 1 + N < t_r < t + 35 + N$	< 8.7/24h	0,01

Fonte: (ALLIANCE, 2018b).

De acordo com a Tabela 3 existem três faixas distintas que devem ser consideradas. A primeira janela representa os limites para a primeira hora de funcionamento do dispositivo cujo ciclo útil é igual a 1% ou 36 segundos. Além disso,

quando escolhido o tempo para a próxima retransmissão de um quadro, ele deve ter uma margem aleatória, ou *random margin* (RM) entre 0 e 1 segundo.

A segunda fase de operação corresponde ao período das próximas 10 horas subsequentes, onde o ciclo útil é reduzido para 0,1% (total de 36 segundos) e a margem aleatória deve se encontrar entre 1 e 11 segundos.

Finalmente, depois de 11 horas de operação do dispositivo, o ciclo útil é reduzido ainda mais, para 0,01%, ou seja, é permitido utilizar 8,7 segundos a cada 24 horas. O fator aleatório passa a depender do número de ciclos (N) de 24 horas decorrido, variando entre  $1 + N$  e  $35 + N$ .

## 2.3 PARÂMETROS REGIONAIS LORAWAN

O documento de parâmetros regionais LoRaWAN é mantido separadamente da especificação a fim de possibilitar a adição de novos parâmetros para novas regiões do planeta, já visando a rápida expansão do uso desse protocolo. Esse documento contém informações acerca dos canais de frequência disponíveis para uso em várias regiões, assim como limitações de uso regionais. A regulamentação regional engloba basicamente a camada física LoRa, incluindo o formato do preâmbulo, canais de frequência, taxa de dados, potência de transmissão e limites de tempo de uso do canal (ALLIANCE, 2021b).

A rede LoRaWAN utiliza bandas ISM não licenciadas. Portanto para um dispositivo operar legalmente em uma banda de frequência em um local específico do planeta, ele deve estar de acordo com as regulamentações requeridas para aquela região. O objetivo da associação LoRa Alliance com a definição dos parâmetros regionais não é ser autoritária, pois as leis e regulamentações de cada país são ditadas pelo governo regional (CHAUDHARI; ZENNARO, 2020).

Atualmente, para a versão 1.0.3, existe uma tabela sugestiva para o plano de frequência para cada país. Existem dez planos de frequência. São eles: EU868, US915, CN779, EU433, AU915, CN470, AS923, KR920, IN865, RU864 (ALLIANCE, 2018a).

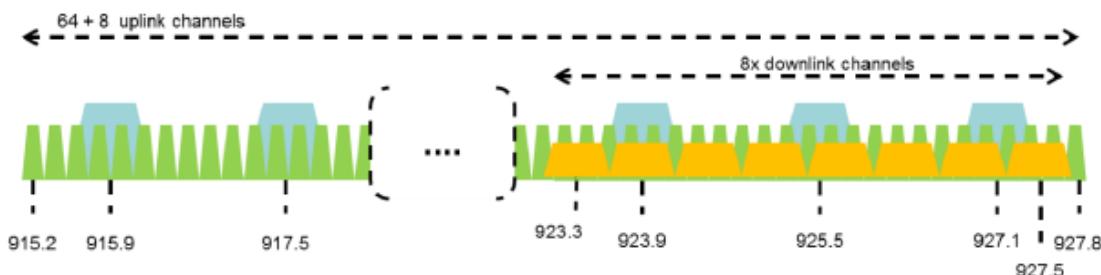
No Brasil, a agência responsável pela regulamentação interna de todas as faixas de frequência é a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). Atualmente não existe nenhuma regulamentação específica para redes LoRa e o plano de frequência regional para redes LoRaWAN mais utilizado é o AU915, que varia no espectro de 915MHz até 928MHz. O padrão US915, vigente nos Estados Unidos, abrange a frequência de 902 a 928MHz e seria interessante para o uso no país, contudo, a faixa de 907,5 a 915 MHz é regulamentada para uso de prestação de serviço móvel pessoal, segundo resolução nº 454 de dezembro de 2016. Já as outras faixas desse espectro: 902 a 907,5 MHz; 915 a 927,75 MHz e 927,75 a 928 MHz estão disponíveis para uso de quaisquer serviços de telecomunicações, incluindo radioamador, segundo resolução nº 697 de agosto de 2018. Por esses motivos o AU915 é utilizado no Brasil (ANATEL, 2017).

### 2.3.1 Canais de Frequência

Para o AU915 o espectro de banda ISM utilizado varia entre 915MHz até 928 MHz, dividido em vários canais, visto na Figura 9. Vale ressaltar que, segundo ALLIANCE (2018a) existem quatorze valores definidos para taxa de dados da comunicação, que vão desde o DR0 até o DR13 e serão explicados com mais detalhes na Seção 2.3.2.

- *Upstream* – 64 canais numerados de 0 a 63, com BW 125KHz, DR0 à DR5, CR = 4/5, iniciando em 915,2MHz até 927,8MHz com incrementos de 200KHz;
- *Upstream* – 8 canais numerados de 64 a 71, BW 500KHz, DR6, variando de 915,9MHz até 927,1MHz com incremento linear de 1,6MHz;
- *Downstream* – 8 canais numerados de 0 a 7, BW 500KHz, DR8 a DR13, iniciando em 923,3MHz até 927,5MHz, com incrementos de 600KHz.

Figura 9: Canais de frequência AU915.



Fonte: (ALLIANCE, 2018a).

Se utilizado o procedimento de ativação OTAA, a mensagem de *join request* pode ser enviada em qualquer um dos 64 canais com BW 125KHz, utilizando o DR2, ou qualquer um dos 8 canais de BW 500KHz, utilizando o DR6. Essas taxas de dados padrão tem o objetivo de assegurar a compatibilidade com os dispositivos e a limitação de uso de 400ms de tempo do quadro no ar. Também é definido que, para cada nova transmissão de um quadro, o dispositivo deve trocar o canal utilizado anteriormente, sem repetições, até que todos os canais previamente configurados sejam utilizados (ALLIANCE, 2018a).

### 2.3.2 Taxa de comunicação de dados e potência

Para a região AU915 os *data rates* (DR) presentes na Tabela 4 podem ser utilizados. Apenas o DR0 ao DR6 pode ser utilizado para mensagens de *uplink*, enquanto o DR8 ao DR13 podem ser utilizados para *downlink* (ALLIANCE, 2018a).

Tabela 4: Taxas de comunicação de dados AU915.

DR	Configuração	Bit rate [bps]
0	SF12 - BW125	250
1	SF11 - BW125	440
2	SF10 - BW125	980
3	SF9 - BW125	1760
4	SF8 - BW125	3125
5	SF7 - BW125	5470
6	SF8 - BW500	12500
8	SF12 - BW500	980
9	SF11 - BW500	1760
10	SF10 - BW500	3900
11	SF9 - BW500	7000
12	SF8 - BW500	12500
13	SF7 - BW500	21900

Fonte: (ALLIANCE, 2018a).

Por recomendação do AU915, a máxima potência de transmissão que poderá ser empregada é 30dBm.

### 2.3.3 Janela de Recepção

Como visto na Seção 2.3.1, toda nova transmissão por parte do ED deve selecionar um novo canal para transmissão de forma aleatória. Já o canal onde haverá a comunicação da janela RX1 é derivado do canal onde houve a transmissão do quadro (*uplink*) através do módulo de 8, conforme a seguinte relação (ALLIANCE, 2018a):

$$canal_{down} = canal_{up} \% 8 \quad (6)$$

O DR utilizado para a mensagem de *downlink* também é derivado da taxa de subida, através da Tabela 5. O DR escolhido depende do parâmetro RX1DROffset, que pode assumir valores de 0 a 5, sendo 0 o inicial (ALLIANCE, 2018a).

Já para a segunda janela de recepção RX2, o canal e DR utilizado são fixos e valem, para a região AU915, 0 (923,3 MHz) e DR8, respectivamente. Outro dado importante a respeito das janelas de recepção é o intervalo de tempo para sua abertura, dado pelo AU915. Inicialmente, durante o processo de *join*, a abertura da janela de recepção RX1 é realizada após cinco segundos, enquanto que para RX2 essa espera é de seis segundos, contados a partir do final da transmissão, conforme visto na Figura 6. Após a associação, esses intervalos normalmente passam para um e dois segundos para RX1 e RX2, respectivamente. Esse tempo também pode ser configurado pelo *gateway* (ALLIANCE, 2018a).

Tabela 5: Mapa de DR para *downlink* AU915.

Upstream DR	Downstream DR					
	0	1	2	3	4	5
DR0	DR8	DR8	DR8	DR8	DR8	DR8
DR1	DR9	DR8	DR8	DR8	DR8	DR8
DR2	DR10	DR9	DR8	DR8	DR8	DR8
DR3	DR11	DR10	DR9	DR8	DR8	DR8
DR4	DR12	DR11	DR10	DR9	DR8	DR8
DR5	DR13	DR12	DR11	DR10	DR9	DR8
DR6	DR13	DR13	DR12	DR11	DR10	DR9

Fonte: (ALLIANCE, 2018a).

## 2.4 GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS

Um fator muito importante que vale ressaltar é a questão da geração de números aleatórios em redes IoT. Segundo ALLIANCE (2018b), existem três momentos principais durante a associação à rede via OTAA em que há a necessidade do uso de números aleatórios. O primeiro deles é na criação do *DevNonce*, compondo o quadro de *Join Request*, onde para cada ED presente na rede o servidor deve manter uma lista atualizada desses valores únicos. Esse mecanismo previne possíveis ataques a rede enviando quadros externos iguais aos já recebidos anteriormente na rede. O segundo momento é no sorteio aleatório do canal que será utilizado naquele momento para envio no quadro de *join request*. Para cada tentativa de envio, um canal é selecionado aleatoriamente, onde um canal já selecionado voltará a fazer parte do sorteio apenas após todos os outros canais terem sido utilizados previamente. Por fim o número aleatório é necessário para gerar a margem aleatória compondo o tempo de contenção  $t_c$ .

Está explícito que existem diversos pontos críticos no protocolo de comunicação que dependem de um bom gerador de números aleatórios. Comumente é utilizado a função *rand()* presente na biblioteca *stdlib*, que permite gerar um número pseudo randômico, ou seja, sua sequência de valores é previsível se a mesma semente para início do algoritmo for utilizada. Existem diversas técnicas para esse fim, citadas em (DENIS; JOHNSON, 2006), onde existem basicamente 2 classes: os geradores determinísticos (PRNG) e os não determinísticos (TRNG). O microcontrolador utilizado da ST possui um periférico de TNRG, baseado em um circuito analógico de ruído elétrico, capaz de gerar um número aleatório de 32 bits. Em contrapartida esse método pode levar um tempo considerável para geração do número aleatório. A alternativa escolhida no presente trabalho foi gerar um número aleatório (TRNG) com o periférico do microcontrolador que será utilizado como semente na função *srand()*, fazendo com que a chance de 2 dispositivos terem a mesma semente seja da ordem de  $2,328 * 10^{-8} \%$ , resultando em um gerador robusto e bem seguro, mas com um tempo de processamento menor devido ao uso da função *rand*.

## 2.5 ESTUDOS RELACIONADOS

Vários estudos acerca da tecnologia LoRa estão presentes na literatura. Muitos deles a respeito do desempenho de redes LoRa em geral, alguns abordando o desempenho do protocolo LoRaWAN juntamente com a camada física LoRa, em relação a mensagens de dados pós processo de *join* e apenas alguns foram identificados abordando especificadamente o procedimento de associação à rede via OTAA, sendo que estudos envolvendo o procedimento de *join* são muito abordados no âmbito de segurança de rede apenas. Em geral muitos estudos são realizados no âmbito teórico e simulado, mas também existem vários estudos com testes reais na rede LoRaWAN (ambientes internos e externos), e serão discutidos a seguir.

Em geral, é comum encontrar análises de redes LoRaWAN simuladas ou teóricas, evidenciando o comportamento da rede em situações computacionais. Por exemplo, em LAVRIC e POPA (2018) é efetuada uma análise de desempenho teórico de uma rede LoRaWAN, sendo apresentadas discussões em relação a quantidade de colisões de pacotes em relação ao número de dispositivos e alguns outros parâmetros. Através de simulação foi constatado que, para até aproximadamente 1000 dispositivos é garantido um bom nível de desempenho. Uma avaliação de diversos limites da rede, tais como o número de dispositivos na rede e o tamanho do *payload*, também simulada, pode ser vista em (ADELANTADO *et al.*, 2017).

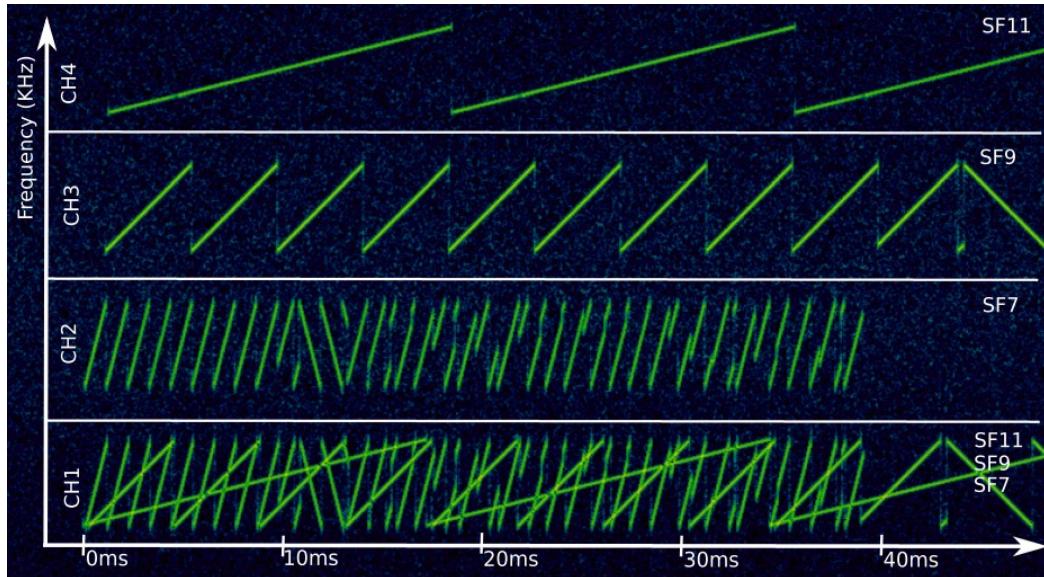
Simulações podem também ser encontradas em relação ao emprego de ciclo útil em redes LoRaWAN. Um modelo de cadeia de Markov para ativação OTAA foi proposto na literatura, analisando o tempo esperado da associação e sua energia requerida para o padrão EU868. Foi constatado que quanto menor é o tempo do quadro no ar, menor será o atraso no tempo de associação. Também foi evidenciado que o número de EDs e canais influenciam diretamente nas variáveis analisadas (TOUSSAINT; EL RACHKIDY; GUITTON, 2016).

A avaliação do impacto do uso do ciclo útil em redes LoRaWAN também é encontrado na literatura, onde foi proposto a criação de um ciclo útil adaptativo com base em três indicadores: energia residual, carga do nó e taxa de congestionamento da rede.

Foi constatado, através de simulações, que a adoção de um ciclo útil fixo de 5% apresentou melhoria em relação a taxa de entrega de pacotes, ou *packet delivery rate* (PDR), se comparado ao caso sem uso do *duty cycle*. Também foi evidenciado que o ciclo útil proposto apresentou um desempenho melhor, evidenciando mais esse efeito à medida que existiam mais dispositivos na rede, cerca de 800 (DENG; ZHU; NIE, 2017).

Com o intuito de demonstrar a capacidade de recepção concorrente do LoRa com SFs diferentes, LIANDO *et al.* (2019) realizou um teste em canais BW 125KHz onde, para o canal 1, três dispositivos enviavam dados utilizando SF7, SF9 e SF11 e para os canais de 2 a 4, foi enviado o mesmo pacote, porém com apenas um dispositivo. O resultado pode ser visto, através de um espectrograma, na Figura 10. Para esse teste, o *gateway* recebe 6 quadros em 4 canais, conseguindo decodificar todos eles com sucesso.

Figura 10: Espectrograma de transmissões LoRa.

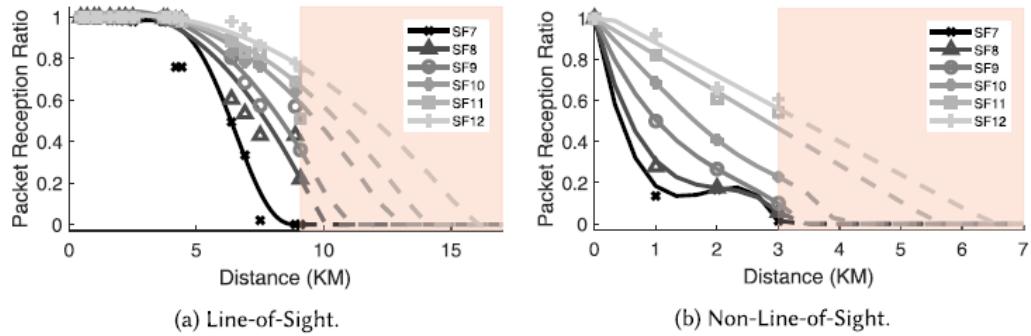


Fonte: (LIANDO *et al.*, 2019).

LIANDO *et al.* (2019) também realizou um teste com 8 EDs enviando 100 quadros continuamente a fim de avaliar o impacto da seleção de canais e de SFs. Para isso quatro cenários foram testados e comparados. Considerando o teste com 6 transmissões concorrentes, os cenários com múltiplos canais e SFs, múltiplos canais e SF fixo e canal fixo e múltiplos SFs apresentaram todos um PDR de 100%. Já para o caso de um canal fixo e SF fixo, a taxa de sucesso foi de apenas 16%, evidenciando a ortogonalidade entre os SFs e a eficiência da rede com a distribuição dos canais.

A distância da comunicação para dispositivos LoRa pode variar com diversos fatores, entre os principais: fator de espalhamento, largura de banda, potência de transmissão e taxa de código. Através de um experimento, LIANDO *et al.* (2019) mediu, em Singapura, a distância de comunicação entre os dispositivos e a relação com a PDR. Utilizando BW 125KHz fixo, um rádio de 100mW e com a melhor combinação de potência de transmissão e CR, variando entre o SF7 ao SF12, tamanho do *payload* do quadro de 10 bytes e uma área de 3 x 3 km, o experimento foi realizado e pode ser visto na Figura 11. Para os resultados apresentados, no cenário em linha reta sem obstáculos e com SF7 é possível obter um PDR de 90% e 70% para distância de 4 e 5 km respectivamente. Já no ambiente urbano com obstáculos, a distância é reduzida drasticamente, cobrindo uma distância de 0,1 e 0,3 km com PDR de 90% e 70% respectivamente, usando SF7.

Figura 11: Relação entre PDR e distância de comunicação para diferentes SFs e ambientes.



Fonte: (LIANDO *et al.*, 2019).

Ainda quanto a distância de comunicação, SHANMUGA, DU e ZHAO (2020) apresentam vários estudos onde, para comunicação em linha reta, ou *line of sight* (LoS) o SF12 pode alcançar distâncias de até 9 Km com um PDR maior que 70%, já com o SF7 para um PDR maior que 70% a distância atingida é de 5 Km, com potência de transmissão de 14dBm segundo SHANMUGA, DU e ZHAO (2020 apud HAXHIBEQIRI *et al.*, 2017; PETÄJÄJÄRVI *et al.*, 2017). Já para o cenário sem linha reta, ou *non line of sight* (nLoS) composto de obstáculos como prédios, a distância mais longa atingida, segundo SHANMUGA, DU e ZHAO (2020 apud EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019), foi de 2 Km. Também foi evidenciado em SHANMUGA, DU e ZHAO (2020 apud ANGRISANI *et al.*, 2017), que a distância de comunicação é afetada pelos parâmetros: *bandwidth*, SF, potência de transmissão e CR.

Outro teste em ambiente externo, realizado por AUGUSTIN *et al.* (2016) foi realizado em Paris utilizando o SX1276 e potência de transmissão de 14 dBm. O *gateway* foi posicionado a 5 metros de altura, enquanto o ED estava fixo dentro de um carro. Para o SF12 e uma distância de 2,8 Km obteve-se um PDR de mais de 80%, já para o SF7, nenhum pacote foi recebido.

Outro teste quanto ao desempenho da rede LoRaWAN foi realizado por MARAIS, MALEKIAN e ABU-MAHFOUZ (2019) com 18 EDs na rede e 1 *gateway* na banda de 868 MHz. Os resultados apresentados demonstraram que, para a troca de mensagens após o processo de *join*, a utilização do ADR e o uso do comando MAC de *link check* não resultaram em significantes alterações no PDR. Já para as mensagens confirmadas com ACK, demonstraram uma melhoria em relação ao PDR, comprovando o estudo segundo MARAIS, MALEKIAN e ABU-MAHFOUZ (2019 apud ABEELE *et al.*, 2017) que, para redes pouco densas e dados enviados com pouca frequência, o uso de mensagens confirmadas contribui para uma melhoria no desempenho da rede.

SEMTECH (2017b) avaliou a capacidade da tecnologia LoRa e protocolo LoRaWAN em aplicações de medição inteligente. O sistema foi instalado na Alemanha, contando com 7mil sensores LoRa e com o uso de 11 *gateways*. Os sensores foram configurados para enviar mensagens não confirmadas a cada 15 minutos e 1 mensagem confirmada ao dia, através de dispositivos LoRaWAN classe C. Foi mostrado que o uso do algoritmo de ADR melhorou a capacidade da rede através do ajuste da taxa de dados e alocação de canais.

A fim de avaliar o impacto do uso do ciclo útil na região EU868, *duty cycle* de 1% e cenário de teste interno, NEUMANN; MONTAVONT e NOEL (2016) constataram que, para o uso de DR6, ao longo do dia, pouco mais de 1MB de dados poderia ser transmitido, enquanto que para DR0 este valor é reduzido para 15KB. Para uma distância entre o *gateway* e o único ED de 6,8 metros os melhores DRs em relação ao RSSI foram: DR2, DR4, DR5, DR0, DR1 e DR3. Já com relação ao SNR, obteve-se: DR4, DR3, DR5, DR1, DR0 e DR2, ou seja, taxas mais rápidas, com menor ToA, para essa distância apresentaram melhores indicadores (NEUMANN; MONTAVONT; NOEL, 2016).

Técnicas para se evitar colisões de quadros (ALMEIDA *et al.*, 2017, 2018) também podem contribuir para uma melhoria da comunicação *downlink*, com o custo de um aumento da potência demandada pelo ED. Separando a comunicação *uplink* e *downlink* em diferentes sub bandas contribui para uma diminuição no número de colisões (CENTENARO; VANGELISTA, 2018). Outra solução encontrada na literatura a fim de reduzir o número de colisões e aumentar o possível tráfego de mensagens *downlink* é o uso de múltiplos *gateways*, resultando em um aumento do ciclo útil de mensagens de *downlink*. Uma abordagem de multiplexação da potência no tempo, pode também ser utilizada para aumentar o possível número de dispositivos na rede (CENTENARO; VANGELISTA, 2018).

Existem algumas técnicas que vêm sendo utilizadas para contornar o possível problema de sobrecarga na rede LoRaWAN. Uma delas é a utilização de *slotted-ALOHA*, onde deve haver uma boa sincronização entre o gateway e o RTC (*Real Time Clock*) do nó. Dessa forma a camada de aplicação deve agendar as transmissões no início de cada slot. Nas condições do teste, com 24 nós na rede, POLONELLI *et al.* (2019) afirma que houve uma melhoria do uso do *slotted-ALOHA* de 5,8x em comparação com o padrão.

O mecanismo de ADR gerencia dinamicamente, através do servidor de rede, o *data rate* e potência de transmissão dos EDs, a fim de aumentar o PDR, com base na estimativa do *link* nas mensagens de *uplink* e no SNR cuja correta decodificação do pacote foi realizada. O ADR somente é ativado após o processo de associação do ED à rede (HAXHIBEQIRI *et al.*, 2018). Várias propostas existem na literatura com o objetivo de otimizar o uso do ADR, como HAUSER e HEGR (2017) que avaliaram o desempenho da implementação do ADR amplamente utilizada (ALLIANCE, 2018b) e propuseram melhorias no ajuste do DR, na utilização de uma integração dos últimos 20 SNRs do dispositivo e na aplicação de histerese na margem do *link*, resultando em uma significativa melhora no desempenho da rede mesmo em condições ruins de operação.

Baseando nos estudos apresentados, apenas um tem foco no processo de associação à rede (TOUSSAINT; EL RACHKIDY; GUITTON, 2016). Todos os outros estudos têm ênfase na troca de mensagens posterior a associação. O presente trabalho vem com a proposta de preencher essa lacuna de estudos, focados no processo de

associação à rede via OTAA. Outros três estudos foram apresentados quanto ao uso do ADR (MARAIS; MALEKIAN; ABU-MAHFUZ, 2019; NEUMANN; MONTAVONT; NOEL, 2016; SEMTECH, 2017b). Grande parte dos estudos apresentados são sobre a relação entre os parâmetros LoRa e/ou infraestrutura da rede, como: SF, BW, CR, potência de transmissão, número de *gateways*, número de dispositivos e alcance, com relação ao desempenho geral da rede LoRaWAN.

No campo do uso do ciclo útil existem poucos estudos e poucas contribuições originais para melhoria do desempenho da rede com seu uso. Quanto ao uso da taxa de dados adaptativa, diversos estudos existem aplicados as mensagens de dados contudo, nenhum estudo foi encontrado com a proposta da alteração do uso da taxa de dados para a quadro de *join request*. Já a margem aleatória que compõe o ciclo útil não foi encontrada nenhuma análise em estudo algum, sendo a ideia da proposta da margem aleatória adaptativa inédita.

Tendo as três contribuições propostas em mente, o próximo capítulo traz todo o escopo teórico, pertinente para formulação das propostas de ciclo útil, taxa de dados adaptativa e margem aleatória adaptativa.

### **3 MELHORIAS NO DESEMPENHO DE JUNÇÃO À REDE**

No presente capítulo, toda a formulação teórica pertinente as contribuições referentes as três propostas serão formuladas e discutidas em detalhes. Se dará início pela proposta que corresponde ao objetivo primário, com todo o equacionamento das estratégias para uso do ciclo útil, que são: exponencial, linear e constante. Logo depois, as propostas com relação aos objetivos secundários serão definidas, iniciando com a proposta de taxa de dados adaptativa, onde será definida através de um fluxograma de seu funcionamento, assim como seu impacto em relação ao tempo de contenção do ciclo útil. Por fim a proposta de margem aleatória adaptativa será detalhada através do equacionamento e sua respectiva formulação teórica.

#### **3.1 PROPOSTA DE EQUACIONAMENTO PARA O CICLO ÚTIL**

##### **3.1.1 Definições gerais e nomenclatura aplicada**

O funcionamento geral do equacionamento proposto é sempre o mesmo, independente da estratégia. Considere um volume total de tempo de transmissão ( $V$ ) que pode ser usado por um ED no período  $P$ , ditado por um valor de ciclo útil máximo  $d$ . Considere também que seja desejada a transmissão no tempo  $t$  de um quadro que irá ocupar o canal por  $V_f$  ms. Partindo da informação de que já foi usado, até aquele momento,  $v_r(t)$  ms do volume total disponível para o ED, o que se deseja calcular é o tempo de contenção (ou espera)  $t_c$ , a partir do instante  $t$ , para que o quadro seja enviado.

Desde que haja volume disponível naquele período do ciclo, de acordo com o tempo solicitado ( $(v_r(t) + V_f) < V$ ), o instante de tempo para início da transmissão ( $t_d$ ) terá seu cálculo realizado pelas diversas equações propostas nas seções seguintes. Caso contrário, o dispositivo já utilizou todo seu volume de dados para o ciclo útil em questão e precisará aguardar a próxima janela, segundo a Tabela 3. Se o valor de  $t_d$  for menor que o instante de tempo atual  $t$  a contenção para envio do próximo quadro será apenas a margem aleatória referente a janela atual.

Vale ressaltar que o menor tempo de espera entre duas transmissões é o próprio tempo de espera das 2 janelas de recepção do dispositivo classe A, que são RX1 e RX2, com 5 e 6 segundos respectivamente, para a região AU915.

A seguir, são apresentadas as variáveis presentes no equacionamento proposto, juntamente com seu significado e respectiva unidade.

- $P$ : Período de avaliação do uso da rede, sempre expresso em segundos. Ao final do período, todas as variáveis são reiniciadas e uma nova avaliação é iniciada.
- $t$ : Instante de tempo atual, dentro do período, para o qual a estratégia corrente é aplicada, sempre iniciando em zero. Expresso em segundos.
- $r(t)$ : Taxa de ocupação máxima de tempo de transmissão para um determinado dispositivo no instante  $t$ . Essa taxa é expressa em milissegundos de uso por segundo, ou  $ms/s$ .
- $d$ : Ciclo útil empregado no período  $P$ . Valor adimensional e dado na forma percentual.
- $V$ : Volume total disponível para uso pelo dispositivo, durante o período  $P$ . Dado também em  $ms$ . O volume total pode ser expresso também em função do ciclo útil, ou seja  $V = d \times P \times 1000$ .
- $v_r(t)$ : Volume real de uso do canal para um determinado dispositivo, acumulado até o tempo  $t$ , dado em  $ms$ .
- $R_0$ : Valor inicial da taxa de ocupação do canal, em  $ms/s$ .
- $C$ : Constante de decaimento para parametrização da expressão exponencial.
- $n_e$ : Número de termos na expansão da série de Taylor menos um, utilizado no decaimento exponencial.
- $V_f$ : Tempo de ocupação do canal necessário para a publicação de um determinado quadro, em  $ms$ .
- $V_d$ : Tempo demandado de ocupação do canal necessário para a publicação do próximo quadro, em  $ms$ . Esse tempo pode ser diferente de  $V_f$  uma vez que a

utilização real do canal pode estar abaixo ou acima da utilização teórica. Nesse caso, pode-se dizer que:

$$V_d = v_r(t) + V_f - v_t(t) \quad (7)$$

Nos casos onde essa expressão for negativa e existir tempo disponível, a publicação será imediata. Caso seja positiva, tem-se a indicação de um período de contenção para a publicação.

- **RM:** Margem aleatória para próxima retransmissão, onde a faixa é definida na Tabela 3.
- $t_d$ : Instante de tempo posterior onde  $V_d$  poderá ser atendido, em ms, em relação ao início do ciclo ( $t = 0$ ).
- $t_c$ : Tempo de contenção para publicação do quadro, dado o instante de tempo atual  $t$ , em ms, onde:

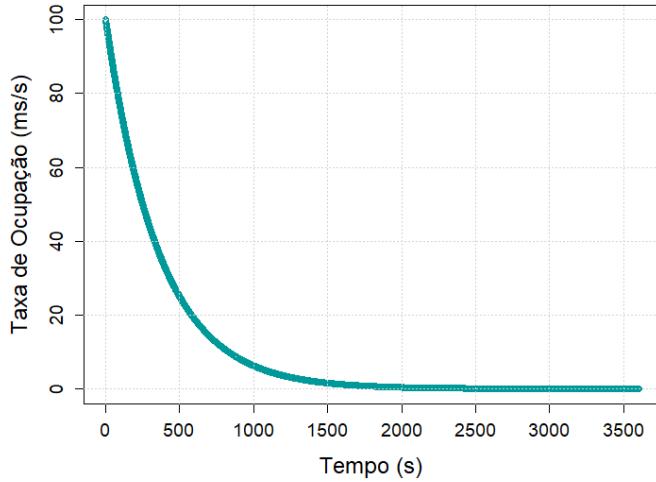
$$t_c = \begin{cases} t_d - (t * 10^3) + RM & \text{se } t_d \geq t \\ RM & \text{se } t_d < t \end{cases} \quad (8)$$

### 3.1.2 Uso da rede com decaimento exponencial

A primeira estratégia proposta utiliza uma taxa de ocupação do canal com decaimento exponencial. Dessa forma, o volume total disponível é utilizado com maior intensidade no início do processo de comunicação, numa tentativa de realizar o *join* de forma mais rápida e continuar obedecendo ao ciclo útil imposto da primeira hora, que é de 1% ou 36000 ms de uso do canal ( $P = 3600s$ ).

O comportamento levantado é apresentado na Figura 12, tendo como valor inicial para a taxa de ocupação de  $R_0 = 100ms/s$ . Vale ressaltar que a integração da curva no período ( $P$ ) é igual ao volume total disponível ( $V$ ).

Figura 12: Taxa de ocupação com decaimento exponencial.



É interessante parametrizar os valores iniciais  $R_0$  e a taxa de decaimento da curva  $C$ , de forma a ajustá-la ao processamento desejado pela aplicação. Para isso, considere a expressão exponencial dada por:

$$r(t) = R_0 e^{-ct} \quad (9)$$

Como o volume total ( $V$ ) é conhecido e igual a integração da Equação 9, é possível estabelecer a seguinte relação:

$$V = \int_0^P r(t) dt = \int_0^P R_0 e^{-ct} dt \quad (10)$$

$$V = -\frac{R_0}{C} e^{-ct} \Big|_0^P \quad (11)$$

$$V = -\frac{R_0}{C} [e^{-CP} - 1] \quad (12)$$

Para simplificar a solução da Equação 12 pode ser feita uma decomposição em série de Taylor, eliminando-se a exponencial. Assim, o termo  $e^{-CP}$  pode ser escrito como:

$$e^{-CP} = 1 + \frac{(-CP)}{1!} + \frac{(-CP)^2}{2!} + \frac{(-CP)^3}{3!} + \dots + \frac{(-CP)^n}{n!} + \dots \quad (13)$$

Empregando-se apenas os cinco primeiros elementos da série e substituindo-se a Equação 13 em 12, tem-se:

$$V \approx -\frac{R_0}{C} \left[ 1 + \frac{(-CP)}{1!} + \frac{(-CP)^2}{2!} + \frac{(-CP)^3}{3!} + \frac{(-CP)^4}{4!} - 1 \right] \quad (14)$$

$$V \approx -\frac{R_0}{C} \left[ -CP + \frac{C^2 P^2}{2} - \frac{C^3 P^3}{6} + \frac{C^4 P^4}{24} \right] \quad (15)$$

$$\frac{V}{R_0} \approx P - \frac{CP^2}{2} + \frac{C^2 P^3}{6} - \frac{C^3 P^4}{24} \quad (16)$$

$$\frac{C^3 P^4}{24} - \frac{C^2 P^3}{6} + \frac{CP^2}{2} - P + \frac{V}{R_0} \approx 0 \quad (17)$$

$$C^3 - \frac{4C^2}{P} + \frac{12C}{P^2} + 24 \left( \frac{V}{R_0 P^4} - \frac{1}{P^3} \right) \approx 0 \quad (18)$$

Como o período  $P$  é geralmente um valor elevado (por exemplo, 3600 segundos) e os valores  $R_0$  e  $V$  são bem menores, é razoável aproximar a parte não dependente de  $C$  da equação por zero.

$$C^3 - \frac{4C^2}{P} + \frac{12C}{P^2} \approx 0 \quad (19)$$

Ou ainda, uma vez que  $C = 0$  não é um valor desejado de raiz:

$$C^2 - \frac{4C}{P} + \frac{12}{P^2} \approx 0 \quad (20)$$

Novamente, tem-se uma situação de denominador com valor elevado ( $P^2$ ) e que poderia ser substituído por zero:

$$C^2 - \frac{4C}{P} \approx 0 \quad (21)$$

Descartando novamente a raiz 0, chega-se ao valor de  $C$ :

$$C \approx \frac{4}{P} \quad (22)$$

De maneira geral, utilizando-se o mesmo procedimento acima, pode-se provar que o valor de  $C$  é dado por:

$$C \approx \frac{n_e}{P} \quad (23)$$

Onde  $n_e$  é o número de termos usados na expansão da série de Taylor menos um. O inconveniente desse resultado é a impossibilidade de estabelecer, de forma direta, uma

relação entre  $C$  e  $R_0$  uma vez que  $R_0$  foi descartado na aproximação. No entanto, para cada valor de  $n_e$ ,  $R_0$  pode ser determinado através de um rearranjo da Equação 12.

$$R_0 = \frac{VC}{1 - e^{-CP}} \quad (24)$$

Substituindo  $C$  e usando  $V = 1000 \times d \times P$ :

$$R_0 = \frac{1000 \times d \times P \times \frac{n_e}{P}}{1 - e^{-\frac{n_e P}{P}}} \quad (25)$$

$$R_0 = \frac{1000 \times d \times n_e}{1 - e^{-n_e}} \quad (26)$$

Para valores maiores de  $n_e$ , a Equação 26 pode ser dada por:

$$R_0 \approx 1000 \times d \times n_e \quad (27)$$

Outra simplificação possível nessa situação de  $n_e \gg 1$  refere ao cálculo de volume total (Equação 12):

$$V = -\frac{R_0}{C}[e^{-CP} - 1] = -\frac{R_0}{C}\left[e^{-\frac{n_e P}{P}} - 1\right] \approx \frac{R_0}{C} \quad (28)$$

Apenas para ilustração, utilizando-se um ciclo útil de  $d = 0,01$  (1%), é possível calcular alguns valores de  $R_0$  para um determinado  $n_e$ , evidenciando que o erro percentual em utilizar pelo menos 5 termos na expansão já gera resultados com erros abaixo de 2%, conforme Tabela 6. Dessa forma, a escolha do valor de  $n_e$  pode ser então mais direcionada ao valor inicial de taxa de ocupação desejada ( $R_0$ ).

