



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ROBERT DE ALMEIDA CABRAL

**UM ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS IOT COM
DIVERSIDADES DE DUPLICAÇÃO DE PACOTES**

QUIXADÁ

2019

ROBERT DE ALMEIDA CABRAL

UM ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS IOT COM
DIVERSIDADES DE DUPLICAÇÃO DE PACOTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Me. Francisco Helder
Candido dos Santos Filho

QUIXADÁ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C121e Cabral, Robert de Almeida.
Um Estudo sobre a eficiência energética em sistemas IoT com diversidades de duplicação de pacotes /
Robert de Almeida Cabral. – 2019.
58 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá,
Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2019.
Orientação: Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.
1. Internet das Coisas. 2. Eficiência Energética. I. Título.

CDD 621.39

ROBERT DE ALMEIDA CABRAL

UM ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS IOT COM
DIVERSIDADES DE DUPLICAÇÃO DE PACOTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovada em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos
Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Joel Ramiro de Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Armando Cavalcante Aguilar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Á Deus,

Aos meus pais, Rosângela e Roberto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças todos os dias.

Agradeço meus pais Rosângela e Roberto por todo apoio, carinho e amor que fez com que eu me tornasse quem sou hoje, muito obrigado. A minha irmã Ana Roberta e meu irmão Roberto Filho que sempre estiveram do meu lado, motivando e me inspirando ser uma pessoa ainda melhor. Ao meu sobrinho Eric, que chegou para encher a casa de brinquedo e o nosso coração de amor e alegria.

Aos meus avós, em especial minha avó Hosana por todo o cuidado que sempre teve comigo. Aos meus tios, em especial meu tio Antônio, que contribuiu muito com meu crescimento.

Aos meus amigos Segundo, Vinícius, Sávio, Beatriz e Andson que me acompanham desde o ensino médio, me apoiando e ajudando sempre que precisei. Meus amigos de graduação Emanuel, Mateus Lima, Mateus Sousa, Iago, Felipe, Wesley e toda a turma que sempre se ajudou no decorrer dos anos.

Ao meu orientador, Professor Helder que me acompanha desde o início do curso, me ajudando e orientando.

Aos professores da Universidade Federal do Ceará, Campus Quixadá, que contribuíram para minha formação, em especial aos professores Joel, Paulo Armando, Cristiano e André, muito obrigado por todo aprendizado repassado.

À Escola Profissional de Quixadá e EEF Antônio Martins de Almeida, além dos professores que contribuíram de alguma forma na minha formação.

À minha namorada Gabriela que sempre esteve ao meu lado, me ajudando, aconselhando e compartilhando momentos maravilhosos. Muito obrigado por todo carinho, suporte e amor.

E a todas as outras pessoas que não foram aqui citadas, mas contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

“Um dia, quando olhares para trás, verás que os dias mais belos foram aqueles em que lutaste.”

(Sigmund Freud)

RESUMO

A quantidade de dispositivos da Internet das Coisas tem crescendo bastante nos últimos anos. Estima-se que até o ano de 2025, 75 bilhões de dispositivos IoT estarão ligados a internet. Como cada vez mais os objetos vem se conectando a Internet, diversos tipos de comunicação podem realizar essa intermediação. Porém muitos deles não estão adaptados para trabalhar com dispositivos que requerem baixo consumo de energia sem perder a conectividade. O presente trabalho visa realizar um estudo comparativo entre as redes Wi-Fi, GPRS e LoRa a fim de descobrir qual melhor rede para determinado tipo de dispositivo. Usando as mesmas redes, foi realizado um estudo de confiabilidade, utilizando diversidades de duplicação de pacotes. Como resultado é possível afirmar que GPRS e Wi-Fi não é um bom tipo de comunicação quando se preza por eficiência energética, enquanto LoRa apresenta resultados melhores. Utilizando mais de um tipo de comunicação por vez, todos os pacotes enviados foram recebidos, ao mesmo tempo que ao utilizar uma comunicação por vez, percas de pacotes foram percebidas.

Palavras-chave: IoT. Eficiência Energética. Duplicação de Pacotes. LoRa. GPRS. Wi-Fi.

ABSTRACT

The number of IoT devices has increased dramatically in recent years. It is estimated by 2025, 75 billion devices IoT connected to the Internet. Objects are increasingly connecting to the Internet, various types of communication can perform this intermediation. However, many of them are not adapted to work with low power devices without losing connectivity. This paper aims to conduct a comparative study between Wi-Fi, GPRS and LoRa networks to find out which option is best for the given device type. Using these networks, a usage study was conducted using various packet duplication diversities. As a result it can be stated that GPRS and Wi-Fi is not a good type of communication when it is energy efficient, while LoRa has better results. Using more than one type of communication at a time, all sent packets were received, while using one communication at a time, packet loss were perceived.

Keywords: IoT. Energy efficiency. Package Duplication. LoRa. GPRS. Wifi.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico de comparação entre <i>ZigBEE</i> , <i>Wireless Fidelity</i> (Wi-Fi) e <i>Bluetooth</i>	21
Figura 2 – Gráfico de consumo energético dos dispositivos	22
Figura 3 – Estrutura <i>Internet of Things</i> (IoT)	24
Figura 4 – Gráfico de projeção de dispositivos IoT	25
Figura 5 – Gartner 2018 Hype Cycle de tecnologias emergentes	26
Figura 6 – Técnicas de eficiência energética em IoT	27
Figura 7 – Comparativo entre as tecnologias IEEE 802.11	29
Figura 8 – Exemplo de dispositivo utilizando o <i>General Packet Radio Services</i> (GPRS)	29
Figura 9 – Exemplo de pecuária inteligente utilizando o protocolo <i>Long Range-Wide Area Network</i> (LoRaWAN)	30
Figura 10 – Exemplo de duplicação de pacotes	31
Figura 11 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos	33
Figura 12 – Placa FRDM-KL25Z e Sensor DHT22	34
Figura 13 – Diagrama de fluxo do <i>software</i>	34
Figura 14 – Circuito de leitura de tensão e corrente	37
Figura 15 – Gráfico de consumo do software genérico	38
Figura 16 – Gráfico de consumo GPRS	39
Figura 17 – Gráfico de consumo <i>Long Range</i> (LoRa [®])	40
Figura 18 – Gráfico de consumo Wi-Fi	41
Figura 19 – Gráfico de consumo GPRS e LoRa [®]	42
Figura 20 – Gráfico de consumo GPRS e Wi-Fi	43
Figura 21 – Gráfico de consumo LoRa [®] e Wi-Fi	44
Figura 22 – Gráfico de consumo energético dos dispositivos	45
Figura 23 – Gráfico de consumo energético dos dispositivos	46
Figura 24 – Circuito base	50
Figura 25 – Circuito da comunicação LoRa [®]	50
Figura 26 – Circuito da comunicação GPRS	51
Figura 27 – Circuito da comunicação Wi-Fi	51
Figura 28 – Gráfico de consumo do software genérico	52
Figura 29 – Gráfico de consumo GPRS	52
Figura 30 – Gráfico de consumo LoRa [®]	53

Figura 31 – Gráfico de consumo Wi-Fi	53
Figura 32 – Gráfico de consumo GPRS e LoRa [®]	54
Figura 33 – Gráfico de consumo GPRS e Wi-Fi	54
Figura 34 – Gráfico de consumo LoRa [®] e Wi-Fi	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre os protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4	20
Quadro 2 – Comparativo entre os trabalhos relacionados e o trabalho proposto.	22
Quadro 3 – Quadro média e mediana <i>software</i> genérico	38
Quadro 4 – Quadro rendimento GPRS	39
Quadro 5 – Quadro rendimento LoRa [®]	40
Quadro 6 – Quadro rendimento Wi-Fi	41
Quadro 7 – Quadro rendimento GPRS e LoRa [®]	42
Quadro 8 – Quadro rendimento GPRS e LoRa [®]	43
Quadro 9 – Quadro rendimento LoRa [®] e Wi-Fi	44

LISTA DE CÓDIGOS-FONTE

Código-fonte 1 – Leitura do sensor DHT22	56
Código-fonte 2 – <i>Software</i> para o envio de dados coletados	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
EC-GSM-IoT	<i>Extended coverage GSM IoT</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
Kbps	<i>Kilobits per second</i>
LoRa®	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range-Wide Area Network</i>
LPWA	<i>Low Power-Wide Area</i>
M2M	<i>Machine to machine</i>
NB-IoT	<i>Narrowband IoT</i>
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	17
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
2	TRABALHOS RELACIONADOS	18
2.1	Uma análise do consumo de energia em redes LPWA	18
2.2	Análise de consumo de energia entre os protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4	19
2.3	Comparação da eficiência energética entre ZigBEE, Wi-Fi e Bluetooth em sistema de estacionamento	20
2.4	Duplicação de pacotes para URLLC na arquitetura de conectividade dupla 5G	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1	Internet das Coisas (IoT)	23
3.1.1	<i>Conceito</i>	23
3.1.2	<i>Estrutura</i>	24
3.1.3	<i>Mercado</i>	25
3.2	Eficiência energética	25
3.2.1	<i>Conceito</i>	26
3.2.2	<i>Eficiência energética em sistemas embarcados</i>	27
3.3	Comunicação	27
3.3.1	<i>Wi-Fi</i>	28
3.3.2	<i>GPRS</i>	28
3.3.3	<i>LoRaWAN</i>	30
3.4	Duplicação de Pacotes	31
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	33
4.1	Software embarcado	33
4.2	Driver de comunicação	35
4.2.1	<i>Módulos</i>	35
4.2.1.1	<i>LoRa®</i>	35

4.2.1.2	<i>Wi-Fi</i>	36
4.2.1.3	<i>GPRS</i>	36
4.3	Validação das comunicações	36
4.4	Coleta de dados	36
4.5	Compilação e análise dos dados	37
5	RESULTADOS	38
5.1	<i>Software</i> genérico	38
5.2	GPRS	39
5.3	LoRa	40
5.4	Wi-Fi	41
5.5	GPRS e LoRa[®]	42
5.6	GPRS e Wi-Fi	43
5.7	LoRa e Wi-Fi	44
6	CONCLUSÃO E DISCUSSÕES	45
	REFERÊNCIAS	48
	APÊNDICE A – Circuitos utilizados no estudo	50
	APÊNDICE B – Gráficos dos experimentos	52
	APÊNDICE C – Códigos-fontes utilizados para o estudo	56

1 INTRODUÇÃO

Os dispositivos da Internet das coisas (do inglês, *Internet of Things* - IoT) vem se tornando cada vez mais comuns no dia-a-dia, em todos os lugares existem sistemas embarcados ligados a Internet fazendo tarefas que muitas vezes passam despercebidos, mas com o aumento de dispositivos vem algumas preocupações, como a eficiência energética desses dispositivos.

A IoT é um conceito na computação em que como diz o nome, conecta as coisas ao redor do mundo inteiro, desde veículos, eletrodomésticos e até mesmo a criação de animais (ATZORI *et al.*, 2010). Este conceito apesar de ficar famoso na ultima década, já é um conceito que vem sendo usado desde a década de 90 e utiliza sistemas embarcados para que possa manipular seus sensores e atuadores (GUBBI *et al.*, 2013). Os dispositivos ligados a IoT apresentam um grande potencial de crescimento. Desde 2014 a IoT aparece no *Gartner Hype Cycle*¹ mostrando que o mercado ainda deve explorar muito este conceito.

Como cada vez mais os objetos vem se conectando a Internet, diversos tipos de comunicação podem realizar essa intermediação. Porém muitos deles não estão adaptados para trabalhar com dispositivos que requerem baixo consumo de energia sem perder a conectividade. O consumo de energia em dispositivos IoT não causam prejuízos só para fabricantes e usuário, mas também para o meio ambiente gerando cada vez mais lixo eletrônico e liberando CO₂ na atmosfera. Trabalhos existentes no ramo da eficiência energética vem sendo desenvolvidos, porém com foco em protocolos específicos e sem fazer um paralelo com outros tipos de comunicação. Como em Zhao *et al.* (2015), que foca no protocolo 802.11ah (protocolo utilizado no Wi-Fi), ou em Salman *et al.* (2017) que enfatiza a eficiência energética em casas inteligentes.

Existe uma necessidade de estudar e comparar diversos tipos de comunicação em IoT, fazendo comparações entre as determinadas redes existentes e suas características energéticas, trazendo dados comparativos que podem ajudar a comunidade de desenvolvedores e projetistas de *hardware* e *software*, além de dar mais comodidade para o usuário final, para que não seja necessário manutenção de fonte energética por bastante tempo.

Normalmente a comunicação usada em dispositivos IoT é sem fio, usando diferentes tipos de comunicação e faixas de frequência. Se tratando de milhares de sensores, o enorme número de nós conectados a uma estação base causa muitos problemas energéticos. Problemas como este motivaram o estudo sobre a eficiência energética em determinados tipos de comunicação focando em estudar e analisar a eficiência energética de diversos protocolos, como Wi-Fi,

¹ <https://www.gartner.com/>

bluetooth, GPRS e LoRa[®].

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo Geral*

Analisar o consumo de energia em dispositivos IoT e fazer um comparativo entre determinados tipos de comunicação, além de utilizar a duplicação de pacotes afim de aumentar a confiabilidade dos sistemas.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Implementar um software embarcado genérico para os diversos tipos de comunicação;
- Implementar o *driver* de cada tipo de comunicação;
- Coletar os dados de cada tipo de comunicação;
- Analisar os resultados de eficiência do *firmware* embarcado, a eficiência energética de cada teste e a confiabilidade;
- Fazer um comparativo com os dados obtidos na análise dos dados e descrever para cada tipo de comunicação suas virtudes e falhas em sistemas embarcados.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo serão apresentados trabalhos relacionados, mostrando as semelhanças e diferenças com relação a este trabalho, destacando pontos positivos e negativos que viraram a servir como espelho para o trabalho proposto. Considerando em particular os trabalhos de Finnegan e Brown (2018), Varghese *et al.* (2017) e Qadir *et al.* (2018).

2.1 Uma análise do consumo de energia em redes LPWA

No trabalho de Finnegan e Brown (2018), o autor mostra a taxa de consumo de energia em diferentes tipos de comunicações em redes *Low Power-Wide Area* (LPWA), se concentrando no consumo diário do dispositivo transmitindo no máximo 10kB de dados por dia. As seguintes comunicações são usadas para o estudo:

- LoRaWAN
- Sigfox
- *Narrowband IoT* (NB-IoT)
- *Extended coverage GSM IoT* (EC-GSM-IoT)

O trabalho de Finnegan e Brown (2018) mostra que não há uma solução global para melhorar a eficiência energética nos tipos de comunicação, mas depende da disponibilidade e do problema a ser solucionado. O autor usa duas redes (NB-IoT e EC-GSM-IoT) que não tem cobertura no Brasil, sendo depreciadas neste trabalho, porém redes de curto alcance como Wi-Fi, *Bluetooth* e *ZigBee*, que são desconsideradas serão estudadas e comparadas as redes LPWA disponíveis, mostrando comparações entre os diversos tipos de redes disponíveis em IoT.

Para a coleta dos dados, Finnegan e Brown (2018) usa *datasheets* de componentes de cada tipo de comunicação, mostrando assim um ponto fraco no trabalho, pois de acordo com a aplicação que está sendo executada pode-se obter valores distintos de consumo de energia, mostrando que o autor somente se prendeu ao módulo de comunicação de cada tipo de rede, desprezando a placa controladora de um dispositivo IoT.

Assim como Finnegan e Brown (2018), o trabalho deste documento se propõe em analisar a eficiência energética nos diversos tipos de comunicação. Porém, usando uma mesma aplicação em um mesmo microcontrolador para todos os tipos de comunicação, deixando assim os valores mais reais e confiáveis, além de considerar redes de curto alcance.

2.2 Análise de consumo de energia entre os protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4

No trabalho de Varghese *et al.* (2017), é feito uma análise do consumo de energia em dispositivos de curto alcance para aplicações industriais de baixo consumo de energia, focando nos protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4. Diferentemente do trabalho de Finnegan e Brown (2018), Varghese *et al.* (2017) preza por uma maior taxa de dados por segundo, então as redes LPWA passam a não ser uma solução ideal.

O artigo mostra um comparativo entre os protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4, que são protocolos que buscam a menor potência possível, sem perder a velocidade de transmissão, vindo a transmitir até 250 *Kilobits per second* (Kbps) no caso do IEEE 802.15.4 e 54000 Kbps no caso do IEEE 802.11b/g, porém o alcance varia de 10 até 140 metros, que se torna uma diferença muito grande quando comparado a redes LPWA.

O autor usa três estados do dispositivo IoT para realizar as comparações entre os protocolos, que são o modo *sleep*, quando o dispositivo está dormindo, o modo *idle*, quando o dispositivo está ocioso e o modo *transmission*, onde o dispositivo está transmitindo uma mensagem. Para calcular a vida útil da bateria, Varghese *et al.* (2017) considera a capacidade da bateria, a eficiência dela e o vazamento da bateria por mês.

O Quadro 1 mostra os resultados para os protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4 obtidos por (VARGHESE *et al.*, 2017), onde é perceptível a grande diferença de consumo de energia do IEEE 802.11b/g comparado ao IEEE 802.15.4, porém com uma velocidade de transmissão bem maior, é importante ressaltar também o tempo que o dispositivo leva para sair do modo *sleep* e ir para o modo *transmission*, pois em sistemas que devem dar respostas rápidas este é um ponto crucial. Com os valores obtidos, Varghese *et al.* (2017) obteve que ao transmitir muitos pacotes por segundo, mesmo com o consumo maior na transmissão, o protocolo IEEE 802.11b/g é mais eficiente comparado ao IEEE 802.15.4 por conta da velocidade de transmissão de dados, já o IEEE 802.15.4 é bem mais eficiente para o envio de poucos pacotes por segundo.

Como Finnegan e Brown (2018), o trabalho de Varghese *et al.* (2017) é semelhante ao trabalho deste documento, porém Varghese *et al.* (2017) foca somente em comunicações de curto alcance, deixando de lado as redes LPWA, além de não se preocupar com a parte do sistema embarcado que controla a unidade de comunicação.

Quadro 1 – Comparativo entre os protocolos IEEE 802.11b/g e IEEE 802.15.4

Parâmetro	IEEE 802.11b/g	IEEE 802.15.4
Consumo modo <i>sleep</i>	115 μ A	1.6 μ A
Consumo modo <i>idle</i>	690 μ A	28 μ A
Consumo modo <i>transmission</i>	160mA	25mA
Taxa de transferência	54000Kbps	250Kbps
Tempo de despertar	3ms	0.340ms

Fonte: adaptado de Varghese *et al.* (2017).

2.3 Comparação da eficiência energética entre ZigBEE, Wi-Fi e Bluetooth em sistema de estacionamento

Em (QADIR *et al.*, 2018), é apresentado um sistema inteligente de estacionamento em tempo real baseado em IoT usando ZigBEE, que por sua vez utiliza o protocolo IEEE 802.15.4. O sistema proposto funciona como uma rede de sensores, usando uma topologia em malha, conectando cada nó a estação base, que envia mensagens para proprietários de veículos próximos, notificando que existe uma vaga para estacionar.

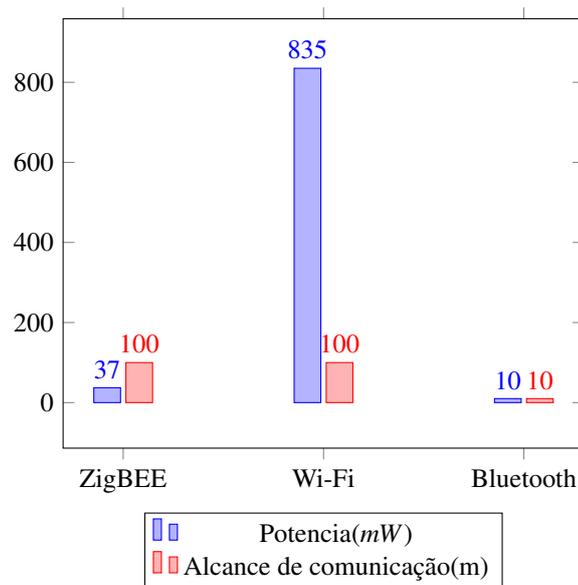
O trabalho de Qadir *et al.* (2018) mostra bastante detalhes sobre o ZigBEE e o sistema embarcado proposto, utilizando um microcontrolador e sensores para a detecção de vagas de estacionamento. Se tratando de um sistema como este, o dispositivo deve ser capaz de transmitir dados a uma distância considerável, por isso o autor sugere o uso do ZigBEE e não de Wi-Fi e *bluetooth*, além do número de dispositivos que podem se conectar a rede de sensores sem fio.

O autor utiliza de simuladores para os testes do sistema proposto e faz comparações utilizando os protocolos de comunicação, ZigBEE, Wi-Fi e *Bluetooth*, a Figura 1 mostra como se comportou o sistema utilizando as diversas comunicações. A coluna em azul mostra a potencia requerida do sistema para cada tipo de comunicação, já a coluna do alcance de comunicação mostra a distancia em que cada nó pode estar do outro.

É possível ver a disparidade do Wi-Fi em comparação com as demais comunicações em relação ao consumo de energia, vindo a ser um problema para a vida útil da bateria, já o *Bluetooth* gasta bem menos que as demais, porém perde no alcance da comunicação, então para cada sistema deve-se ser estudado a melhor forma de fazer a comunicação, como disse Finnegan e Brown (2018), não existe uma solução global para a eficiência energética.

O trabalho de Qadir *et al.* (2018) como os demais, mostra comparativo entre tipos de comunicação, mas foca somente em três tipos de comunicação, sendo bem específico no sistema de estacionamento proposto. O autor se preocupa no sistema embarcado controlador do nó, porém não cita possíveis soluções para melhorar a eficiência energética e nem em quais dispositivos IoT as demais comunicações poderiam se encaixar.