Tabela 6: Erro percentual para diferentes números de termos na expansão de Taylor.

$n_e$	$R_0(\text{ms/s})$	Erro (%)	$n_e$	$R_0(\text{ms/s})$	Erro (%)
1	15,82	58,20%	6	60,15	0,25%
2	23,13	15,65%	7	70,06	0,09%
3	31,57	5,23%	8	80,03	0,04%
4	40,75	1,86%	9	90,01	0,01%
5	50,34	0,68%	10	100	0,00%

Com os valores escolhidos de  $n_e$  e  $R_0$  é possível determinar o tempo até a próxima publicação, dado um consumo de ocupação real ( $v_r(t)$ ) já efetuado na comunicação e o consumo teórico até esse mesmo momento ( $v_t(t)$ ).

O volume teórico até o momento  $t$  é representado por (ver Equação 12):

$$v_t(t) = -\frac{R_0}{C}[e^{-ct} - 1] \quad (29)$$

Para a publicação de um determinado quadro com tempo de ocupação do canal  $V_f$ , é preciso descobrir qual o intervalo de tempo deve-se esperar para que a expressão de tempo demandado seja atendida, o que pode ser calculado pela Equação 7. Para isso, considere  $t$  como o tempo atual e  $t_d$  como o instante de tempo posterior onde  $V_d$  poderá ser atendido.

$$V_d = v_r(t) + V_f - v_t(t) \quad (30)$$

$$V_d = v_r(t) + V_f + \frac{R_0}{C}[e^{-ct} - 1] \quad (31)$$

Sabendo-se que  $V_d$  representa uma diferença de volume entre os instantes de tempo  $t_d$  e  $t$ , tem-se:

$$V_d = r(t_d) - r(t) = -\frac{R_0}{C}[e^{-ct_d} - 1] + \frac{R_0}{C}[e^{-ct} - 1] \quad (32)$$

$$V_d = -\frac{R_0}{C}[e^{-ct_d} - e^{-ct}] \quad (33)$$

Substituindo-se 33 em 31, tem-se:

$$-\frac{R_0}{C}[e^{-ct_d} - e^{-ct}] = v_r(t) + V_f + \frac{R_0}{C}[e^{-ct} - 1] \quad (34)$$

$$-\frac{R_0}{C}[e^{-ct_d} - 1] = v_r(t) + V_f \quad (35)$$

$$e^{-ct_d} = 1 - \frac{C}{R_0}(v_r(t) + V_f) \quad (36)$$

$$t_d = -\frac{1}{C} \ln \left[ 1 - \frac{C}{R_0}(v_r(t) + V_f) \right] \quad (37)$$

O emprego do volume total, em sua forma aproximada (Equação 28), permite reescrever essa equação de forma mais compreensível:

$$t_d = -\frac{1}{C} \ln \left[ \frac{V - (\nu_r(t) + V_f)}{V} \right] \quad (38)$$

Ou seja, desde que exista volume disponível para o tempo de canal demandada ( $(\nu_r(t) + V_f) < V$ ), o instante de tempo para início da transmissão é uma relação com o logaritmo da fração desejada de tempo dado um volume total.

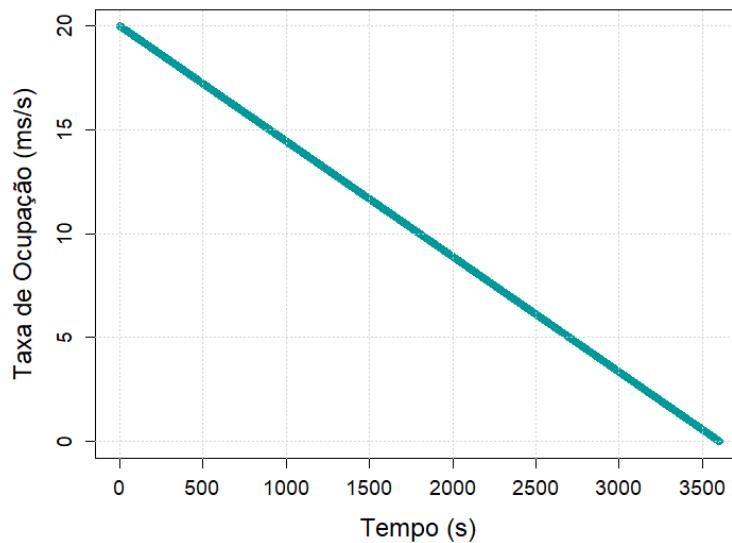
### 3.1.3 Uso da rede com decaimento linear

Outra proposta apresentada nesse trabalho é a utilização de um decaimento linear para a taxa de ocupação do canal, como apresentado na Figura 13. Assumindo uma taxa inicial de utilização  $R_0$  é possível representar a taxa de uso como visto na Equação 39. O volume total é também facilmente determinado pela integral da área, presente na Equação 40.

$$r(t) = -\frac{R_0 t}{P} + R_0 \quad (39)$$

$$V = \int_0^P r(t) dt = \frac{PR_0}{2} \quad (40)$$

Figura 13: Taxa de ocupação com decaimento linear.



Com isso e considerando-se o ciclo útil  $d$ ,  $R_0$  também pode ser determinado ao se assumir o consumo de todo o ciclo útil.

$$V = P \times d \times 1000 = \frac{PR_0}{2} \quad (41)$$

$$R_0 = 2000 \times d \quad (42)$$

O volume teórico até o momento  $t$  pode ser calculado com a integração de  $r(t)$ , representado por:

$$v_t(t) = \int_0^t \left( -\frac{R_0 t}{P} + R_0 \right) dt = R_0 t - \frac{R_0 t^2}{2P} \quad (43)$$

O cálculo do tempo de publicação de um determinado quadro  $V_f$  sabendo-se que já foi consumido o volume real  $v_r(t)$  pode ser determinado como:

$$v_t(t_d) = v_r(t) + V_f \quad (44)$$

$$R_0 t_d - \frac{R_0 t_d^2}{2P} = v_r(t) + V_f \quad (45)$$

$$t_d^2 - 2Pt_d + \frac{2P}{R_0} (v_r(t) + V_f) = 0 \quad (46)$$

Assumindo-se que  $v_r(t) + V_f < V$ , ou seja, que exista tempo de uso de canal disponível, a solução da Equação 40 é dada por:

$$t_d = \frac{2P \pm \sqrt{4P^2 - \frac{8P}{R_0} (v_r(t) + V_f)}}{2} = P \pm \sqrt{\frac{4P^2 - \frac{8P}{R_0} (v_r(t) + V_f)}{4}} \quad (47)$$

$$t_d = P \pm \sqrt{P^2 - \frac{2P}{R_0} (v_r(t) + V_f)} \quad (48)$$

Como as soluções que estão acima do período atual não são relevantes, uma vez que foi feita a suposição de que ainda existe tempo de uso disponível no período, basta considerar o menor valor de  $t_d$ , ou seja:

$$t_d = P - \sqrt{P^2 - \frac{2P}{R_0} (v_r(t) + V_f)} \quad (49)$$

O período de contenção existirá caso o valor calculado para  $t_d$  seja superior ao tempo atual  $t$  e valores menores do que  $t$  dispensam esperas, considerando apenas a margem RM.

### 3.1.4 Uso constante da rede

O caso de utilização constante da banda disponível pode ser considerado uma situação especial do caso linear (

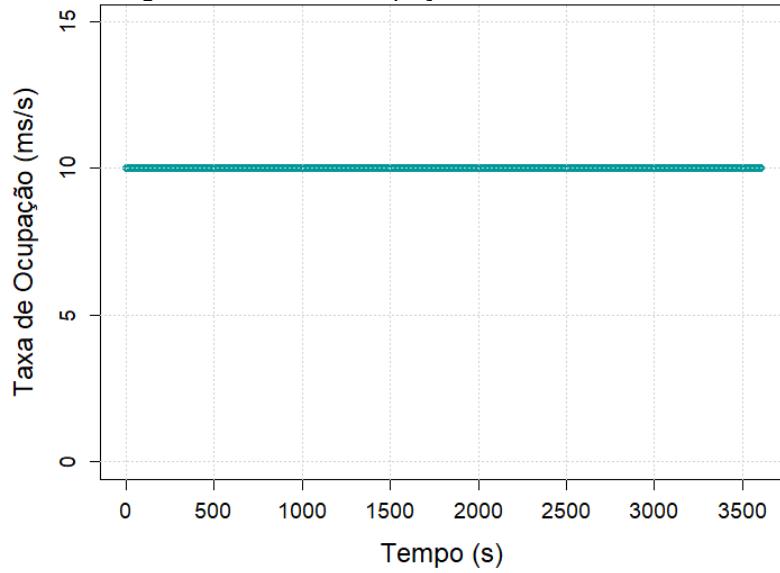
Figura 14). O volume de uso é dado por  $V = P \times d \times 1000 = P \times R_0$ , de onde é possível definir  $R_0 = 1000 \times d$ . A taxa de ocupação e o volume acumulado real são, respectivamente,  $r_t(t) = R_0$  e  $v_t(t) = R_0 t$ .

Para cálculo do tempo de contenção, é possível usar a seguinte expressão:

$$v_t(t_d) = v_r(t) + V_f = R_0 t_d \quad (50)$$

$$t_d = \frac{v_r(t) + V_f}{R_0} \quad (51)$$

Figura 14: Taxa de ocupação com uso constante.

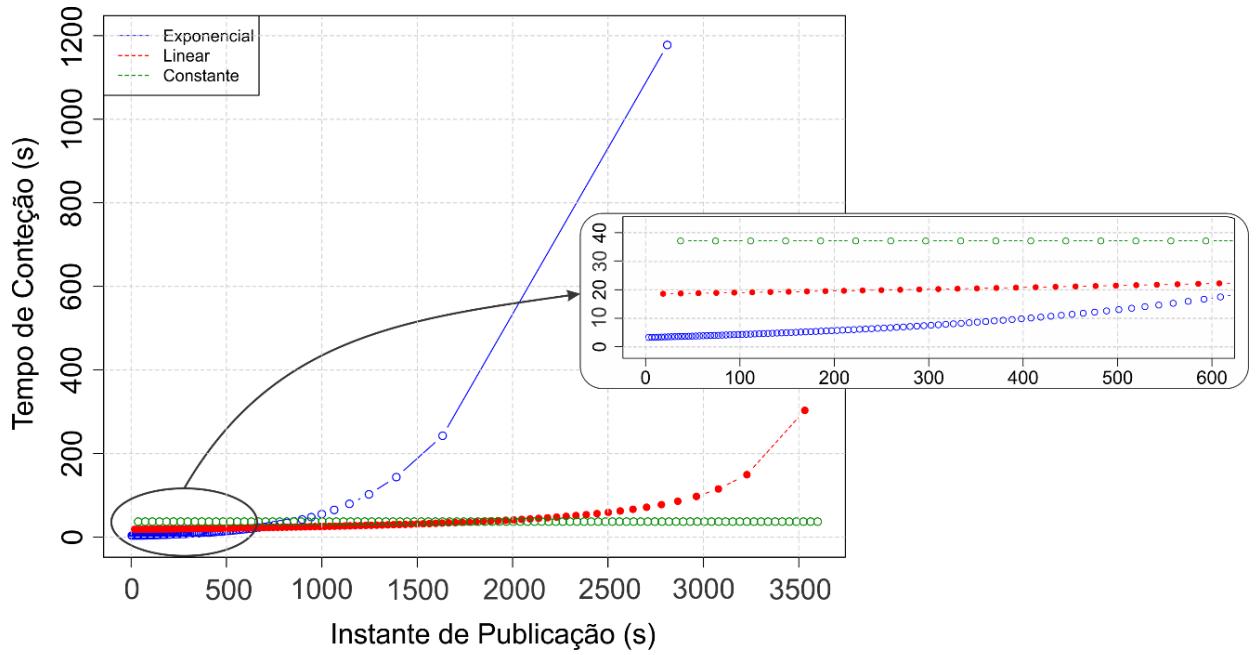


### 3.1.5 Considerações gerais

Já considerando o cenário a ser utilizado para os testes e ressaltando a adoção da região AU915, o tempo de envio de um quadro de *Join Request*, com DR2, *Spreading Factor* 10, largura de banda de 125KHz e *code rate* 4/5 é de aproximadamente 371ms, ou seja,  $V_f = 371ms$ .

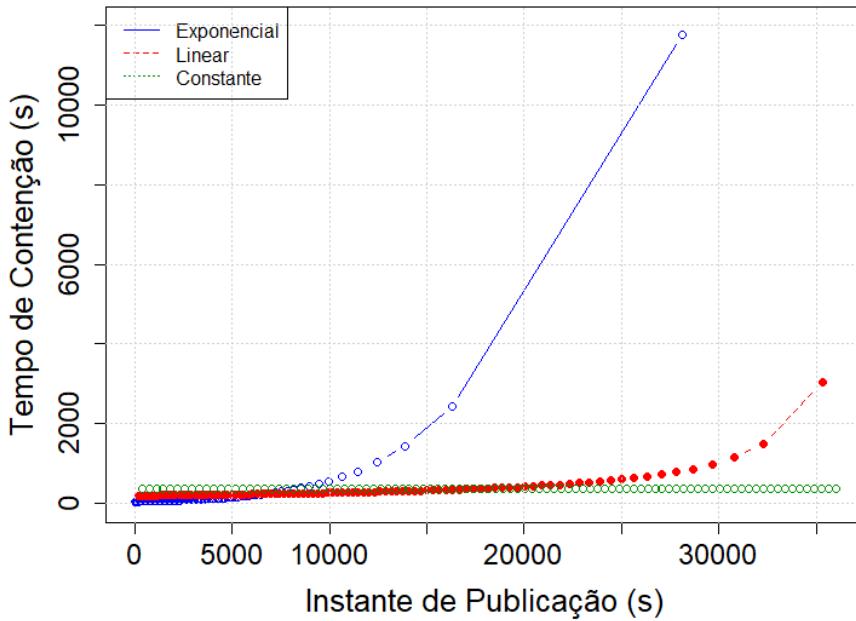
Com base na Tabela 3, foi evidenciado, na própria Seção 2.2.3, a existência de períodos de funcionamento do dispositivo quanto ao ciclo útil. Sendo assim, considerando o período da primeira hora ( $P = 3600$ ), ciclo útil de 1% ( $d = 0,01$ ),  $n_e = 10$ ,  $V_f = 371ms$ , é possível calcular os valores de  $R_0$ ,  $C$  e os instantes de tempo de publicação ( $td$ ) para todas as três estratégias. Os resultados para os valores de  $t_d$  ao longo do período podem ser vistos na Figura 15, onde é possível perceber que para os primeiros dez minutos de operação, cada estratégia possui sua dilatação nos pontos de publicação de acordo com o equacionamento apresentado, evidenciando a rapidez da estratégia exponencial, seguida da linear e depois a constante.

Figura 15: Tempo de contenção entre retransmissões para todas as estratégias e janela na 1<sup>a</sup> hora de uso.



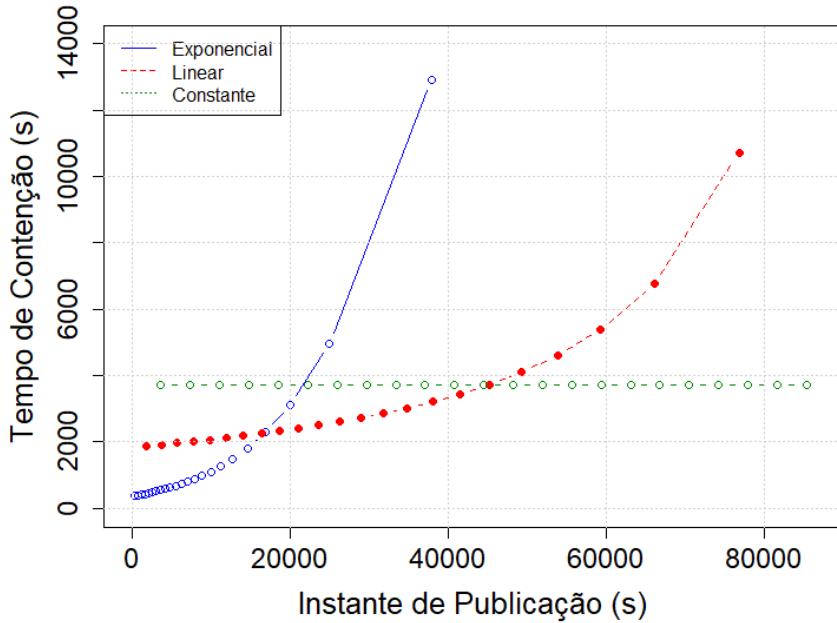
Levando em conta ainda esse mesmo cenário, porém para a janela entre a primeira hora e a decima primeira ( $P = 36000$ ) e ciclo útil de 0,1%, tem-se os instantes de tempo das publicações na Figura 16.

Figura 16: Tempo de contenção entre retransmissões para todas as estratégias e janela entre a 1<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> hora de uso.



Já a Figura 17 representa os instantes de tempo de publicação  $td$  a partir da decima primeira hora de uso em diante até completar 24 horas no respectivo período, com ciclo útil de 0,01% ( $d = 0,0001$ ).

Figura 17: Tempo de contenção entre retransmissões para todas as estratégias e janela a partir da 11<sup>a</sup> hora de uso até as 24hs subsequentes.



Na Figura 15, Figura 16 e Figura 17, pode-se observar que a estratégia exponencial utiliza boa parte do seu volume nos primeiros momentos do período, já a linear tem seus momentos de publicação mais espaçados se comparada à exponencial. Em compensação, a constante distribui igualmente todos os momentos de publicação ao longo do período. Considerando a primeira hora ( $P = 3600$ ), para todas as estratégias, o dispositivo dispõe de uma quantidade máxima de 97 tentativas de publicação de quadros de *Join Request*. Já para a segunda janela ( $P = 36000$ ), também há uma quantidade máxima de 97 retransmissões possíveis, porém mais espaçadas no tempo. Por fim para a terceira janela ( $P = 86400$ ), o número disponível de publicações de quadros de *Join Request* é de apenas 23, pois o volume permitido de uso no ar reduz de 36 segundos para 8,7 segundos.

Outra consideração importante é que alterações no *Spreading Factor*, influenciam diretamente no cálculo dos tempos de contenção. Segundo ALLIANCE (2018a) o *data rate* padrão para o *Join Request* é o DR2 a fim de manter a limitação de 400ms quanto ao tempo de duração do quadro no ar e não faz nenhuma menção ao uso de *data rates* maiores (DR3, DR4 e DR5) que resultariam em um tempo de quadro no ar menor. Tendo em vista as considerações aqui tomadas, a Tabela 7 reuni as possíveis configurações de SF e BW que atendem a norma regional AU915, com seus respectivos valores máximos para possíveis retransmissões e a duração do quadro no ar durante a transmissão.

Tabela 7: Comparativo entre os data rates e número de possíveis quadros de *join request* para uso das estratégias de ciclo útil.

Taxa de dados	Configuração LoRa	ToA [ms]	Nº de possíveis retransmissões de <i>Join Request</i>
DR2	SF10 /125KHz	371	97
DR3	SF9 /125KHz	206	175
DR4	SF8 /125KHz	114	316
DR5	SF7 /125KHz	62	581
DR6	SF8 /500KHz	29	1241

### 3.2 PROPOSTA DE TAXA DE DADOS ADAPTATIVA

Tendo em vista que, conforme exposto na Tabela 7 e de acordo com ALLIANCE (2018a) é possível utilizar *data rates* maiores para o quadro de *Join Request*. Sabendo-se que a relação entre o tempo do quadro no ar e a taxa de envio é diretamente proporcional, isso implica que, o uso de uma taxa maior pode vir a aumentar a eficiência durante o processo de associação em toda a rede pois, com quadros que demandam menor ocupação no ar, a chance de colisão entre EDs tende a se reduzir.

Pensando nisso, será proposto a criação e uso de uma espécie de ADR (*adaptive data rate*) durante o processo de associação, especificamente nos quadros de *Join Request*. Vale ressaltar que é possível criar diversos algoritmos que regem a utilização dos diferentes DR ao longo do tempo durante o processo de *Join*.

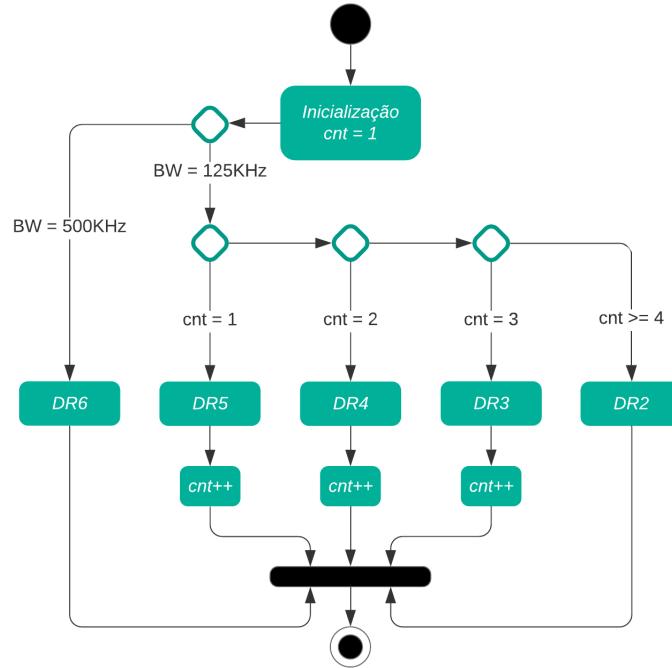
Em uma topologia de rede onde os EDs estão próximos ao *gateway*, quanto maior for o DR, por exemplo DR5, maiores são as chances de melhorar a eficiência na associação, pois resultará em um menor número de colisões. Entretanto se essa distância for grande, a utilização de uma taxa elevada tende a ter um resultado ruim, sendo que o ideal seria usar o maior *spreading factor* possível, o DR2.

Diferente do ADR implementado na norma para os quadros de dados, o ADR para o quadro de *Join Request* não possui ainda nenhum valor referente a RSSI ou SNR do *gateway*, além do fato de que o algoritmo é executado inteiramente no ED e não no *gateway*. Dessa forma não há como haver uma malha de controle para a seleção do DR utilizado.

Analizando as possibilidades e restrições, será proposto a criação de um ADR de forma linear, levando em consideração apenas os canais de 125KHz. O algoritmo inicia sempre com o maior DR possível e à medida que houver necessidade de retransmissões, o DR é decrementado até atingir sua menor taxa que respeite ao tempo do quadro no ar máximo de 400ms, onde a partir desse ponto o DR se tornará fixo. Os canais de 500KHz não entram no cálculo do algoritmo, porém se algum deles for sorteado para uso, será utilizado o DR6 (ALLIANCE, 2018b).

O algoritmo descrito pode ser observado, de forma completa, na Figura 18.

Figura 18: Fluxograma do algoritmo de ADR proposto durante o processo de *Join*.



Levando em conta o algoritmo do ADR proposto e ainda assumindo o uso de uma máscara de canais de 125KHz e de posse das Equações 38, 49 e 51 para cálculo de  $t_d$ , a Tabela 8 foi compilada. Nela os valores para o tempo de contenção  $t_c$  já subtraem o tempo atual, porém sem adicionar a RM.

Tabela 8: Comparativo entre os tempos de contenção  $t_c$  para os quatro primeiros quadros em relação ao período do ciclo, estratégia e uso do ADR.

Fase do ciclo útil	Estratégia	Tempo de contenção sem ADR (s)				Tempo de contenção com ADR (s)			
		1º quadro	2º quadro	3º quadro	4º quadro	1º quadro	2º quadro	3º quadro	4º quadro
1	Exponencial	3,73	3,77	3,81	3,85	0,62	1,14	2,08	3,77
1	Linear	18,60	18,70	18,80	18,90	3,10	5,71	10,34	18,70
1	Constante	37,10	37,10	37,10	37,10	6,20	11,40	20,60	37,10
2	Exponencial	37,30	37,70	38,10	38,50	6,21	11,44	20,76	37,69
2	Linear	186,00	187,00	188,00	189,00	31,00	57,10	103,40	187,00
2	Constante	371,00	371,00	371,00	371,00	62,00	114,00	206,00	371,00
3	Exponencial	379,00	397,00	416,00	437,00	62,50	115,60	212,90	397,10
3	Linear	1875,00	1918,00	1964,00	2016,00	311,00	574,00	1047,00	1919,00
3	Constante	3710,00	3710,00	3710,00	3710,00	620	1140,00	2060,00	3710,00

Analizando a Tabela 8 é possível perceber que, com o algoritmo de ADR proposto, o tempo de contenção para os 3 primeiros quadros é bem menor se comparada ao caso

sem o ADR. Esse efeito se torna ainda mais relevante se considerado a segunda janela da 1<sup>a</sup> a 11<sup>a</sup> hora e para a terceira janela (próximas 24hs).

### 3.3 PROPOSTA DE MARGEM ALEATÓRIA ADAPTATIVA

Segundo ALLIANCE (2018b) e conforme visto na Tabela 3, existem margens aleatórias entre as transmissões de quadros de *join request*, adicionadas ao período de contenção, conforme Equação 8. Pensando em uma rede com alta densidade de EDs, essa margem aleatória tende a contribuir com um melhor desempenho da comunicação. Com o intuito de reduzir o número de colisões de quadros no ar da rede, quanto maior for o limite dessa margem aleatória, menor a probabilidade de colisões, porém em contrapartida, maior será o tempo para associação à rede. Tendo em vista os pontos levantados e as recomendações da Tabela 3 é proposto a criação de uma margem aleatória com crescimento linear ao longo do período da janela, denominada de ARM (*adaptive random margin*). A Equação 52 mostra o cálculo da equação da reta para se obter o máximo e mínimo para o sorteio de RM.

$$RM = \frac{(RM_2 - RM_1)}{V} * v_r(t) + RM_1 \quad (52)$$

Onde:

$RM_1$ : margem aleatória do início do período da janela.

$RM_2$ : margem aleatória do final do período da janela.

Conforme visto na Tabela 3, existem fases do ciclo útil em relação ao tempo de funcionamento do dispositivo desde sua inicialização. Dessa forma serão calculados os valores iniciais e finais da margem aleatória, seguindo a Equação 52 para as 3 primeiras fases de funcionamento do ED.

O equacionamento para cálculo de  $RM_{\min}$  e  $RM_{\max}$  considerando o primeiro período do ciclo ( $P = 3600s$ ),  $d = 1\%$  e  $V = 36000ms$ , pode ser visto a seguir.

$$RM_{\min} = \frac{(1000 - 0)}{36000} * v_r(t) + 0 \quad (53)$$

$$RM_{min} = 0,027777 * v_r(t) \quad (54)$$

$$RM_{max} = \frac{(11000 - 1000)}{36000} * v_r(t) + 1000 \quad (55)$$

$$RM_{max} = 0,27777 * v_r(t) + 1000 \quad (56)$$

Avaliando agora a segunda janela da Tabela 3, com  $P = 36000s$ ,  $d = 0,1\%$  e  $V = 36000ms$ , o equacionamento é apresentado nas Equações 57 a 60.

$$RM_{min} = \frac{((1000 + 1000) - 1000)}{36000} * v_r(t) + 1000 \quad (57)$$

$$RM_{min} = 0,027777 * v_r(t) + 1000 \quad (58)$$

$$RM_{max} = \frac{((35000 + 1000) - 11000)}{36000} * v_r(t) + 11000 \quad (59)$$

$$RM_{max} = 0,694444 * v_r(t) + 11000 \quad (60)$$

Partindo para a terceira janela, com  $P = 86400s$ ,  $d = 0,01\%$  e  $V = 8700ms$ , o equacionamento é demonstrado a seguir.

$$RM_{min} = \frac{((1000 + 2000) - 2000)}{8700} * v_r(t) + 2000 \quad (61)$$

$$RM_{min} = 0,114943 * v_r(t) + 2000 \quad (62)$$

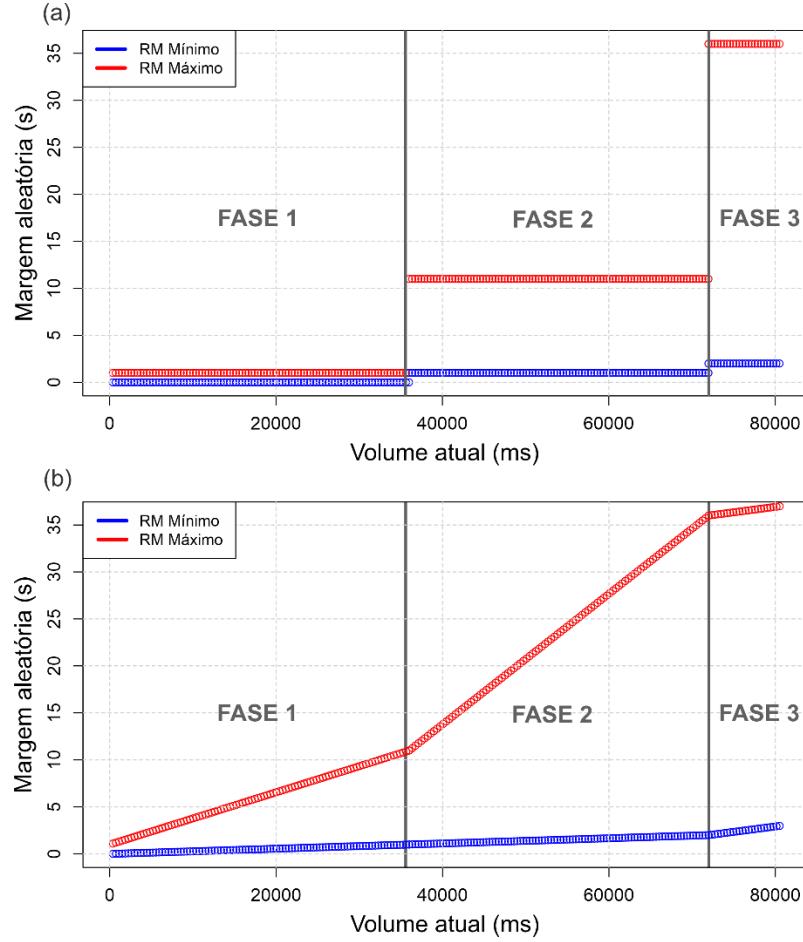
$$RM_{max} = \frac{((35000 + 2000) - 36000)}{8700} * v_r(t) + 36000 \quad (63)$$

$$RM_{max} = 0,114943 * v_r(t) + 36000 \quad (64)$$

Levando em consideração as 3 primeiras fases do ciclo útil e os valores calculados nas equações anteriores, a Figura 19 foi construída com o intuito de comparar o impacto na margem aleatória com a estratégia convencional da norma LoRaWAN e com a estratégia adaptativa proposta neste trabalho .Na análise da ARM proposta é possível notar que o limite inferior da margem aleatória para a fase 1 inicia em 0 e vai até 1 segundo no final do período. Já o limite superior de RM varia entre 1 e 11 segundos,

ambos de forma linear segundo o volume  $v_r(t)$  atual. Analisando o cálculo convencional da margem é possível notar que, para a primeira janela o limite mínimo e máximo de RM é constante ao longo de todo o período e valeria 0 e 1 segundo, respectivamente.

Figura 19: Valores mínimo e máximo para RM (a) com a RM padrão e (b) com a estratégia de ARM proposta.



A intenção desse aumento linear dos limites para o sorteio aleatório da margem está na expectativa de redução no número de colisões entre quadros, visto que a ocupação no ar para envio de um quadro com DR2 é de 371ms.

O presente capítulo apresentado, reuniu em suma, toda a formulação teórica, através de equações, fluxogramas, além de figuras e tabelas com o intuito de facilitar a compreensão de cada uma das propostas. Seguindo a diante, o próximo capítulo irá explorar toda a metodologia e estruturação dos testes e análises dos dados, assim como a infraestrutura física para realização de tais testes.

## **4 METODOLOGIA**

No presente capítulo o foco principal é a definição do escopo completo para todos os testes experimentais a serem realizados. No primeiro momento serão definidas todas as variáveis independentes e dependentes. Posteriormente, todos os testes serão detalhados e agrupados por cenários específicos, segundo os objetivos deste trabalho. O próximo passo consiste nas definições da forma como os dados serão coletados. Por fim uma abordagem prática das estratégias propostas de ciclo útil e seu real impacto nos tempos de transmissão dos dispositivos será realizada.

Após os dados serem coletados a próxima etapa consiste na análise dos mesmos. Com esse objetivo em mente, os dados serão abordados através de uma análise descritiva, com o auxílio de diversos gráficos e tabelas. Posteriormente serão definidos testes estatísticos como forma de provar estatisticamente a influência das variáveis independentes nas variáveis dependentes em questão.

Dando continuidade, será apresentado toda a infraestrutura eletrônica e mecânica adotada para a realização dos testes de desempenho na rede, incluindo o servidor, gateway e dispositivos.

Por fim, a lista das ferramentas e/ou programas utilizados durante o desenvolvimento e análise do presente trabalho será listada.

### **4.1 DEFINIÇÕES DE ESCOPO DOS TESTES**

O escopo de todos os testes práticos, realizados na rede LoRaWAN, serão apresentados em detalhes durante o decorrer da presente seção. Como visto previamente, o objetivo principal do presente trabalho consiste na proposta de uso de ciclo útil durante o processo de associação à rede. Como objetivos secundários tem-se as propostas de taxa de dados adaptativa (ADR) e da margem aleatória adaptativa (ARM), todas devidamente analisadas através da variação de alguns fatores internos do rádio, do protocolo LoRaWAN e da infraestrutura do sistema e tendo o desempenho de

junção à rede como balizador. Sendo assim, onze testes práticos foram realizados com o intuito de avaliar o impacto das estratégias de ciclo útil propostas em diversos cenários.

#### 4.1.1 Variáveis

Do ponto de vista estatístico existem dois tipos de variáveis, as independentes e as dependentes. O objetivo principal é estabelecer relações entre as mudanças das variáveis independentes e as mudanças nas variáveis dependentes (SCHMULLER, 2019).

##### 4.1.1.1 Variáveis independentes

As variáveis a serem manipulados nos experimentos, ou seja, variáveis independentes são:

- Estratégia de uso do ciclo útil;
- Utilização do ADR proposto;
- Utilização do ARM proposto;
- Máscara de seleção de canais;
- Distância entre o *gateway* e os dispositivos;
- Número de dispositivos na rede;
- Redução do ciclo útil.

##### 4.1.1.2 Variáveis dependentes

Os testes para aferir o desempenho da junção à rede LoRaWAN através do método OTAA consideraram sete variáveis dependentes, detalhadas a seguir junto com a classificação seu respectivo tipo de dado.

- (Discreto) Número de transmissões de quadros de *Join Request*;
- (Contínuo) Tempo total para que o ED realize a associação à rede, dado em segundos (contados desde a inicialização do dispositivo);
- (Discreto) Volume real de uso na rede até o momento da associação, dado em porcentagem em relação ao período corrente do ciclo útil;

- (Categórico) Lista dos oito primeiros canais utilizados pelo ED (depende do número de transmissões);
- (Categórico) Canal em que foi realizada a associação à rede;
- (Discreto) RSSI do quadro de *join accept*;
- (Discreto) SNR do quadro de *join accept*;

#### 4.1.2 Cenários

Antes de definir todos os cenários de teste é importante adiantar alguns pontos importantes quanto a infraestrutura da rede. Cada teste utilizará no máximo 20 dispositivos, instalados lado a lado em uma posição fixa. Já quanto ao *gateway*, dois equipamentos foram utilizados instalados fixamente em locais distintos e identificados com ID 1 e 2. Todos esses detalhes serão amplamente explanados na Seção 4.4.

Os cenários de testes foram criados com o intuito de validar o impacto do ciclo útil em diversas situações diferentes na rede LoRaWAN. Cada cenário também trará uma análise segundo os objetivos secundários, previamente definidos.