Figura 1 – Gráfico de comparação entre *ZigBEE*, Wi-Fi e *Bluetooth*



Fonte: adaptado de Qadir *et al.* (2018)

2.4 Duplicação de pacotes para URLLC na arquitetura de conectividade dupla 5G

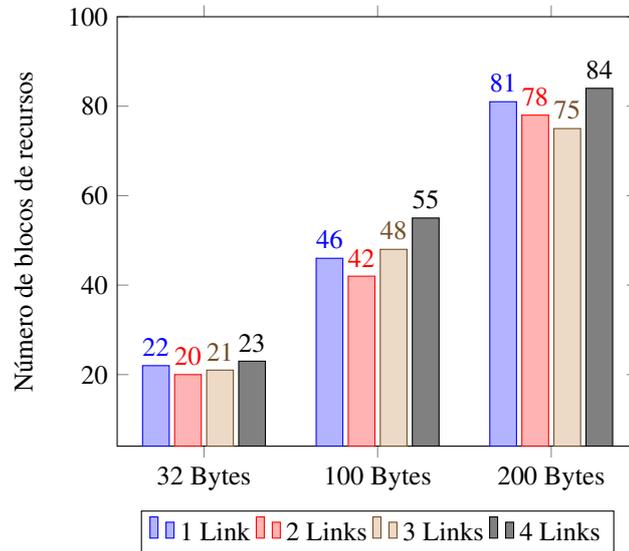
O trabalho de Rao e Vrzić (2018b) apresenta a duplicação de pacotes como uma solução promissora para atender os requisitos das redes 5G. A técnica de duplicação de pacotes foi adotada pelo Projeto de Parceria de 3ª Geração (do inglês, *3rd Generation Partnership Project - 3GPP*).

O autor foca bastante em confiabilidade e latência como problemas, então a confiabilidade de um sistema sem fio pode ser aumentada transmitindo o mesmo pacote por vários meios redundantes, como os tipos de comunicações usados neste estudo, aumentando assim a confiabilidade de cada um deles.

Como de fato é de se esperar, essa duplicação de pacotes afeta diretamente a eficiência energética, o que é citado pelo autor, mas não estudado mais a fundo. Para o problema de latência, o autor cita que os pacotes transmitidos devem ser recebidos dentro do prazo inferior a 1ms.

O gráfico da Figura 2 mostra os experimentos feitos por Rao e Vrzic (2018b), onde é fácil de visualizar que com uma maior quantidade de links, a chance do pacote chegar da forma correta é maior, como foi em todos os casos testados.

Figura 2 – Gráfico de consumo energético dos dispositivos



Fonte: Adaptado de Rao e Vrzic (2018b).

O trabalho de Rao e Vrzic (2018b) diferentemente dos demais, não foca em eficiência energética e nem em sistemas embarcados, porém explora o ramo da duplicação de pacotes, como é utilizado neste trabalho.

O Quadro 2 mostra as semelhanças e diferenças em relação aos trabalhos apresentados e o trabalho proposto.

Quadro 2 – Comparativo entre os trabalhos relacionados e o trabalho proposto.

	FINNEGAN	VARGHESE	QADIR	RAO	Trabalho proposto
Compara redes de longo alcance	Sim	Não	Não	Não	Sim
Compara redes de curto alcance	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Analisa o sistema embarcado	Não	Não	Sim	Não	Sim
Utiliza meios físicos para a coleta de dados	Não	Não	Não	Não	Sim
Mostra qual melhor tipo de comunicação para determinados sistema	Não	Não	Não	Não	Sim
Utiliza duplicação de pacotes para uma maior confiabilidade	Não	Não	Não	Sim	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta e fundamenta os principais conceitos relacionados a este trabalho, trazendo a contribuição de cada conceito para o trabalho proposto.

A Seção 3.1 mostra o conceito de internet das coisas. Na Seção 3.2 é mostrado o conceito de eficiência energética focando em sistemas embarcados. Na Seção 3.3 são apresentados os conceitos de cada tipo de comunicação utilizado neste trabalho.

3.1 Internet das Coisas (IoT)

Nas últimas décadas, a tecnologia vem ganhando cada vez mais espaço no dia-a-dia, com isso surgem novos conceitos com o intuito de facilitar a vida humana cada vez mais. O termo internet das coisas, (do inglês *Internet of Things* - IoT) surgiu em 1999 vinculado ao *Radio-Frequency IDentification* (RFID) na organização de paletes na cadeia de fornecimento de produtos (ASHTON, 2009). Porém, o conceito vem sendo utilizado bem antes disso. Em Weiser (1991), o autor afirma que dispositivos serão conectados de uma forma transparente para o humano, se tornando invisíveis no dia-a-dia, possibilitando a realização de tarefas de forma totalmente automatizada.

3.1.1 Conceito

O conceito de IoT, ainda é algo que possibilita diversas divergências entre autores, Cavalli (2016) define como um conjunto de tecnologias e protocolos associados que permitem que objetos se conectem a internet e sejam identificados e controlados através da rede, já Meira (2017) define o termo "coisas" em internet das coisas como dispositivos que têm, em alguma intensidade, capacidades de computação, comunicação e controle, simultaneamente. E Gubbi *et al.* (2013) define a IoT como:

A interconexão de dispositivos de detecção e de atuação, fornecendo a capacidade de compartilhar informações entre plataformas por meio de uma estrutura unificada, desenvolvendo um quadro operacional comum para permitir aplicativos inovadores. Isso é conseguido por uma detecção onipresente, análise de dados e representação de informações com a computação em nuvem como a estrutura unificadora. (GUBBI *et al.*, 2013, traduzido pelo autor).

Não existindo assim apenas um conceito de IoT, de toda forma, um objeto ligado a internet utilizando sensores pequenos e sistemas embarcados trocando dados sobre o ambiente

instalado e fazendo algum tipo de atuação no meio físico, pode-se dizer que é um dispositivo IoT.

3.1.2 Estrutura

Como o conceito, a estrutura da IoT não é bem definida, porém a Figura 3 retrata uma estrutura bem genérica e mais usada atualmente, onde a parte mais alta são os sensores e atuadores que estão em contato com o ambiente, prontos para coletar dados ou atuar fisicamente de alguma forma.

O dispositivo controlador, muitas vezes um sistema embarcado processa os dados lidos e atua localmente, ou simplesmente recebe os dados e envia para a internet através de um *gateway* para que os mesmos sejam processados e retornados para o controlador para atuar ou não, de acordo com os dados recebidos.

O *gateway* tem o papel de ligar o dispositivo a internet, fazendo uma espécie de intermediação entre dispositivo e rede. Em algumas comunicações, o *gateway* pode não estar presente, muitas vezes o dispositivo embarcado se comunica diretamente com uma estação base, que é capaz de trocar dados, funcionando analogamente a um *gateway*.

E por fim, a rede mundial de computadores conecta os dispositivos, hospeda páginas WEB para o controle destes dispositivos, trazendo assim o controle de algo físico mesmo que a distância para o usuário. A Seção 3.3 se aprofunda nos tipos de comunicações em IoT.

Figura 3 – Estrutura IoT

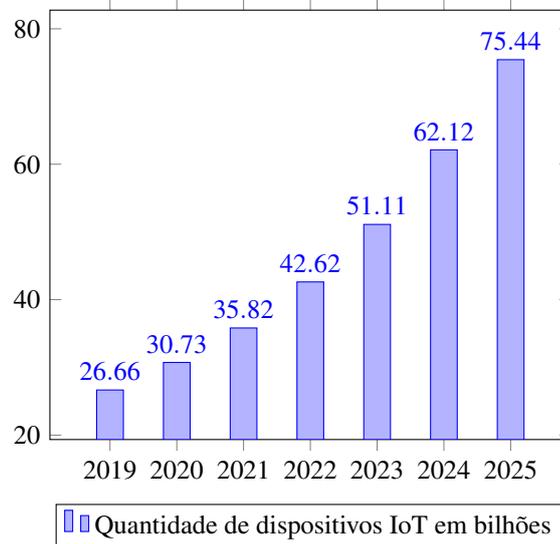


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.3 Mercado

Desde que a IoT surgiu, tarefas simples que fazemos todos os dias vem sendo automatizadas, deixando assim estas tarefas mais simples, como por exemplo ligar o aparelho de ar condicionado mesmo sem estar no cômodo, ou mesmo programando a cafeteira para que o café esteja pronto ao chegar em casa. O gráfico da Figura 4 de Forbes (2016) estima que em 2025, aproximadamente 75 bilhões de dispositivos ligados a IoT estarão conectados a internet, enquanto em 2019, apenas 26.66 bilhões, tendo assim um aumento de aproximadamente 182% em seis anos.

Figura 4 – Gráfico de projeção de dispositivos IoT



Fonte: adaptado de Forbes (2016)

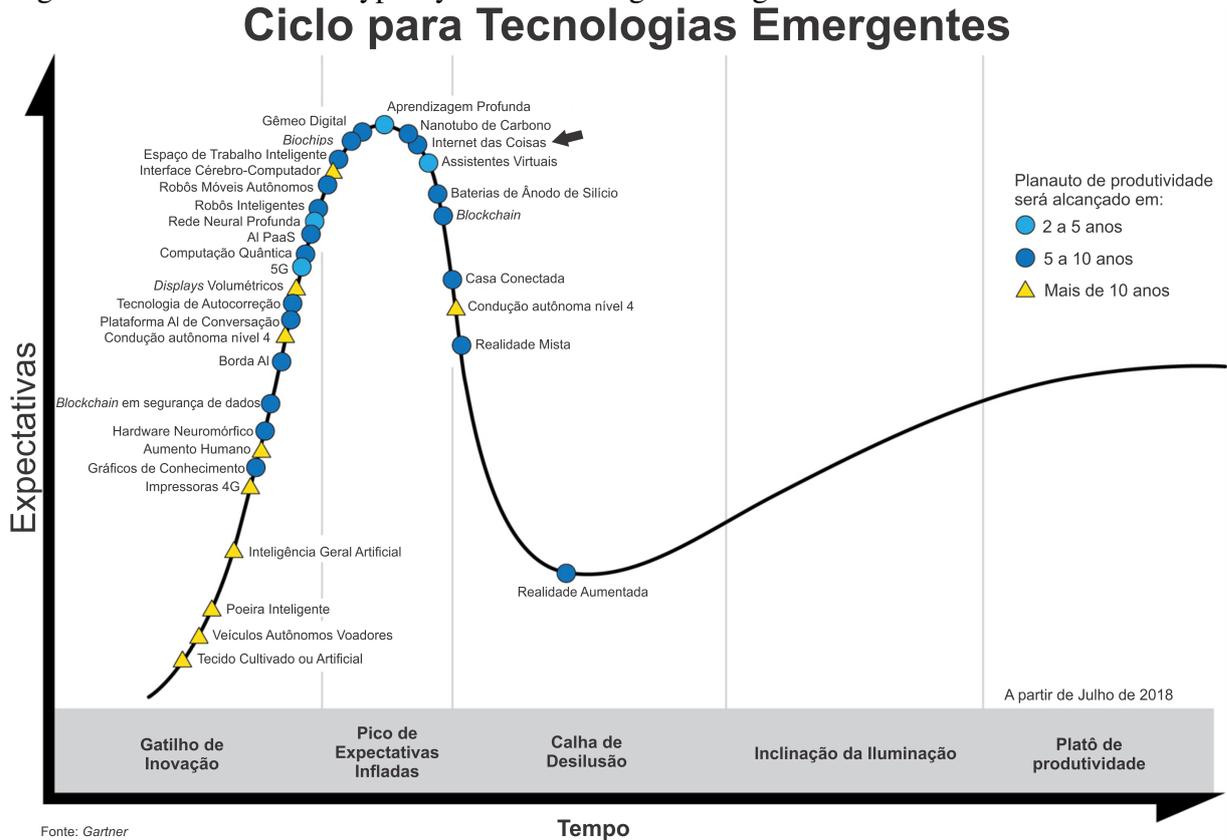
O *Gartner Hype Cycle*¹ é um gráfico que mostra como as tecnologias estão no mercado, mostrando a maturidade delas descritas em cinco fases, a descoberta da inovação, pico das expectativas, declínio das expectativas, adesão da comunidade e a produtividade industrial. A Figura 5 mostra o *Gartner 2018 Hype Cycle*, em que a IoT já está no pico das expectativas, onde o auge da tecnologia esta sendo prevista dentro de cinco a dez anos. Portanto, o mercado da IoT continuará crescendo ao longo dos próximos anos.