Foram criados seis cenários distintos, englobando os onze testes realizados, apresentados na Tabela 9, onde serão detalhados mais a seguir. São eles:

**CENÁRIO A:** Máscara de seleção de canais;

**CENÁRIO B:** Distância entre os dispositivos e o *gateway*;

**CENÁRIO C:** Número de dispositivos na rede;

**CENÁRIO D:** Redução do ciclo útil;

**CENÁRIO E:** Proposta do ADR;

**CENÁRIO F:** Proposta do ARM.

Tabela 9: Agrupamento dos cenários e testes e seus parâmetros.

Cenário	ID Teste	Dispositivos		Gateway		Variáveis
		Nº	Canais	ID	Canais	
A	1		0 a 7	1	0 a 7 e 64	Nº de Transmissões, tempo de associação, volume ocupado, 8 primeiros canais, canal de associação, RSSI e SNR
	2		0 a 7 e 64			
	3	20	0	1 e 2	0 a 7 e 64 8 a 15 e 65	
	4		0 a 71			
B	5	20	8 a 15	2	8 a 15 e 65	
C	6	14	0 a 7	1	0 a 7 e 64	
	7	8				
D	8	20	0 a 7	1	0 a 7 e 64	
E	9	20	0 a 7	1	0 a 7 e 64	
F	10	20	0	1	0 a 7 e 64	

#### 4.1.2.1 Cenário A

O objetivo dos testes do cenário A é abranger o objetivo primário quanto ao uso do ciclo útil e também analisar o desempenho da rede no processo de associação de acordo com a máscara de seleção de canais escolhida no dispositivo.

O cenário A se refere ao uso de diferentes máscaras de canais de seleção nos dispositivos. A máscara de canais consiste na faixa de canais de frequência, previamente configurados no dispositivo e utilizados para a seleção do canal para o envio dos quadros de *join request* onde, seu mecanismo de seleção foi explicado na Subseção 2.3.1. Como visto na Tabela 9, quatro testes, identificados pelos IDs de 1 a 4 foram realizados. O teste 1 consiste na configuração dos canais de 0 a 7 com BW 125KHz. Já para o teste 2 é utilizado os canais de 0 a 7 com BW 125KHz mais o canal 64 com BW 500KHz. Já para o teste 3, todos os dispositivos foram configurados no canal 0 com BW 125KHz. Por fim, no teste 4 foi utilizado todos os canais disponíveis para *uplink* do protocolo LoRaWAN, que são de 0 a 71, sendo estes, de 0 a 63 com BW 125KHz e de 64 a 71 com BW 500KHz. É importante ressaltar que todos os outros parâmetros permaneceram iguais para os testes de 1 a 3 do respectivo cenário. Contudo, como para o teste 4 não havia a possibilidade de desligamento do gateway 2, apenas no presente teste foram utilizados os dois gateways 1 e 2, configurados em seus respectivos canais.

No cenário A haverá a análise do impacto das estratégias de ciclo útil em todos os testes realizados e, por fim será realizada uma análise comparativa entre a escolha da máscara de seleção de canais e o desempenho no processo de junção à rede.

#### 4.1.2.2 Cenário B

Os testes do cenário B enquadram o objetivo primário quanto ao uso do ciclo útil e também o objetivo secundário da análise do desempenho da rede no processo de associação de acordo com a distância entre os dispositivos e o *gateway*.

O cenário B representa a distância entre os dispositivos e o *gateway*. Como visto na Tabela 9 apenas um teste, identificado como 5 será realizado. Para esse teste os canais de seleção utilizados foram do 8 ao 15 com BW 125KHz e comunicando apenas com o *gateway* 2.

No cenário B haverá a análise do impacto das estratégias de ciclo útil para o único teste e também será realizada uma análise comparativa entre a distância dos EDs e o *gateway* e o desempenho no processo de junção à rede. Para esse comparativo será utilizado o próprio teste 5 e o teste 1 do cenário A, devido ao fato de ambos utilizarem máscara de oito canais BW 125KHz, variando apenas o *gateway* utilizado para cada respectivo teste.

#### 4.1.2.3 Cenário C

Os testes do cenário C, além do objetivo primário, também envolvem o desempenho da rede no processo de associação segundo o número de dispositivos na rede.

O número de dispositivos tentando se associar à rede LoRaWAN é analisado no cenário C. Segundo a Tabela 9, dois testes, identificados como 6 e 7 serão realizados, com 14 e 8 dispositivos na rede respectivamente. A máscara de seleção de canais utilizada é a de oito canais com BW 125KHz e foi utilizado o *gateway* 1.

Toda a análise das estratégias de ciclo útil será realizada nos testes do cenário C, além da análise comparativa entre o número de dispositivos presentes na rede. Com esse

objetivo, os dois testes do presente cenário serão utilizados, além do teste 1 do cenário A, que apresenta os parâmetros de canais e *gateway* iguais.

#### 4.1.2.4 Cenário D

Os testes do cenário D enquadram o objetivo primário quanto ao uso do ciclo útil e também o objetivo secundário da análise do desempenho da rede no processo de associação de acordo com a redução do ciclo útil.

O cenário D se refere a redução do ciclo útil da rede. Como demonstrado na Seção 2.2.3 existem três fases iniciais definidas para o uso do ciclo útil segundo o tempo de execução do dispositivo, que são:

- Fase 1 ( $t < 1h$ ): ciclo útil (1%) e margem adaptativa ( $0 < RM < 1$ );
- Fase 2 ( $1h \leq t \leq 11h$ ): ciclo útil (0,1%) e margem adaptativa ( $1 < RM < 11$ );
- Fase 3 ( $11h < t \leq 35h$ ): ciclo útil (0,01%) e margem adaptativa ( $1 < RM < 35$ );

O teste 8 do cenário D, Tabela 9, é realizado considerando a fase 2 do ciclo útil, para isso assumiu-se que todos os dispositivos da rede falharem em realizar a associação e iniciaram sincronamente a partir da 1<sup>a</sup> hora de funcionamento. Vale salientar também que todos os outros testes realizados foram considerados durante a fase 1 (1<sup>a</sup> hora de funcionamento) para o ciclo útil.

No cenário D haverá a análise do impacto das estratégias de ciclo útil no respectivo teste e, por fim será realizada uma análise comparativa entre a fase 1 e 2 do ciclo útil. Para isso será utilizado os dados do teste 8 do presente cenário, além do teste 1 do cenário A que apresenta os mesmos parâmetros da rede, apenas com a alteração da fase do ciclo útil.

#### 4.1.2.5 Cenário E

Quanto ao cenário E, o mesmo irá avaliar o objetivo primário quanto ao uso da estratégia de ciclo útil e também a proposta secundária da taxa de dados adaptativa.

O cenário E representa a validação da proposta de taxa de dados adaptativa (ADR). Como visto na Tabela 9 apenas um teste, identificado como 9 será realizado. Para

esse teste a proposta de ADR se encontra habilitada e os canais de seleção utilizados foram do 0 ao 7 com BW 125KHz, comunicando apenas com o *gateway* 1.

No cenário E haverá a análise do impacto das estratégias de ciclo útil para o único teste e também será realizada uma análise comparativa entre o uso do ADR proposto. Para esse fim, será utilizado o próprio teste 9 e o teste 1 do cenário A sem o uso do ADR, devido ao fato de ambos utilizarem máscara de oito canais BW 125KHz e mesmo *gateway*.

#### 4.1.2.6 Cenário F

Quanto ao cenário F, o mesmo irá avaliar o objetivo primário quanto ao uso da estratégia de ciclo útil no processo de associação à rede como também a proposta secundária da margem aleatória adaptativa.

O cenário F se refere a validação da proposta de margem aleatória adaptativa (ARM). Como visto na Tabela 9 o teste identificado como 10 será realizado. Para esse teste a proposta de ARM se encontra habilitada e o canal de seleção utilizado para o teste 10 foi apenas o 0 com BW 125KHz e *gateway* 1. Essa configuração dos parâmetros foi escolhida com base na operação da ARM, vista na Seção 3.3, que dilata o mínimo e máximo da margem aleatória em relação ao tempo, ou seja, quanto maior for o tempo de tentativa de associação à rede, maior o impacto do uso da ARM. Assim sendo, o uso de apenas um canal, teoricamente deve apresentar um pior desempenho em relação ao tempo de associação, fazendo com que o efeito da proposta seja mais perceptível.

No cenário F haverá a análise do impacto das estratégias de ciclo útil no respectivo teste e, por fim será realizada uma análise comparativa entre o uso do ARM proposto. Com esse objetivo em mente, o teste 10 será comparado com o teste 3 do cenário A. O teste 3 apresenta parâmetros semelhantes ao teste deste cenário, porém sem o uso do ARM.

#### 4.1.3 Coleta dos dados

Foi adotado um número de dez repetições para cada teste, com o intuito de se obter uma amostra suficiente para aplicar testes estatísticos.

Como o objetivo primário consiste no uso do ciclo útil durante o processo de associação à rede, todos os testes realizados levaram em conta as estratégias: exponencial, linear e constante, além do caso N.E. (nenhuma estratégia). Para o caso N.E. não haverá o uso do ciclo útil, ou seja, todos os quadros serão enviados imediatamente após a finalização da janela RX2, visto em partes na Figura 6.

Para salvar e ler as sete variáveis de interesse em cada dispositivo foi utilizado um setor de 2Kb da memória não volátil FLASH, do microcontrolador STM32L433. A leitura dos dados de cada ED foi realizada através do modo de depuração com o auxílio do ST-LINK. A fim de se tornar viável as diversas repetições dos inúmeros testes, foram organizadas bateladas de testes automáticas. Como visto anteriormente cada teste foi realizado com um número de repetições igual a 10, além de tratar de todos os casos das estratégias de ciclo útil, ou seja, cada teste será composto por 40 repetições (10 repetições de cada estratégia). No final de toda a execução os dados de cada dispositivos foram salvos individualmente.

Os dados colhidos de cada teste foram trabalhados de forma bruta, sem nenhum agrupamento por média ou mediana, pois o tamanho da amostra é considerável e representa melhor a distribuição da população. Os *outliers* foram identificados e removidos dentro de cada bateria de teste, pois foi identificado que, em alguns dispositivos, por motivo de mal contato no conector da antena, havia uma latência muito superior, se comparado aos outros EDs, chegando até ao ponto de nunca se associar. Por esse motivo também foram removidos os dados para quais os dispositivos não conseguiram realizar o processo de associação corretamente. Para essa finalidade um tempo máximo para o teste de 30 minutos foi adotado.

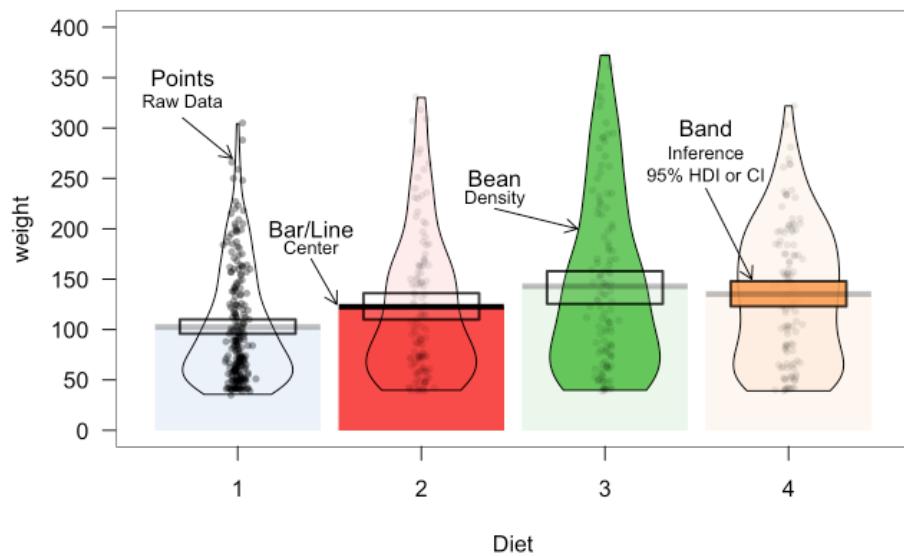
## 4.2 ANÁLISE DESCRIPTIVA

Iniciando com a análise estatística descritiva, para cada teste (1 a 11) os dados brutos foram compilados através de um gráfico chamado *pirateplot*. As variáveis a serem analisadas são: número de transmissões de *join request*, volume utilizado do presente período e tempo de associação à rede. Como já citado anteriormente, dentro de cada cenário será realizado um comparativo entre as estratégias propostas de uso do ciclo útil.

Como o volume de dados é muito grande e existem 4 classes (exponencial, linear, constante e N.E.), além de três variáveis analisadas, a utilização de um gráfico do tipo barras ou um *boxplot* conseguiria expor os dados, mas sem muitos detalhes perceptíveis e comparativos entre as classes. Para esses casos é aconselhado o uso de gráficos do tipo RDI (*Raw, Description and Inference*), ou dado bruto, descrição e inferência. Um gráfico desse tipo é o *pirateplot*, visto na Figura 20 e implementado no R. O *pirateplot* permite mostrar a relação entre uma até três categorias de variáveis independentes e uma variável dependente contínua (PHILLIPS, 2017). Os quatro elementos do *pirateplot* são:

- Pontos: Representam os dados brutos;
- Barra: Mostra a linha de tendência central;
- Distribuição: Representa a densidade suavizada dos dados;
- Inferência: Retângulo representando o intervalo de inferência com relação ao intervalo de confiança.

Figura 20: Elementos do gráfico tipo *pirateplot*.



Fonte: (PHILLIPS, 2017).

Dando continuidade à análise descritiva dos dados, uma tabela condensará os valores de média, desvio padrão e mediana para as seguintes variáveis dependentes: número de transmissões de quadros de *join request*, tempo de associação à rede, volume ocupado, RSSI e SNR. Nessa tabela, os valores apresentados na primeira linha se

referem a média junto com o desvio padrão, no seguinte formato:  $\bar{x} \pm \sigma$ . Já a segunda linha é referente ao valor da mediana dos dados.

Também será apresentado, se necessário para a presente análise, um histograma dos oito primeiros canais sorteados por cada dispositivo e os canais atribuídos à associação. Vale ressaltar que os números apresentados na frequência desse histograma irão depender do número de transmissões de *join request* onde, para os testes com 20 EDs, análise das 3 estratégias mais o caso N.E. e 10 repetições, podem existir valores totais, quanto aos canais selecionados, entre 800 (se todos os EDs tiverem número de transmissões igual a um) e 6400 (se todos os EDs tiverem número de transmissões igual a oito ou mais). Em testes específicos onde o gráfico não contribua com nenhuma análise pertinente ele será omitido.

Por fim, no fechamento dos resultados de cada cenário, três histogramas serão apresentados, um para cada variável de interesse, a saber: número de transmissões de *join request*, volume utilizado do presente período e tempo de associação à rede. Cada histograma reunirá os dados dos testes individuais, permitindo uma comparação direta entre cada teste dentro do cenário em questão, por exemplo, no cenário do uso do ADR, o histograma irá comparar diretamente desempenho no processo de junção à rede sem e com o uso do ADR. Todos esses histogramas apresentados utilizaram o tipo de posição *stack*, ou pilha e com tamanho do intervalo variado para cada caso.

#### 4.3 ESTATÍSTICA NÃO PARAMÉTRICA

Após a aquisição de todos os dados, foram realizadas análises quanto a normalidade das distribuições, a fim de se obter uma orientação quanto ao uso de testes paramétricos ou não paramétricos para a análise estatística dos dados. Foram aplicados testes para checar a normalidade dos resíduos e a homogeneidade da variância, entretanto, as amostras dos dados não foram suficientes para atestar normalidade quanto a distribuição. Partindo dessa análise prévia, um teste não paramétrico é mais aconselhado nesse caso, devido a não normalidade dos dados e do tamanho da amostra

(10 para cada dispositivo). Para esse fim, foi escolhido o teste de Kruskal-Wallis e posteriormente o teste de Dunn.

Para o teste de Kruskal-Wallis foi utilizado um nível de significância de 5%. O intuito inicial do teste consiste em avaliar as seguintes hipóteses:

- Hipótese nula: Todas as medianas entre os grupos do fator analisado são iguais;
- Hipótese alternativa: Nem todas as medianas entre os grupos do fator analisado são iguais.

Após o teste de Kruskal-Wallis, caso seja descartada a hipótese nula é comum utilizar o teste *post-hoc* de Dunn com o objetivo de identificar entre quais grupos da amostra se encontram as diferenças responsáveis pela rejeição da hipótese nula. Com isso é possível detectar, pontualmente, entre quais grupos houve diferença estatisticamente significativa. Caso contrário, se a hipótese nula for aceita, a conclusão é que não há diferença significativa entre os grupos analisados.

No teste *post-hoc* de Dunn a comparação de todas as combinações de grupos possíveis no cenário em questão é realizada, sempre em relação a dois testes. Dois valores calculados são de interesse nesse teste, denominados de p-valor e z-valor. O p-valor indica o aceite ou rejeite da hipótese nula, em que não há diferença entre os dois grupos. Caso o p-valor seja menor que 5%, a hipótese nula é rejeitada e assume-se que existem diferenças entre as medianas dos dois grupos. Nas tabelas apresentadas, se a hipótese nula for rejeitada, o z-valor será apresentado em negrito para melhor visualização, caso a hipótese nula seja aceita os valores não estarão em negrito.

O próximo valor analisado é o z-valor, que indica a relação positiva ou negativa da comparação entre os dois grupos. Por exemplo, se o p-valor é menor que 5% e o z-valor é positivo, isso indica que o teste do grupo 1 apresenta uma mediana menor, em relação a variável dependente, se comparada com o teste do grupo 2. Já um z-valor negativo indica que a mediana do grupo 1 é maior que a do grupo 2.

A análise através de testes não paramétricos será dividida em duas partes dentro de cada cenário. Conforme visto na Seção 4.1.2 para cada cenário será realizada uma análise das estratégias propostas de ciclo útil e também uma análise seguindo os

objetivos secundários. Sendo assim, primeiramente os testes não paramétricos serão aplicados nos dados com relação à análise das estratégias de ciclo útil. Posteriormente os testes não paramétricos serão aplicados com relação ao fator exclusivo daquele cenário em questão, por exemplo, o número de dispositivos na rede.

#### 4.4 INFRAESTRUTURA PARA OS TESTES

Serão analisados, todos os elementos que compõe a rede LoRaWAN, utilizada para os testes de desempenho no processo de associação via OTAA, incluindo o servidor, *gateway* e *end device*. Além disso, também será apresentado a montagem da estrutura para os EDs e a distância entre os *gateways* instalados.

Atualmente a especificação LoRaWAN possui várias versões, sendo as mais recentes a v1.1 e v1.0.4. Todavia, a especificação v1.0.3 está a mais tempo sendo testada e validade em campo e por esse motivo será adotada nesse trabalho.

##### 4.4.1 Servidor

O servidor Linux Ubuntu está hospedado na nuvem pelo serviço web *Amazon Elastic Compute Cloud* (Amazon EC2) com capacidade computacional segura e dimensionável na nuvem. O servidor de rede e de aplicação utilizado foi o ChirpStack, de código aberto, instalado por meio de *containers* via *docker*. O acesso ao servidor pode ser realizado através de uma interface web na porta 8080 e visto na Figura 21.

Figura 21: Interface web do servidor LoRaWAN

The screenshot shows a web-based management interface for a LoRaWAN network. The left sidebar contains a navigation menu with options like Network-servers, Gateway profiles, Organizations, All users, loraserver, Org. settings, Org. users, Service profiles, Device profiles, Gateways, Applications, and Multicast-groups. The main content area has tabs for DEVICES, APPLICATION CONFIGURATION, INTEGRATIONS, and FUOTA. The DEVICES tab is selected, displaying a table of connected devices. The columns in the table are Last seen, Device name, Device EUI, Link margin, and Battery. There are 16 entries in the table, each corresponding to a device named ULORA\_16 through ULORA\_34. The 'Last seen' column shows 'n/a' for all devices. The 'Device name' column lists the device IDs. The 'Device EUI' column shows unique EUI values for each device. The 'Link margin' and 'Battery' columns both show 'n/a'.

Last seen	Device name	Device EUI	Link margin	Battery
n/a	ULORA_16	16504850e9379d20	n/a	n/a
n/a	ULORA_17	16504850e9379e020	n/a	n/a
n/a	ULORA_19	13504850e9379020	n/a	n/a
n/a	ULORA_2	16504850e93397c20	n/a	n/a
n/a	ULORA_21	14504850e9377c20	n/a	n/a
n/a	ULORA_22	14504850e9378520	n/a	n/a
n/a	ULORA_23	14504850e9379220	n/a	n/a
n/a	ULORA_24	14504850e9377520	n/a	n/a
n/a	ULORA_25	14504850e9379320	n/a	n/a
n/a	ULORA_26	16504850e9379620	n/a	n/a
n/a	ULORA_30	16504850e9379120	n/a	n/a
n/a	ULORA_32	14504850e9374f20	n/a	n/a
n/a	ULORA_33	14504850e9376620	n/a	n/a
n/a	ULORA_34	14504850e9937620	n/a	n/a

#### 4.4.2 Gateway

Como um dos objetivos deste trabalho é comparar a eficiência da associação à rede em relação a distância entre o *gateway* e os EDs, foram utilizados dois *gateways* distintos para os testes, denominados ao longo do escopo de *gateway 1* e *gateway 2*.

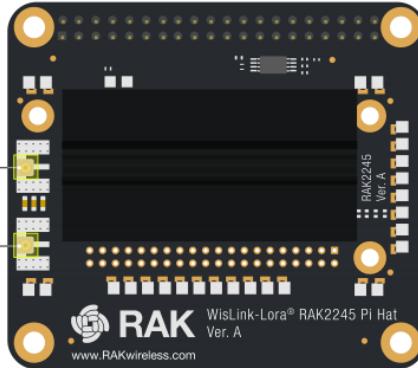
O *gateway 1* utiliza o módulo RAK2245 Pi HAT, realizando o papel de concentrador da rede LPWAN. Esse módulo é compatível com a Raspberry Pi 3 Modelo B+ e compõe completamente o RF *front-end* do *gateway*. O módulo é composto pelo processador SX1301 e mais duas unidades do SX1257 do fabricante Semtech, possui potência máxima de 27dBm e suporte a várias bandas de frequência, incluindo a AU915 (RAK, 2020). O módulo pode ser visto na Figura 22.

Esse módulo é composto pelo SX1301 e SX125x, onde para a banda de frequência de 915Mhz é utilizado o modelo SX1257. O chip SX1301 é um processador digital de sinais com o concentrador LoRa integrado, possuindo capacidade de alta eficiência para transmissão e recepção em vários canais, sendo projetado para receber pacotes LoRa simultaneamente com SFs e canais distinto. O SX1301 permite 10 canais de recepção programáveis, sendo 8 deles conectados diretamente aos rádios SX1257 e podendo apenas ser configurado para canais com BW de 125KHz. Esses 8 canais podem receber qualquer *data rate* (SF7 a SF12) inclusive simultaneamente se estiverem em canais diferentes, ou no mesmo canal, porém com SFs distintos. Existe também 1 canal

que pode ser configurado para um BW de 125KHz ou 500KHz, no caso do teste foi utilizado 500KHz, onde apenas será realizada a demodulação do DR configurado. (SEMTECH, 2018, 2017a).

Os canais configurados para recepção de pacotes na rede LoRaWAN para o *gateway* 1 são: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 64. Os canais 0 a 7 possuem *bandwidth* de 125KHz, já o canal 64 é de 500KHz.

Figura 22: Módulo *gateway* RAK2245 Pi HAT WisLink da RAKWireless.



Fonte: (RAK, 2020).

O *gateway* 2 é uma estação comercial com tecnologia de comunicação bidirecional LoRa, com banda de 902-928 MHz, com potência de 0dBm até 30dBm, utiliza o processador ARM 926EJS e pode ser configurado para recepção de dados através de 9 canais LoRa. A estação pode ser vista na Figura 23.

Os canais de recepção configurados no *gateway* 2 são: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 com 125KHz além do canal 65 com largura de banda de 500KHz.

Figura 23: Gateway Wirnet Station 915 da Kerlink.



Fonte: (KERLINK, 2016).

Em relação ao *firmware* do *gateway*, no geral é composto por vários módulos, onde os principais são: o LoRa *gateway* responsável por concentrar a parte de RF LoRa da

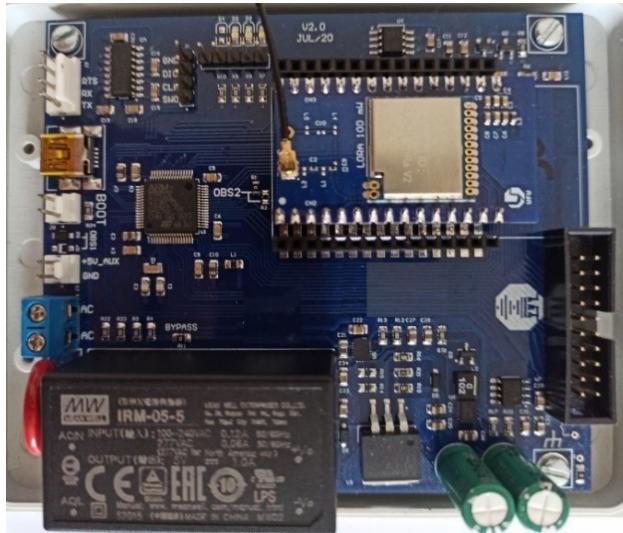
Semtech e o *packet forwarder* que é executado dentro do LoRa *gateway*, responsável por encaminhar os pacotes recebidos de RF ao servidor, via *link IP/UDP*, além de emitir os pacotes de RF solicitados pelo servidor.

#### 4.4.3 Dispositivos

O dispositivo ED, utilizam um rádio LoRa baseado no chip SX1276 de 100mW da fabricante Nice-RF, com banda de frequência de 915MHz e potência máxima de 20dBm. Quanto ao microcontrolador foi utilizado o STM32L433RCTx com núcleo ARM Cortex-M4 32 bits, 256Kb de memória flash e 64Kb de RAM (NICERF, 2020; ST, 2018). Cada rádio LoRa possui também uma antena omnidirecional de 9dBi específica para a frequência de 915MHz.

Foram reunidas um total de 20 placas completas, disponibilizadas pelo laboratório da universidade em parceria com a Companhia Energética de Brasília. A PCB (*print circuit board*) do ED pode ser vista na Figura 24.

Figura 24: PCB do dispositivo.

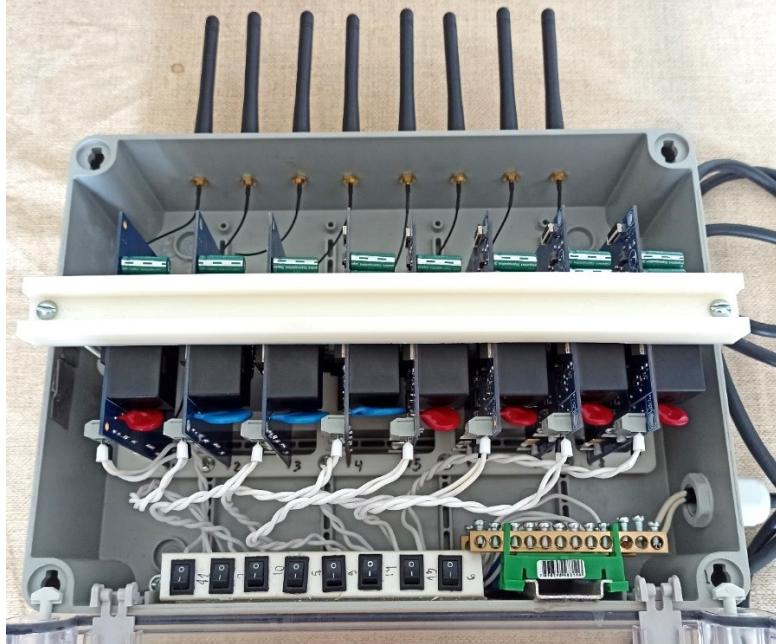


#### 4.4.4 Montagem do sistema

Com o intuito de agrupar as placas dos EDs, vista na Figura 24, foi realizado a montagem de uma caixa para agrupar 8 EDs. Essa caixa compõe toda a fiação para

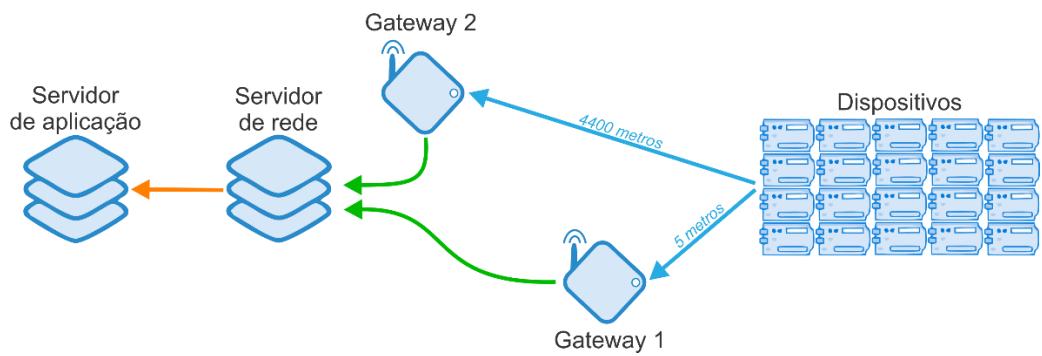
alimentação A/C dos módulos além da conexão com a antena omnidirecional, conforme visto na Figura 25. Vale ressaltar que, duas caixas iguais foram montadas, agrupando 16 EDs. Como os testes propostos utilizarão 20 dispositivos, mais 4 placas foram montadas em caixas menores e individuais.

Figura 25: Montagem da caixa com 8 dispositivos.



A topologia de todo o sistema da rede LoRaWAN com todos os elementos pertinentes pode ser vista na Figura 26.

Figura 26: Topologia do sistema LoRaWAN.



Como discorrido na Seção 4.4.2 dois *gateways* diferentes foram utilizados para os testes propostos. O *gateway* denominado de 1, visualizado na Figura 27, foi montado a uma distância de 5 metros em relação aos EDs e sem a presença de obstáculos.

Já o segundo *gateway*, denominado de *gateway* 2, está instalado em uma torre para antenas nas dependências da Universidade Federal de Uberlândia – campus Umuarama a uma altura de 20 metros em relação ao chão, onde apresenta uma distância de 4400 metros em relação aos EDs instalados (10 metros de altura em relação ao chão), conforme visto na Figura 28. É possível notar que entre o GW2 e os EDs existem dois vales na topografia da região e que há uma diferença de nível entre os dispositivos de 48 metros, contribuindo assim, para um cenário um pouco mais propício para a comunicação.

Figura 27: Montagem do *gateway* 1.



Figura 28: Distância e relevo entre o *gateway* 2 e os EDs.



## 4.5 CONSIDERAÇÕES PARA A PROPOSTA DE USO DO CICLO ÚTIL

A presente seção tem como objetivo estabelecer o vínculo entre o equacionamento proposto para o ciclo útil, apresentado na Seção 3, e seu impacto prático nos dispositivos, em relação aos tempos de contenção para transmissão de quadros.

Para o caso padrão, o quadro do comando de *join request* possui um tempo de ocupação no ar de 371ms com os seguintes parâmetros: DR2 (SF10, BW 125KHz) e CR 4/5. Todas as outras configurações de parâmetros para as mensagens de *uplink*, definidos no escopo dos testes, foram apresentadas previamente na Tabela 7.

O instante de tempo da publicação de um quadro, em relação aos valores de  $t_d$  e  $t_c$ , podem ser calculados através das seguintes equações, vistas na Seção 3.

- Equação 38: Tempo de contenção  $t_d$  para a estratégia exponencial;
- Equação 49: Tempo de contenção  $t_d$  para a estratégia linear;
- Equação 51: Tempo de contenção  $t_d$  para a estratégia constante;
- Equação 8: Tempo de contenção  $t_c$  para todas as estratégias.

Considerando a fase 1 do ciclo útil (1<sup>a</sup> hora de funcionamento), os valores reais para os tempos de contenção em relação as três estratégias propostas e para as 5 primeiras transmissões de quadros podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10: Valores de contenção  $t_d$  e  $t_c$  para os cinco primeiros quadros.

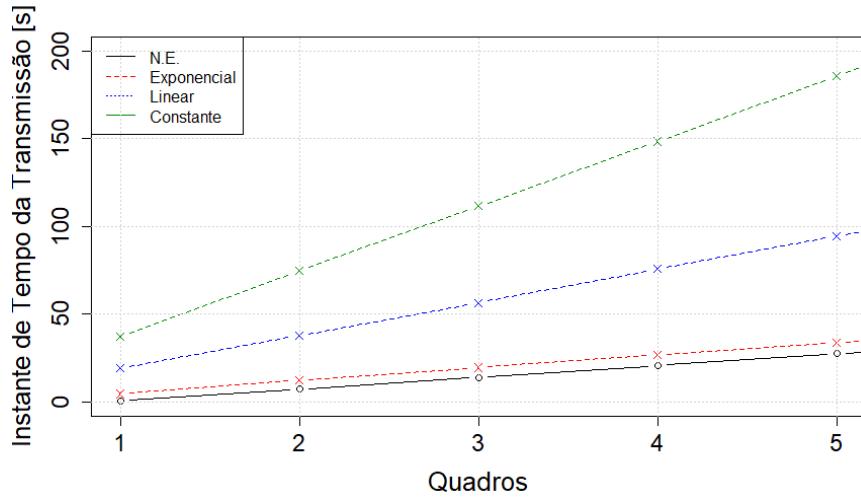
Quadros	Exponencial		Linear		Constante	
	$t_d$ [s]	$t_c$ [s]	$t_d$ [s]	$t_c$ [s]	$t_d$ [s]	$t_c$ [s]
1	3,73	4,06	18,60	18,95	37,00	36,95
2	7,50	1,00	37,29	11,75	74,00	30,67
3	11,31	0,72	58,09	11,85	111,00	30,11
4	15,15	0,38	74,98	12,60	148,00	30,20
5	19,05	0,25	93,98	11,95	185,00	30,55

Com base na Tabela 10 percebe-se que para a estratégia exponencial os valores de  $t_c$  do segundo quadro em diante são pequenos, pois a diferença entre o valor de  $t_d$  atual e o tempo atual do dispositivo é menor que o período da janela de recepção, ou seja  $t_d < t$ . Conforme visto na Figura 6, as janelas de recepção para o dispositivo classe A possuem tempos de 5 e 6 segundos para RX1 e RX2 respectivamente. Sendo assim,

o tempo de contenção  $t_c$  será apenas referente ao valor da margem aleatória, neste caso, de 0 a 1 segundo. Já para as estratégias linear e constante, como a transmissão dos quadros é distribuída com maior espaçamento em relação ao período, ou seja  $t_d \geq t$ , os valores de  $t_c$  já levam em conta o valor de  $t_d$  calculado mais a margem aleatória.

De posse dos dados colhidos e apresentados na Tabela 10, adicionando os instantes de tempo de publicação para o caso N.E. a Figura 29 foi construída e representa os instantes reais de publicação dos cinco primeiros quadros de *join request* para as estratégias exponencial, linear e constante mais o caso N.E.

Figura 29: Instante de tempo de publicação para os cinco primeiros quadros segundo a estratégia de ciclo útil.



#### 4.6 SOFTWARES UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do projeto foram utilizados os seguintes softwares:

- STM32CubeIDE: Plataforma de desenvolvimento, configuração, geração e compilação de código e *debug* da fabricante ST.
- RStudio: Ambiente de desenvolvimento integrado para R, uma linguagem de programação para gráficos e cálculos estatísticos.

No próximo capítulo os resultados para todos os testes experimentais, definidos durante a metodologia com seus respectivos cenários, será apresentada em detalhes, sempre acompanhadas das análises descritivas, através de gráficos e tabelas e também dos testes não paramétricos.

## 5 RESULTADOS

O presente capítulo será dividido em várias seções, de acordo com os cenários de testes previamente definidos na seção 4.1.2. Apenas para relembrar, sete cenários foram definidos para os onze testes experimentais realizados onde, os cenários são: máscara de seleção de canais, distância entre os EDs e o *gateway*, número de EDs na rede, redução do ciclo útil, proposta do ADR e a proposta do ARM.

Dentro de cada cenário será realizada a análise descritiva dos resultados obtidos nos testes e a aplicação de testes não paramétricos.

Por fim, no final desse capítulo será realizado uma discussão geral de forma macro com relação a todos os testes e resultados para os cenários apresentados.