3.2 Eficiência energética

A eficiência energética é uma discussão comum em projetos de sistemas embarcados, em geral, sistemas assim passam despercebidos pelos usuários, então os projetistas devem fazer

¹ <https://www.gartner.com/>

Figura 5 – Gartner 2018 Hype Cycle de tecnologias emergentes



o melhor para que este tipo de sistema consuma a menor quantidade de energia possível.

3.2.1 Conceito

Segundo Hordesky (2004), o termo "eficiência" descreve a eficácia dos dispositivos que operam em ciclos ou processos produzirem os resultados esperados. De acordo com Wander *et al.* (2007) a eficiência energética compreende a análise do consumo de energia, com o objetivo da redução de custos e maior economia da mesma, aliadas a novas tecnologias, materiais e equipamentos.

A Eficiência Energética pode ser interpretada como a economia de energia gerada para executar a mesma atividade antes realizada, seja pelo uso de um equipamento mais eficiente (característica técnica), ou mesmo de uma nova tecnologia, ou apenas pelo uso racional da energia (característica comportamental). (MME; EPE, 2007).

O conceito de eficiência energética está bem formulado há alguns anos, conforme descrito pelos autores, a eficiência energética foca em reduzir a quantidade de energia gasta para se fazer alguma coisa de forma a aumentar a eficiência energética.

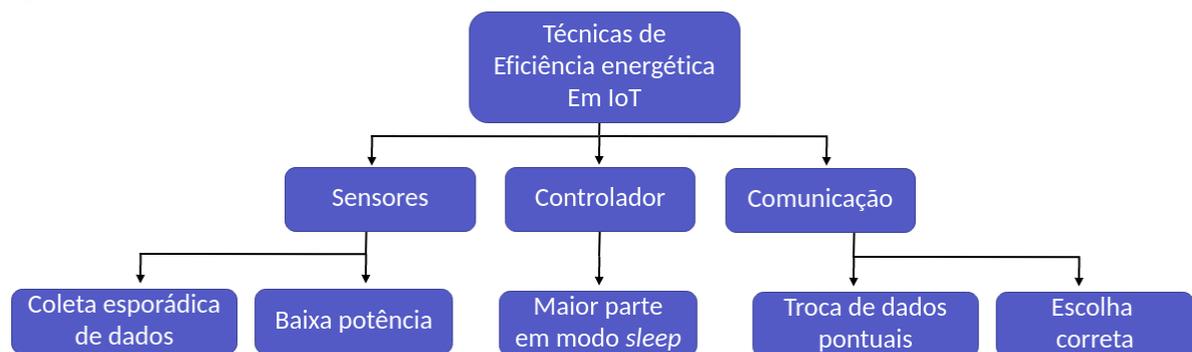
3.2.2 Eficiência energética em sistemas embarcados

Um sistema embarcado eficientemente energético é aquele que consome a menor quantidade de corrente possível, utilizando sensores e comunicações de baixa potência, de uma forma que não perca desempenho nas tarefas desenvolvidas. Se tratando de dispositivos IoT que na sua maior parte utiliza tecnologias sem fios, um estudo de casos com as variáveis que causam problemas energéticos se fazem mais que necessárias para a continuação do desenvolvimento do sistema.

Existem diversos sistemas que trabalham em áreas de riscos, ou até mesmo locais que tornam inviáveis a manutenção eventuais, como sistemas controladores de caldeiras ou até mesmo sistemas instalados no deserto. Sistemas críticos como estes devem durar anos com a mesma bateria e componentes, utilizando uma única carga, ou utilizando energias renováveis para manter a bateria sempre carregada.

Mas não basta recarregar a bateria e rapidamente o sistema consumir tudo da fonte energética, para isso existem algumas técnicas para que o sistema gaste o mínimo de bateria possível. A Figura 6 mostra boas práticas que fazem sistemas utilizar menos bateria. Este trabalho foca nos tipos de comunicação, então a escolha do tipo de comunicação será o roteiro mais imersivo.

Figura 6 – Técnicas de eficiência energética em IoT



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Comunicação

A comunicação em dispositivos IoT é a parte que conecta as "coisas" a rede, ou seja, é um dos pilares da internet das coisas. A comunicação é o principal foco do trabalho proposto, pois além de ser algo extremamente importante para o dispositivo é o ponto em que normalmente

os sistemas IoT perdem em eficiência energética. Abaixo, os seguintes meios de comunicação. Wi-Fi na Seção 3.3.1, GPRS na Seção 3.3.2 e LoRaWAN na Seção 3.3.3.

3.3.1 *Wi-Fi*

O Wi-Fi (do inglês *Wireless Fidelity*) está presente por todos os lados no dia-a-dia, permitindo conexões sem fio e conectando dispositivos a rede. O nome Wi-Fi é uma denominação para a tecnologia IEEE 802.11 que é o nome original desta tecnologia.

Existem diversos padrões 802.11 para redes sem fio, todos eles transmitem dados em uma taxa bem maior que todas as outras comunicações utilizadas para este trabalho. Porém por transmitir dados com muita rapidez a rede Wi-Fi tem um alto consumo de energia que é um serio problema em dispositivos IoT (KUROSE; ROSS, 2013).

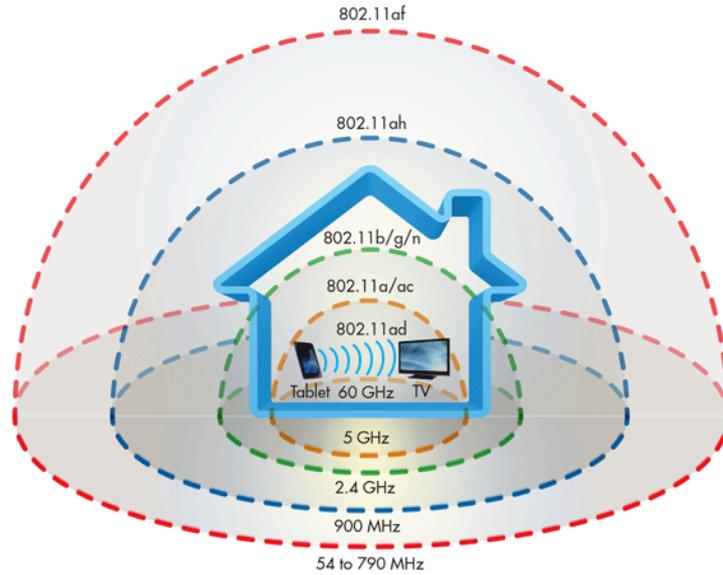
A IoT surgiu com dispositivos muito propensos a utilizar o Wi-Fi, pois é uma rede de fácil acesso e sem fio, mas ao longo dos anos diversos tipos de protocolos foram implementados visando uma maior velocidade de transmissão de dados. Com isso passou a ser inviável a utilização desse tipo de comunicação em IoT, porém em 2017 surgiu a tecnologia IEEE 802.11ah com o objetivo de cobrir uma área suficiente para atender uma residencia como mostra a Figura 7 e utilizando uma menor quantidade de energia utilizando uma frequência de aproximadamente 900MHz (IEEE, 2017).

A Figura 7 mostra um comparativo entre o alcance de comunicação em diversos protocolos IEEE 802.11. Assim como o *bluetooth*, o Wi-Fi é mais apropriado para sistemas em que não necessitam de um longo alcance, pois o alcance varia de 10 a 100 metros. Em IoT existem diversos meios de comunicação e no trabalho será utilizado a comunicação M2M (do inglês *Machine to machine* - M2M).

3.3.2 *GPRS*

O GPRS (do inglês *General Packet Radio Services* - GPRS) é um tipo de comunicação nas redes GSM (do inglês *Global System for Mobile Communications* - GSM). O GPRS é um serviço de celular de dados utilizado nas redes 2G e aperfeiçoado para a tecnologia 3G. Utiliza um canal específico para dados, tornando a comunicação mais veloz. Por ser uma tecnologia que utiliza a telefonia, é um tipo de comunicação que requer um plano de utilização de dados, custando um valor mensal. O GPRS diferentemente de outras tecnologias permite que a empresa de telefonia cobre pela quantidade de dados utilizado, sendo bem aproveitado em IoT.

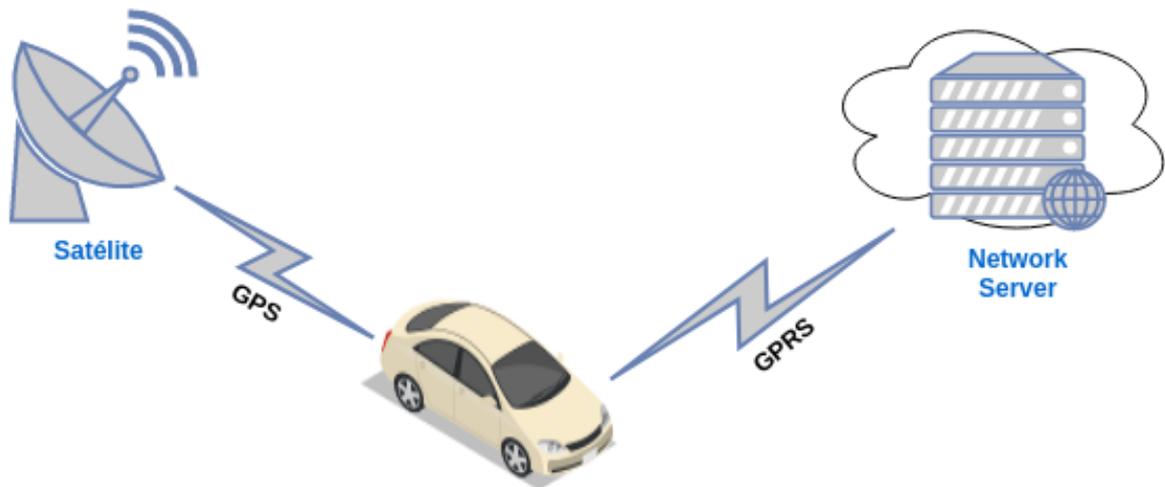
Figura 7 – Comparativo entre as tecnologias IEEE 802.11



Fonte: (GTA/UFRJ, 2015).

A Figura 8 mostra o exemplo onde um carro é monitorado através do *Global Positioning System* (GPS) e se comunica diretamente com a internet através do GPRS (do inglês *General Packet Radio Services* - GPRS).

Figura 8 – Exemplo de dispositivo utilizando o GPRS



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em IoT o GPRS é muito utilizado em dispositivos móveis pela sua capacidade de manter uma conexão mesmo estando em movimento, pois o alcance é limitado ao sinal de telefonia. Com esta flexibilidade, sistemas de rastreamento de veículos são exemplos comuns no cotidiano como ilustra a Figura 8.