### 5.1 Cenário A

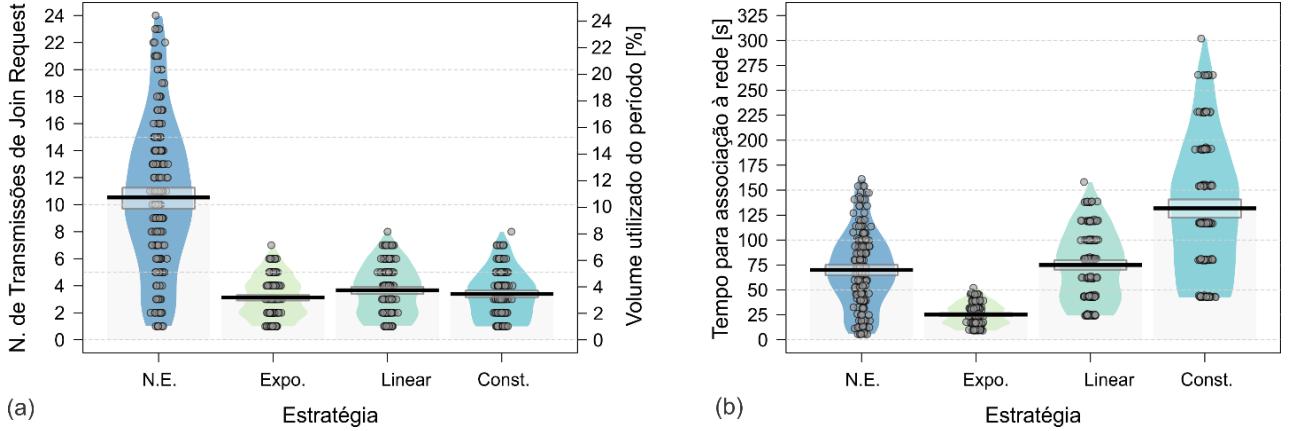
O cenário A será o primeiro a ser apresentado, e se refere a análise segundo a máscara de seleção de canais dos dispositivos, segundo Tabela 9 e detalhado na Seção 4.1.2.1.

#### 5.1.1 Análise descritiva

##### 5.1.1.1 Teste 1

O teste 1, realizado com oito canais BW 125KHz, tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 30. É possível perceber que o uso das três estratégias propostas de ciclo útil obteve desempenho superior se comparadas ao caso N.E., levando em consideração o número de retransmissões e o volume ocupado.

Figura 30: Comparativo o teste 1 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de *join request* e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.



Através da Tabela 11 é perceptível as relações entre as médias, medianas e desvio padrão entre as estratégias, onde as três estratégias propostas apresentam uma redução no número de retransmissões se comparada ao caso N.E. Em contrapartida, os casos constante e linear apresentaram os maiores tempos para o processo de associação à rede. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

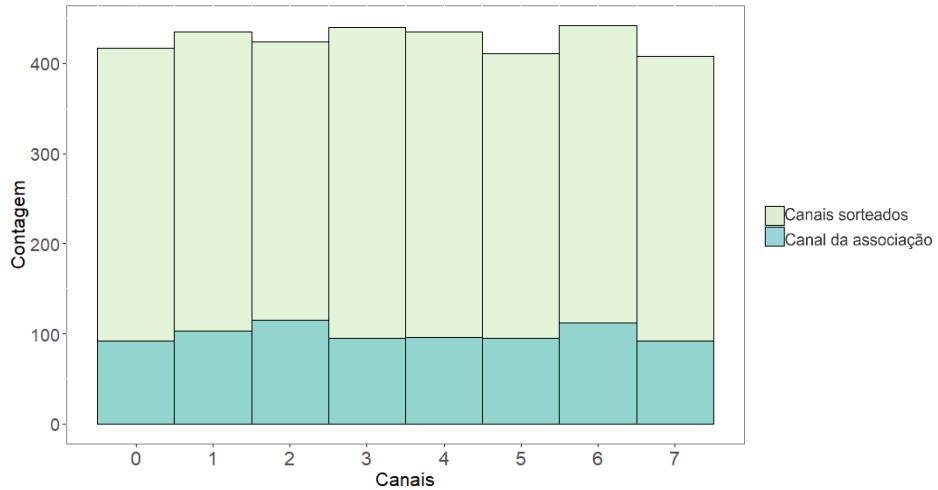
Tabela 11: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 1 do cenário A.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$3,13 \pm 1,49$ 3,00	$3,67 \pm 1,80$ 4,00	$3,4 \pm 1,73$ 3,00	$10,54 \pm 5,46$ 10,00
Tempo de associação	$25,27 \pm 10,76$ 24,32	$74,91 \pm 33,96$ 80,72	$131,76 \pm 64,06$ 117,50	$70,04 \pm 36,92$ 66,82
Volume	$3,23 \pm 1,54$ 3,09	$3,78 \pm 1,85$ 4,12	$3,5 \pm 1,78$ 3,09	$10,86 \pm 5,63$ 10,31
RSSI	$-56,34 \pm 5,92$ -57,00	$-60,52 \pm 4,66$ -61,00	$-60,17 \pm 4,83$ -60,00	$-57,51 \pm 4,91$ -58,00
SNR	$6,35 \pm 0,89$ 7,00	$6,47 \pm 0,88$ 7,00	$6,44 \pm 0,83$ 7,00	$6,37 \pm 0,87$ 7,00

O sorteio dos oito primeiros canais e o canal em que foi realizada a associação pode ser visto na Figura 31. É possível inferir que há uma distribuição bem igualitária

entre os canais, representando um bom gerador de números aleatórios e um bom algoritmo, aparentemente sem a presença de tendências no sorteio.

Figura 31: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 1 do cenário A.



#### 5.1.1.2 Teste 2

Posteriormente o teste 2, com oito canais BW 125KHz e um canal BW500, conforme Tabela 9 pode ser visto na Figura 32. Vale ressaltar que, nesse teste o volume não é relacionado diretamente por uma constante ao número de transmissões, pois para o canal 64 (DR6) o tempo de duração do quadro no ar é de apenas 29ms, segundo a Tabela 7. Através dos resultados apresentados é possível perceber que as estratégias propostas também tiveram desempenho superior no número de transmissões se volume em relação ao N.E.

Através da Tabela 12 é perceptível as relações entre as médias, medianas e desvio padrão entre as estratégias, onde as três estratégias propostas apresentam uma redução no número de retransmissões se comparada ao N.E. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

Figura 32: Comparativo para o teste 2 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de *join request*, (b) tempo de junção à rede, (c) volume de uso da rede.

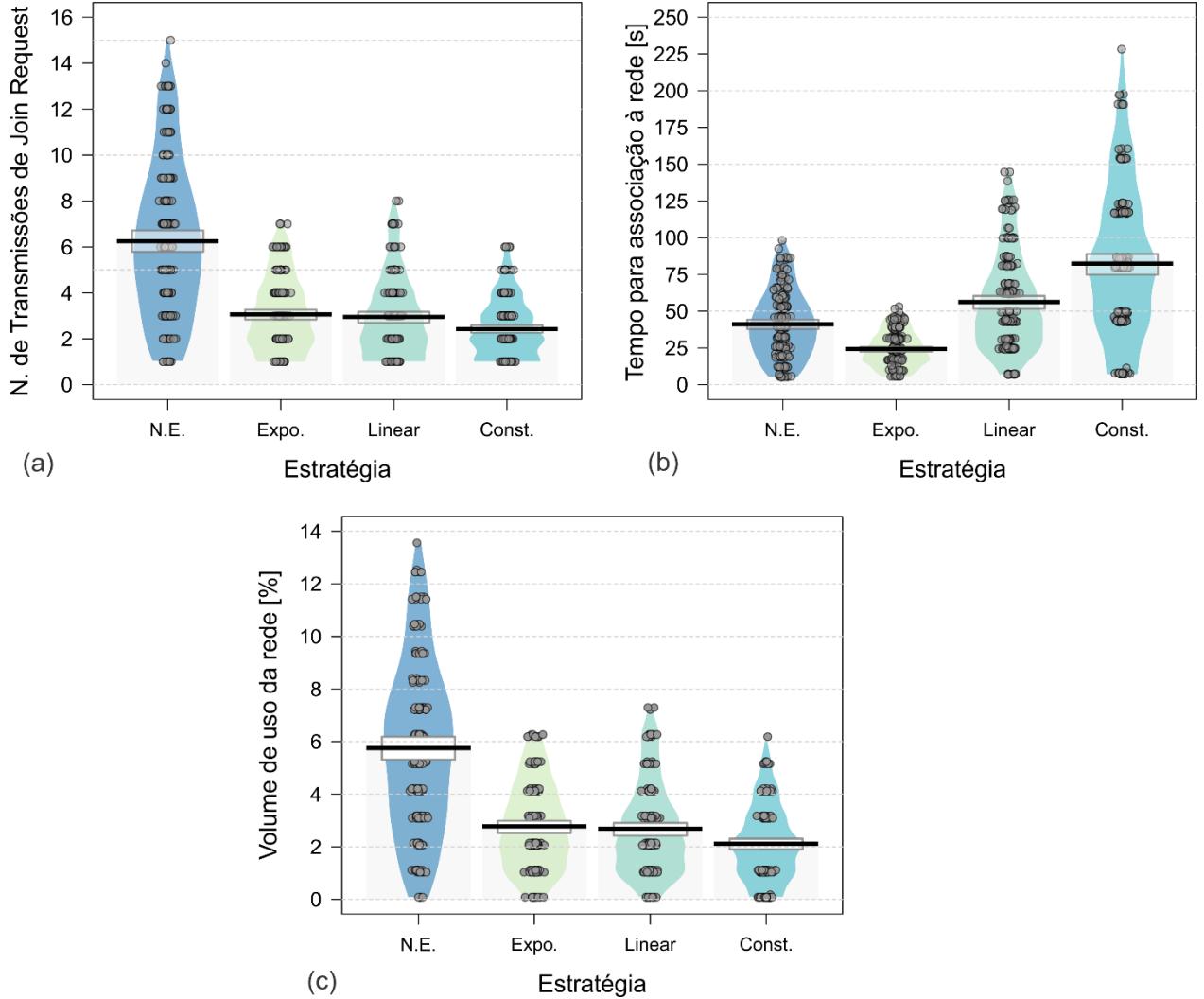
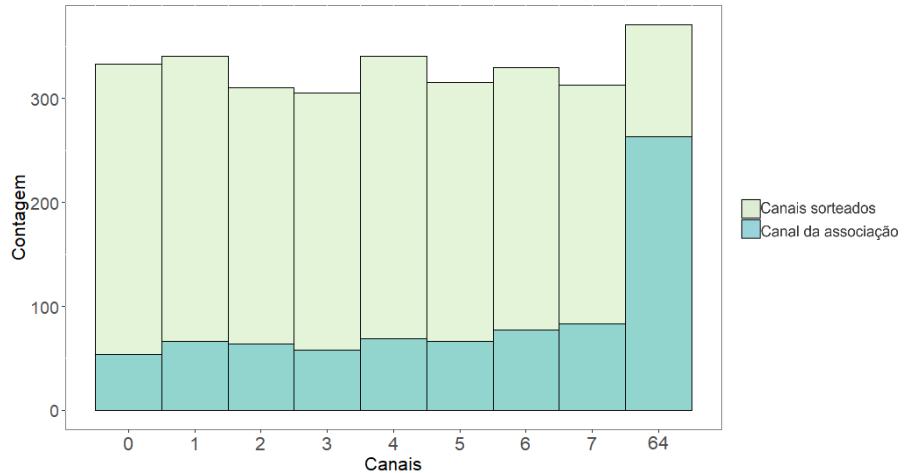


Tabela 12: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 2 do cenário A.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$3,06 \pm 1,58$ 3,00	$2,95 \pm 1,72$ 3,00	$2,42 \pm 1,27$ 2,00	$6,25 \pm 3,29$ 6,00
Tempo de associação	$24,26 \pm 11,52$ 23,77	$56,17 \pm 32$ 49,24	$82,46 \pm 50,06$ 80,17	$41,09 \pm 22,17$ 39,33
Volume	$2,77 \pm 1,60$ 2,62	$2,69 \pm 1,72$ 2,14	$2,11 \pm 1,39$ 2,06	$5,75 \pm 3,13$ 6,18
RSSI	$-54,26 \pm 5,47$ -54,00	$-59,18 \pm 6,72$ -59,50	$-60,61 \pm 6,84$ -60,00	$-57,61 \pm 6,49$ -58,00
SNR	$6,15 \pm 0,82$ 6,00	$6,19 \pm 0,80$ 6,00	$6,16 \pm 0,82$ 6,00	$6,26 \pm 0,88$ 6,00

A Figura 33 demonstra o sorteio dos oito primeiros canais e o canal em que foi realizada a associação. É possível inferir que há uma taxa de sucesso maior no canal 64 de 500KHz se compara com o restante dos canais de 125KHz.

Figura 33: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 2 do cenário A.



#### 5.1.1.3 Teste 3

Os resultados para o teste 3 com apenas um canal BW 125KHz configurado podem ser vistos na Figura 34. Aparentemente, apenas a estratégia exponencial apresentou menor volume ocupado e número de transmissões, além do menor tempo de associação. Como, possivelmente, o número de colisões no ar parece muito elevado, as estratégias não apresentam um ganho tão expressivo no desempenho, quando comparadas aos resultados obtidos nos testes anteriores. O intuito desse teste é justamente demonstrar a elevação no número de possíveis colisões, resultantes da falta de pluralidade de canais durante o processo de associação à rede.

Os dados compilados para o respectivo teste podem ser vistos na Tabela 13, apresentando, aparentemente, uma redução expressiva no número de retransmissões apenas para o caso exponencial. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

Figura 34: Comparativo do teste 3 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de *join request* e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.

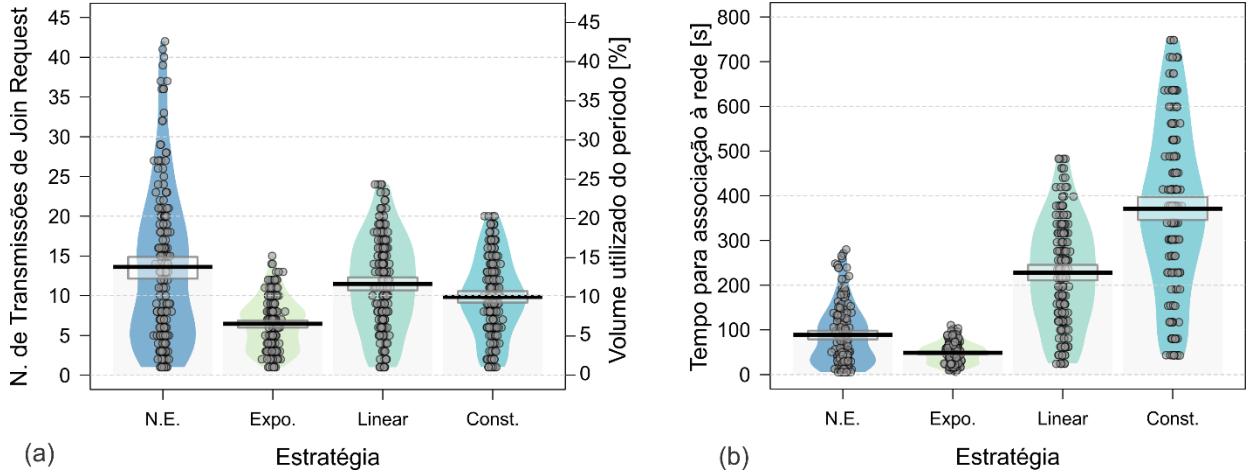


Tabela 13: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 3 do cenário A.

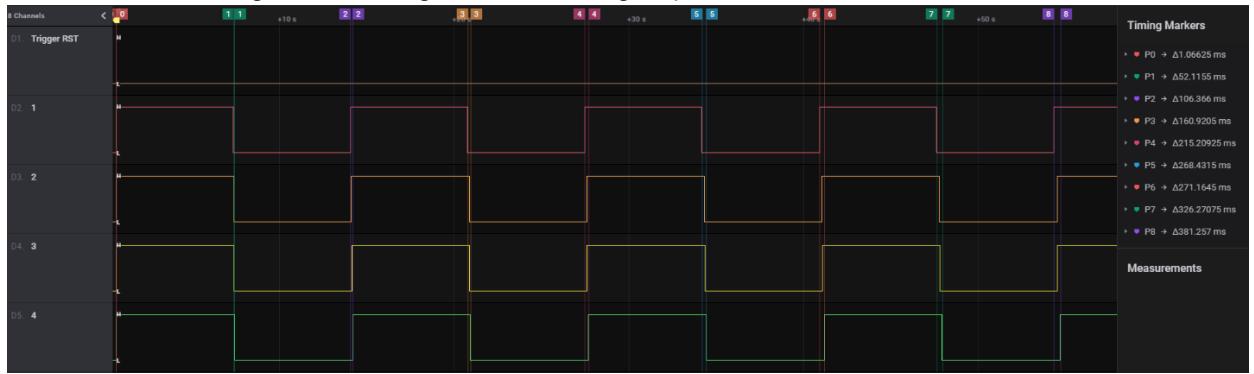
Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$6,47 \pm 3,16$ 7,00	$11,48 \pm 5,93$ 11,00	$9,85 \pm 4,95$ 10,00	$13,61 \pm 9,83$ 13,00
Tempo de associação	$48,76 \pm 22,65$ 51,08	$227,89 \pm 117,46$ 216,72	$371,04 \pm 183,51$ 376,83	$88,98 \pm 65,80$ 82,53
Volume	$6,66 \pm 3,26$ 7,21	$11,84 \pm 6,11$ 11,34	$10,15 \pm 5,10$ 10,31	$14,03 \pm 10,13$ 13,40
RSSI	$-57,87 \pm 6,18$ -58,00	$-57,94 \pm 5,61$ -57,00	$-59,13 \pm 5,96$ -58,00	$-56,44 \pm 5,41$ -55,00
SNR	$6,38 \pm 0,98$ 7,00	$6,42 \pm 0,88$ 7,00	$6,58 \pm 0,76$ 7,00	$6,45 \pm 0,97$ 7,00

Como o respectivo teste utiliza apenas um único canal fixo, não é relevante a análise dos canais através do histograma de seleção de canais.

Tendo em vista o cenário teórico, uma grande quantidade de dispositivos sincronizados e transmitindo no mesmo canal não deveriam obter sucesso no processo de associação, pois todos os quadros acabariam colidindo. Todavia, como explorado no Apêndice B, existe uma tolerância elevada na frequência do relógio no dispositivo, resultando assim, em uma grande divergência na sincronização entre os dispositivos. Além desse fator, a própria arquitetura do *firmware* é também responsável por impactar nesses atrasos de tempo. A Figura 35 traz o teste entre 4 dispositivos durante 60

segundos para o caso N.E. (sem RM) com partida sincronizada. As transições de nível lógico representam os instantes de tempo onde os quadros foram transmitidos. Após 60 segundos foi constatada uma diferença máxima de aproximadamente 380ms entre os dispositivos e linearmente crescente ao longo do tempo. O valor calculado da tolerância do relógio foi de aproximadamente 270ms após 60 segundos de funcionamento, o que explicaria o efeito obtido nos testes da presente seção e constatado na Figura 35. Quando comparado com o tempo de transmissão do quadro no ar, visto na Tabela 1, para o SF10 que é de 370ms, o tempo de divergência devido ao relógio interno representa uma transmissão completa entre um dispositivo e outro sem haver colisões.

Figura 35: Divergência entre relógios para o caso N.E. entre 4 EDs.



#### 5.1.1.4 Teste 4

Por fim, o teste 4, referente ao cenário A, cujo dispositivos foram configurados para tentar transmitir em qualquer canal de *uplink* válido (0 a 71) tem seus resultados representado pelo *pirateplot* da Figura 36. Também vale relembrar que os dois *gateways* foram utilizados durante a execução do respectivo teste. Através da Figura 36 é possível constatar que há uma maior variação entre os valores do teste, pois depende da probabilidade de sorteio de um canal onde exista um *gateway*, que seria de 25%. Também quase não houve diferença no número de transmissões entre os casos.

A Tabela 14 expõe as relações entre as médias, medianas e desvio padrão entre as estratégias. É possível inferir que para as três estratégias propostas não houve uma redução expressiva no número de retransmissões, quando comparada ao caso N.E. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

Figura 36: Comparativo para o teste 4 do cenário A quanto ao (a) número de transmissões de *join request*, (b) tempo de junção à rede, (c) volume de uso da rede.

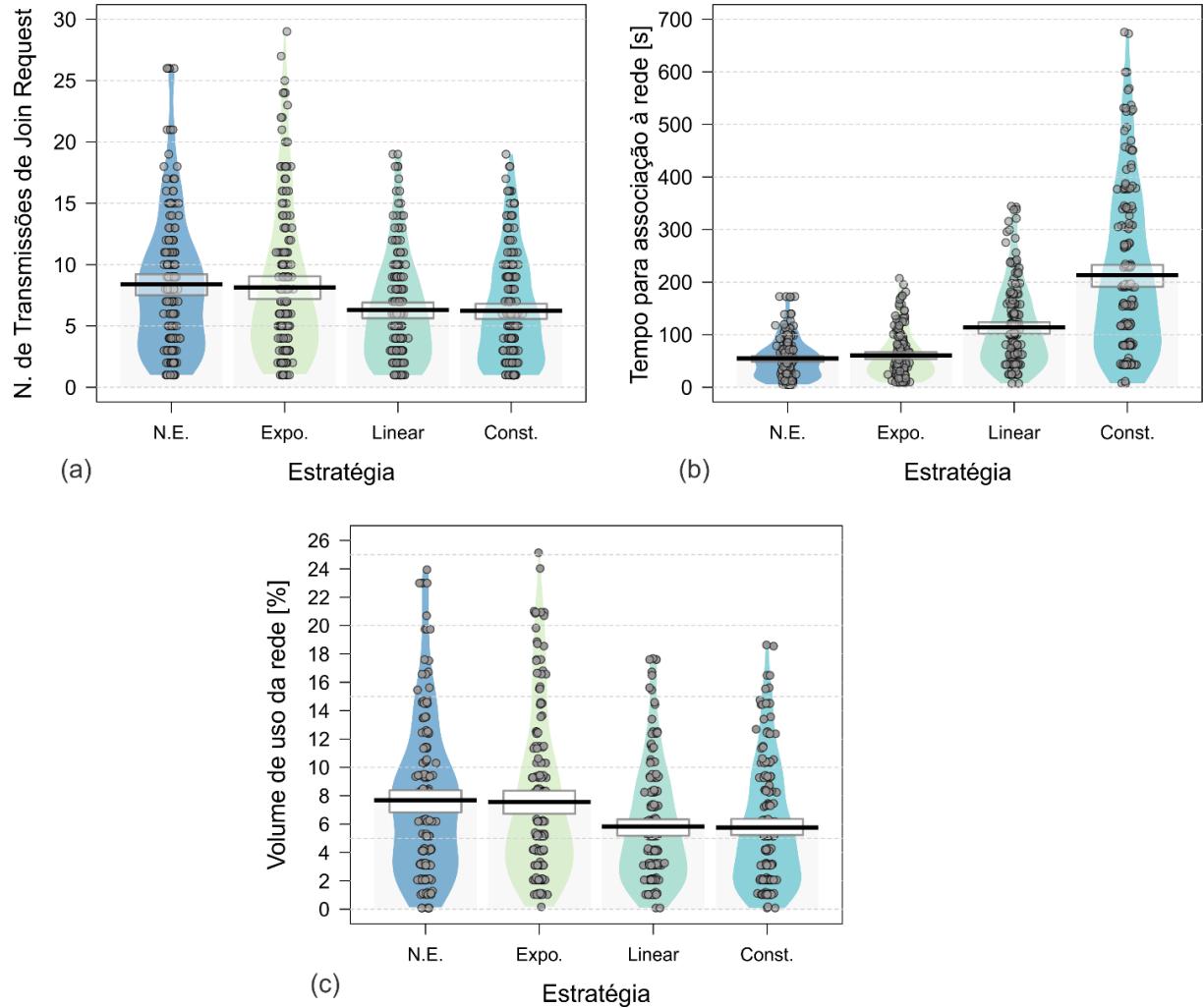
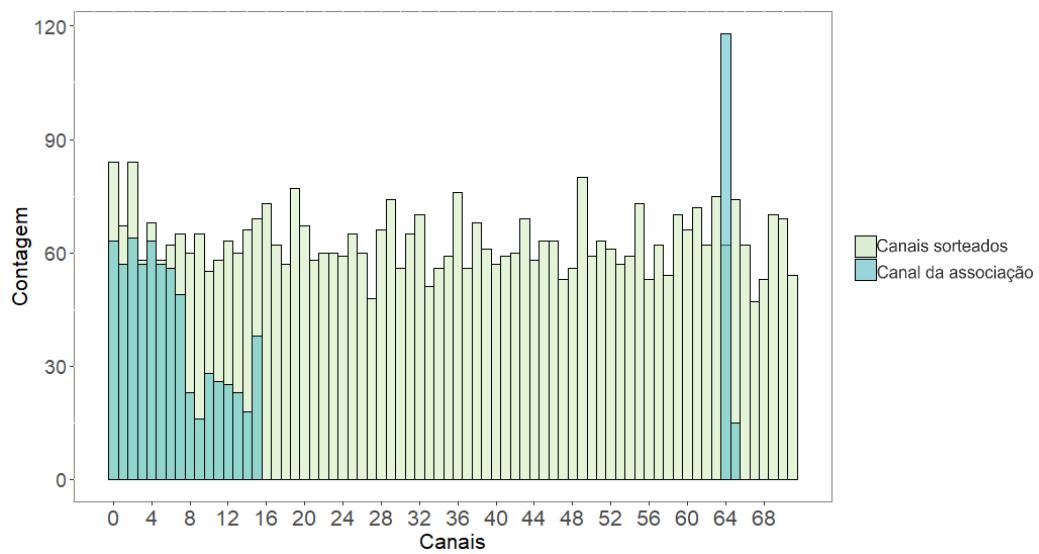


Tabela 14: Valores de média, desvio padrão e mediana para o teste 4 do cenário A.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$8,15 \pm 6,09$ 6,00	$6,31 \pm 4,29$ 6,00	$6,24 \pm 4,41$ 5,50	$8,4 \pm 5,66$ 8,00
Tempo de associação	$60,81 \pm 43,58$ 46,49	$114,08 \pm 76,77$ 100,24	$213,65 \pm 151,93$ 191,26	$55,01 \pm 37,85$ 51,94
Volume	$7,56 \pm 5,56$ 6,18	$5,83 \pm 4,09$ 5,15	$5,76 \pm 4,22$ 5,15	$7,69 \pm 5,31$ 7,29
RSSI	$-72,03 \pm 27,86$ -60,00	$-70,36 \pm 26,00$ -58,00	$-73,3 \pm 26,91$ -60,00	$-72,82 \pm 27,11$ -59,50
SNR	$2,31 \pm 6,91$ 6,00	$3,33 \pm 6,10$ 6,00	$2,76 \pm 6,34$ 6,00	$2,68 \pm 6,52$ 6,00

O sorteio dos oito primeiros canais e o canal em que foi realizada a associação para o cenário D pode ser visto na Figura 37. Percebe-se que há uma boa distribuição no sorteio ao longo dos 72 canais e que nos canais respectivos ao *gateway* 1, a associação teve uma maior taxa de sucesso se compara aos canais do *gateway* 2. Além disso é possível inferir que há uma taxa de sucesso maior no canal 64 (*gateway* 1), de 500KHz se comparada aos outros canais de 125KHz. Já para o canal 65 (*gateway* 2), o desempenho foi inferior se comparada aos outros canais de 125KHz do mesmo *gateway*.

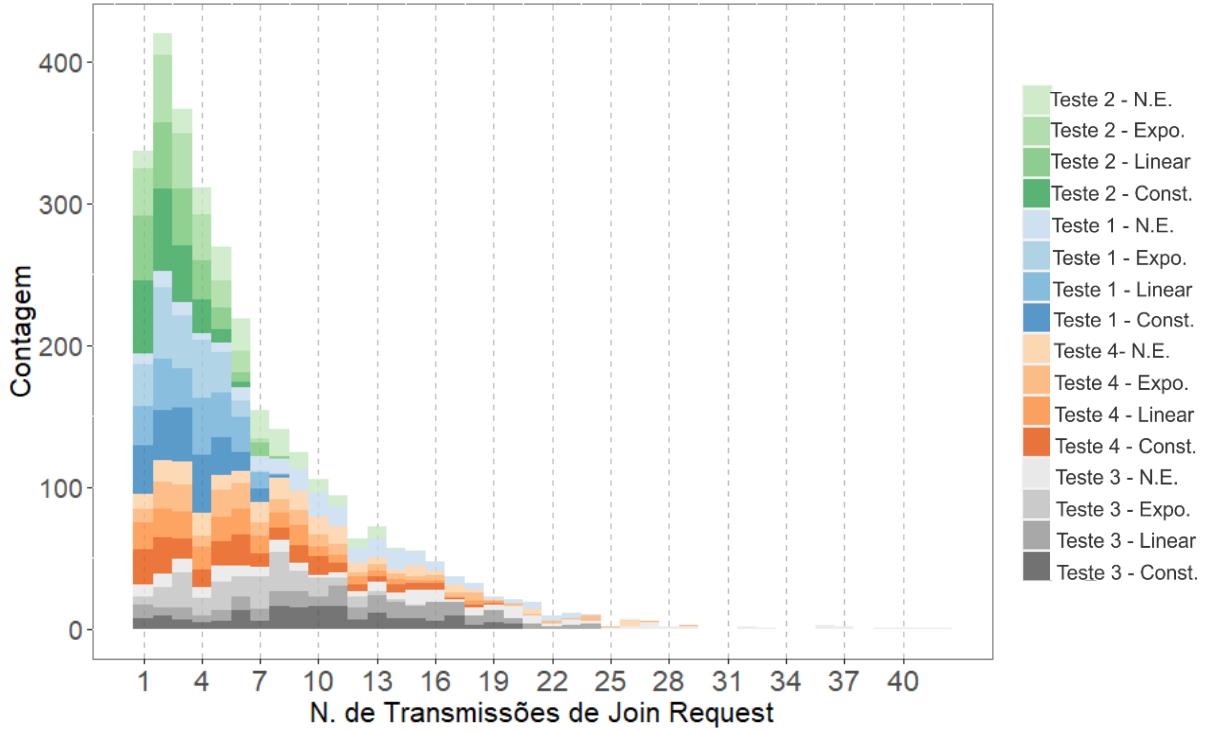
Figura 37: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 4 do cenário A.



#### 5.1.1.5 Comparativo dos testes do cenário A

A fim de compilar todos os quatro testes apresentados (1, 2, 3 e 4) do cenário A, relacionando dois fatores: a máscara de seleção de canais e a estratégia de ciclo útil utilizada, serão apresentados histogramas referentes ao número de transmissões e com tamanho do intervalo de classe de um, Figura 38, tempo de associação à rede com tamanho do intervalo de 20, Figura 39 e volume de uso da rede com referente tamanho do intervalo de classe igual a dois, Figura 40.

Figura 38: Comparativo de todo o cenário A referente ao número de transmissões.



Analizando os três histogramas apresentados é possível inferir, para todas as variáveis, que o teste 3, com máscara de 1 canal BW 125KHz apresentou o pior desempenho no processo, seguido do teste 4, com máscara de 64 canais BW 125KHz e 8 canais BW 500KHz. O melhor desempenho ficou com o teste 2, com 8 canais BW 125KHz e 1 canal BW 500KHz, seguido do teste 1, com 8 canais BW 125KHz. Também é possível perceber que a distribuição do número de transmissões e do volume ocupado é bastante semelhante, devido ao uso do DR2 fixo para os canais de BW 125KHz e DR6 também fixo para os canais de 500KHz. Na Figura 39 é possível perceber que para o teste 1 o tempo máximo para associação foi da ordem de 200 segundos, ou 3,33 minutos. Já para o teste 2, esse tempo máximo foi da ordem de 260 segundos, ou 4,33 minutos. Para o teste 3, 680 segundos (11,33 minutos) e no teste 4, 740 segundos (12,33 minutos).

Também é possível inferir, através da Figura 38 que o caso N.E. apresenta maior número de transmissões em comparação com qualquer uma das estratégias propostas. Já segundo o tempo de associação à rede, Figura 40, as estratégias que apresentam maior latência foram a constante e linear.

Figura 39: Comparativo de todo o cenário A referente ao tempo de associação.

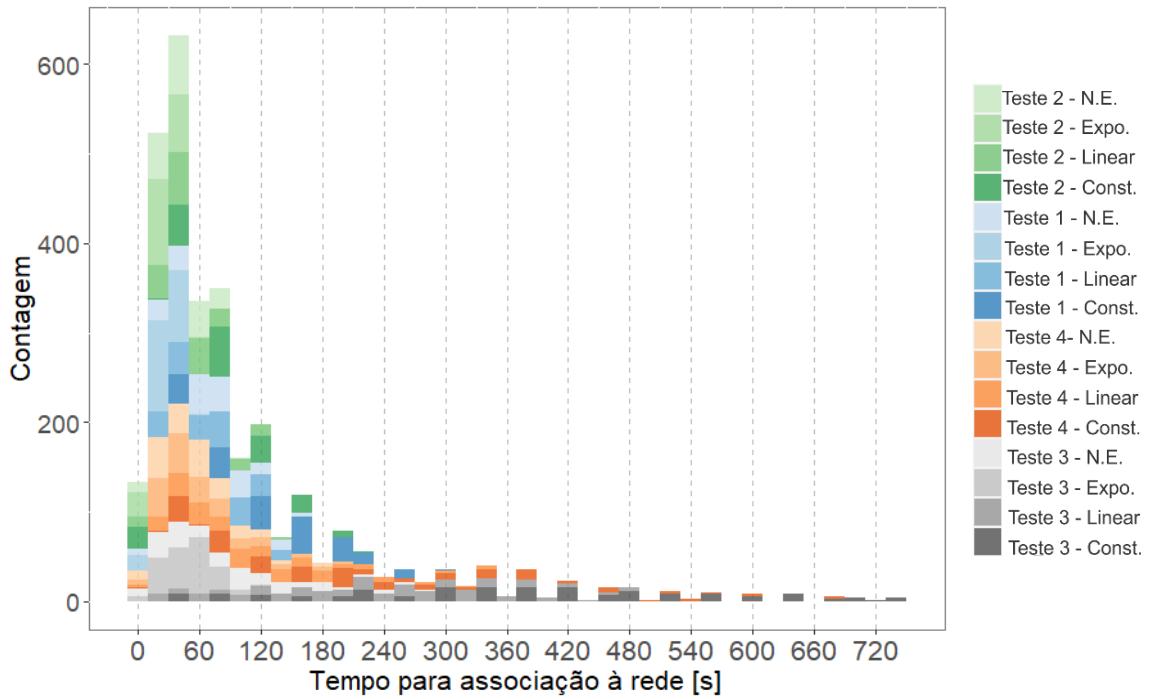
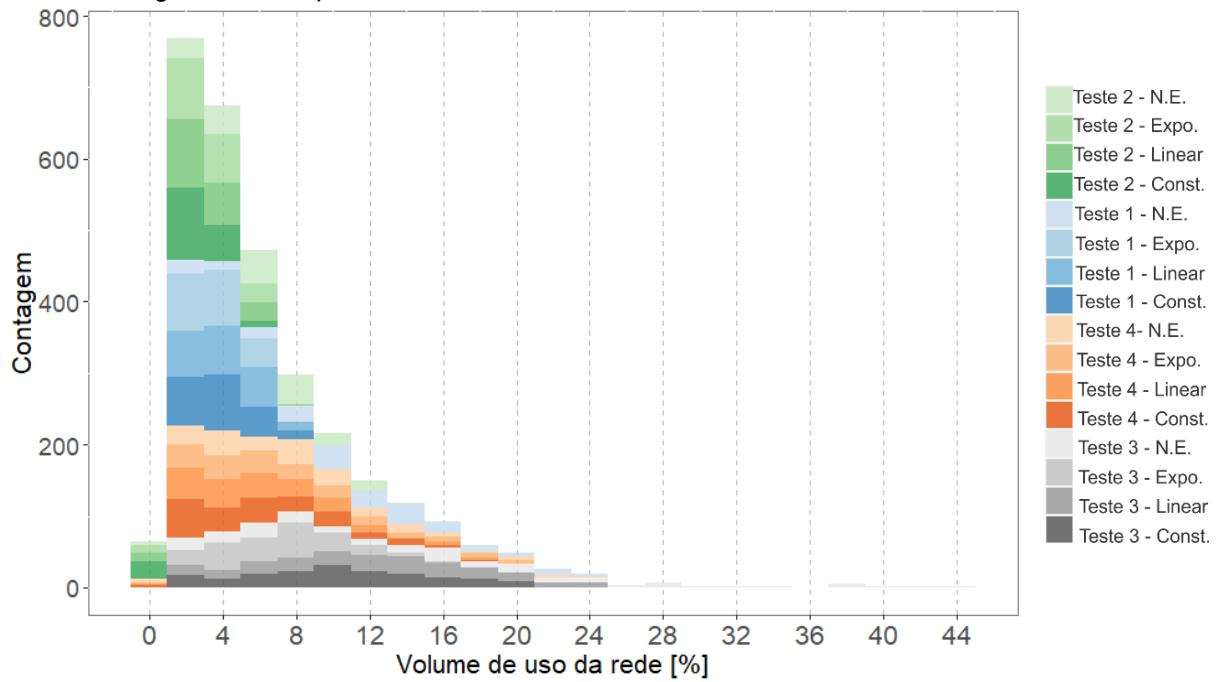


Figura 40: Comparativo de todo o cenário A referente ao volume de uso da rede.



## 5.1.2 Análise não paramétrica

### 5.1.2.1 Estratégias de ciclo útil

O objetivo dessa primeira análise é ranquear as melhores estratégias de uso para o ciclo útil de acordo com a variável independente da máscara de seleção de canais. Com base nos dados dos resultados apresentados na seção anterior, o teste de Kruskal-Wallis é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: Teste de Kruskal-Wallis entre as estratégias de ciclo útil para o cenário A.

ID Teste	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
1	< 2,20 E-16	< 2,20 E-16	< 2,20 E-16
2	< 2,20 E-16	< 2,20 E-16	< 2,20 E-16
3	< 2,20 E-16	< 2,20 E-16	< 2,20 E-16
4	1,07 E-04	< 2,20 E-16	1,46 E-04

Com base no teste apresentado, fica evidenciado que a hipótese nula foi rejeitada para todas as máscaras de canais, ou seja, existem diferenças entre as medianas das estratégias de ciclo útil. Portanto o teste de Dunn pode ser aplicado, conforme Tabela 16. Apenas relembrando que o teste 1 usa a máscara de 8 canais BW 125KHz, teste 2: 8 canais BW 125KHz e 1 canal BW 500KHz, teste 3: 1 canal BW 125KHz e o teste 4: 62 canais BW 125KHz e 8 canais BW 500KHz.

Tabela 16: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário A (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

ID Teste	Estratégia		Nº de transmissões		Tempo de <i>Join</i>		Volume utilizado	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
1	Const.	Expo.	-1,08	2,82E-01	-19,8	<b>7,21E-87</b>	-1,08	2,82E-01
	Const.	Linear	1,25	2,09E-01	-6,71	<b>1,92E-11</b>	1,25	2,09E-01
	Const.	N.E.	13,3	<b>1,63E-40</b>	-8,32	<b>9,01E-17</b>	13,3	<b>1,63E-40</b>
	Expo.	Linear	2,33	<b>1,97E-02</b>	13	<b>6,96E-39</b>	2,33	<b>1,97E-02</b>
	Expo.	N.E.	14,4	<b>5,15E-47</b>	11,4	<b>4,77E-30</b>	14,4	<b>5,15E-47</b>
	Linear	N.E.	12,1	<b>1,44E-33</b>	-1,62	1,05E-01	12,1	<b>1,44E-33</b>
2	Const.	Expo.	3,32	<b>8,99E-04</b>	-14,5	<b>1,11E-47</b>	3,4	<b>6,69E-04</b>
	Const.	Linear	2,45	<b>1,42E-02</b>	-3,99	<b>6,59E-05</b>	2,62	<b>8,75E-03</b>
	Const.	N.E.	12,9	<b>8,03E-38</b>	-7,8	<b>6,03E-15</b>	12,7	<b>6,76E-37</b>
	Expo.	Linear	-0,889	3,74E-01	10,6	<b>2,09E-26</b>	-0,801	4,23E-01
	Expo.	N.E.	9,55	<b>1,27E-21</b>	6,82	<b>8,89E-12</b>	9,3	<b>1,36E-20</b>
	Linear	N.E.	10,5	<b>8,87E-26</b>	-3,84	<b>1,21E-04</b>	10,2	<b>3,03E-24</b>
3	Const.	Expo.	-5,94	<b>2,89E-09</b>	-18,1	<b>2,35E-73</b>	-5,94	<b>2,89E-09</b>
	Const.	Linear	2,15	<b>3,17E-02</b>	-4,84	<b>1,27E-06</b>	2,15	3,17E-02
	Const.	N.E.	2,37	<b>1,78E-02</b>	-14	<b>2,45E-44</b>	2,37	1,78E-02
	Expo.	Linear	8,22	<b>2,07E-16</b>	13,5	<b>1,55E-41</b>	8,22	<b>2,07E-16</b>
	Expo.	N.E.	8,31	<b>9,82E-17</b>	3,84	<b>1,24E-04</b>	8,31	<b>9,82E-17</b>
	Linear	N.E.	0,271	7,86E-01	-9,38	<b>6,86E-21</b>	0,271	7,86E-01
4	Const.	Expo.	2,79	<b>5,32E-03</b>	-12,2	<b>2,67E-34</b>	2,91	<b>3,61E-03</b>
	Const.	Linear	0,254	8,00E-01	-5,26	<b>1,41E-07</b>	0,282	7,78E-01
	Const.	N.E.	3,8	<b>1,44E-04</b>	-13	<b>1,93E-38</b>	3,67	<b>2,42E-04</b>
	Expo.	Linear	-2,51	<b>1,22E-02</b>	6,9	<b>5,34E-12</b>	-2,6	<b>9,36E-03</b>
	Expo.	N.E.	0,978	3,28E-01	-0,655	5,13E-01	0,727	4,67E-01
	Linear	N.E.	3,51	<b>4,56E-04</b>	-7,6	<b>2,91E-14</b>	3,35	<b>8,15E-04</b>

De acordo com os p-valores e z-valores das combinações da Tabela 16 é possível ranquear, para cada máscara de seleção de canal, qual a melhor estratégia de ciclo útil baseando no número de transmissões e volume ou com base no tempo de associação. A relação entre o desempenho da rede e o número de transmissões e volume ou o tempo de associação à rede é inversamente proporcional. Essa classificação das melhores estratégias para cada teste, segundo a máscara de canais, pode ser vista na Tabela 17.

Tabela 17: Classificação das estratégias de ciclo útil para os testes do cenário A.

Teste	Classificação	Estratégia ciclo útil	
		Número de Transmissões/ Volume ocupado	Tempo de associação à rede
1	1º	<b>Constante</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	Exponencial/Linear	N.E.
	3º	N.E.	Linear
	4º	-	Constante
2	1º	<b>Exponencial/Constante</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	Linear/Constante	Linear/N.E.
	3º	N.E.	Constante
	4º	-	-
3	1º	<b>Exponencial</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	Constante	N.E.
	3º	Linear	Linear
	4º	N.E.	Constante
4	1º	<b>Constante/Linear</b>	<b>Exponencial/N.E.</b>
	2º	Exponencial	Linear
	3º	N.E.	Constante
	4º	-	-

Analizando a Tabela 17 é possível escolher qual a melhor estratégia de uso do ciclo útil segundo a máscara de canais adotada para funcionamento do dispositivo. É possível constatar que quanto ao tempo de associação, a melhor estratégia para todos os testes foi a exponencial. Já para o número de transmissões e volume cada teste apresentou sua melhor estratégia, mas com destaque para o uso constante da rede. Também é possível constar que o caso N.E. apresentou os piores desempenhos quanto ao número de transmissões, porém com um tempo de associação relativamente ágil.

#### 5.1.2.2 Máscara de seleção de canais

A Tabela 18 reuni os valores para o cálculo do teste de Kruskal-Wallis entre as quatro máscaras de canais abordadas, separados pelas estratégias de ciclo útil e analisando as três variáveis de interesse, definidas previamente.

Tabela 18: Teste de Kruskal-Wallis entre as máscaras de canais para cada estratégia de ciclo útil.

Estratégia	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
N.E.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Expo.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Linear	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Const.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16

Analizando a Tabela 18, a hipótese nula é rejeitada para todas as estratégias e para as três variáveis, ou seja, existem diferenças entre as medianas dos grupos entre as máscaras de seleção de canais. Portanto, se dará continuidade para análise através do teste de Dunn, representado na Tabela 19.

Tabela 19: Teste de Dunn entre todas as máscaras de canais para cada estratégia de ciclo útil (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

Estratégia	ID Teste		Nº de transmissões		Tempo de Join		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
N.E.	3	4	-5,05	<b>4,32E-07</b>	-4,91	<b>9,18E-07</b>	-5,88	<b>4,20E-09</b>
	3	2	-8,33	<b>8,22E-17</b>	-7,92	<b>2,44E-15</b>	-8,94	<b>3,90E-19</b>
	3	1	-1,16	2,45E-01	-0,662	5,08E-01	-1,02	3,07E-01
	4	2	-3,25	<b>1,15E-03</b>	-2,98	<b>2,86E-03</b>	-3,03	<b>2,48E-03</b>
	4	1	4,04	<b>5,34E-05</b>	4,4	<b>1,10E-05</b>	5,03	<b>4,86E-07</b>
	2	1	7,41	<b>1,25E-13</b>	7,5	<b>6,32E-14</b>	8,19	<b>2,64E-16</b>
Expo.	3	4	0,165	8,69E-01	0,184	8,54E-01	-0,522	6,02E-01
	3	2	-10,4	<b>2,13E-25</b>	-10,4	<b>2,07E-25</b>	-11,2	<b>5,08E-29</b>
	3	1	-10,1	<b>5,11E-24</b>	-9,72	<b>2,37E-22</b>	-9,98	<b>1,81E-23</b>
	4	2	-10,4	<b>1,68E-25</b>	-10,5	<b>1,33E-25</b>	-10,5	<b>8,23E-26</b>
	4	1	-10,1	<b>3,95E-24</b>	-9,77	<b>1,45E-22</b>	-9,31	<b>1,24E-20</b>
	2	1	0,44	6,60E- 1	0,826	4,09E-01	1,34	1,80E-01
Linear	3	4	-7,2	<b>5,88E-13</b>	-7,9	<b>2,88E-15</b>	-7,88	<b>3,33E-15</b>
	3	2	-15,4	<b>1,33E-53</b>	-15,8	<b>1,66E-56</b>	-15,9	<b>6,46E-57</b>
	3	1	-12,6	<b>1,21E-36</b>	-12,4	<b>3,72E-35</b>	-12,4	<b>3,85E-35</b>
	4	2	-8,03	<b>1,00E-15</b>	-7,75	<b>9,03E-15</b>	-7,83	<b>4,91E-15</b>
	4	1	-5,23	<b>1,71E-07</b>	-4,26	<b>2,07E-05</b>	-4,27	<b>1,93E-05</b>
	2	1	2,9	<b>3,72E-03</b>	3,61	<b>3,11E-04</b>	3,67	<b>2,44E-04</b>
Const.	3	4	-6,28	<b>3,32E-10</b>	-7,02	<b>2,25E-12</b>	-6,94	<b>3,91E-12</b>
	3	2	-15,4	<b>8,61E-54</b>	-16,1	<b>2,88E-58</b>	-16,1	<b>2,22E-58</b>
	3	1	-11,8	<b>3,91E-32</b>	-11,5	<b>8,58E-31</b>	-11,6	<b>6,17E-31</b>
	4	2	-9,38	<b>6,91E-21</b>	-9,29	<b>1,48E-20</b>	-9,39	<b>6,04E-21</b>
	4	1	-5,56	<b>2,64E-08</b>	-4,54	<b>5,66E-06</b>	-4,65	<b>3,36E-06</b>
	2	1	3,94	<b>8,05E-05</b>	4,88	<b>1,06E-06</b>	4,87	<b>1,13E-06</b>

Com base na Tabela 19 é possível perceber que para cada estratégia de ciclo útil analisada a maioria das comparações entre os testes apresentaram diferenças significativas, ou seja, com p-valor abaixo de 5%. Isso significa que o parâmetro dos canais escolhidos para o processo de associação tem grande influência no desempenho. Apenas a estratégia exponencial, entre os testes 3 e 4 e entre os testes 1 e 2 não apresentaram diferenças significativas quanto ao desempenho do processo de *join*. Também para o caso N.E. entre os testes 2 e 3 não houve diferença significativa.

De acordo com os p-valores e z-valores das combinações da Tabela 19 é possível ranquear, para cada estratégia de ciclo útil, qual ou quais são as melhores máscaras de seleção de canal. Essa classificação pode ser vista na Tabela 20.

Tabela 20: Classificação dos testes do cenário A segundo as estratégias de ciclo útil.

Estratégia de Ciclo Útil	Classificação	Teste Número de Transmissões/ Volume ocupado / Tempo de associação à rede
Exponencial	1º	<b>1 e 2</b>
	2º	3 e 4
	3º	-
	4º	-
Linear	1º	<b>2</b>
	2º	1
	3º	4
	4º	3
Constante	1º	<b>2</b>
	2º	1
	3º	4
	4º	3
N.E.	1º	<b>2</b>
	2º	4
	3º	1 e 3
	4º	-

Analizando a Tabela 20 é possível escolher qual a melhor máscara de seleção de canais para cada estratégia de ciclo útil. Foi notado que todas as três variáveis analisadas apresentaram o mesmo resultado no ranqueamento. A máscara com melhor desempenho nos testes do cenário A foi a de 8 canais BW 125KHz e 1 canal BW 500KHz

(teste 2). Também é possível perceber que o pior desempenho ficou com a máscara de 1 canal BW 125KHz (teste 3). Os testes 1 e 4 ficaram em posições intermediárias.

## 5.2 Cenário B

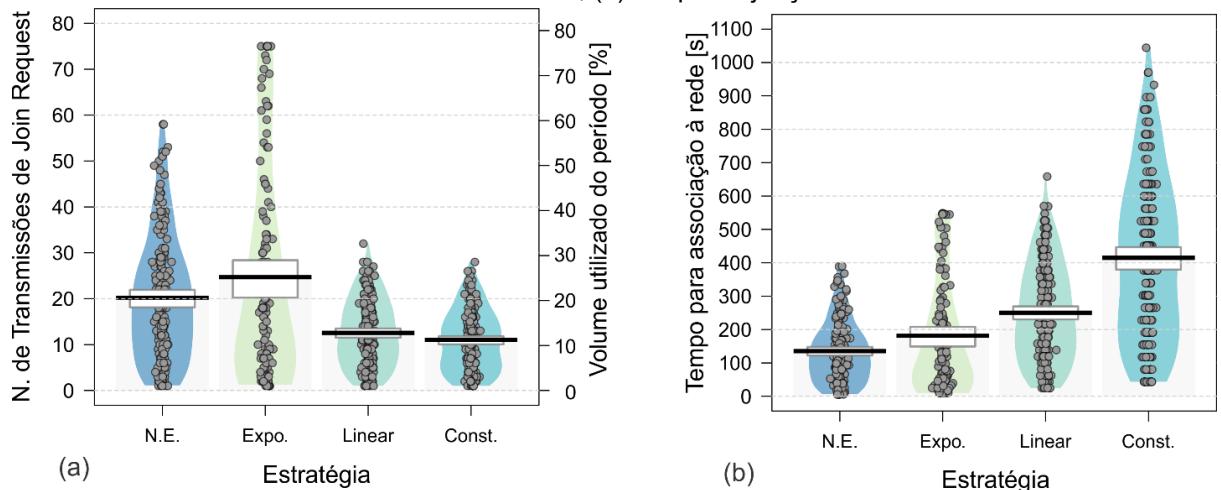
O cenário B, segundo a Tabela 9 é referente a analise entre a distância dos dispositivos e o *gateway*, visto com mais detalhes na Seção 4.1.2.2. Durante a presente Seção, a abreviação GW x será utilizada, referente ao *gateway* (1 ou 2).

### 5.2.1 Análise descritiva

#### 5.2.1.1 Teste 5

O teste 5, realizado com oito canais BW 125KHz e com o *gateway* 2 (4400 metros) tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 41 e comentado mais a diante.

Figura 41: Comparativo do teste 5 do cenário B quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.



A Tabela 21 exprime as relações entre as médias com desvio padrão e medianas entre as estratégias.

Com base na Figura 41 e Tabela 21 é possível perceber que, quanto ao uso das estratégias propostas de ciclo útil, levando em consideração o número de retransmissões e o volume ocupado, que a estratégia exponencial teve desempenho semelhante ao caso

N.E. Já para os casos linear e constante, aparentemente apresentaram uma ligeira melhora em relação ao caso N.E. Quanto ao tempo de associação o caso N.E. foi o mais ágil e por último a estratégia constante;

Tabela 21: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 5 do cenário B.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	24,69 ± 23,06 18,00	12,56 ± 7,13 12,00	11,02 ± 6,52 11,00	20,22 ± 13,31 19,00
Tempo de associação	181,32 ± 166,93 132,02	250,36 ± 142,79 236,22	414,66 ± 241,95 414,14	135,34 ± 89,92 126,67
Volume	25,44 ± 23,76 18,55	12,95 ± 7,34 12,37	11,36 ± 6,72 11,34	20,84 ± 13,72 19,58
RSSI	-115,94 ± 7,81 -117,00	-115,23 ± 7,30 -116,00	-115,50 ± 7,67 -117,00	-115,73 ± 7,13 -116,00
SNR	-7,71 ± 5,58 -8,00	-5,91 ± 4,99 -6,00	-6,08 ± 5,26 -7,00	-7,24 ± 5,22 -7,00

É possível perceber, na Tabela 21, uma diferença entre o SNR das estratégias exponencial e linear, chegando a aproximadamente 30% de diferença, o que reflete diretamente no número bem alto de transmissões de *join request* para a estratégia exponencial. Também é possível destacar que os valores de RSSI e SNR são mais baixos, quando comparados aos testes com o *gateway* 1 (cenário A) Seção 5.1.1, isso se dá pelo aumento considerável da distância entre os dispositivos e o *gateway*, além da presença de obstáculos da zona urbana.

A distribuição entre os canais selecionados durante o teste foi uniforme entre todos os oito canais configurados no dispositivo, portanto o histograma de canais não será apresentado.

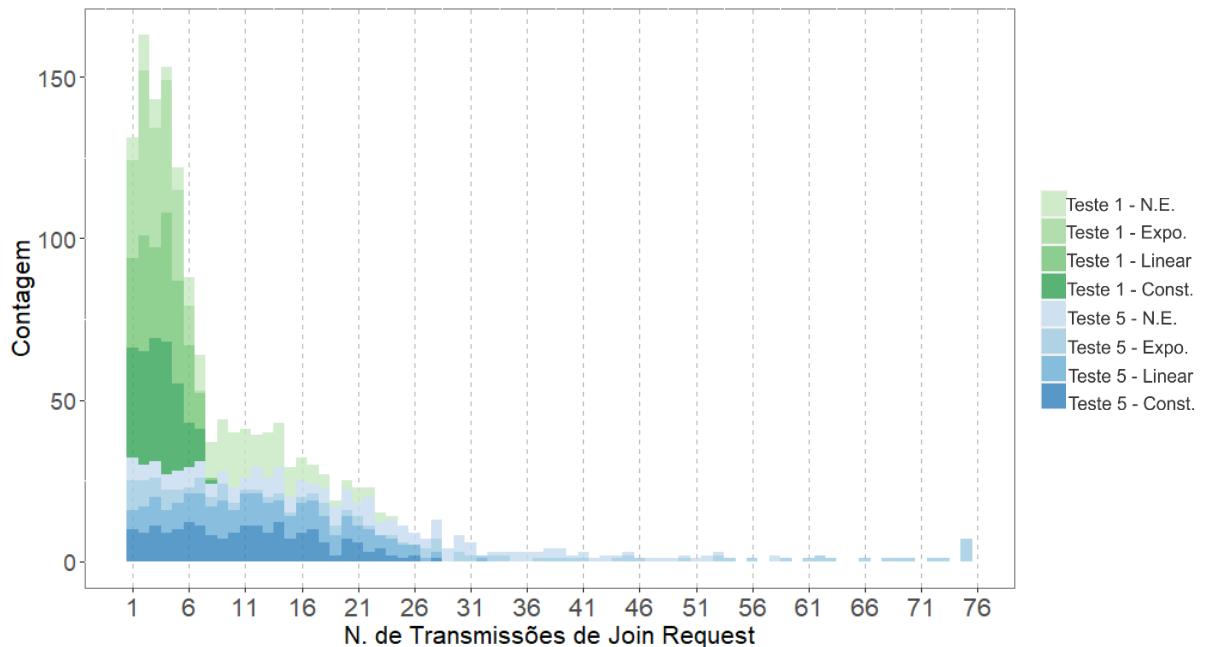
### 5.2.1.2 Comparativo do teste do cenário B

O objetivo aqui é destacar o impacto da distância entre os dispositivos e *gateway* em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso o teste 5 considerou uma distância de 4400 metros com o uso do *gateway* 2 (GW 2). Para efeitos comparativos, o teste 1, presente na Seção 5.1.1.1 possui os mesmos parâmetros de número de

dispositivos, número e largura de banda dos canais, sendo a única diferença o uso do *gateway* 1 (GW 1), localizado a 5 metros de distância dos dispositivos.

Portanto será realizada uma comparação direta entre o teste 5 do cenário B e o teste 1 do cenário A, relacionando dois fatores: a distância entre os dispositivos e o *gateway* e a estratégia de ciclo útil utilizada, serão apresentados histogramas referentes ao número de transmissões e com tamanho do intervalo de classe de um, Figura 42, tempo de associação à rede com tamanho do intervalo de 20, Figura 43 e volume de uso da rede com referente tamanho do intervalo de classe igual a dois, Figura 44.

Figura 42: Comparativo entre o teste 1 (GW 1) e 5 (GW 2) para o cenário B referente ao número de transmissões.



Analisando os três histogramas apresentados é possível inferir, para todas as variáveis analisadas, que o teste 1 apresentou desempenho superior se comparado ao teste 2. Ou seja, para uma distância menor (*gateway* 1) o desempenho da comunicação apresentou um melhor desempenho sem comparada a uma distância maior (*gateway* 2).

Na Figura 43 é possível perceber que para o teste 1 o tempo máximo para associação foi da ordem de 250 segundos, ou 4,16 minutos. Já para o teste 5, esse tempo máximo foi da ordem de 1040 segundos, ou 17,33 minutos.

Também é possível inferir, através da Figura 42, que para o teste 1 a pior estratégia de ciclo útil é o caso N.E. Já para o teste 5, o caso N.E. e a estratégia

exponencial parecem apresentar os piores desempenhos. Já segundo o tempo de associação à rede, Figura 43, as estratégias que apresentam maior latência para todos os testes foram a constante e linear.

Figura 43: Comparativo entre o teste 1 (GW 1) e 5 (GW 2) para o cenário B referente ao tempo de associação.

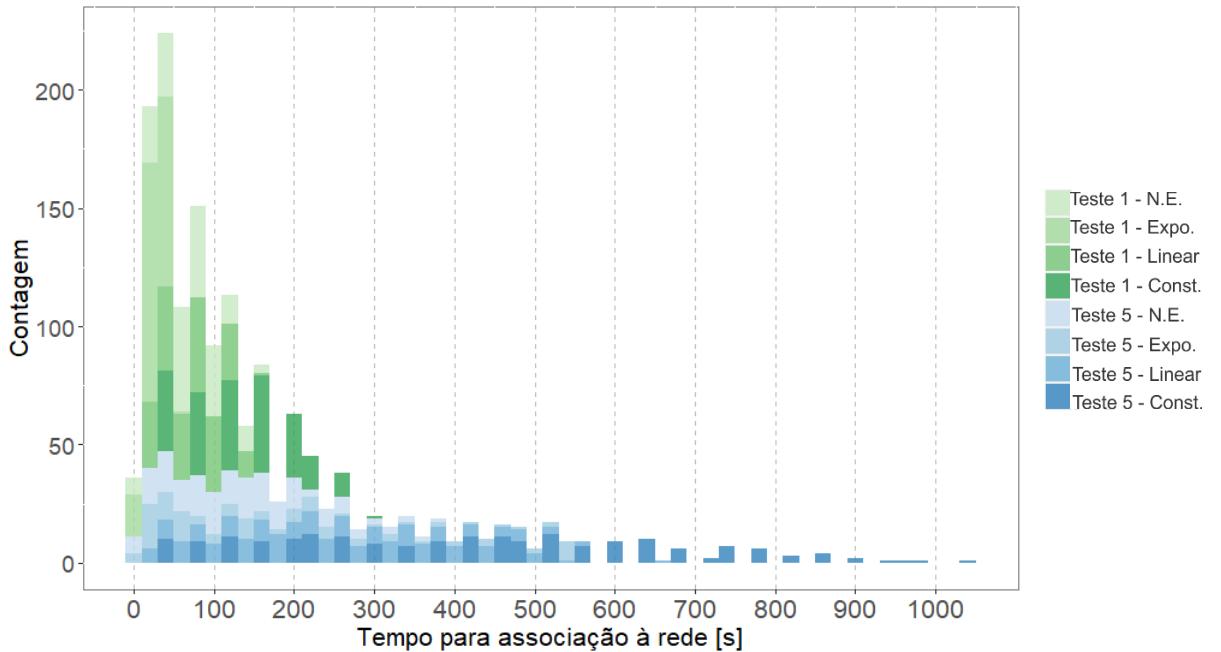
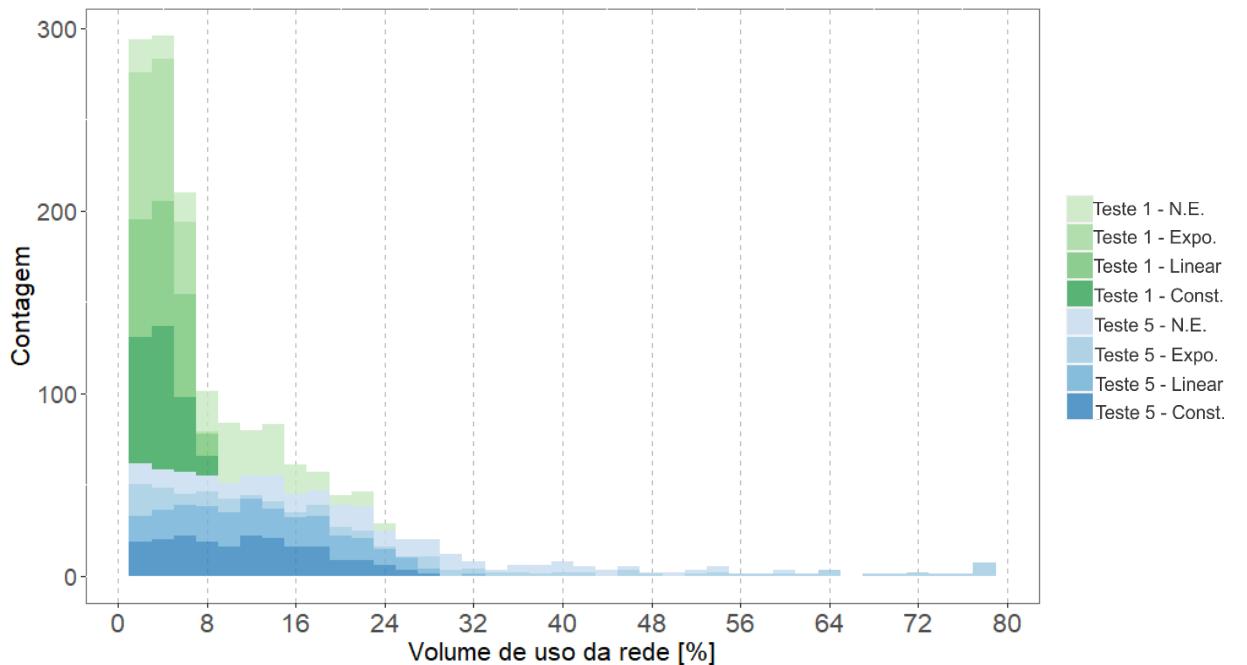


Figura 44: Comparativo entre o teste 1 (GW 1) e 5 (GW 2) para o cenário B referente ao volume de uso da rede.



## 5.2.2 Análise não paramétrica

### 5.2.2.1 Estratégias de ciclo útil

O objetivo dessa primeira análise é ranquear as melhores estratégias de uso para o ciclo útil de acordo com a variável independente da distância entre os dispositivos e o *gateway*. Com base nos dados dos resultados apresentados na seção anterior, o teste de Kruskal-Wallis é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22: Teste de Kruskal-Wallis entre as estratégias de ciclo útil para o teste 5 do cenário B.

ID Teste	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
5	6,57E-13	< 2,20E-16	6,57E-13

Baseando-se na aplicação do teste da Tabela 22, fica evidente que a hipótese nula foi rejeitada para o teste 5. Portanto, o teste de Dunn pode ser utilizado e é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Teste de Dunn entre todas as estratégias de ciclo útil para o teste 5 do cenário B (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

ID Teste	Estratégia		Nº de transmissões		Tempo de Join		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
5	Const.	Expo.	4,99	<b>6,10E-07</b>	-9,57	<b>1,02E-21</b>	4,99	<b>6,10E-07</b>
	Const.	Linear	1,72	8,50E-02	-5,57	<b>2,50E-08</b>	1,72	8,50E-02
	Const.	N.E.	6,90	<b>5,13E-12</b>	-12,60	<b>1,94E-36</b>	6,90	<b>5,13E-12</b>
	Expo.	Linear	-3,48	<b>5,10E-04</b>	4,68	<b>2,88E-06</b>	-3,48	<b>5,10E-04</b>
	Expo.	N.E.	1,11	2,68E-01	-1,56	1,18E-01	1,11	2,68E-01
	Linear	N.E.	5,19	<b>2,09E-07</b>	-7,07	<b>1,56E-12</b>	5,19	<b>2,09E-07</b>

De acordo com os p-valores e z-valores das combinações da Tabela 23 é possível ranquear, qual a melhor estratégia de ciclo útil baseando no número de transmissões e volume ou com base no tempo de associação. A relação entre o desempenho da rede e o número de transmissões e volume ou o tempo de associação à rede é inversamente proporcional. Essa classificação das melhores estratégias para cada teste, segundo a máscara de canais, pode ser vista na Tabela 24.

Tabela 24: Classificação das estratégias de ciclo útil para o teste 5 do cenário B.

Teste	Classificação	Estratégia ciclo útil	
		Número de Transmissões/ Volume ocupado	Tempo de associação à rede
5	1º	<b>Constante / Linear</b>	<b>Exponencial / N.E.</b>
	2º	Exponencial / N.E.	Linear
	3º	-	Constante

Analizando a Tabela 24 é possível escolher qual a melhor estratégia de uso do ciclo útil para o cenário B com uma distância grande entre os EDs e o *gateway*. É possível constatar que quanto ao tempo de associação, a melhor estratégia para todos os testes foi a exponencial, empatada com o caso N.E. Já para o número de transmissões e volume as estratégias constante e linear apresentaram os melhores resultados.

#### 5.2.2.2 Distância entre os dispositivos e o *gateway*

Igualmente a Seção 5.2.1.2, o objetivo aqui é destacar o impacto da distância entre os dispositivos e *gateway* em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso, também será utilizado, além do teste 5 deste cenário, o teste 1 do cenário A. Com base nos dados dos resultados dos respectivos testes, a aplicação do teste de Kruskal-Wallis pode ser vista na Tabela 25.

Tabela 25: Teste de Kruskal-Wallis entre a distância dos EDs e o GW no cenário B.

Estratégia	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
N.E.	2,39E-14	4,64E-14	2,39E-14
Expo.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Linear	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Const.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16

Analizando a Tabela 25, a hipótese nula é rejeitada para todas as estratégias e para as três variáveis, ou seja, existem diferenças entre as medianas dos grupos entre a distância de 5 metros e 4400 metros. Portanto, dar-se-á prosseguimento para o teste de Dunn, Tabela 26.

Tabela 26: Teste de Dunn entre a distância dos EDs e o GW no cenário B (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

Estratégia	ID Teste (GW x)		Nº de transmissões		Tempo de <i>Join</i>		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
N.E.			7,63	<b>2,39E-14</b>	7,54	<b>4,64E-14</b>	7,63	<b>2,39E-14</b>
Expo.			10,50	<b>9,76E-26</b>	10,70	<b>5,94E-27</b>	10,50	<b>9,76E-26</b>
Linear	1 (GW 1)	5 (GW 2)	13,20	<b>1,10E-39</b>	13,40	<b>4,26E-41</b>	13,20	<b>1,10E-39</b>
Const.			12,40	<b>4,41E-35</b>	12,70	<b>7,25E-37</b>	12,40	<b>4,41E-35</b>

Embocado pela Tabela 26, foi constatado que existe diferença entre os dois *gateways* em relação ao desempenho da associação à rede para todas as estratégias apresentadas. Fica evidenciado que para as estratégias constante, linear, exponencial e o caso N.E., o teste com o *gateway* 1 apresentou melhor desempenho se comparado ao teste com o *gateway* 2. Isso se deve ao fato do *gateway* 1 estar a uma distância próxima dos EDs, apresentando assim menor interferência na comunicação sem fio.

### 5.3 Cenário C

O cenário C se refere a análise segundo o número de dispositivos na rede tentando se associar ao mesmo tempo. Os parâmetros foram definidos na Tabela 9 e todo detalhamento foi apresentado na Seção 4.1.2.3.

#### 5.3.1 Análise descritiva

##### 5.3.1.1 Teste 6

O teste 6, realizado com oito canais BW 125KHz, com o *gateway* 1 e com 14 dispositivos tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 45 e comentado mais a diante. As relações entre as médias com desvio padrão e medianas entre as estratégias é apresentada na Tabela 27.

Figura 45: Comparativo do teste 6 do cenário C quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.

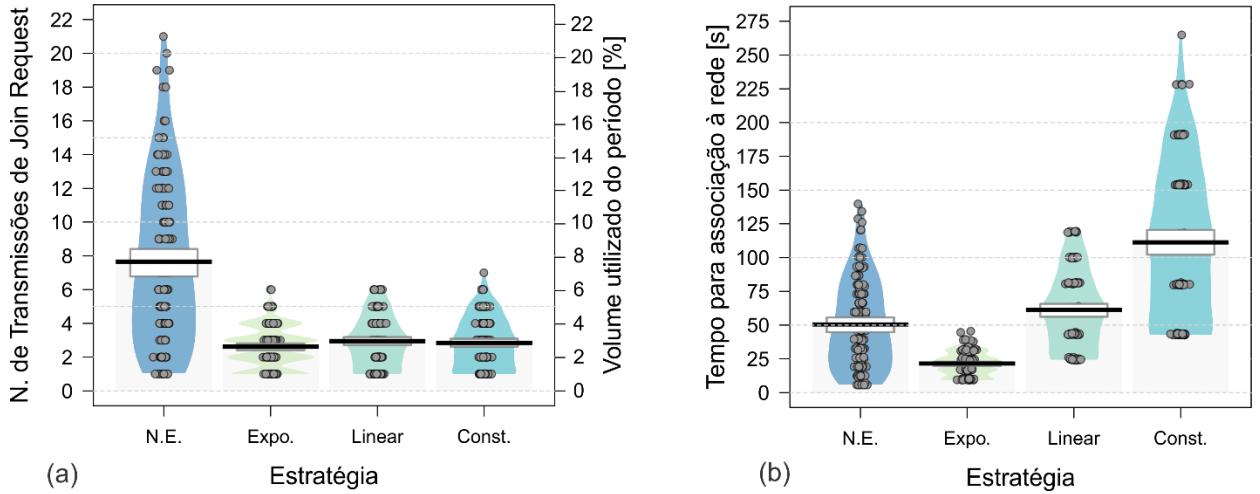


Tabela 27: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 6 do cenário C.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$2,62 \pm 1,22$ 3,00	$2,95 \pm 1,47$ 3,00	$2,84 \pm 1,47$ 3,00	$7,66 \pm 4,84$ 7,00
Tempo de associação	$21,53 \pm 8,82$ 23,37	$61,36 \pm 27,6$ 61,97	$111,28 \pm 54,54$ 116,75	$50,49 \pm 32,65$ 46,12
Volume	$2,7 \pm 1,26$ 3,09	$3,04 \pm 1,51$ 3,09	$2,93 \pm 1,52$ 3,09	$7,89 \pm 4,99$ 7,21
RSSI	$-55,85 \pm 4,69$ -55,00	$-58,42 \pm 3,66$ -59,00	$-59,16 \pm 3,5$ -59,00	$-55,61 \pm 4,37$ -55,00
SNR	$6,3 \pm 0,93$ 6,00	$6,42 \pm 0,93$ 6,00	$6,54 \pm 0,86$ 7,00	$6,27 \pm 0,93$ 6,00

Através da análise da Figura 45 e da Tabela 27 é possível perceber que todas as três estratégias propostas apresentaram desempenho melhor, em função do número de transmissões, volume e tempo, se comparada ao caso N.E. Entretanto entre elas (exponencial, linear e constante) a diferença foi pequena comparando o número de transmissões e volume. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

Através da análise do histograma dos canais foi concluído que há igualdade entre o sorteio dos canais e os canais em que houver a associação.