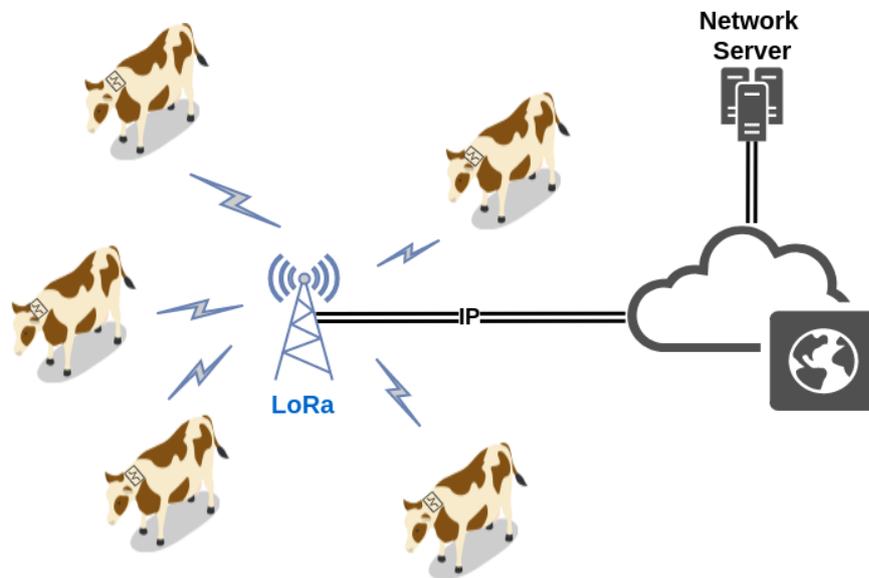
3.3.3 LoRaWAN

O LoRaWAN é um protocolo de longo alcance e baixa potência, além de ser um padrão aberto baseado em LoRa[®] que cada vez ganha mais mercado. É mantido pela LoRa Alliance[™] que descreve o protocolo como:

A especificação LoRaWAN é um protocolo de rede LPWA (Low Power Wide Area) projetado para conectar "coisas" sem fio operadas por bateria à Internet em redes regionais, nacionais ou globais, e tem como alvo os principais requisitos da Internet das Coisas (IoT), como bidirecional serviços de comunicação, segurança *end-to-end*, mobilidade e localização. (LoRa Alliance, 2019, tradução nossa).

A Figura 9 mostra um modelo de pecuária inteligente utilizando o protocolo LoRaWAN. Onde em cada vaca há um dispositivo que mede pontos importantes para a saúde de cada uma, além de localização e etc. Cada dispositivo é ligado diretamente a um *gateway* que esta conectado a um servidor que guarda essas informações, podendo ser consumidas de uma aplicação.

Figura 9 – Exemplo de pecuária inteligente utilizando o protocolo LoRaWAN



Fonte: Elaborada pelo autor.

O LoRaWAN opera em frequências baixas com uma taxa de transmissão de até 50Kbps, sendo capaz de transmitir ilimitadas mensagens durante um dia. Sendo uma rede LPWA, o LoRaWAN promete o baixo custo de energia com uma boa cobertura, cobrindo uma área de até 15km (LoRa Alliance, 2019).

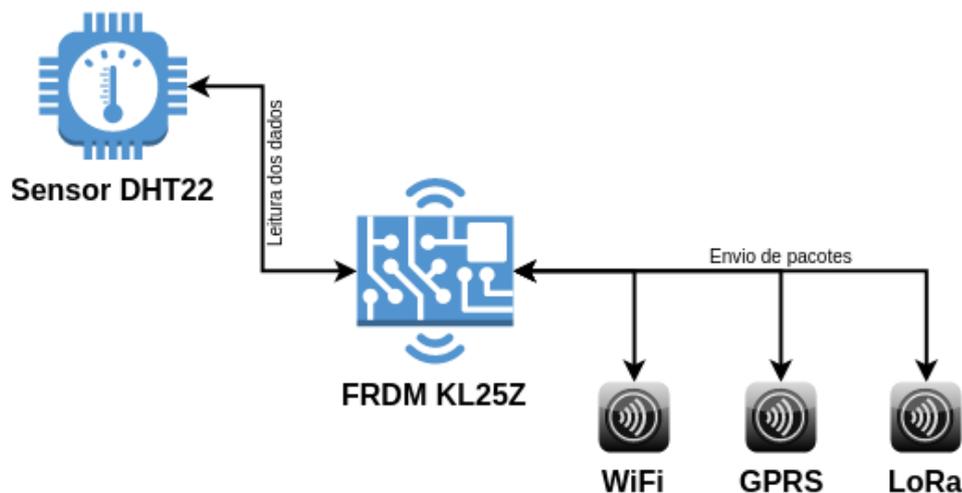
3.4 Duplicação de Pacotes

A duplicação de pacotes é uma técnica utilizada para aumentar a confiabilidade do sistema, enviando dados redundantes por mais de um canal. Rao e Vrzić (2018b) define a duplicação de pacotes como:

O princípio fundamental da duplicação de pacotes envolve a geração de várias instâncias de um pacote e a transmissão simultânea de pacotes em diferentes canais não correlacionados [...] a duplicação de pacotes melhora a robustez da transmissão e minimiza a probabilidade de falhas no link. (RAO; VRZIC, 2018, traduzido pelo autor).

Como o próprio nome diz, basicamente o sistema que utiliza essa técnica envia pacotes duplicados por outros meios, como por exemplo o que mostra a Figura 10, onde a placa controladora FRDM-KL25Z colhe os dados utilizando o sensor DHT22 e envia para a nuvem através de três tipos de comunicações diferentes: Wi-Fi, GPRS e LoRa.

Figura 10 – Exemplo de duplicação de pacotes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Alguns tipos de sistemas necessitam uma maior confiabilidade relacionada a perda de pacotes, como em alguns sistemas críticos onde a perda de pacotes pode ocasionar riscos sérios

aos sistemas. Utilizando a propagação desses pacotes através de mais de um link, a probabilidade de que o pacote chegue é maior, trazendo uma maior confiança na troca de dados.

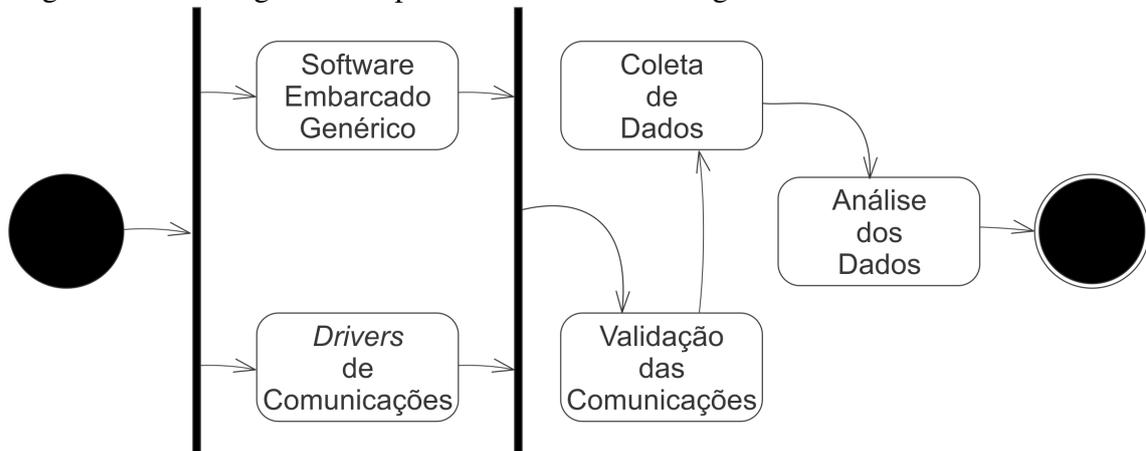
Porém aliado a uma maior confiabilidade a duplicação de pacotes faz com que o consumo geral do sistema aumente, pois como será utilizado mais de um tipo de comunicação, isso pesará no consumo final. Este trabalho faz uma análise do custo benefício de se usar a duplicação de pacotes, comparando os tipos de comunicações escolhidos.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os passos necessários para a execução do trabalho. O fluxograma da Figura 11 mostra os a sequencia de passos na execução do trabalho. Os passos são os seguintes:

1. Software genérico embarcado;
2. *Drivers* de comunicação;
3. Validação das comunicações;
4. Coleta de dados;
5. Análise dos dados coletados.

Figura 11 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Elaborado pelo autor.

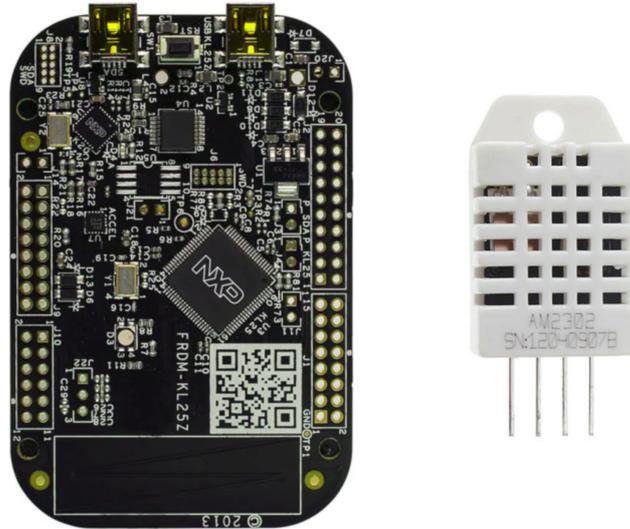
Os passos 1 e 2 aconteceram em paralelo, onde os *drivers* são utilizados tendo o software genérico como base. As etapas e os passos serão discutidos detalhadamente a seguir.

4.1 Software embarcado

Para a realização dos experimentos utilizando tipos de comunicações diferentes é necessário o desenvolvimento de uma aplicação base. Esta aplicação é genérica comum a todos os tipos de comunicação, mantendo assim suas características. Utilizando a placa KL25z mostrada na Figura 12(a) que captura dados do sensor de temperatura e umidade DHT22¹ apresentado na Figura 12(b) e envia-os periodicamente através dos tipos de comunicação, juntamente com um número de controle do pacote, afim de ser calculada a confiabilidade.