### 5.3.1.2 Teste 7

O teste 7, realizado com oito canais BW 125KHz, com o *gateway* 1 e com apenas 8 dispositivos tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 46 e comentado mais a diante. As relações entre as médias com desvio padrão e medianas entre as estratégias para o respectivo teste é apresentada na Tabela 28.

Figura 46: Comparativo do teste 7 do cenário C quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.

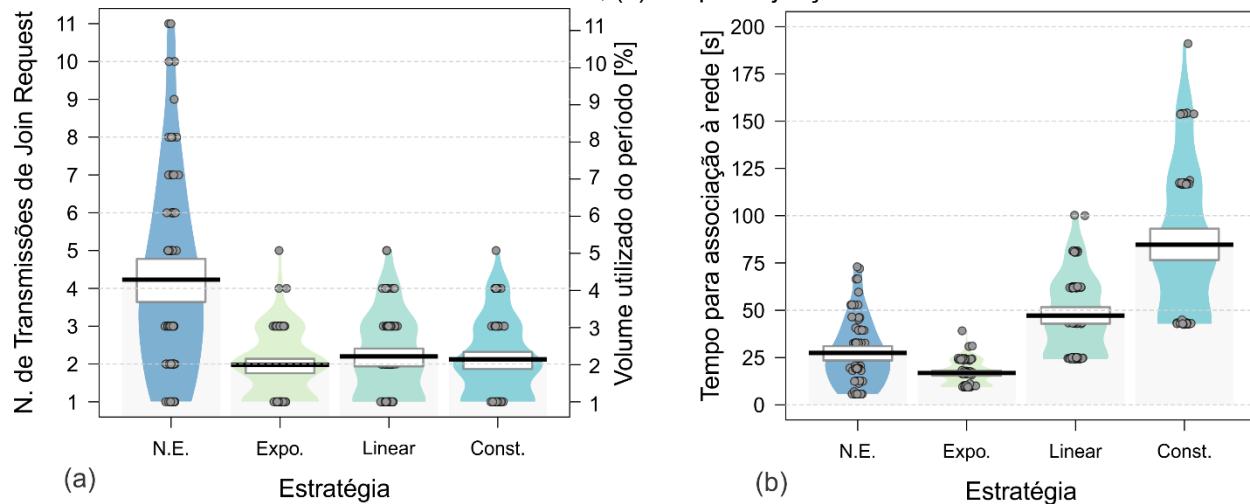


Tabela 28: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 7 do cenário C.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$1,97 \pm 0,87$ 2,00	$2,20 \pm 1,08$ 2,00	$2,13 \pm 1,00$ 2,00	$4,23 \pm 2,51$ 4,00
Tempo de associação	$16,81 \pm 6,24$ 16,83	$47,21 \pm 20,26$ 43,52	$84,70 \pm 37,16$ 79,99	$27,43 \pm 16,86$ 25,48
Volume	$2,04 \pm 0,90$ 2,06	$2,27 \pm 1,11$ 2,06	$2,19 \pm 1,04$ 2,06	$4,36 \pm 2,58$ 4,12
RSSI	$-56,03 \pm 5,89$ -55,00	$-55,80 \pm 5,32$ -55,00	$-56,19 \pm 5,07$ -55,00	$-55,96 \pm 5,23$ -56,00
SNR	$6,48 \pm 0,87$ 7,00	$6,61 \pm 0,87$ 7,00	$6,5 \pm 0,87$ 7,00	$6,65 \pm 0,81$ 7,00

Analizando a Figura 46 e a Tabela 28 é possível perceber que as estratégias propostas apresentaram desempenho superior no quesito número de transmissões e volume em relação ao caso N.E.. A diferença novamente ficou no tempo de associação

à rede. O volume ocupado nos casos com uso das estratégias ficou em torno de 2%, já no caso N.E. o volume ocupado foi de 4,36%. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

A distribuição entre os canais selecionados durante o teste foi uniforme entre todos os oito canais configurados no dispositivo, portanto o histograma de canais não será apresentado.

### 5.3.1.3 Comparativo dos testes do cenário C

Os objetivos nessa comparação consistem em relacionar o uso de estratégias de ciclo útil e também em relação ao número de dispositivos na rede. Para isso o teste 6 apresentou resultados referente ao uso de 14 dispositivos. Já o teste 7 foi para 8 dispositivos. Para efeitos comparativos, o teste 1, presente na Seção 5.1.1.1 possui os mesmos parâmetros, número e largura de banda dos canais, uso do *gateway* 1, porém com 20 dispositivos na rede.

A fim de compilar todos os testes apresentados (6 e 7) do cenário C, relacionando dois fatores: o número de dispositivos da rede e a estratégia de ciclo útil utilizada, serão apresentados histogramas referentes ao número de transmissões, Figura 47, e com tamanho do intervalo de classe de um, tempo de associação à rede, Figura 48, com tamanho do intervalo de 15, e volume de uso da rede, Figura 49, com classe dois.

Analizando os três histogramas apresentados é possível inferir, para todas as variáveis, que aparenta existir uma relação do desempenho segundo o número de dispositivos na rede. Ficou realçado que o teste com 8 dispositivos apresentou o melhor desempenho, seguido do teste com 14 e 20 dispositivos.

Também é possível perceber que a distribuição do número de transmissões e do volume ocupado é bastante semelhante, devido ao uso do DR2 fixo para os canais. Na Figura 48 é possível perceber que para o teste 1 o tempo máximo para associação foi da ordem de 225 segundos, ou 3,75 minutos. Já para o teste 2, esse tempo máximo foi da ordem de 225 segundos, ou 3,75 minutos, e no teste 3, 150 segundos, ou 2,5 minutos.

Também é possível inferir, através da Figura 47 que o caso N.E. apresenta maior número de transmissões em comparação com qualquer uma das estratégias propostas.

Já segundo o tempo de associação à rede, Figura 48, as estratégias que apresentam maior latência foram a constante e linear.

Figura 47: Comparativo entre o teste 1 (20 EDs), 6 (14 EDs) e 7 (8 EDs) para o cenário C referente ao número de transmissões.

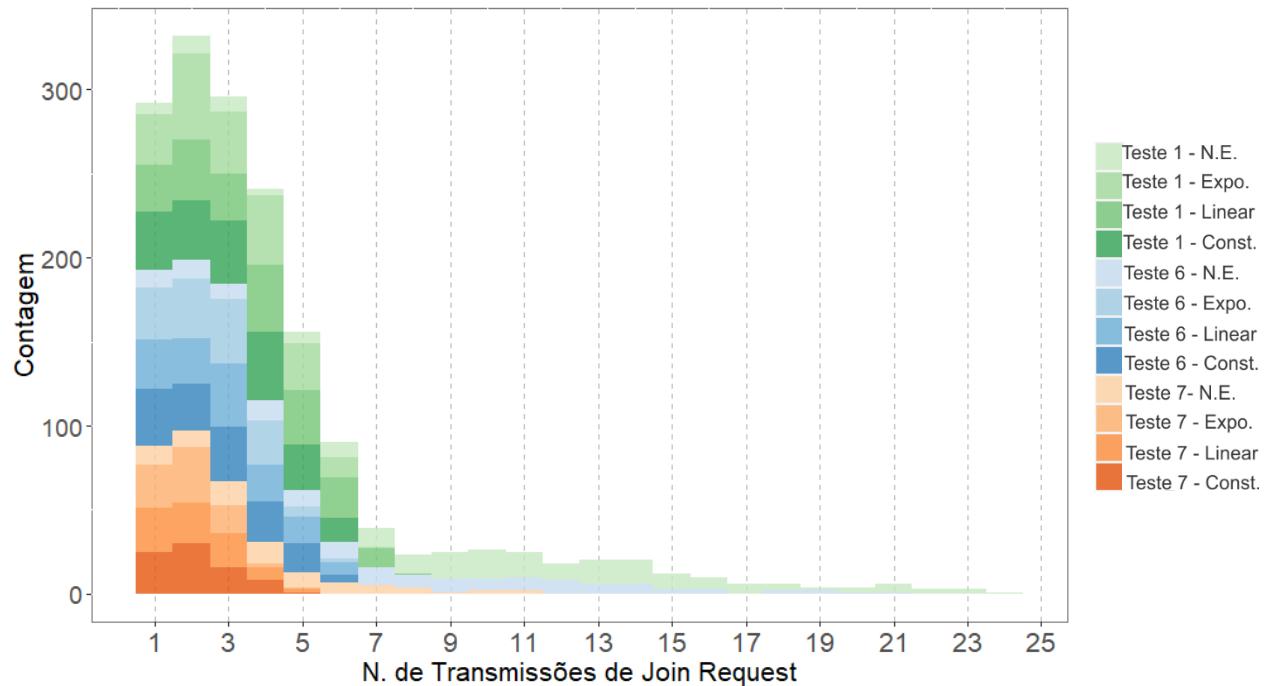


Figura 48: Comparativo entre o teste 1 (20 EDs), 6 (14 EDs) e 7 (8 EDs) para o cenário C referente ao tempo de associação.

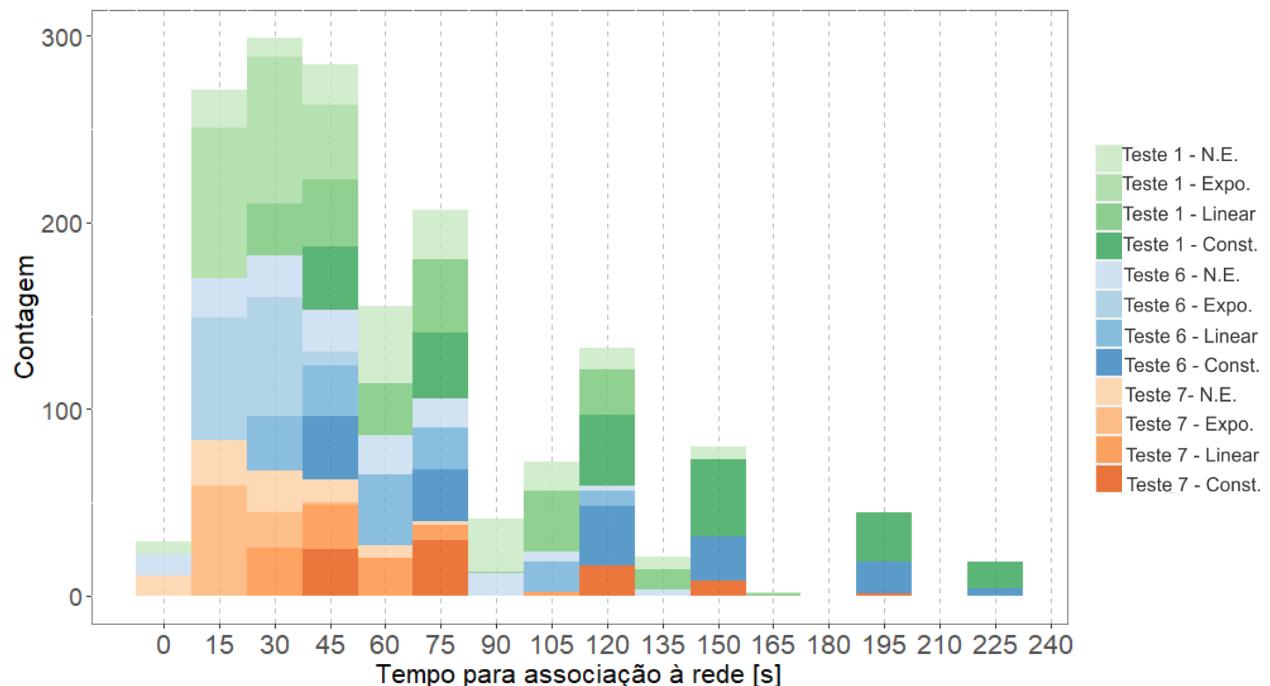
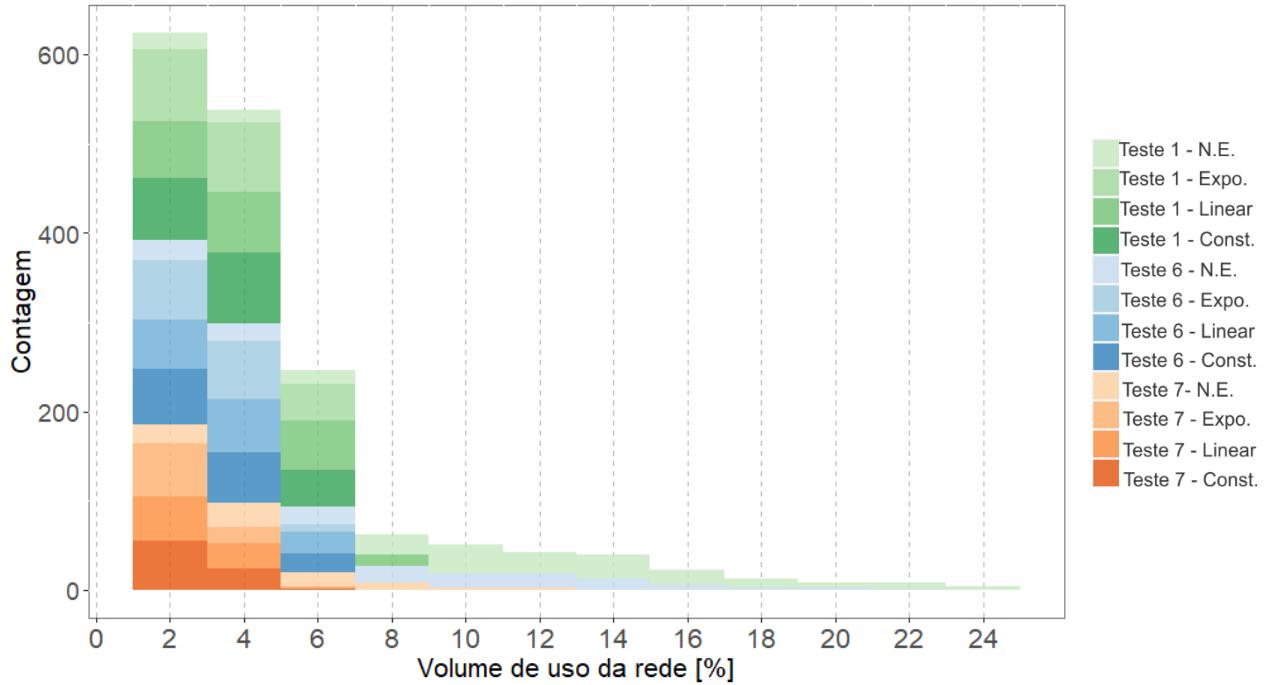


Figura 49: Comparativo entre o teste 1 (20 EDs), 6 (14 EDs) e 7 (8 EDs) para o cenário C referente ao volume de uso da rede.



### 5.3.2 Análise não paramétrica

#### 5.3.2.1 Estratégias de ciclo útil

O objetivo dessa primeira análise é ranquear as melhores estratégias de uso para o ciclo útil de acordo com o número de dispositivos na rede (20, 14 e 8). Com base nos dados dos resultados apresentados na seção anterior, o teste de Kruskal-Wallis foi montado e é apresentado na Tabela 29.

Tabela 29: Teste de Kruskal-Wallis entre as estratégias de ciclo útil do cenário C.

ID Teste	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
6	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
7	3,41E-12	< 2,20E-16	3,41E-12

Baseando-se na aplicação do teste da Tabela 29, fica evidente que a hipótese nula foi rejeitada para os testes 6 e 7. Portanto, o teste de Dunn pode ser utilizado e será apresentado na Tabela 30.

Tabela 30: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário C (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%)

ID Teste	Estratégia		Nº de transmissões		Tempo de <i>Join</i>		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
6	Const.	Expo.	-0,84	4,01E-01	-16,40	<b>3,59E-60</b>	-0,84	4,01E-01
	Const.	Linear	0,62	5,33E-01	-5,49	<b>3,91E-08</b>	0,62	5,33E-01
	Const.	N.E.	9,15	<b>5,68E-20</b>	-8,68	<b>4,11E-18</b>	9,15	<b>5,68E-20</b>
	Expo.	Linear	1,46	1,43E-01	10,90	<b>1,08E-27</b>	1,46	1,43E-01
	Expo.	N.E.	9,97	<b>2,04E-23</b>	7,64	<b>2,13E-14</b>	9,97	<b>2,04E-23</b>
	Linear	N.E.	8,55	<b>1,29E-17</b>	-3,22	<b>1,30E-03</b>	8,55	<b>1,29E-17</b>
7	Const.	Expo.	-0,71	4,76E-01	-13,1	<b>2,67E-39</b>	-0,71	4,76E-01
	Const.	Linear	0,35	7,30E-01	-4,01	<b>6,14E-05</b>	0,35	7,30E-01
	Const.	N.E.	5,97	<b>2,34E-09</b>	-9,19	<b>4,08E-20</b>	5,97	<b>2,34E-09</b>
	Expo.	Linear	1,06	2,90E-01	9,12	<b>7,45E-20</b>	1,06	2,90E-01
	Expo.	N.E.	6,66	<b>2,70E-11</b>	3,88	<b>1,06E-04</b>	6,66	<b>2,70E-11</b>
	Linear	N.E.	5,63	<b>1,82E-08</b>	-5,20	<b>1,95E-07</b>	5,63	<b>1,82E-08</b>

Com base na Tabela 30 é possível ranquear para os testes 6 e 7, com 14 e 8 dispositivos na rede, respectivamente, qual seria a melhor estratégia de ciclo útil, baseando no número de transmissões e volume ou com base no tempo de associação. Analisando os z-valores e p-valores fica constatado que para 8 ou 14 dispositivos na rede o ranqueamento das estratégias de ciclo útil permanece o mesmo e pode ser visto a seguir, na Tabela 31.

Tabela 31: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário C.

Teste	Classificação	Estratégia ciclo útil	
		Número de Transmissões/ Volume ocupado	Tempo de associação à rede
6 e 7	1º	<b>Exponencial / Constante / Linear</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	N.E.	N.E.
	3º	-	Linear
	4º	-	Constante

### 5.3.2.2 Número de dispositivos na rede

Igualmente a Seção 5.3.1.3, o objetivo aqui é destacar o impacto do número de dispositivos presentes na rede em relação ao desempenho de associação à rede. Para

isso, também será utilizado, além dos testes 6 e 7 do cenário C, o teste 1 do cenário A. Com base nos dados dos resultados dos respectivos testes, a aplicação do teste de Kruskal-Wallis pode ser vista na Tabela 32.

Tabela 32: Teste de Kruskal-Wallis entre o número de EDs no cenário C.

Estratégia	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
N.E.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Expo.	4,30E-09	1,87E-09	4,30E-09
Linear	3,57E-10	1,61E-09	3,57E-10
Const.	9,23E-07	4,54E-07	9,23E-07

Através da Tabela 32 fica evidente que para todas as estratégias do ciclo útil e para o caso N.E. que a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as medianas dos grupos segundo o número de dispositivos. Com isso em mente, o teste de Dunn pode ser aplicado e visualizado na Tabela 33.

Tabela 33: Teste de Dunn entre o número de EDs no cenário C (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

Estratégia	ID Teste		Nº de transmissões		Tempo de Join		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
N.E.	6	1	4,63	<b>3,62E-06</b>	4,70	<b>2,60E-06</b>	4,63	<b>3,62E-06</b>
	6	7	-4,87	<b>1,11E-06</b>	-4,69	<b>2,70E-06</b>	-4,87	<b>1,11E-06</b>
	1	7	-9,02	<b>1,90E-19</b>	-8,89	<b>6,33E-19</b>	-9,02	<b>1,90E-19</b>
Expo.	6	1	2,88	<b>3,94E-03</b>	2,90	<b>3,68E-03</b>	2,88	<b>3,94E-03</b>
	6	7	-3,53	<b>4,13E-04</b>	-3,64	<b>2,69E-04</b>	-3,53	<b>4,13E-04</b>
	1	7	-6,15	<b>7,75E-10</b>	-6,29	<b>3,24E-10</b>	-6,15	<b>7,75E-10</b>
Linear	6	1	3,46	<b>5,32E-04</b>	3,34	<b>8,25E-04</b>	3,46	<b>5,32E-04</b>
	6	7	-3,37	<b>7,39E-04</b>	-3,25	<b>1,14E-03</b>	-3,37	<b>7,39E-04</b>
	1	7	-6,46	<b>1,04E-10</b>	-6,23	<b>4,58E-10</b>	-6,46	<b>1,04E-10</b>
Const.	6	1	2,12	<b>3,42E-02</b>	2,11	<b>3,51E-02</b>	2,12	<b>3,42E-02</b>
	6	7	-3,32	<b>9,05E-04</b>	-3,46	<b>5,48E-04</b>	-3,32	<b>9,05E-04</b>
	1	7	-5,27	<b>1,40E-07</b>	-5,40	<b>6,63E-08</b>	-5,27	<b>1,40E-07</b>

Analizando a Tabela 33 é constatado que o número de dispositivos presentes na rede tem influência sim quanto ao número de transmissões, o tempo de associação e o volume ocupado, sendo essa relação de desempenho proporcional ao número de dispositivos. Considerando todas as estratégias propostas e o caso N.E., para os testes

com 8 EDs o desempenho foi superior se comparado aos testes com 14 EDs que também apresentou melhor desempenho quando comparado aos resultados do teste com 20 EDs.

## 5.4 Cenário D

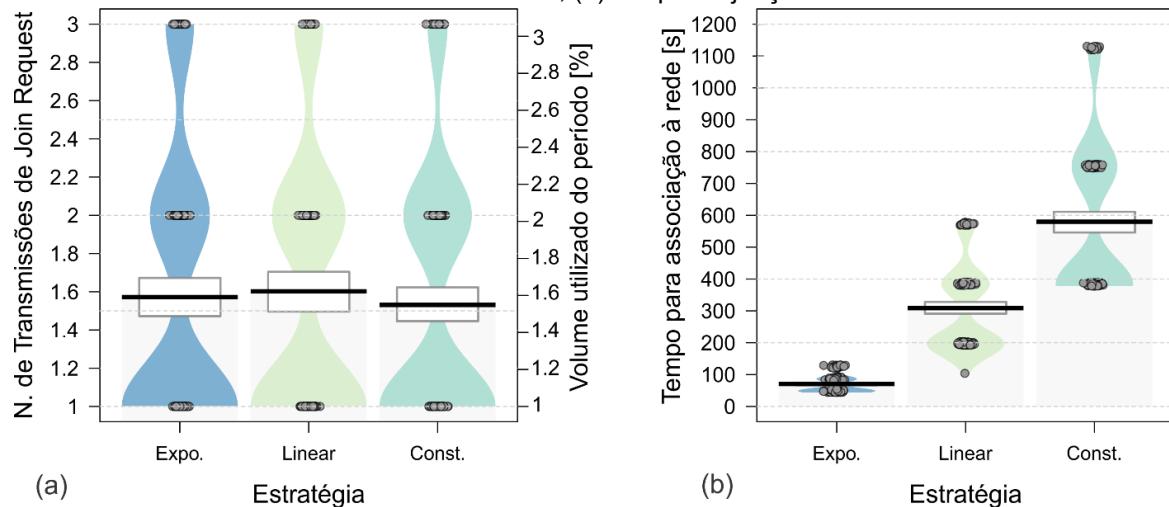
O cenário D, segundo a Tabela 9 é referente a análise da redução do ciclo útil, visto com mais detalhes na Seção 4.1.2.4.

### 5.4.1 Análise descritiva

#### 5.4.1.1 Teste 8

O teste 8, realizado com oito canais BW 125KHz, com o *gateway* 1, 20 dispositivos e durante a fase 2 do ciclo útil, tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 50 e comentado mais a diante. As relações entre as médias com desvio padrão e medianas entre as estratégias para o respectivo teste será apresentada na Tabela 34.

Figura 50: Comparativo do teste 8 do cenário D quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.



Analizando a Figura 50 e a Tabela 34 é possível perceber que as estratégias propostas apresentaram desempenho bastante semelhante entre elas quanto ao número de transmissões de quadros, porém evidenciando ainda mais a diferença no tempo de

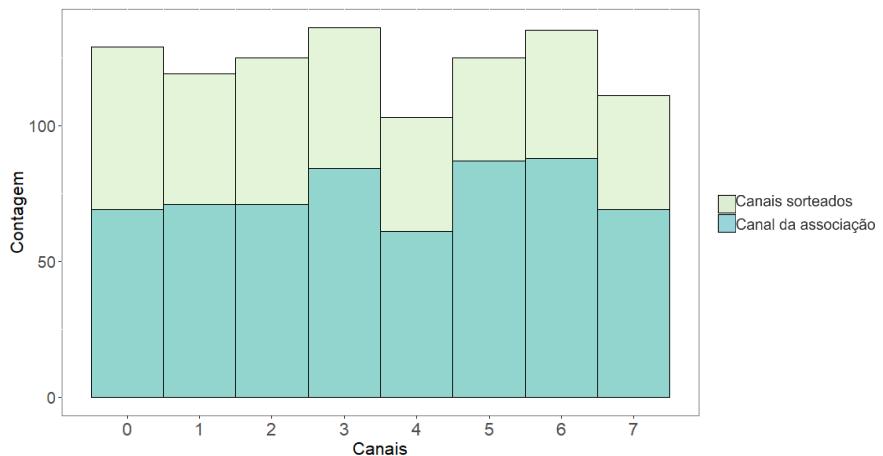
associação, devido ao aumento do período e redução do ciclo útil. Para esse cenário, o número máximo de transmissões ficou em três, ou seja, dilatando o tempo entre as transmissões e aumentando a margem aleatória aparentemente resultou em um menor número de colisões de quadros e consequentemente um menor volume ocupado. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

Tabela 34: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 8 do cenário D.

Variável	Estratégia		
	Expo.	Linear	Const.
Nº de Transmissões	$1,57 \pm 0,72$ 1,00	$1,60 \pm 0,71$ 1,00	$1,53 \pm 0,67$ 1,00
Tempo de associação	$70,64 \pm 27,8$ 53,54	$308,62 \pm 134,35$ 202,18	$579,97 \pm 247,59$ 387,71
Volume	$1,62 \pm 0,75$ 1,03	$1,65 \pm 0,73$ 1,03	$1,58 \pm 0,69$ 1,03
RSSI	$-55,64 \pm 5,43$ -55,00	$-56,57 \pm 6,55$ -55,00	$-54,81 \pm 5,02$ -55,00
SNR	$6,53 \pm 0,89$ 7,00	$6,46 \pm 1,02$ 7,00	$6,51 \pm 0,96$ 7,00

Na Figura 51 é mostrado os canais sorteados e que houver a associação onde, é possível perceber um leve desequilíbrio entre o sorteio dos oito canais disponíveis. Provavelmente isso se deve ao fato do baixo número de transmissões, ou seja, poucos canais foram sorteados durante os testes, resultando em poucas amostras dos dados.

Figura 51: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 8 do cenário D.

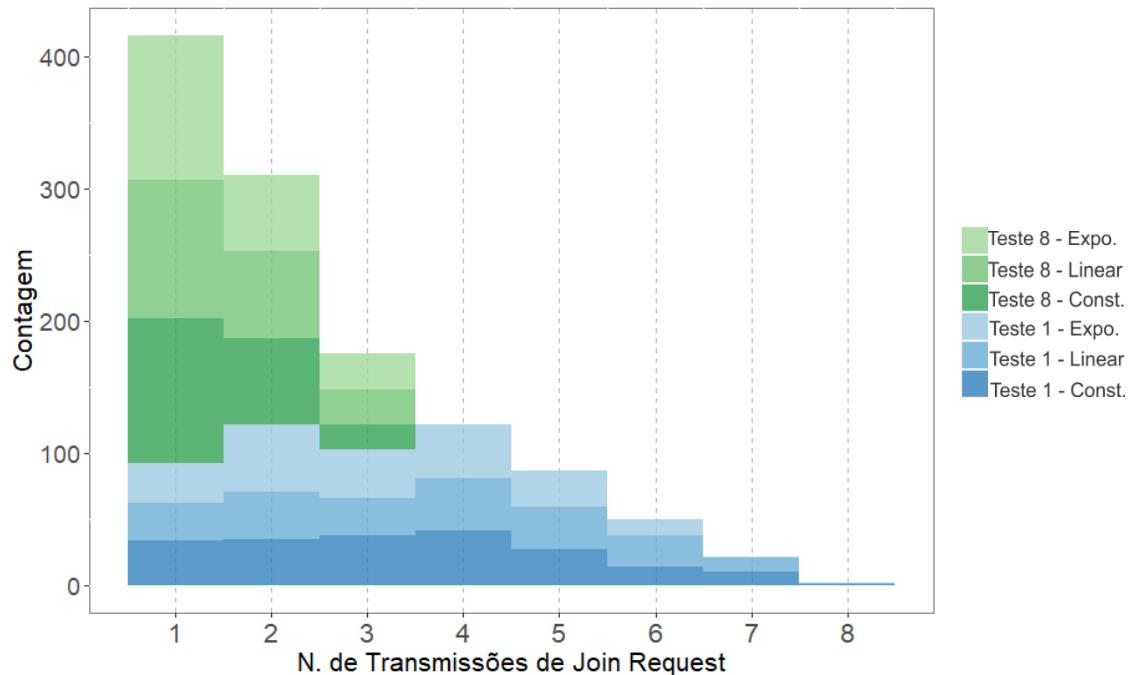


#### 5.4.1.2 Comparativo do teste do cenário D

Os objetivos nessa comparação consistem em relacionar o uso de estratégias de ciclo útil e também a relação quanto a redução de ciclo útil. Para isso o teste 8 apresentou resultados referente ao uso do dispositivo em fase 2, entre a 1<sup>a</sup> e a 11<sup>a</sup> hora de funcionamento, segundo a Tabela 3.. Para efeitos comparativos, o teste 1, presente na Seção 5.1.1.1 possui os mesmos parâmetros, número e largura de banda dos canais, uso do *gateway* 1, 20 dispositivos, entretanto utilizado na fase 1 do ciclo útil, considerada na primeira hora de funcionamento. Também vale salientar que o caso N.E. do teste 1 foi removido, pois o teste 8 apenas foi realizado nas 3 estratégias propostas.

Portanto será realizada uma comparação direta entre o teste 8 do cenário D e o teste 1 do cenário. Serão apresentados histogramas referentes ao número de transmissões e com tamanho do intervalo de classe de um, Figura 52, tempo de associação à rede com tamanho do intervalo de 60, Figura 53 e volume de uso da rede com referente tamanho do intervalo de classe igual a dois, Figura 54.

Figura 52: Comparativo entre o teste 1 e 8 para o cenário D referente ao número de transmissões.



Com base na análise dos histogramas apresentados é possível inferir que o teste 8, na fase 2 e com ciclo útil de 0,1% teve desempenho superior que o teste 1, na fase 1 e com ciclo útil de 1%, quando considerado o número de transmissões e volume ocupados. Quando a análise é em relação ao tempo para a associação esse cenário muda, com o teste 1 sendo mais rápido que o teste 2, devido ao aumento do período e diminuição do ciclo útil. O efeito da diminuição do ciclo útil em relação aos tempos de contenção das estratégias foi exemplificado na Seção 3.1.5.

Segundo a Figura 54 para o teste 8 o volume máximo ocupado foi de aproximadamente 3%, enquanto que para o teste 1 esse valor foi de 8%.

Também é possível perceber que a distribuição do número de transmissões e do volume ocupado é semelhante, devido ao uso do DR2 fixo para os canais. Na Figura 53 é possível perceber que para o teste 1 o tempo máximo para associação foi da ordem de 240 segundos, ou 4 minutos. Já para o teste 8, esse tempo máximo foi da ordem de 1140 segundos, ou 19 minutos. Segundo o tempo de associação à rede, Figura 53, as estratégias que apresentam maior latência foram a constante e linear, com destaque ainda maior durante o teste 8.

Figura 53: Comparativo entre o teste 1 e 8 para o cenário D referente ao tempo de associação.

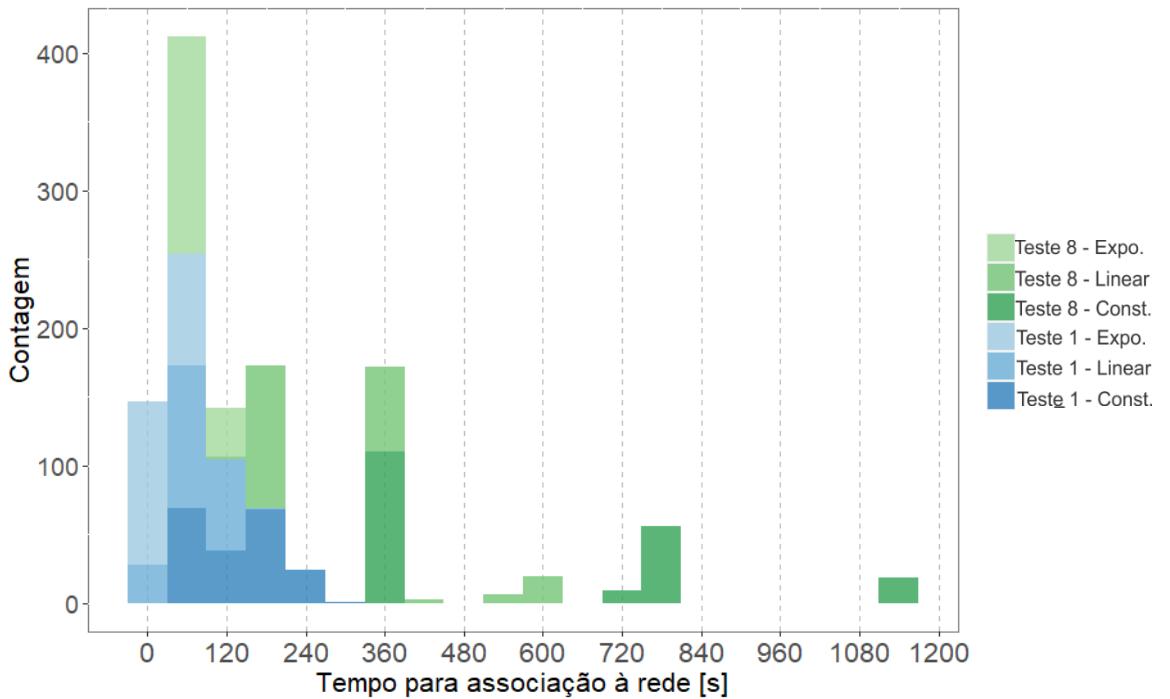
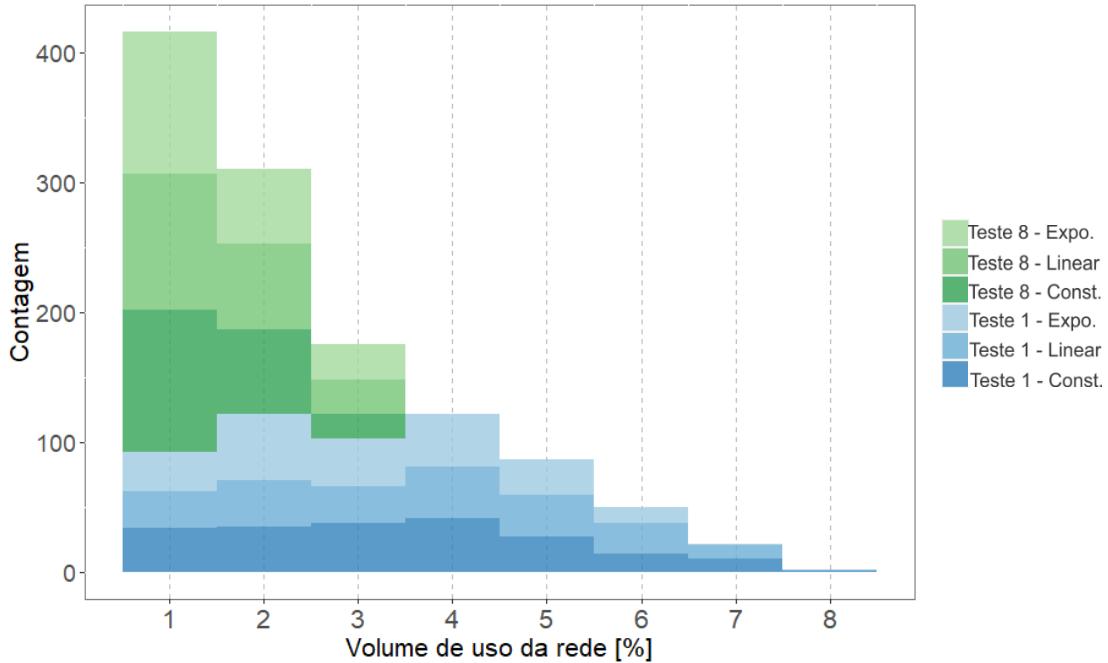


Figura 54: Comparativo entre o teste 1 e 8 para o cenário D referente ao volume de uso da rede.