¹ Datasheet DHT22

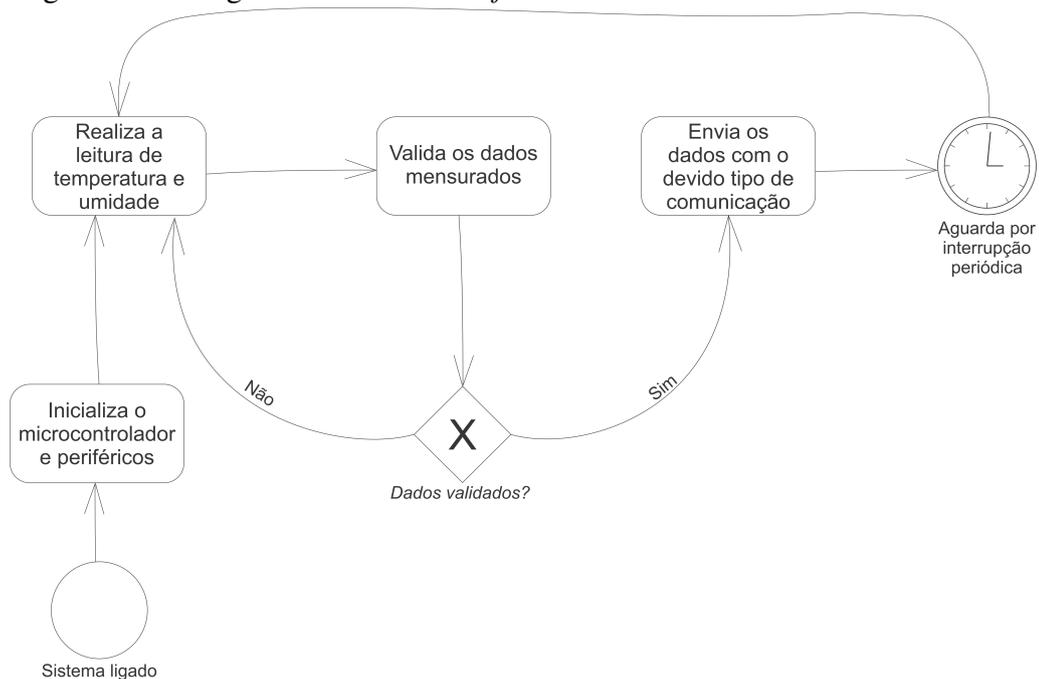
Figura 12 – Placa FRDM-KL25Z e Sensor DHT22
(a) (b)



Fonte: (NXP, 2019) e (FARANUX, 2019).

O circuito base utilizado no estudo pode-se ser observado na Figura 24 presente no Apêndice A, onde mostra a conexão feita entre a placa controladora e o circuito. A Figura 13 apresenta o diagrama de fluxo da aplicação base implementada, onde a partir da inicialização do microcontrolador e periféricos, o sistema fica em um laço infinito colhendo dados do sensor e enviando-os se validos. O código fonte utilizado para a captura de dados do sensor foi basicamente o código fonte 1 do Apêndice C.

Figura 13 – Diagrama de fluxo do *software*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em mãos os dados colhidos através do sensor, o envio de dados pode-se iniciar. O código fonte 2 do Apêndice C mostra de forma genérica o envio dos dados, onde a é escolhido o tipo de comunicação a ser utilizado na instanciação da classe "COMM". A etapa descrita na Seção 4.2 detalha melhor os tipos de comunicações.

4.2 Driver de comunicação

Cada tipo de comunicação tem seu modo de trocar dados, então nessa etapa os *drivers* de cada tipo de comunicação foram implementados. Todos os *drivers* seguiram o mesmo padrão para o envio e recebimento dos dados, deixando o software genérico intacto.

Utilizando a programação orientada a objetos, todos os tipos de comunicações foram encapsulados em uma classe chamada "COMM", onde na instancia do objeto deve-se escolher o tipo de comunicação a ser usada. Deve-se ser escolhido um dos três tipos de comunicações a seguir:

1. LORA;
2. GPRS;
3. WIFI.

Vale ressaltar que para a utilização de duplicação de pacotes, a classe de comunicação é chamada mais de uma vez, sendo possível assim enviar os dados por mais de um canal, como propõe a técnica.

4.2.1 Módulos

Cada tipo de comunicação tem seus módulos no mercado, onde é possível conectar o dispositivo controlador a nuvem. As seções a seguir especifica para cada tipo de comunicação o *hardware* utilizado.

4.2.1.1 LoRa[®]

O modulo LoRa[®] utilizado no estudo foi o transceptor RFM95W², onde o chip se comunica diretamente com o *gateway* LoRa[®], que por sua vez envia os dados para a nuvem. A Figura 25 do Apêndice A mostra o circuito para a comunicação do módulo a placa controladora KL25Z.

² *Datasheet* transceptor RFM95W

4.2.1.2 Wi-Fi

O módulo escolhido para o Wi-Fi foi o ESP01³ da *microchip* que comunicará o dispositivo utilizando o protocolo IEEE 802.11b/g/n. O circuito de ligação do módulo com a placa KL25Z se encontra na Figura 27 do Apêndice A.

4.2.1.3 GPRS

E por fim o módulo SIM800L⁴ fez a ligação entre a nuvem e a placa KL25Z utilizando o GPRS. O esquema de ligação do chip à placa é mostrado na Figura 26 do Apêndice A.

Para a utilização da duplicação de pacotes, os esquemas de ligações presentes no Apêndice A se unem, permitindo assim com que a placa possa utilizar mais de um canal para a transmissão de pacotes.

4.3 Validação das comunicações

Nesta etapa, testes foram realizados com os módulos das comunicações, enviando dados para a nuvem como forma de validação das implementações, evitando assim falhas no decorrer dos passos.

4.4 Coleta de dados

Com todos os tipos de comunicação funcionando e devidamente testados, a coleta de dados pôde ser feita, coletando dados do funcionamento do sistema para cada tipo de comunicação, como o consumo de corrente elétrica em miliampere (mA) e tensão (V). Para cada tipo de comunicação foi enviado a mesma quantidade de dados, transmitindo dois números ponto flutuante e um número inteiro, ou seja, 10 *bytes* por transmissão.

Para calcular os dados de potência em *Watts* é utilizada a lei de Ohm, explicitada na Equação 4.1, onde V é a tensão aplicada no sistema e i a corrente necessária para o funcionamento do sistema.

$$P = V \cdot i \tag{4.1}$$

³ *Datasheet* módulo ESP01

⁴ *Datasheet* módulo SIM800L

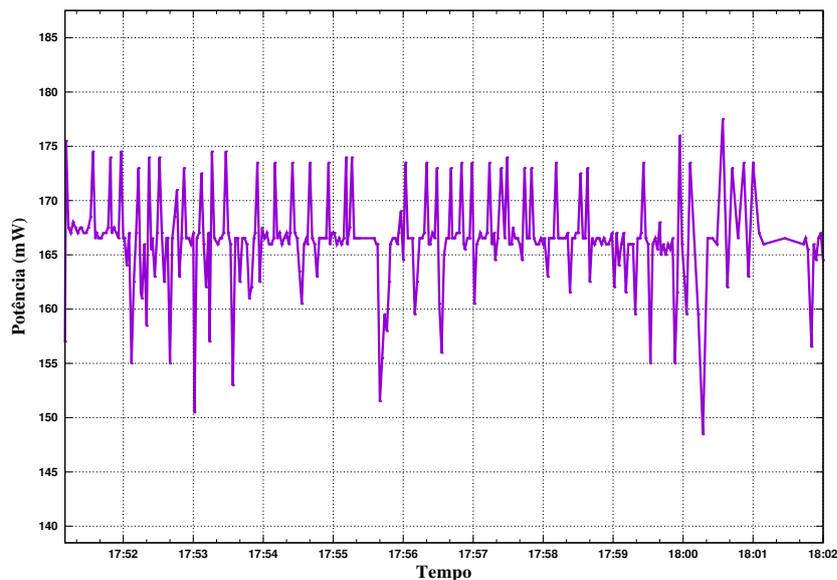
5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com os experimentos no trabalho. Vale ressaltar que os gráficos apresentados neste capítulo são uma parcela dos gráficos das figuras do Apêndice B.

5.1 *Software* genérico

O *software* genérico foi implementado para servir como base para o restante do trabalho. Utilizando o sensor DHT22, apresentado na Seção 4.1. O *software* captura informações de temperatura e umidade do ambiente através do sensor. O gráfico da Figura 15 apresenta o comportamento do sistema quanto a potência consumida para realizar a leitura dos dados somente, ou seja, não enviando os dados para a nuvem.

Figura 15 – Gráfico de consumo do *software* genérico



Fonte: Elaborado pelo autor.

É perceptível picos de potência, que ocorrem enquanto o sistema está realizando as leituras, após a leitura o sistema entra em modo ocioso, ou seja, aguarda a interrupção periódica, como indica a Figura 13. O Quadro 3 apresenta a média e mediana dos dados colhidos.

Quadro 3 – Quadro média e mediana *software* genérico

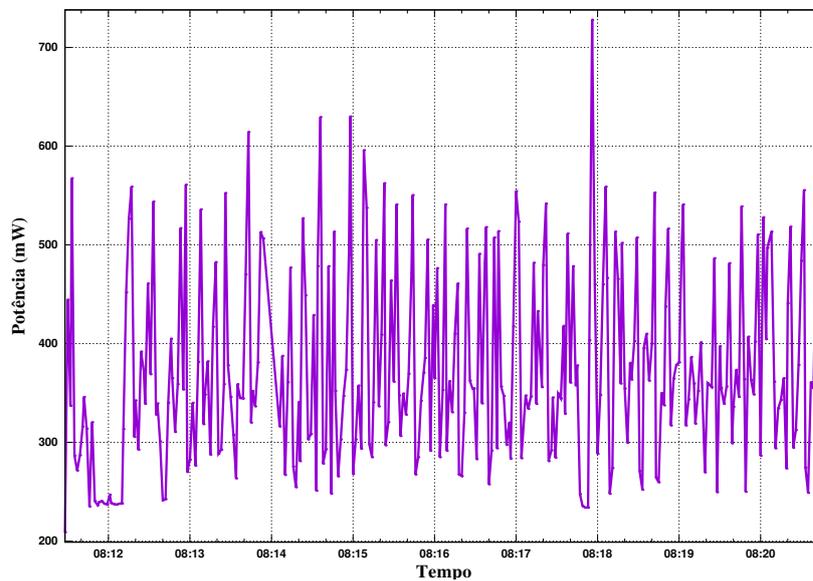
<i>Software</i> genérico	
Média	165.53 mW
Mediana	165.97 mW

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 GPRS

O gráfico da Figura 16 apresenta os dados do consumo energético do sistema quando utilizando o GPRS como tipo de comunicação. É possível perceber no gráfico uma grande variação da potência, isso porque o GPRS deve manter a conexão ativa com a rede, então vários pacotes são enviados com o tempo. Além disso é perceptível alguns picos, quando o sistema colhe dados do sensor ou envia-os para a nuvem, mantendo os dados em média entre 300 mW e 400 mW, como mostra o Quadro 4.

Figura 16 – Gráfico de consumo GPRS



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 4 mostra a média e mediana, além da taxa de sucesso, ou seja, porcentagem de pacotes entregues corretamente. Para todas as comunicações utilizadas 1000 pacotes forem enviados, sendo assim o GPRS entregou 937 pacotes.

Quadro 4 – Quadro rendimento GPRS

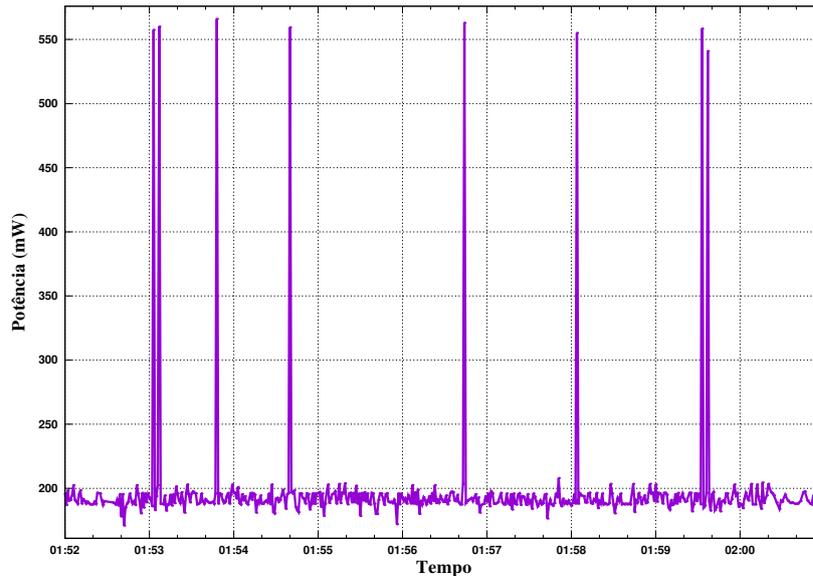
GPRS	
Média	374.18 mW
Mediana	355 mW
Taxa de sucesso	93.7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 LoRa

O gráfico da Figura 17 mostra o consumo do sistema utilizando o LoRa[®]. Diferentemente dos demais tipos de comunicações, o módulo LoRa[®] acorda apenas para o envio do pacote, fazendo com que o gráfico fique com picos constantes.

Figura 17 – Gráfico de consumo LoRa[®]



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber também que normalmente o sistema consome em média aproximadamente 190 mW, como mostra o Quadro 5. A mediana é importante também por conta dos picos que ocorrem ao longo dos experimentos, podendo assim fazer com que a média fique desproporcional. Quando maior a diferença entre média e mediana, maior é o número de valores acima da média.

O Quadro 5 mostra também que o LoRa[®] obteve um resultado bastante satisfatório quanto a perda de pacotes. De 1000 pacotes, apenas 2 foram perdidos.

Quadro 5 – Quadro rendimento LoRa[®]

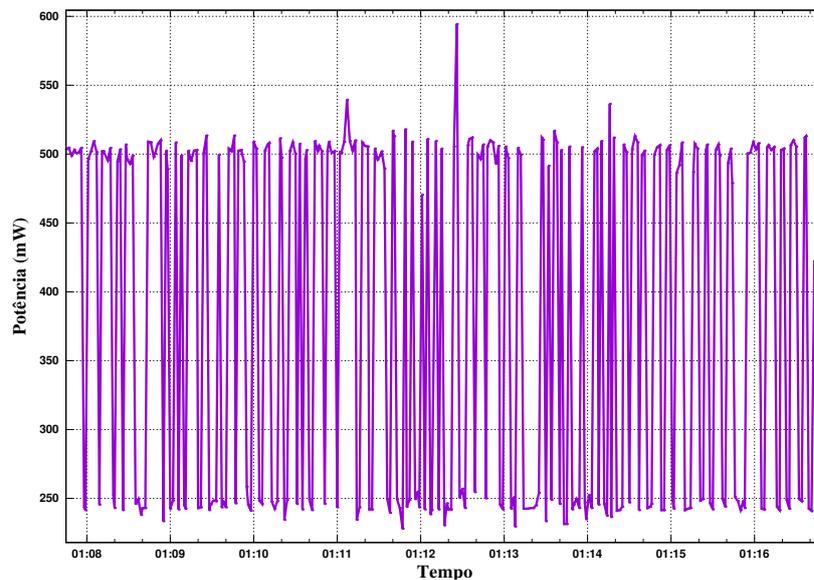
LoRa	
Média	194.60 mW
Mediana	189.51 mW
Taxa de sucesso	99.8%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Wi-Fi

O gráfico da Figura 18 apresenta o comportamento do sistema ao enviar dados utilizando o Wi-Fi. O gráfico mostra as variações entre o sistema ocioso e o envio de pacotes, além disso é possível perceber na Figura 31, que mostra em escala maior que o Wi-Fi envia o chamado *beacon frame* que são transmitidos periodicamente e servem para renovar a concessão na rede. (KUROSE; ROSS, 2013)

Figura 18 – Gráfico de consumo Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os *beacon frames* elevam o nível de potência em um determinado instante o que é perceptível no Quadro 6, que mostra uma variação considerável entre média e mediana. O Wi-Fi enviou corretamente 987 pacotes de 1000, como mostra o Quadro 6.

Quadro 6 – Quadro rendimento Wi-Fi

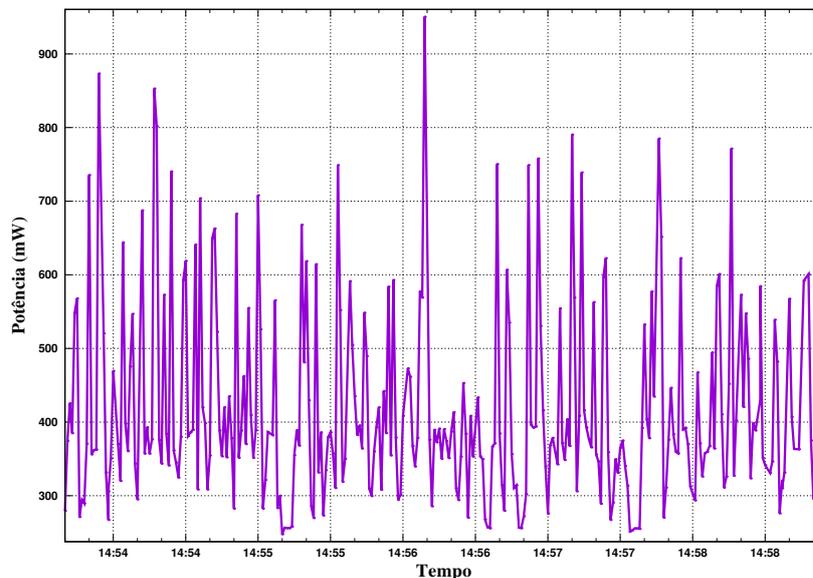
Wi-Fi	
Média	383.99 mW
Mediana	490.48 mW
Taxa de sucesso	98.7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 GPRS e LoRa[®]

Após a obtenção dos dados utilizando uma única comunicação, iniciou-se os testes utilizando mais de uma comunicação por vez, buscando uma maior confiabilidade. O gráfico da Figura 19 mostra o consumo do sistema quando combinado o GPRS e LoRa[®]. É possível perceber com o gráfico uma variação bastante parecida com o gráfico da Figura 16, porém os picos são maiores, isso porque ao enviar, o LoRa[®] eleva o consumo em um período constante.

Figura 19 – Gráfico de consumo GPRS e LoRa[®]



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 7 apresenta os valores de consumo do sistema com essas duas comunicações e suas respectivas taxas de sucesso. A média e mediana se aproximaram bastante dos resultados obtidos utilizando apenas o GPRS, porém o experimento mostrou um salto na confiabilidade, que foi de pouco mais de 90% para 100%.

Quadro 7 – Quadro rendimento GPRS e LoRa[®]

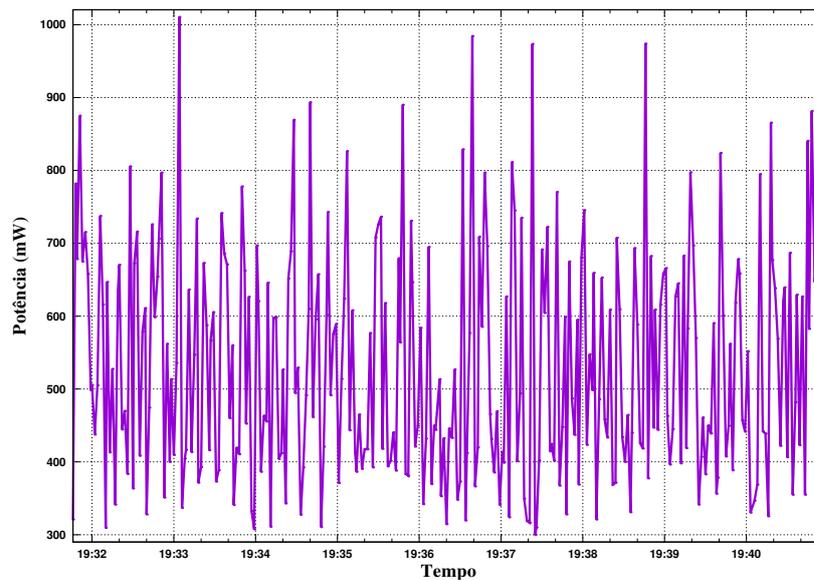
GPRS e LoRa	
Média	404.28 mW
Mediana	375.48 mW
Taxa de sucesso geral	100%
Taxa de sucesso GPRS	91.7%
Taxa de sucesso LoRa	99.6%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 GPRS e Wi-Fi

A Figura 20 mostra o gráfico do consumo ao utilizar o GPRS e Wi-Fi simultaneamente. Como na seção anterior, o gráfico se assemelha com o GPRS, porém com valores de consumo maior. O gráfico da Figura 33 do Apêndice B que mostra todos os valores obtidos neste teste apresenta picos de consumo, assim como mostrado na Seção 5.4.

Figura 20 – Gráfico de consumo GPRS e Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 8 apresenta os valores obtidos no teste. É visto um consumo maior que analisado nos testes com apenas uma comunicação, assim como era previsto. Ainda assim a taxa de sucesso obtida foi de 100%. Vale ressaltar que cada tipo de comunicação envia 1000 pacotes.

Quadro 8 – Quadro rendimento GPRS e LoRa[®]

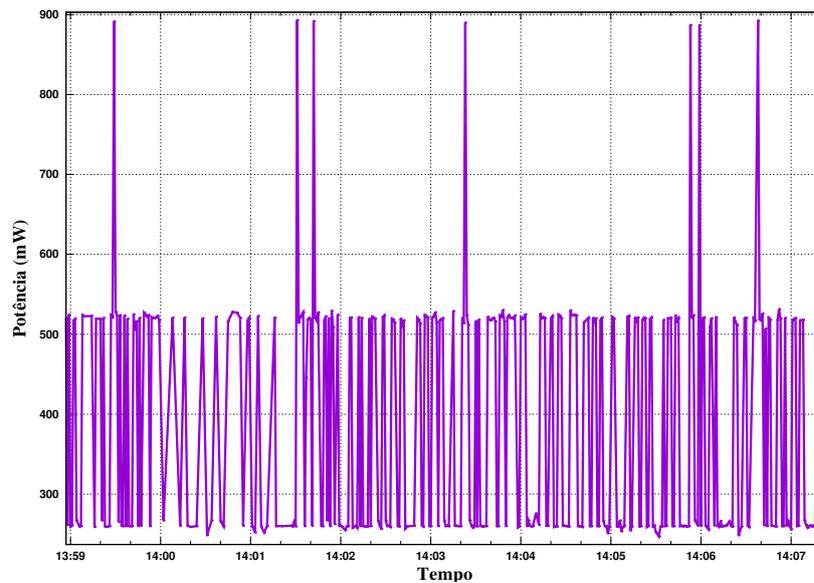
GPRS e Wi-Fi	
Média	523.92 mW
Mediana	497.98 mW
Taxa de sucesso geral	100%
Taxa de sucesso GPRS	94.6%
Taxa de sucesso Wi-Fi	99.3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 LoRa e Wi-Fi

O gráfico da Figura 21 apresenta o resultado dos testes de consumo quando se utiliza LoRa[®] e Wi-Fi para o envio de pacotes. É visto o mesmo período encontrado na Seção 5.4, porém em alguns instantes picos se aproximam de 900 mW, quando o pacote é enviado utilizando o LoRa[®].

Figura 21 – Gráfico de consumo LoRa[®] e Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 9 mostra a mediana e a média do consumo, onde percebe-se uma diferença considerável entre elas. A mediana mostra que na maioria das vezes o consumo fica aproximado em 270 mW, ou seja, esperando para fazer outra leitura e o envio de dados. Porém por conta dos picos de consumo a média chega a se aproximar de 400 mW, fazendo com que a média fique desproporcional.