#### 5.4.2 Análise não paramétrica

##### 5.4.2.1 Estratégias de ciclo útil

O objetivo dessa primeira análise é ranquear as melhores estratégias de uso para o ciclo útil de acordo com o ciclo útil utilizado segundo a fase de funcionamento do dispositivo (fase 1 [1%] e fase 2 [0,1%]). Com base nos dados dos resultados apresentados na seção anterior, o teste de Kruskal-Wallis foi executado e pode ser visto na Tabela 35. Para todas as variáveis analisadas a hipótese nula foi rejeitada, passando então para a análise do teste de Dunn, visto na Tabela 36.

Tabela 35: Teste de Kruskal-Wallis entre todas as estratégias de ciclo útil para o cenário D.

ID Teste	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
8	6,57E-13	< 2,20E-16	6,57E-13

Com base na Tabela 36 é possível perceber que apenas para o tempo de associação houve diferença significativa entre as estratégias. Prosseguindo, é possível ranquear para o teste 8, qual seria a melhor estratégia de ciclo útil, baseando no número de transmissões e volume ou com base no tempo de associação e pode ser visto na

Tabela 37.

Tabela 36: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário D (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

ID Teste	Estratégia		Nº de transmissões		Tempo de <i>Join</i>		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
8	Const.	Expo.	0,35	0,73	-20,50	<b>5,14E-93</b>	0,35	0,73
	Const.	Linear	0,91	0,36	-6,83	<b>8,27E-12</b>	0,91	0,36
	Expo.	Linear	0,56	0,58	13,70	<b>1,41E-42</b>	0,56	0,58

Tabela 37: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário D.

Teste	Classificação	Estratégia ciclo útil	
		Número de Transmissões/ Volume ocupado	Tempo de associação à rede
8	1º	<b>Exponencial / Linear / Constante</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	-	Linear
	3º	-	Constante

Através da

Tabela 37 é possível perceber que quanto ao tempo de associação à rede o melhor desempenho foi da estratégia exponencial, seguida da linear e constante. Já em relação ao número de transmissões e volume ocupado, todas as estratégias apresentaram um desempenho bem semelhante.

#### 5.4.2.2 Redução do ciclo útil

Como na Seção 5.4.1.2, o objetivo é destacar o impacto da redução do ciclo útil em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso, também será utilizado, além do teste 8 do cenário D, o teste 1 do cenário A. Com base nos dados dos resultados dos respectivos testes, a aplicação do teste de Kruskal-Wallis pode ser vista na Tabela 38.

Tabela 38: Teste de Kruskal-Wallis para o ciclo útil no cenário D.

Estratégia	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
Expo.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Linear	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Const.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16

Através da Tabela 38 fica evidente que para todas as estratégias do ciclo que a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as medianas dos grupos segundo o ciclo útil utilizado (1% ou 0,1%). Sendo assim, o teste de Dunn é aplicado e pode ser visualizado na Tabela 39.

Tabela 39: Teste de Dunn para o ciclo útil no cenário D(valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

Estratégia	ID Teste		Nº de transmissões		Tempo de <i>Join</i>		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
Expo.	1	8	-10,90	<b>8,63E-28</b>	16,80	<b>1,76E-63</b>	-10,90	<b>8,63E-28</b>
Linear	1	8	-11,80	<b>2,51E-32</b>	17,20	<b>3,78E-66</b>	-11,80	<b>2,51E-32</b>
Const.	1	8	-11,50	<b>1,72E-30</b>	17,20	<b>4,74E-66</b>	-11,50	<b>1,72E-30</b>

A Tabela 39 permite constatar que para todas as variáveis analisadas existem diferenças entre o teste 1 (fase 1 [1%]) e o teste 8 (fase 2 [0,1%]) para as estratégias exponencial, constante e linear. Sendo que, em relação ao número de transmissões e o volume ocupado o teste 8 apresentou desempenho superior ao teste 1. Já para o caso do tempo de associação à rede o resultado também foi o inverso, sendo o teste 1 mais rápido que o teste 8.

## 5.5 Cenário E

O cenário E, segundo a Tabela 9 é referente a análise para validação da proposta de taxa de dados adaptativa, visto com detalhes na Seção 4.1.2.5. Para tal, o teste 9 será apresentado, utilizando o ADR proposto na Seção 3.2.

### 5.5.1 Análise descritiva

#### 5.5.1.1 Teste 9

O teste 9, realizado com oito canais BW 125KHz, gateway 1, 20 dispositivos e com o uso do ADR proposto tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 55 e comentado mais a diante. As relações entre as médias com desvio padrão e medianas entre as estratégias pode ser vista na Tabela 40.

Figura 55: Comparativo para o teste 9 do cenário E quanto ao (a) número de transmissões de *join request*, (b) tempo de junção à rede, (c) volume de uso da rede.

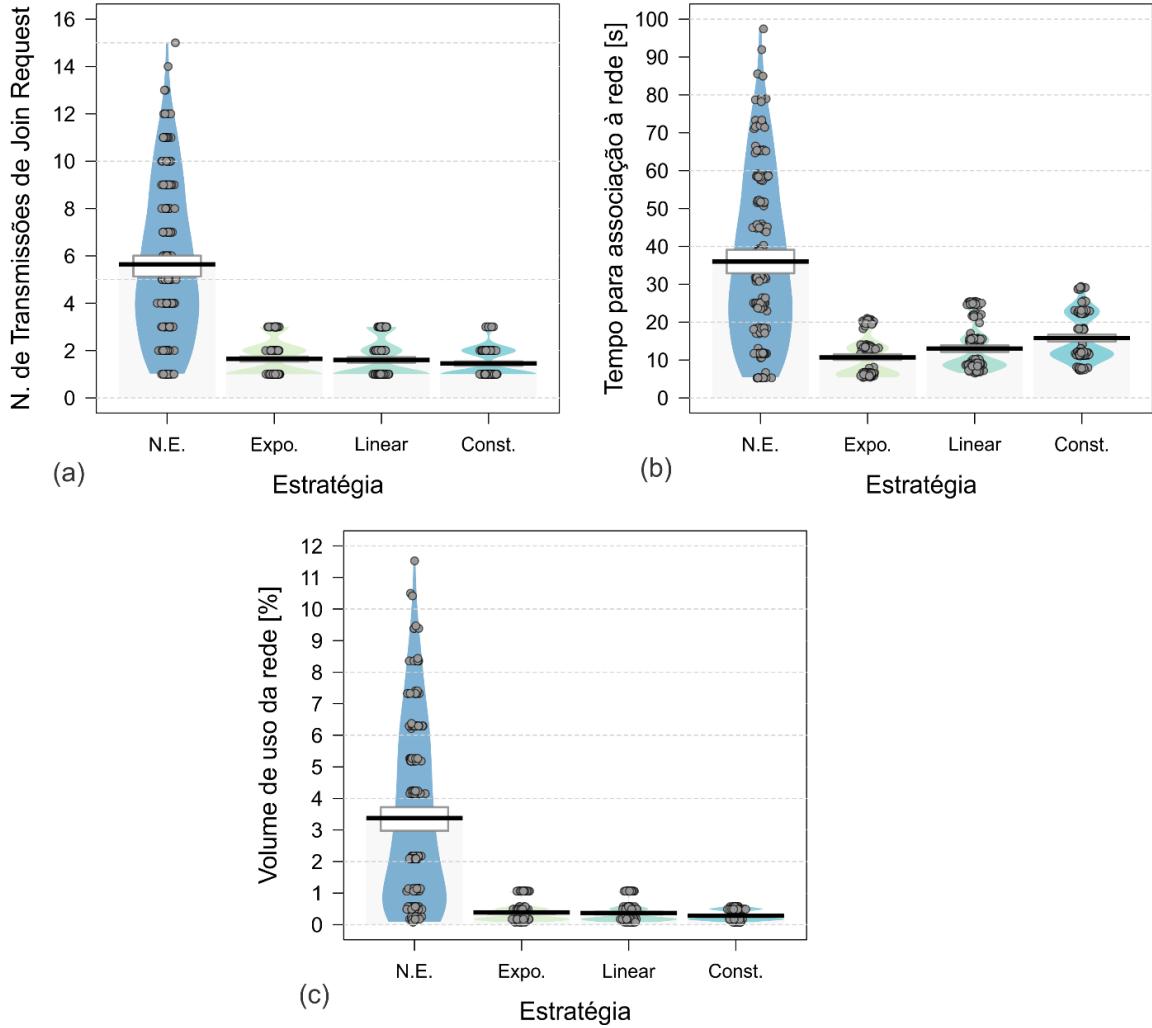


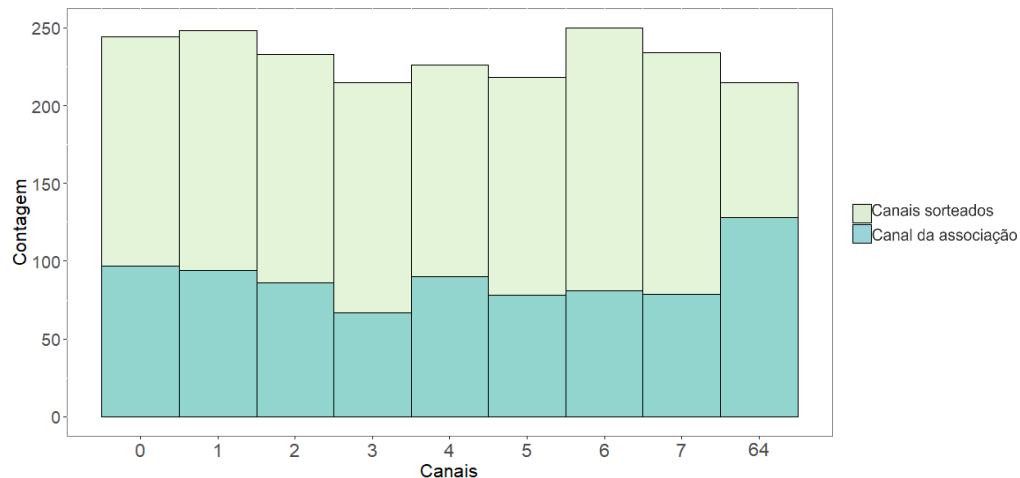
Tabela 40: Valores de média, mediana e desvio padrão para o teste 9 do cenário E.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$1,65 \pm 0,73$ 1,00	$1,61 \pm 0,77$ 1,00	$1,46 \pm 0,60$ 1,00	$5,64 \pm 3,17$ 5,00
Tempo de associação	$10,70 \pm 5,03$ 7,84	$13,03 \pm 5,91$ 9,14	$15,78 \pm 6,09$ 11,94	$35,99 \pm 21,26$ 31,79
Volume	$0,39 \pm 0,30$ 0,17	$0,37 \pm 0,30$ 0,17	$0,28 \pm 0,16$ 0,17	$3,38 \pm 2,76$ 3,12
RSSI	$-51,93 \pm 5,37$ -51,00	$-55,12 \pm 6,17$ -54,00	$-54,21 \pm 5,19$ -53,00	$-57,05 \pm 6,51$ -57,00
SNR	$6,11 \pm 0,73$ 6,00	$6,12 \pm 0,75$ 6,00	$6,04 \pm 0,67$ 6,00	$6,21 \pm 0,83$ 6,00

Analizando a Figura 55 e a Tabela 40 é possível perceber que as estratégias propostas apresentaram desempenho superior no quesito número de transmissões, tempo de associação e volume em relação ao caso N.E.. O volume ocupado nos casos com uso das estratégias ficou bem abaixo de 1%, já no caso N.E. a média do volume ocupado foi de 3,38%. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

A Figura 56 demonstra o sorteio dos oito primeiros canais e o canal em que foi realizada a associação. É possível inferir que há uma taxa de sucesso ligeiramente maior no canal 64 de 500KHz se compara com o restante dos canais de 0 a 7 com BW 125KHz. Quando comparado a Figura 33 do teste 2 (sem o ADR proposto) é possível perceber que para a Figura 56, os canais com BW 125KHz tiveram um desempenho bem próximo do canal com BW 500KHz, o que não foi o caso para o teste 2.

Figura 56: Histograma dos canais selecionados e canal da associação no teste 9 do cenário E.



### 5.5.1.2 Comparativo do teste do cenário E

O objetivo aqui é destacar o impacto do uso do ADR proposto em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso o teste 9 utilizou o ADR. Para efeitos comparativos, o teste 2, presente na Seção 5.1.1.2, possuindo os mesmos parâmetros de número de dispositivos, número e largura de banda dos canais, *gateway*, sendo a única diferença nesse caso a não utilização do ADR será utilizado.

Portanto será realizada uma comparação direta entre o teste 9 do cenário E e o teste 2 do cenário A, relacionando dois fatores: o impacto do ADR proposto e a estratégia

de ciclo útil utilizada. Serão apresentados histogramas referentes ao número de transmissões, Figura 57, tempo de associação à rede, Figura 58 e volume de uso da rede, Figura 59, com tamanhos de classe igual a 1, 15 e 1, respectivamente.

Figura 57: Comparativo entre o teste 2 e 9 para o cenário E referente ao número de transmissões.

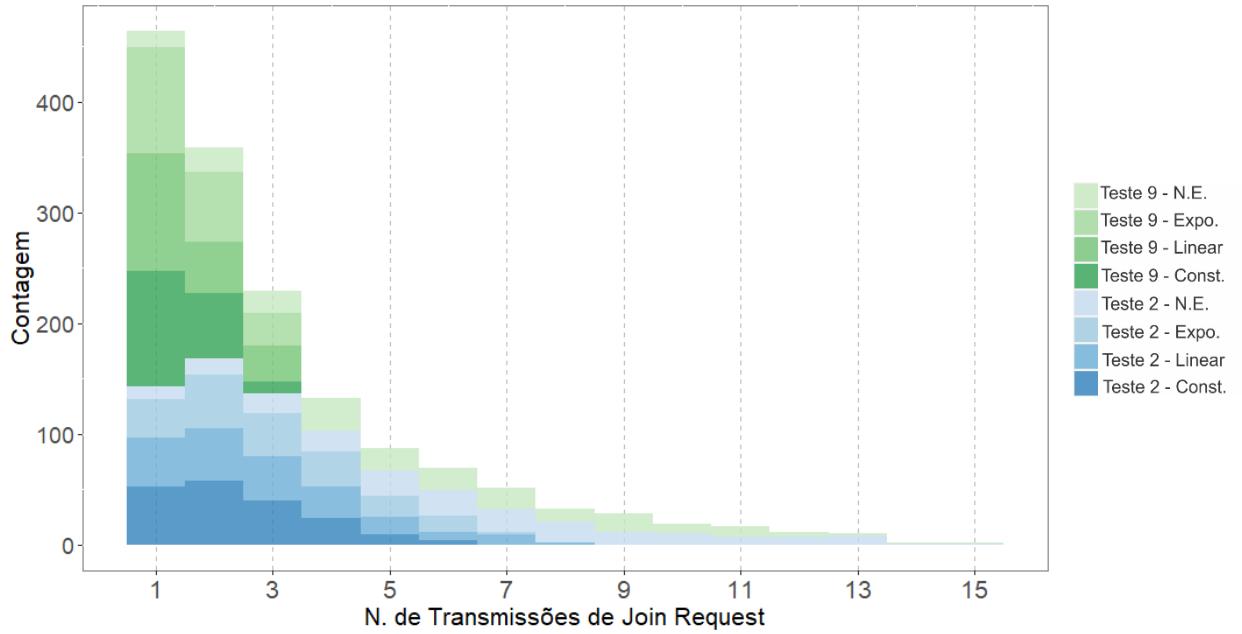


Figura 58: Comparativo entre o teste 2 e 9 para o cenário E referente ao tempo de associação.

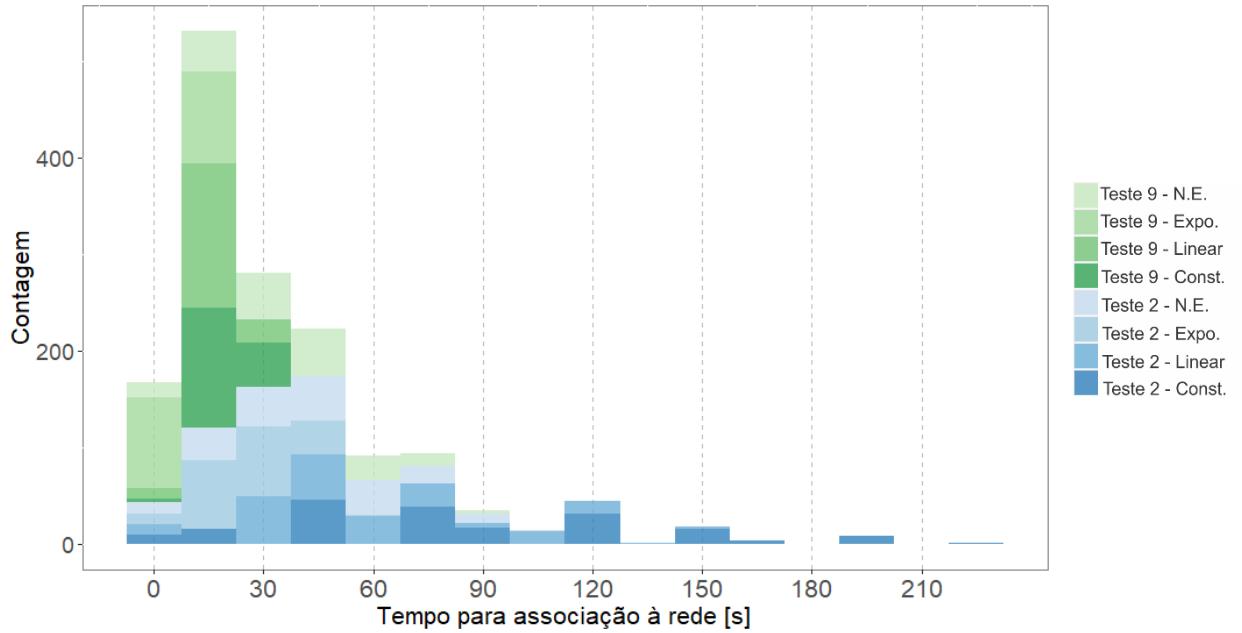
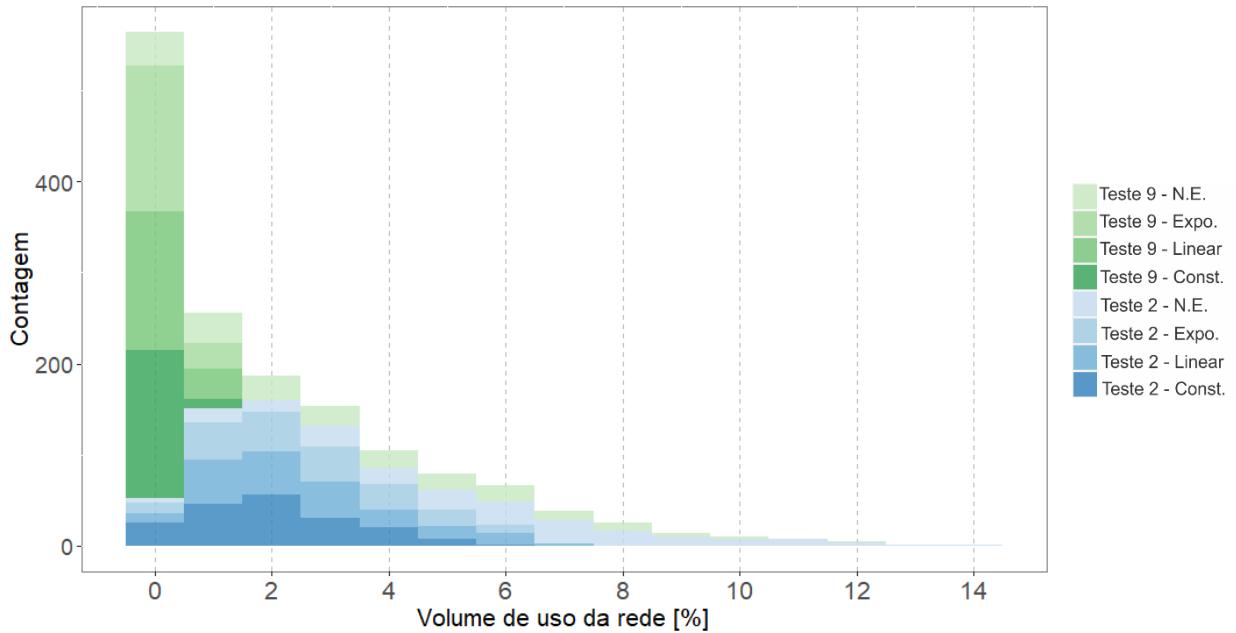


Figura 59: Comparativo entre o teste 2 e 9 para o cenário E referente ao volume de uso da rede.



Analisando os três histogramas apresentados é possível inferir, para todas as variáveis, que o teste 9 (com o ADR proposto) aparentemente teve desempenho melhor se comparado ao teste 2 (sem o ADR proposto).

Também é possível perceber que a distribuição do número de transmissões e do volume ocupado é bastante semelhante, devido ao uso do DR2 fixo para os canais. Na Figura 58 é possível perceber que para o teste 9 o tempo máximo para associação foi da ordem de 90 segundos, ou 1,5 minutos. Já para o teste 2, esse tempo máximo foi da ordem de 225 segundos, ou 3,75 minutos.

Segundo a Figura 59, para o teste com o ADR o máximo volume ocupado foi de 10%, enquanto que para o teste sem o ADR esse valor chegou a 14%. Se considerarmos apenas as três estratégias esse valor é ainda mais discrepante, sendo que com o ADR o volume utilizado não passou de 1%, enquanto que para o teste sem o ADR o volume chegou na casa dos 9%.

Também é possível inferir, através da Figura 57 que o caso N.E. apresenta maior número de transmissões em comparação com qualquer uma das estratégias propostas. Já segundo o tempo de associação à rede, Figura 58, as estratégias que apresentam maior latência também foram a constante e linear.

## 5.5.2 Análise não paramétrica

### 5.5.2.1 Estratégias de ciclo útil

O objetivo dessa primeira análise é ranquear as melhores estratégias de uso para o ciclo útil de acordo com os resultados com o uso do ADR proposto. Com base nos dados dos resultados apresentados na seção anterior, o teste de Kruskal-Wallis foi montado e é apresentado na Tabela 41.

Tabela 41: Teste de Kruskal-Wallis entre todas as estratégias de ciclo útil para o cenário E.

ID Teste	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
9	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16

Baseando-se na aplicação do teste da Tabela 41, fica evidente que a hipótese nula foi rejeitada para o teste 9 em todas as variáveis analisadas. Portanto, o teste de Dunn pode ser utilizado e será apresentado na Tabela 42.

Tabela 42: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário E (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

ID Teste	Estratégia		Nº de transmissões		Tempo de Join		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
9	Const.	Expo.	1,74	8,24E-02	-6,30	<b>2,94E-10</b>	1,93	5,42E-02
	Const.	Linear	1,12	2,62E-01	-2,90	<b>3,68E-03</b>	1,24	2,17E-01
	Const.	N.E.	15,30	<b>9,65E-53</b>	8,10	<b>5,43E-16</b>	14,90	<b>1,94E-50</b>
	Expo.	Linear	-0,62	5,35E-01	3,44	<b>5,78E-04</b>	-0,70	4,87E-01
	Expo.	N.E.	13,80	<b>1,39E-43</b>	14,80	<b>1,09E-49</b>	13,30	<b>2,62E-40</b>
	Linear	N.E.	14,40	<b>5,53E-47</b>	11,30	<b>2,23E-29</b>	13,90	<b>4,67E-44</b>

Com base na Tabela 42 é possível ranquear para o teste 9, qual seria a melhor estratégia de ciclo útil, baseando no número de transmissões e volume ou com base no tempo de associação. Analisando os z-valores e p-valores a classificação pode ser construída e vista a seguir, na Tabela 43.

Através da Tabela 43 é possível perceber que quanto ao tempo de associação à rede o melhor desempenho foi da estratégia exponencial, seguida da linear e constante e por último o caso N.E. Já em relação ao número de transmissões e volume ocupado,

todas as três estratégias apresentaram um desempenho bem semelhante e também superior ao caso N.E.

Tabela 43: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário E.

Teste	Classificação	Estratégia ciclo útil	
		Número de Transmissões/ Volume ocupado	Tempo de associação à rede
9	1º	<b>Exponencial / Linear / Constante</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	N.E.	Linear
	3º	-	Constante
	4º	-	N.E.

#### 5.5.2.2 ADR proposto

Assim como na Seção 5.5.1.2, o objetivo aqui é destacar o impacto no uso do ADR proposto em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso, também será utilizado, além do teste 9 desse cenário, o teste 2 do cenário A. Com base nos dados dos resultados dos respectivos testes, a aplicação do teste de Kruskal-Wallis pode ser vista na Tabela 44. Esse teste reflete a diferença dos resultados entre o uso do ADR (teste 9) e a não utilização do ADR (teste 2).

Tabela 44: Teste de Kruskal-Wallis para o ADR proposto no cenário E.

Estratégia	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
N.E.	6,49E-02	2,96E-03	2,45E-11
Expo.	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Linear	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16
Const.	1,44E-15	< 2,20E-16	< 2,20E-16

Através da Tabela 44 fica evidente que exceto para o caso N.E. em relação ao número de transmissões, para todas as outras comparações a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as medianas dos grupos com ou sem o uso do ADR proposto. Sendo assim, o teste de Dunn foi aplicado e pode ser visto na Tabela 45.

Analizando a Tabela 45, quanto ao caso N.E., existe uma diferença significante, ainda que pequena, em relação ao tempo de associação e o volume ocupado. Já para as estratégias propostas, todas apresentaram uma diferença significante, apresentando

um melhor desempenho no processo de associação para o caso com o ADR proposto ativo. O destaque maior vai para a grande redução do volume ocupado da rede para todas as estratégias avaliadas.

Tabela 45: Teste de Dunn para o ADR proposto no cenário E (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

Estratégia	ID Teste		Nº de transmissões		Tempo de <i>Join</i>		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
N.E.	9	1	1,85	6,49E-02	2,97	<b>2,96E-03</b>	6,68	<b>2,45E-11</b>
Expo.	9	1	9,41	<b>4,75E-21</b>	11,80	<b>6,58E-32</b>	14,50	<b>9,29E-48</b>
Linear	9	1	8,55	<b>1,26E-17</b>	14,50	<b>1,25E-47</b>	14,40	<b>1,00E-46</b>
Const.	9	1	7,98	<b>1,44E-15</b>	12,20	<b>3,40E-34</b>	12,40	<b>3,29E-35</b>

## 5.6 Cenário F

O cenário F, segundo a Tabela 9 é referente a análise para validação da proposta de margem aleatória adaptativa, visto com detalhes na Seção 4.1.2.6. Para tal, o teste 10 será apresentado, utilizando o ARM proposto na Seção 3.3.

### 5.6.1 Análise descritiva

#### 5.6.1.1 Teste 10

O teste 10, realizado com um canal BW 125KHz, gateway 1, 20 dispositivos e com o uso do ARM proposto, tem seus resultados apresentados por meio do gráfico *pirateplot*, visto na Figura 60 e comentado mais a diante. As relações entre as médias com desvio padrão e medianas entre as estratégias pode ser vista na Tabela 46.

Analisando a Figura 60 e a Tabela 46 é perceptível a melhoria de desempenho em relação ao número de transmissões e volume utilizado com o uso das estratégias em relação ao caso N.E. Sendo a estratégia exponencial a que apresentou menor número de transmissões, menor volume e também o menor tempo de associação à rede. Os valores de RSSI e SNR permanecerem semelhantes para todos os casos.

Como o respectivo teste utiliza apenas um único canal fixo, não é relevante a análise dos canais através do histograma de seleção de canais.

Figura 60: Comparativo do teste 10 do cenário F quanto ao (a) número de transmissões de join request e volume de uso da rede, (b) tempo de junção à rede.

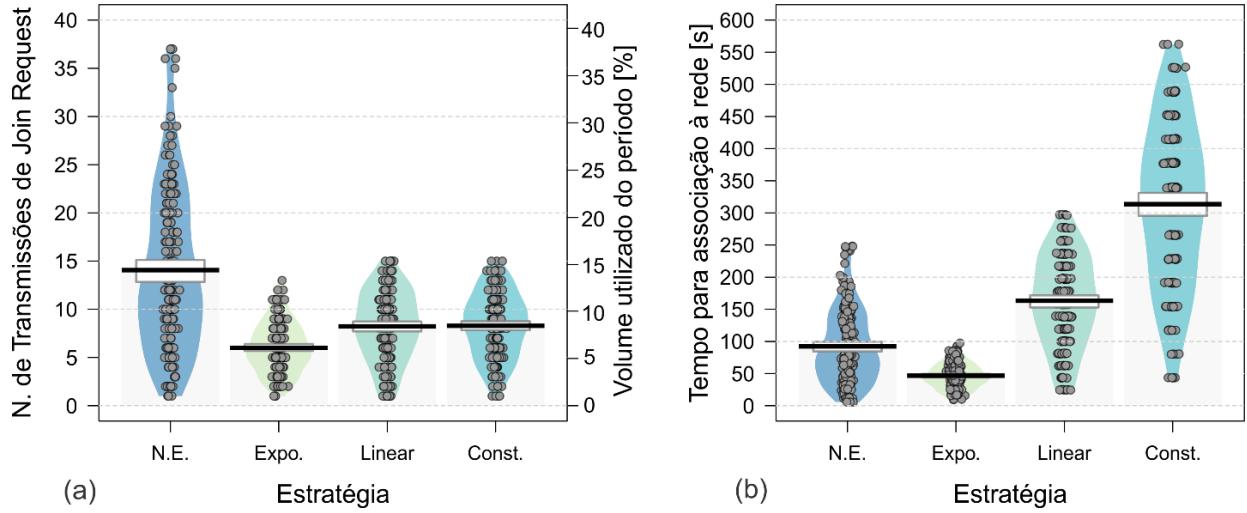


Tabela 46: Valores de média, mediana e desvio padrão do teste 10 do cenário F.

Variável	Estratégia			
	Expo.	Linear	Const.	N.E.
Nº de Transmissões	$6,01 \pm 2,55$ 6,00	$8,23 \pm 3,59$ 8,00	$8,29 \pm 3,36$ 8,00	$14,07 \pm 8,42$ 12,00
Tempo de associação	$46,68 \pm 19,07$ 45,62	$163,31 \pm 69,76$ 158,63	$313,66 \pm 124,98$ 303,24	$92,26 \pm 56,62$ 80,41
Volume	$6,19 \pm 2,63$ 6,18	$8,48 \pm 3,7$ 8,24	$8,54 \pm 3,47$ 8,24	$14,5 \pm 8,68$ 12,37
RSSI	$-54,96 \pm 7,08$ -55,00	$-54,76 \pm 6,84$ -55,00	$-54,69 \pm 6,63$ -55,00	$-55,03 \pm 6,62$ -55,00
SNR	$6,09 \pm 1,36$ 6,00	$6,34 \pm 0,9$ 7,00	$6,34 \pm 0,84$ 7,00	$6,23 \pm 0,95$ 6,00

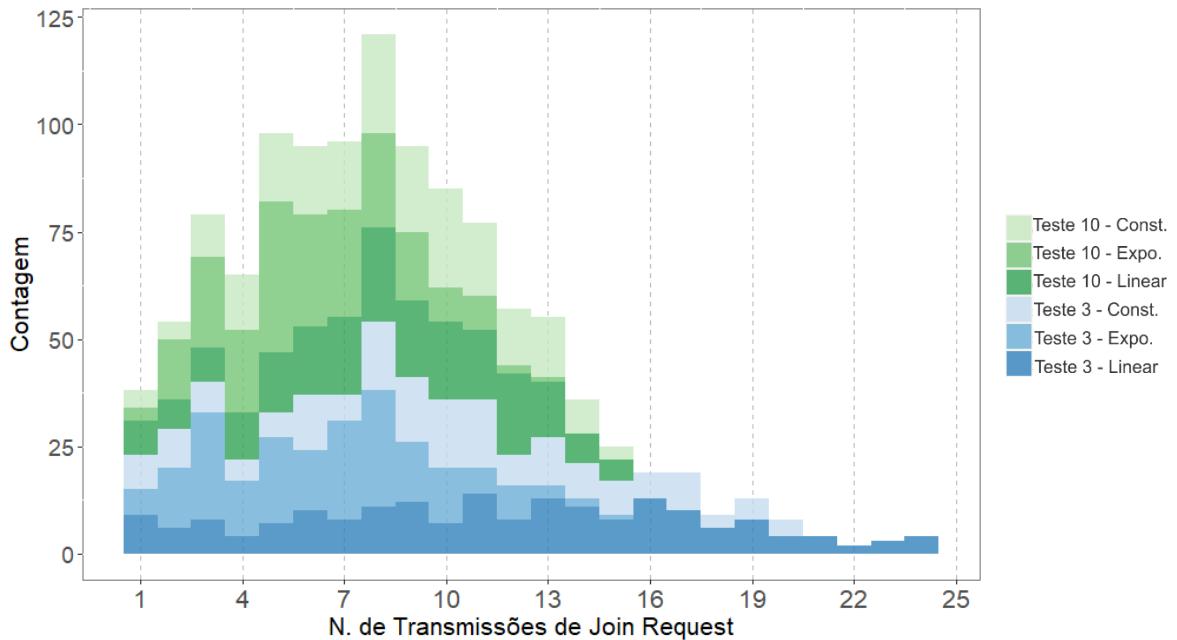
### 5.6.1.2 Comparativo do teste do cenário F

O objetivo aqui é destacar o impacto do uso do ARM proposto em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso o teste 10 utilizou o algoritmo de ARM detalhado na Seção 3.3. Para efeitos comparativos, o teste 3, presente na Seção 5.1.1.3, possuindo os mesmos parâmetros de número de dispositivos, número e largura de banda do único canal e mesmo gateway. Ficou a única diferença a cargo da utilização ou não

do ARM proposto. Também vale ressaltar que para a referente comparação o caso N.E. não será utilizado pois a margem aleatória não está presente nele.

Portanto será realizada uma comparação direta entre o teste 10 do cenário F e o teste 3 do cenário A, relacionando dois fatores: o impacto do ARM proposto e a estratégia de ciclo útil utilizada. Serão apresentados histogramas referentes ao número de transmissões, Figura 61, tempo de associação à rede, Figura 62 e volume de uso da rede, Figura 63, com tamanhos de classe igual a 1, 40 e 2, respectivamente.

Figura 61: Comparativo entre o teste 3 e 10 para o cenário F referente ao número de transmissões.



Analizando os três histogramas apresentados é possível inferir, para todas as variáveis, que o teste 10 (com o ARM) aparentemente teve desempenho melhor se comparado ao teste 3 (sem o ARM).

Também é possível perceber que a distribuição do número de transmissões e do volume ocupado é bastante semelhante, devido ao uso do DR2 fixo para o canal. Na Figura 62 é possível perceber que para o teste 10 o tempo máximo para associação foi da ordem de 560 segundos, ou 9,33 minutos. Já para o teste 3, esse tempo máximo foi da ordem de 760 segundos, ou 12,66 minutos. Podendo estimar assim, a grosso modo, que o uso do ARM proposto reduziu em 26% o tempo de associação à rede. Também é

possível perceber que a estratégia constante foi a que teve maior latência para associação à rede nos dois testes comparados.

Segundo a Figura 63, para o teste com o ARM o máximo volume ocupado foi de 16%, enquanto que para o teste sem o ARM esse valor chegou a 24%.

Figura 62: Comparativo entre o teste 3 e 10 para o cenário F referente ao tempo de associação.

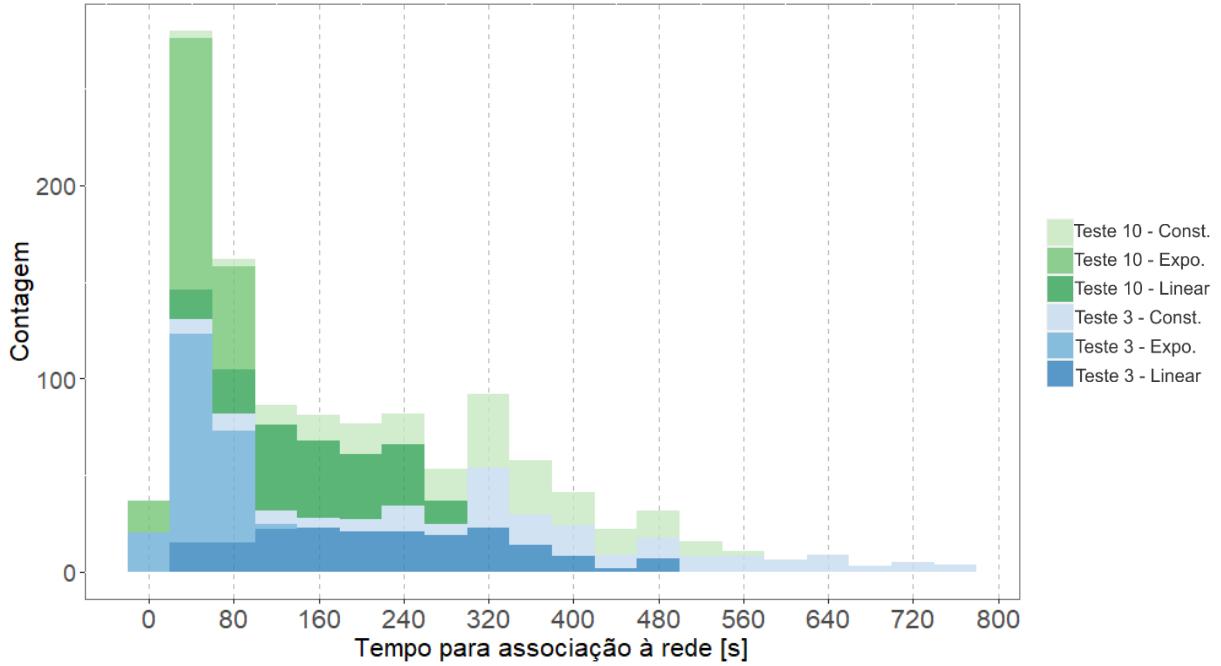
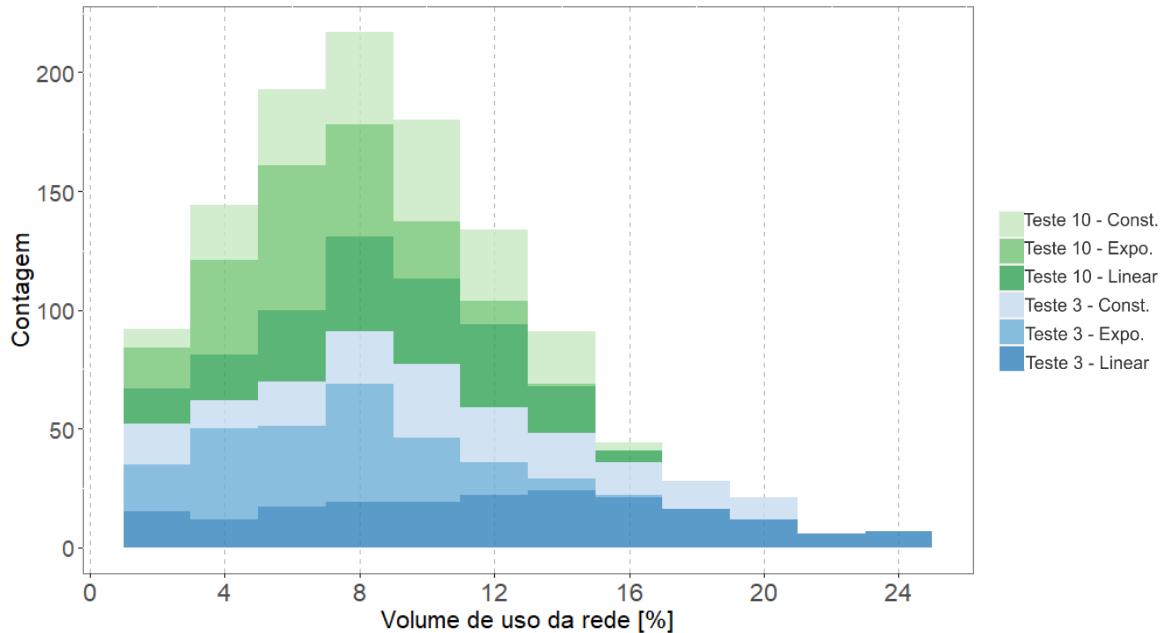


Figura 63: Comparativo entre o teste 3 e 10 para o cenário F referente ao volume de uso da rede.



## 5.6.2 Análise não paramétrica

### 5.6.2.1 Estratégias de ciclo útil

O objetivo dessa primeira análise é ranquear as melhores estratégias de uso para o ciclo útil de acordo com os resultados com o uso do ARM proposto. Com base nos dados dos resultados apresentados na seção anterior, o teste de Kruskal-Wallis foi montado e apresentado na Tabela 47.

Tabela 47: Teste de Kruskal-Wallis entre todas as estratégias de ciclo útil para o cenário F.

ID Teste	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
10	< 2,20E-16	< 2,20E-16	< 2,20E-16

Baseando-se na aplicação do teste visto na Tabela 47, fica evidente que a hipótese nula foi rejeitada para o teste 10 em relação a todas as variáveis analisadas. Portanto, o teste de Dunn pode ser utilizado e será apresentado na Tabela 48.

Tabela 48: Teste de Dunn entre as estratégias de ciclo útil para o cenário F (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

ID Teste	Estratégia		Nº de transmissões		Tempo de Join		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
10	Const.	Expo.	-6,06	<b>1,40E-09</b>	-21,10	<b>4,05E-99</b>	-6,06	<b>1,40E-09</b>
	Const.	Linear	-0,14	8,90E-01	-7,60	<b>3,04E-14</b>	-0,14	8,90E-01
	Expo.	Linear	5,92	<b>3,27E-09</b>	13,50	<b>9,70E-42</b>	5,92	<b>3,27E-09</b>

Com base na Tabela 48 é possível ranquear para o teste 10, qual seria a melhor estratégia de ciclo útil, baseando no número de transmissões e volume ou com base no tempo de associação segundo o uso ou não uso do ARM proposto. Analisando os z-valores e p-valores a classificação pode ser construída e vista na Tabela 49.

Através da Tabela 49 é possível perceber que, a estratégia exponencial apresentou o melhor resultado, tanto em relação ao número de transmissões e volume quanto ao tempo da associação. As outras estratégias linear e constante vem em seguida na classificação.

Tabela 49: Classificação das estratégias de ciclo útil para o cenário F.

Teste	Classificação	Estratégia ciclo útil	
		Número de Transmissões/ Volume ocupado	Tempo de associação à rede
10	1º	<b>Exponencial</b>	<b>Exponencial</b>
	2º	Linear / Constante	Linear
	3º	-	Constante

### 5.6.2.2 ARM proposto

Assim como na Seção 5.6.1.2, o objetivo aqui é destacar o impacto no uso do ARM proposto em relação ao desempenho de associação à rede. Para isso, também será utilizado, além do teste 10 desse cenário, o teste 3 do cenário A. Com base nos dados dos resultados dos respectivos testes, a aplicação do teste de Kruskal-Wallis pode ser vista na Tabela 50. Esse teste reflete a diferença dos resultados entre o uso do ARM (teste 10) e a não utilização do ARM (teste 3).

Tabela 50: Teste de Kruskal-Wallis para o ARM proposto no cenário F.

Estratégia	p-valor para o nº de transmissões	p-valor para o tempo de join	p-valor para o volume utilizado
Expo.	0,19	0,60	0,19
Linear	1,14E-08	1,12E-07	1,14E-08
Const.	1,85E-03	0,007588	1,85E-03

Através da Tabela 50 fica evidente que para a estratégia exponencial a hipótese nula foi aceita, ou seja, não houve diferença significativa entre o uso ou não do ARM proposto. Já para as outras estratégias, a hipótese nula foi rejeitada e seus respectivos testes de Dunn podem ser vistos na Tabela 51.

Tabela 51: Teste de Dunn para o ARM proposto no cenário F (valor em negrito caso z-valor seja menor que 5%).

Estratégia	ID Teste		Nº de transmissões		Tempo de Join		Volume	
	Grupo 1	Grupo 2	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor	z-valor	p-valor
Expo.			1,31	0,191	0,528	0,528	1,31	0,191
Linear	10	3	5,71	<b>1,14E-08</b>	5,31	<b>1,12E-07</b>	5,71	<b>1,14E-08</b>
Const.			3,11	<b>1,85E-03</b>	2,67	<b>7,59E-03</b>	3,11	<b>1,85E-03</b>

A Tabela 51 permite constatar que, para as duas estratégias (linear e constante), o teste com a margem adaptativa apresentou desempenho superior no processo de associação à rede, quando comparado ao teste sem o uso da margem adaptativa. O destaque vai ainda para a estratégia linear, que apresentou maior ganho em desempenho segundo o p-valor do teste de Dunn.

## 5.7 Discussões

O objetivo primário do presente trabalho consiste em avaliar o impacto no desempenho da rede segundo a estratégia de uso do ciclo útil, sendo três estratégias propostas (exponencial, linear e constante) comparadas a um caso sem nenhuma estratégia aplicada (N.E.).

Primeiramente ficou evidente que, para todos os testes apresentados, as estratégias propostas tiveram desempenho superior, considerando o número de retransmissões e volume ocupado, em relação ao caso N.E. Isso evidencia que, o uso da margem aleatória e a estratégia de tempo de contenção para as transmissões impactam positivamente no desempenho durante a associação à rede. Já o comparativo entre as três estratégias propostas em si é mais diversificado. Considerando apenas o tempo de associação e sem considerar os testes envolvendo o *gateway* 2 (distância muito elevada), a estratégia com melhor desempenho é a exponencial, seguida pela linear e por último a constante, o que se é esperado segundo o equacionamento visto na Seção 3 e evidenciado na Figura 15. Levando em conta o número de transmissões e o volume ocupado, para os testes com 14 EDs (Seção 5.3.1.1), 8 EDs (Seção 5.3.1.2), fase 2 do ciclo útil (Seção 5.4.1.1) e uso do ADR proposto (Seção 5.5.1.1) não existiu diferenças no desempenho entre as três estratégias propostas, ficando todas no mesmo patamar. Já para o teste com o *gateway* 2 (Seção 5.2.1.1) as estratégias linear e constante tiveram desempenho semelhante e superior a estratégia exponencial. Com relação ao teste com a margem aleatória adaptativa (Seção 5.6.1.1) a estratégia exponencial apresentou o melhor desempenho, seguidas da linear e constante. Considerando a máscara de canais, cada qual apresentou melhores estratégias para cada caso. Considerando o teste 2 da

Seção 5.1.1.2 com 8 canais BW 125KHz e 1 canal BW 500KHz a melhor estratégia de uso do ciclo útil foi a constante, seguida das estratégias exponencial e linear empatadas.

Em relação a avaliação dos parâmetros do rádio LoRa e parâmetros do protocolo LoRaWAN, quatro fatores foram analisados: máscara de seleção de canais (Seção 5), distância entre o *gateway* e os dispositivos (Seção 5.2), número de dispositivos na rede(Seção 5.3) e período do ciclo útil (Seção 5.4), sempre em relação ao procedimento de associação à rede via OTAA.

Ficou evidenciado que a máscara de canais utilizada tem enorme influência no desempenho da rede sendo que, para o melhor cenário de 5 metros de distância, a melhor alternativa é se utilizar máscara de 8 canais BW 125KHz e 1 canal BW 500KHz. Também é notório que se todos os dispositivos enviarem mensagens em apenas 1 canal simultaneamente, o impacto na rede aparenta ser elevado, ocasionando em muitas colisões e alta latência na associação. Em redes públicas, onde não há a informação prévia dos canais em que o *gateway* opera, há a necessidade de se utilizar a máscara em todos os 72 canais disponíveis. Foi evidenciado, para esse teste com todos os canais habilitados para o processo de *join*, que a latência da associação de todos os dispositivos também é alta, devido principalmente a probabilidade de sorteio de um canal em que exista um *gateway* operando. Considerando que existem 72 canais disponíveis no padrão AU915 e que o *gateway* utilizado opera apenas em 9 canais configurados previamente, a chance de o dispositivo sortear um canal válido para o *gateway* é de apenas 12,5%.

Também é evidente que para o teste de distância, quanto maior for a distância entre os dispositivos e o *gateway* pior será o desempenho de associação da rede. Vale salientar que os testes consideraram duas distâncias extremas, uma muito próxima (5 metros) e outra distante (4400 metros), que segundo (LIANDO et al., 2019), apresentaria um PDR próximo a 0% em um ambiente urbano a 4400m, resultando em uma taxa de erro muito elevada, ocasionada por problemas de reflexão e possíveis interferências.

Com relação ao número de dispositivos na rede, ficou claro que quanto maior for o número de dispositivos tentando se associar a rede, de forma síncrona, pior será o desempenho da rede, resultando em um maior volume de colisões e maiores latências no processo de associação. Apesar do resultado, ficou evidente que o número de

dispositivos utilizados no teste ainda é pequeno. Segundo (LAVRIC; POPA, 2018), seriam necessários centenas de dispositivos na rede com um único *gateway* para se chegar próximo a capacidade máxima da rede.

Os testes de redução do ciclo útil mostraram que dilatar as transmissão em espaços maiores de tempo e aumentar a faixa de valores para o sorteio da margem aleatória, contribuíram consideravelmente para a redução no número de colisões. Embasado nesse resultado, a proposta de ARM tem grande valia e muito potencial, mesmo quando os resultados apresentados na Seção 5.6 não representaram tanto essa melhoria de desempenho. Seria necessário para validação dessa proposta uma rede com maior número de dispositivos, resultando em um maior volume de colisões. De toda forma, o único impacto negativo no uso da estratégia de ARM proposta seria no aumento da latência para o dispositivo se associar à rede, o que para um baixo número de retransmissões de *join request*, teria pouco impacto, pois o crescimento dos limites é realizado de forma linear. Já em um cenário com muitas retransmissões, a latência do processo já está alta e, portanto, esse possível aumento da margem aleatória não representaria grandes impactos no tempo total de associação.

O algoritmo de ADR proposto no processo de associação apresentou, de acordo com a estatística descritiva e os testes não paramétricos, melhoria no desempenho da associação da rede. Isso se deve ao fato do uso de menores SFs, resultando em menores valores de ToA dos quadros. Tudo isso impacta na redução no número de colisões, redução no volume ocupado e consequente diminuição da latência de associação. Vale ressaltar que os testes foram realizados em um ambiente interno, sem obstáculos e a 5 metros de distância do *gateway*. Por meio de (LIANDO et al., 2019), para um ambiente urbano (nLoS), os fatores de espalhamento SF7, SF8 e SF9 alcançariam uma distância máxima de 3 Km, porém com o PDR bem próximo a zero. Devido a esse fato o uso dessa estratégia em ambientes urbanos e com uma distância consideravelmente grande entre o *gateway* e os dispositivos não deve contribuir positivamente para o desempenho da rede. Contudo, como o algoritmo apenas utiliza SFs menores para os 3 primeiros quadros, conforme visto na Seção 3.2, o impacto negativo para esse cenário seria baixo, visto que a partir da 4<sup>a</sup> transmissão já seria utilizado o SF10 (DR2) por padrão.

## 6 CONCLUSÃO

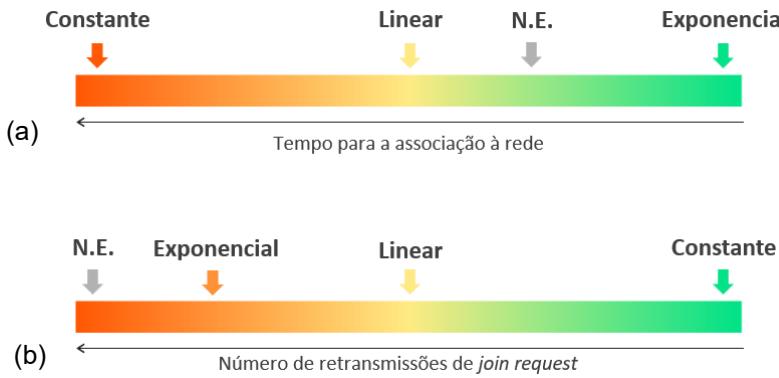
Foram apresentadas as principais características de uma rede LoRaWAN e seus desafios para redução do número de colisões na rede e melhoria de desempenho. O ciclo útil de uso da rede é definido pela especificação LoRaWAN (ALLIANCE, 2018b), todavia, não é detalhado qual a forma de utilização do tempo para as transmissões de quadros, sendo assim, foi proposto neste trabalho as estratégias exponencial, linear e constante.

Com base na Seção 2.5 e na ampla pesquisa literária realizada acerca do assunto, nenhum estudo foi identificado, englobando testes reais na rede, acerca do procedimento de associação à rede via OTAA, tornando assim este estudo pioneiro na área.

Conclui-se, através da análise descritiva e dos testes não paramétricos, que o uso das estratégias exponencial, linear e constante aqui propostas geraram uma melhoria geral do desempenho do processo de junção à rede via OTAA se comparado ao uso sem nenhuma estratégia. Também é possível concluir que as outras duas propostas (taxa de dados adaptativa no processo de associação e da margem aleatória adaptativa no ciclo útil), também apresentaram melhoria no desempenho da rede durante a associação.

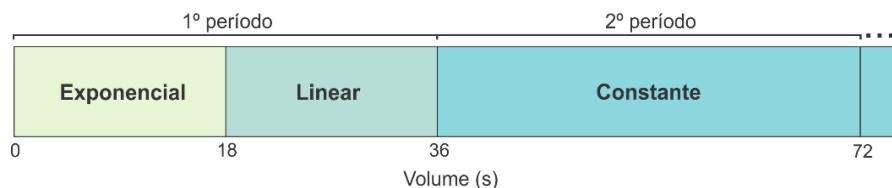
Através dos resultados é possível inferir os casos de uso para cada estratégia de ciclo útil. No cenário onde se tem a necessidade de uma rápida associação à rede por todos os dispositivos, sem se preocupar com a energia consumida e número de colisões, a melhor estratégia, para a maioria dos cenários, seria o uso do ciclo útil com decaimento exponencial. Tendo em vista o requisito de baixo número de colisões somente, sem se preocupar com o tempo para os dispositivos se associarem, a estratégia mais recomendada, para a maioria dos casos, é a de uso constante da rede. Por fim a estratégia com decaimento linear apresenta um bom custo/benefício entre número de colisões e tempo de associação, podendo ser ideal para vários outros cenários. Com o intuito de resumir essas informações descritas, a Figura 64 foi construída, mostrando uma comparação entre todas as estratégias testadas em relação ao tempo de associação à rede e ao número de transmissões de *join requests*.

Figura 64: Comparação indireta entre as estratégias de ciclo útil, com relação à: (a) tempo de associação à rede e (b) número de transmissões.



Com base nessas análises e com a ideia de se criar um modelo mais genérico, que se encaixe bem em cenários diversos, um modelo híbrido pode ser proposto, envolvendo o uso das três estratégias no mesmo dispositivo. A Figura 65 traz essa proposta onde, para a fase 1 do ciclo útil (primeira hora de funcionamento), a estratégia inicial é a exponencial, devido a sua alta tendência de rápida associação. Se a rede for densa e existem muitas colisões, a estratégia linear é empregada após a utilização da metade do volume do período (18 segundos). Todavia, se após a primeira hora de uso, o ED ainda não conseguir se associar à rede, a estratégia constante é adotada, garantindo assim, um possível baixo número de colisões. Fazendo com que aumente sua chance de sucesso na associação. Do 3º período em diante, a estratégia constante continuaria a ser utilizada até que o ED obtenha sucesso na associação à rede.

Figura 65: Proposta híbrida das três estratégias para uso do ciclo útil no processo de associação à rede.



Comparando os resultados obtidos com estudos realizados através de simulações, como (LAVRIC; POPA, 2018) é possível perceber que para os testes realizados, englobando no máximo 20 dispositivos, a densidade da rede ainda é baixa se comparada com a capacidade máxima, ou seja, para um teste que realce ainda mais o efeito das estratégias propostas neste trabalho no processo de associação à rede seria interessante um maior número de dispositivos, da ordem de centenas.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando os parâmetros de infraestrutura dos testes realizados, seria de grande valia a utilização de mais dispositivos assim como a validação de testes com o espalhamento dos mesmos ao longo da região de alcance da rede. Também seria interessante mais testes com diferentes distâncias entre o *gateway* e os EDs, assim como a utilização de múltiplos *gateways*, com o intuito de aumentar a eficiência da mesma e mitigar os efeitos do ciclo útil no volume de mensagens de *downlink*. Também seria interessante outro teste prático, porém com dispositivos móveis.

Outra vertente com amplo potencial seria a criação de um modelo de nó LoRa para simulações em computador das estratégias propostas, a fim de se obter resultados, através de simulação, para redes muito densas, com centenas e milhares de dispositivos conectados.

Outras propostas seriam a validação, com teste reais, da proposta híbrida das três estratégias para uso do ciclo útil em cenários diversos, assim como seu real impacto no processo de associação. Também seria de grande valia a implantação do ciclo útil e suas estratégias também para mensagens de dados confirmadas do protocolo LoRaWAN.

## REFERÊNCIAS

ADELANTADO, Ferran; VILAJOSANA, Xavier; TUSET-PEIRO, Pere; MARTINEZ, Borja; MELIA-SEGUI, Joan; WATTEYNNE, Thomas. **Understanding the Limits of LoRaWAN**. IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9, p. 34–40, 2017. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>.

ALLIANCE, LoRa. **LoRaWAN 1.0.4 specification**. San Ramon, 2021a. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-104-specification-package/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/). Acesso em 16 de março de 2021.

ALLIANCE, LoRa. **About the LoRaWAN® Specification**. 2021b. Disponível em: <https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers/>. Acesso em 10 de fevereiro de 2021.

ALLIANCE, LoRa; WBA. **WiFi & LoRaWAN® Deployment Synergies: Expanding addressable use cases for the Internet of Things**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/wi-fi-and-lorawanr-deployment-synergies.pdf>. Acesso em 22 de agosto de 2020.

ALLIANCE, LoRa. **LoRaWAN® 1.0.3 Regional Parameters**. Beaverton, 2018a. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-regional-parameters-v1-0-3reva/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-regional-parameters-v1-0-3reva/). Acesso em 07 de abril de 2020.

ALLIANCE, LoRa. **LoRaWAN 1.0.3 specification**. San Ramon, 2018b. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-specification-v1-0-3/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-3/). Acesso em 07 de abril de 2020.

ALLIANCE, LoRa. **LoRaWAN 1.1 specification**. Beaverton, 2017. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-specification-v1-1/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/). Acesso em 10 de abril de 2020.

ALMEIDA, Rodrigo; OLIVEIRA, Rúbens; SOUZA, Daniela LUÍS, Miguel; SENNA, Carlos; SARGENTO, Susana. **A Multi-Technology Opportunistic Platform for Environmental Data Gathering on Smart Cities**. In Proceedings of the 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Singapore, pp. 1–7, 2017. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269110>.

ALMEIDA, Rodrigo; OLIVEIRA, Rui; LUÍS, Miguel; SENNA, Carlos; SARGENTO, Susana. **A multi-technology communication platform for urban mobile sensing.** Sensors (Switzerland), vol. 18, no. 4, p. 1–27, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18041184>.

ANATEL. **PLANO DE ATRIBUIÇÃO, DESTINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL**, [S. I.: s. n.], 2017.

AUGUSTIN, Aloïs; YI, Jiazi; CLAUSEN, Thomas; TOWNSLEY, William Mark. **A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things.** Sensors (Switzerland), vol. 16, no. 9, p. 1–18, 2016. <https://doi.org/10.3390/s16091466>.

BENKAHLA, Norhane; BELGACEM, Boutheyna; FRIKHA, Mounir. **Security analysis in Enhanced LoRaWAN duty cycle.** Comnet 2018 - 7th International Conference on Communications and Networking, p. 1–7, 2019. <https://doi.org/10.1109/COMNET.2018.8622296>.

CENTENARO, Marco; VANGELISTA, Lorenzo. **Boosting Network Capacity in LoRaWAN Through Time-Power Multiplexing.** IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, vol. 2018-September, p. 1–6, 2018. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580832>.

CHAUDHARI, Bharat S; ZENNARO, Marco. **LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications.** [S. I.]: Academic Press, 2020.

CLARKE, Steve. **LoRa – When nothing else will do.** 2021. Disponível em: <https://wyldnetworks.com/lora/>. Acesso em 02 de março de 2021.

DENG, Tian; ZHU, Jiang; NIE, Zhiqiang. **An Improved LoRaWAN protocol based on adaptive duty cycle.** Proceedings of 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2017, p. 1122–1125, 2017. <https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122529>.

DENIS, Tom St; JOHNSON, Simon. **Cryptography for Developers.** Syngress, Rockland, 2006

GU, Fei; NIU, Jianwei; JIANG, Landu; LIU, Xue; ATIQUZZAMAN, Mohammed. **Survey of the low power wide area network technologies**. Journal of Network and Computer Applications, vol. 149, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102459>.

HAUSER, Vojtech; HEGR, Tomas. **Proposal of adaptive data rate algorithm for LoRaWAN-based infrastructure**. Proceedings - 2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud, p. 85–90, 2017. <https://doi.org/10.1109/FiCloud.2017.47>.

HAXHIBEQIRI, Jetmir; DE POORTER, Eli; MOERMAN, Ingrid; HOEBEKE, Jeroen. **A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application**. Sensors (Switzerland), vol. 18, no. 11, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18113995>.

KERLINK. **Datasheet Wirnet Station 915**. [S.l.:s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.kerlink.com/product/wirnet-station/>. Acesso em: 10 de novembro de 2020.

LAVRIC, Alexandru; POPA, Valentin. **Performance Evaluation of LoRaWAN Communication Scalability in Large-Scale Wireless Sensor Networks**. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6730719>.

LIANDO, Jansen C.; GAMAGE, Amalinda; TENGOURTIUS, Agustinus W.; LI, Mo. **Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study**. ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 15, no. 2, 2019. <https://doi.org/10.1145/3293534>.

MARAIS, Jaco Morné; MALEKIAN, Reza; ABU-MAHFOUZ, Adnan M. **Evaluating the LoRaWAN Protocol Using a Permanent Outdoor Testbed**. IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 12, p. 4726–4733, 2019. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2900735>.

MCCLELLAND, Calum. **IoT Connectivity - Comparing NB-IoT, LTE-M, LoRa, SigFox, and other LPWAN Technologies**. 2020. Disponível em: <https://www.iotforall.com/iot-connectivity-comparison-lora-sigfox-rpma-ipwan-technologies>. Acesso em: 07 de agosto de 2020.

NEUMANN, Pierre; MONTAVONT, Julien; NOEL, Thomas. **Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study.** International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2016. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2016.7763213>.

NICERF. **Datasheet LoRa127X 100mW Tranceiver Module.** [S. l.: s. n.]. 2020. Disponível em <https://www.nicerf.com/products/detail/fcc-915-module-sx1276-lora-module-rf-module-100mw-long-range-wireless-transceiver-module-lora1276-c1-915.html>. Acesso em 01 de dezembro de 2020.

POLONELLI, Tommaso; BRUNELLI, Davide; MARZOCCHI, Achille; BENINI, Luca. **Slotted ALOHA on LoRaWAN-design, analysis, and deployment.** Sensors (Switzerland), vol. 19, no. 4, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19040838>.

PHILLIPS, Nathaniel D. **YaRrr! The Pirate's Guide to R.** [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://bookdown.org/ndphillips/YaRrr/>. Acesso em 05 de janeiro de 2021.

QADIR, Qahhar Muhammad; RASHID, Tarik A.; AL-SALIHI, Nawzad K.; ISMAEL, Birzo; KIST, Alexander A.; ZHANG, Zhongwei. **Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs.** IEEE Access, vol. 6, p. 77454–77473, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883151>.

RAK. **Datasheet RAK2245 Pi HAT WisLink LPWAN Concentrator.** 2020. Disponível em: <https://store.rakwireless.com/products/rak2245-pi-hat>. Acesso em: 17 de outubro de 2020.

SCHMULLER, Joseph. **Análise Estatística com R para leigos.** Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.

SELLER, Olivier Bernand; SORNIN, Nicolas. **Low Power Long Range Transmitter. U.S. Patent 9,252,834.** 2016. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20140219329A1/en>. Acesso em 11 de junho de 2020.

SEMTECH. **LoRa Modulation Basics AN1200.22.** App Note, 2015. Disponível em: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2020.

SEMTECH. **Datasheet SX1301.** [S.I.:s.n.], 2017a. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-gateways/sx1301>. Acesso em 03 de outubro de 2020.

SEMTECH. **Real-world LoRaWAN™ Network Capacity for Electrical Metering Applications.** [S.I.:s.n.], 2017b. Disponível em: [https://info.semtech.com/network\\_capacity\\_white\\_paper\\_download](https://info.semtech.com/network_capacity_white_paper_download). Acesso em 03 de outubro de 2020.

SEMTECH. **Datasheet SX1257.** [S.I.:s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-gateways/sx1257>. Acesso em 03 de outubro de 2020.

SEMTECH. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview.** Semtech Technique Paper, [S.I.:s.n.], 2020. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>. Acesso em 28 de maio de 2020.

SHANMUGA, Jothi Prasanna; DU, Wan; ZHAO, Zhiwei. **A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues.** IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 22, no. 1, p. 371–388, 2020. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949598>.

ST. **Datasheet STM32L433xx.** [S.I.:s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l433cc.html>. Acesso em 11 de outubro de 2020.

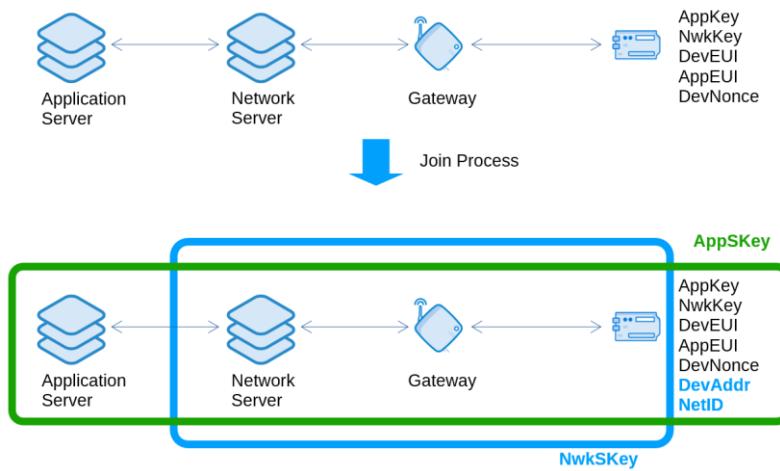
TOUSSAINT, Joel; EL RACKHIDY, Nancy; GUITTON, Alexandre. **Performance analysis of the on-the-air activation in LoRaWAN.** 7th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEEE IEMCON 2016, no. 1, 2016. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2016.7746082>.

## APÊNDICE A – Possibilidade de *Joins* inválidos na rede

No processo de *join* via OTAA duas chaves de criptografia estáticas, ou seja, gravadas no dispositivo, são necessárias, denominadas de chave de rede e de aplicação. A chave de rede é utilizada para assinar a mensagem inicial de *join request* através de um MIC (*Message Integrity Code*). Caso o pedido seja aceito na rede, é devolvida uma mensagem de *join accept*, essa sim com seus dados criptografados e também assinada com a chave de rede. O dispositivo pode então utilizar o conteúdo da mensagem recebida e a sua chave estática de rede e aplicação para, após remover a criptografia e validar a assinatura, gerar novas chaves de rede e aplicação para a sessão corrente Figura 66. Essas últimas chaves são temporárias e vão estar válidas até que o dispositivo reinicie ou os seus contadores de mensagem cheguem no limite.

Na mensagem de *join* é enviado um identificador único do dispositivo e da aplicação a que ele está relacionado, chamados de DevEUI e AppEUI. Uma semente aleatória também é passada, denominada de DevNonce, para impedir que exista uma repetição do conteúdo da mensagem no caso de novas tentativas de junção.

Figura 66: Chaves envolvidas no processo de associação OTAA.



No entanto, não existe nenhuma referência ao dispositivo que fez o pedido de junção na mensagem de *join accept*, sendo uma possível fonte de problemas, com descrito a seguir.

Considere o cenário onde vários dispositivos possuem a mesma chave de rede e que sejam inicializados no mesmo instante de tempo, ou seja, estarão sincronizados após um evento de religamento de energia, por exemplo. Se um ED específico conseguir enviar um quadro de *join request* ao servidor, instantes de tempo depois haverá uma resposta de *join accept*. Como os EDs estão sincronizados, todos estarão com a janela RX aberta e dependendo do canal escolhido no *uplink*, receberão esse pacote. Considerando que a máscara de canais para boa parte dos gateways comerciais usam nove canais (8 de 125KHz e um de 500KHz), é possível que mais de um ED escolha o mesmo canal inicial, ainda mais numa rede densa.

Como a chave de rede é igual para todos, caso o cenário descrito aconteça, eles validarão como correta a mensagem recebida, irão gerar suas chaves de aplicação e rede para a sessão corrente, dando como encerrado o processo de junção via OTAA. No entanto, as chaves geradas nos EDs não serão iguais às chaves do servidor e somente um dispositivo terá de fato criado credenciais válidas de acesso.

Nesse cenário apenas o ED responsável pelo *join accept* inicial conseguirá comunicar na rede e todos os outros EDs terão suas mensagens rejeitadas pela divergência das chaves. Mecanismos adicionais na camada de aplicação do ED são necessários para que ele entenda que será preciso uma nova tentativa de junção, não sendo esse aspecto coberto pela norma. Uma resposta com o DevEUI no campo de dados seria suficiente para resolver essa questão.

Devido à natureza dos testes realizados, esse problema foi verificado na prática. Visando contornar o problema, foi adotado o uso de uma chave de rede exclusiva por ED, baseada em seu *DevEUI*. Dessa forma, no cenário de conflito supracitado, quando houver uma recepção de um pacote de *join accept* indevido, o MIC não será validado internamente naquele ED, resultando assim em um correto funcionamento da rede e sem falsas associações.

## APÊNDICE B - Estabilidade do relógio e sua influência nos testes

Para a placa do *end device* foi utilizado o relógio interno HSI16 do microcontrolador STM32L433, passando pela PLL (*Phase Locked Loop*) que transforma o relógio de 16MHz em 40MHz. Segundo ST (2018) o oscilador interno HSI16 apresenta uma tolerância de  $\pm 1\%$  para variações entre 0°C e 85°C. Quanto que para a PLL, existem valores RMS do *jitter* em relação ao período e do *jitter* entre os ciclos. Assumindo um comportamento linear, para a frequência de 40MHz tem-se aproximadamente  $\pm 20$  pico segundos para o *jitter* ciclo a ciclo e  $\pm 15$  pico segundos para o *jitter* do período. Combinando os dois efeitos existiria um desvio de  $\pm 35$  pico segundos no relógio. Levando em consideração o *jitter* da PLL e assumindo uma tolerância do HSI16 de 0,3%, valor próximo do erro indicado para a temperatura ambiente de 25°C, o erro do relógio ao longo de 60 segundos pode ser calculado como demonstrado a seguir.

$$HSI16_{OUT} = [16 \cdot 10^6 * 0,997 \sim 16 \cdot 10^6 * 1,003] = [15,95 \text{ MHz} \sim 16,05 \text{ MHz}] \quad (65)$$

$$PLL_{OUT\_MIN} = \left[ \frac{1}{\frac{1}{(15,95 \cdot 10^6) * 2,5} + 35 \cdot 10^{12}} \right] = 39,82 \text{ MHz} \quad (66)$$

$$ciclos_{60s} = \frac{60}{\frac{1}{40 \cdot 10^6}} = 24 \cdot 10^8 \text{ ciclos} \quad (67)$$

$$Tempo_{divergencia_{60s}} = 24 \cdot 10^8 * \frac{1}{39,82 \cdot 10^6} = 60,27 \text{ s} \quad (68)$$

Com base nas equações acima, a divergência do relógio do sistema para um período de 60 segundos de execução atingiu um valor de aproximadamente 270ms, ou  $\approx 0,45\%$  de divergência.

Em cinco segundos, que é o tempo da espera para a abertura da primeira janela de recepção, essa divergência geraria 22,5ms de atraso. No entanto, esses valores podem variar com lote de produção, temperatura de operação, calibração ou não do oscilador interno, entre outros, produzindo situações de imprecisão no processo de recepção e impedindo um funcionamento adequado em ampla faixa de temperatura de

operação. Dessa forma, para a temporização das janelas de recepção, foi utilizado o cristal externo do RTC e um timer temporizado por ele, permitindo erros máximos da ordem de 2ms no processo de abertura de janelas, aceitável para a aplicação.

Enquanto o processo de abertura de janelas tenha sido resolvido, as variações de tempo devido ao relógio principal baseado no oscilador interno HSI16 com PLL, geraram um cenário favorável para o convívio de diversos dispositivos, mesmo quando energizados ao mesmo tempo, uma vez que efeito de divergência no relógio interno faz com que os dispositivos não estejam totalmente sincronizados.

Um exemplo claro desse efeito pode ser detectado em um teste onde todos os dispositivos operam no mesmo canal e estão com sua partida sincronizada, ou seja, para esse cenário, teoricamente todas as transmissões de quadros estariam sujeitas a diversas colisões, podendo causar a impossibilidade de recepção desse quadro no *gateway*.