Quadro 9 – Quadro rendimento LoRa[®] e Wi-Fi

LoRa e Wi-Fi	
Média	393.34 mW
Mediana	270.34 mW
Taxa de sucesso geral	100%
Taxa de sucesso LoRa	99.7%
Taxa de sucesso Wi-Fi	96.5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

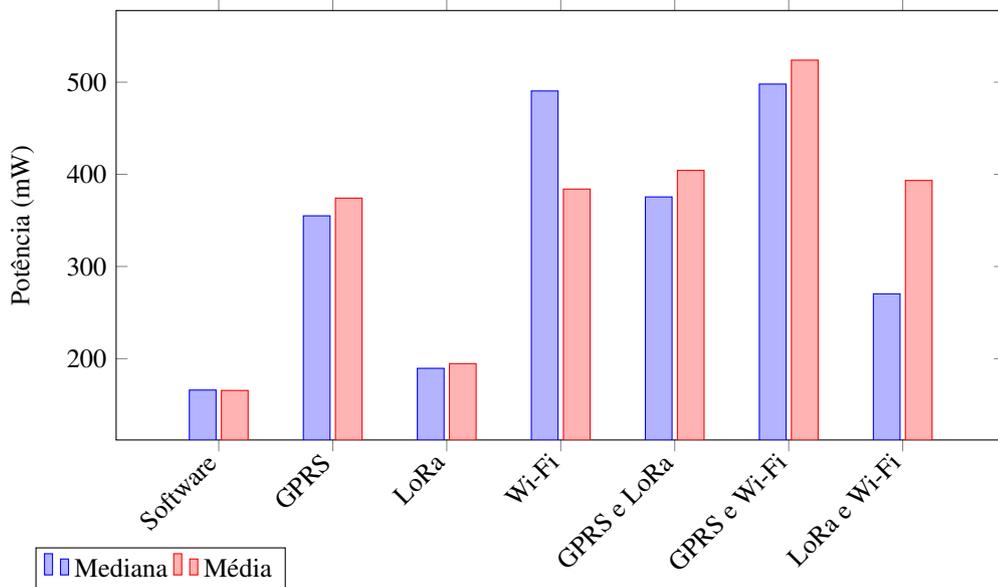
6 CONCLUSÃO E DISCUSSÕES

Este trabalho tinha como objetivo estudar e analisar o consumo de energia em dispositivos IoT e fazer um comparativo entre determinados tipos de comunicação, além de utilizar duplicação de pacotes afim de estudar a viabilidade de se utilizar mais de um tipo de comunicação para um salto na confiabilidade.

Para tal foi necessário descobrir quais os tipos de comunicações que utilizavam mais energia e quais as suas taxas de sucesso ao enviar pacotes. Para manter todos os testes no mesmo nível, um *software* genérico foi implementado e utilizado como base.

Com base nos resultados apresentados no Capítulo 5, os gráficos das Figuras 22 e 23 mostra o comparativo entre os testes realizados, onde a Figura 22 mostra a comparação entre o consumo energético obtidos nos testes, já a Figura 23 apresenta as taxas de sucesso dos envios de pacotes conquistado por cada teste.

Figura 22 – Gráfico de consumo energético dos dispositivos



Fonte: Elaborado pelo autor.

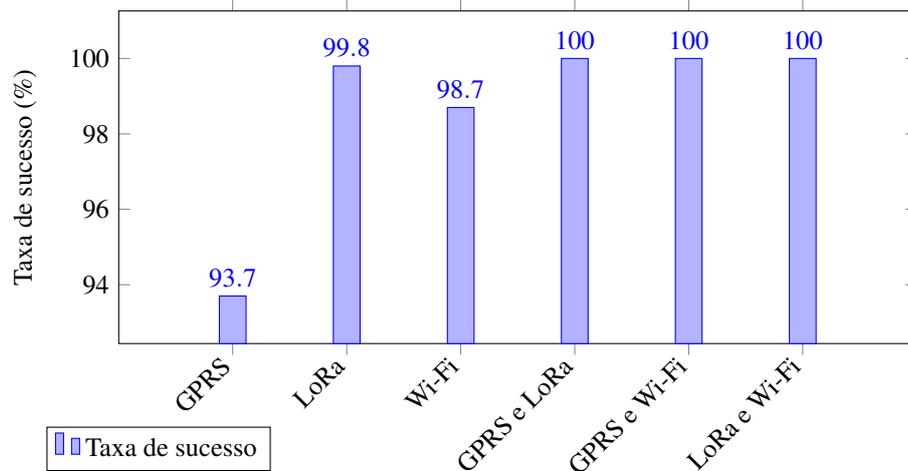
A partir dos dados do gráfico da Figura 22 é possível afirmar que o LoRa[®] consome muito pouco em média, isso porque se aproxima bastante dos resultados obtidos no *software* genérico. Já o GPRS e Wi-Fi consomem de fato um maior número de energia. O uso da mediana foi considerado pois como mostrado nos resultados à vários picos de potência, podendo fazer com que a média fique desproporcional.

Quando utilizado mais de um tipo de comunicação, não é percebido uma grande mudança no consumo energético, porém como mostra a Figura 23 a taxa de sucesso nos envios

dos pacotes aumentam, chegando a 100% nos três casos testados.

Podemos tirar de conclusão que se possível, ao utilizar o GPRS um outro tipo de rede seja incorporado na transmissão, pois apresenta uma grande perda de pacotes, já quando utiliza duplicação de pacotes, a perda de pacotes cai para nenhum pacote perdido. Com o ganho na confiabilidade e um aumento não muito grande do consumo, vale a pena utilizar mais de um tipo de comunicação.

Figura 23 – Gráfico de consumo energético dos dispositivos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda com base nos dados dos testes, é possível afirmar que não vale a pena utilizar a duplicação de pacotes quando se utiliza o LoRa[®] com poucos nós, como o caso dos testes, pois como mostra a Figura 22, o consumo é muito baixo quando comparado aos outros tipos de comunicação. O consumo baixo ligado a uma taxa de sucesso de quase 100% mostra o LoRa[®] obteve os melhores resultados nos testes. Porém, em redes massivas a quantidade de nós aumenta consideravelmente, podendo causar mais interferência entre eles por utilizar a mesma faixa de frequência. Neste caso, o uso da duplicação de pacotes diminui essa perda de pacotes e aumenta a confiabilidade, se tornando assim, viável.

O Wi-Fi obteve os piores resultados em termos energéticos, pois se manteve acima dos demais tipos de comunicações nos testes realizados. Ainda assim obteve uma taxa de sucesso consideravelmente boa, perdendo poucos pacotes.

De fato o LoRa[®] é o melhor tipo de comunicação entre os teste, juntamente com o GPRS tem uma vasta cobertura, já o Wi-Fi que obteve os piores resultados é mais limitado, ficando restrito a alguns metros. Em sistemas que não necessitam de uma grande confiabilidade, mas precisam se comunicar sem limites de distância, o GPRS é uma boa opção.

Quando se fala de redes massivas, ou seja, com muitos nós o custo do GPRS aumenta bastante, pois para cada nó do sistema, um plano de alguma operadora de celular deve ser inserido.

Como trabalhos futuros pretende-se aumentar o número de comunicações e aumentar também a quantidade de nós em cada tipo de comunicação, com o intuito de analisar a confiabilidade e eficiência energética desses nós quando se utiliza vários dispositivos emitindo em uma mesma frequência os dados para a nuvem.

REFERÊNCIAS

- ASHTON, K. That 'Internet of Things' Thing. **RFID Journal**, 2009.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. ISSN 13891286.
- CAVALLI, O. **Internet das coisas e inovação na América Latina**. [S.l.]: Mimeogr, 2016.
- FARANUX. **DHT22/AM2302 Digital Temperature And Humidity Sensor Module SENS462**. 2019. Disponível em: <https://www.faranux.com/product/dht22-am2302-digital-temperature-and-humidity-sensor-module-sens42/>, acessado em 11 jul.2019.
- FINNEGAN, J.; BROWN, S. An Analysis of the Energy Consumption of LPWA-based IoT Devices. **2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications, ISNCC 2018**, IEEE, p. 1–6, 2018.
- FORBES. **Roundup Of Internet Of Things Forecasts And Market Estimates, 2016**. 2016. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2016/11/27/roundup-of-internet-of-things-forecasts-and-market-estimates-2016>, acessado em 01 abr.2019.
- GARTNER. **5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018**. 2018. Disponível em: <https://gtr.it/2vTTphv>, acessado em 02 abr.2019.
- GTA/UFRJ. **IEEE 802.11ah**. 2015. Disponível em: <https://bit.ly/2KHR6Uj>, acessado em 16 abr.2019.
- GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier B.V., v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013. ISSN 0167739X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>, acessado em 15 abr.2019.
- HORDESKY, M. **Dictionary of Energy Efficiency Technologies**. [S.l.]: The Fairmont Press, Inc., 2004. 367 p. ISBN 0881734551.
- IEEE. **IEEE Publishes 802.11ah™-2016 Standard Amendment Extending Range and Improving Energy Efficiency in the Sub 1 GHz band**. 2017. Disponível em: <https://standards.ieee.org/news/2017/ieee802-11ah.html>, acessado em 16 abr.2019.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet**. [S.l.: s.n.], 2013. 658 p. ISBN 9788543014432.
- LoRa Alliance. **What is the LoRaWAN™ Specification?** 2019. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>, acessado em 16 abr.2019.
- MEIRA, S. Sinais do Futuro Imediato. **MMA - Mobile Marketing Association**, p. 47, 2017. Disponível em: <http://www.ikewai.com/WordPress/2016/12/12/sinais-do-futuro- imediato-1-internet-das-coisas/>, acessado em 15 abr.2019.
- MME, M. d. M. e. E.; EPE, E. d. P. E. PNE 2030 - Plano Nacional de Energia 2006-2007. **Ministerio de Minas e Energia**, v. 11 Eficiên, 2007. ISSN 1098-6596.
- NXP. **FRDM-KL25Z: Freedom Development Platform for Kineticis® KL14, KL15, KL24, KL25 MCUs**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2Os3AU1>, acessado em 17 abr.2019.

QADIR, Z.; AL-TURJMAN, F.; KHAN, M. A.; NESIMOGLU, T. ZIGBEE Based Time and Energy Efficient Smart Parking System using IOT. **2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)**, IEEE, p. 295–298, 2018.

RAO, J.; VRZIC, S. Packet Duplication for URLLC in 5G: Architectural Enhancements and Performance Analysis. **IEEE Network**, v. 32, n. 2, p. 32–40, 2018. ISSN 08908044.

RAO, J.; VRZIC, S. Packet duplication for URLLC in 5G dual connectivity architecture. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC**, IEEE, v. 2018-April, p. 1–6, 2018. ISSN 15253511.

SALMAN, L.; SALMAN, S.; JAHANGIRIAN, S.; ABRAHAM, M.; GERMAN, F.; BLAIR, C.; KRENZ, P. Energy efficient IoT-based smart home. **2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016**, IEEE, p. 526–529, 2017.

VARGHESE, A.; TANDUR, D.; RAY, A. Suitability of WiFi Based Communication Devices in Low Power Industrial Applications. **2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, p. 1307–1312, 2017.

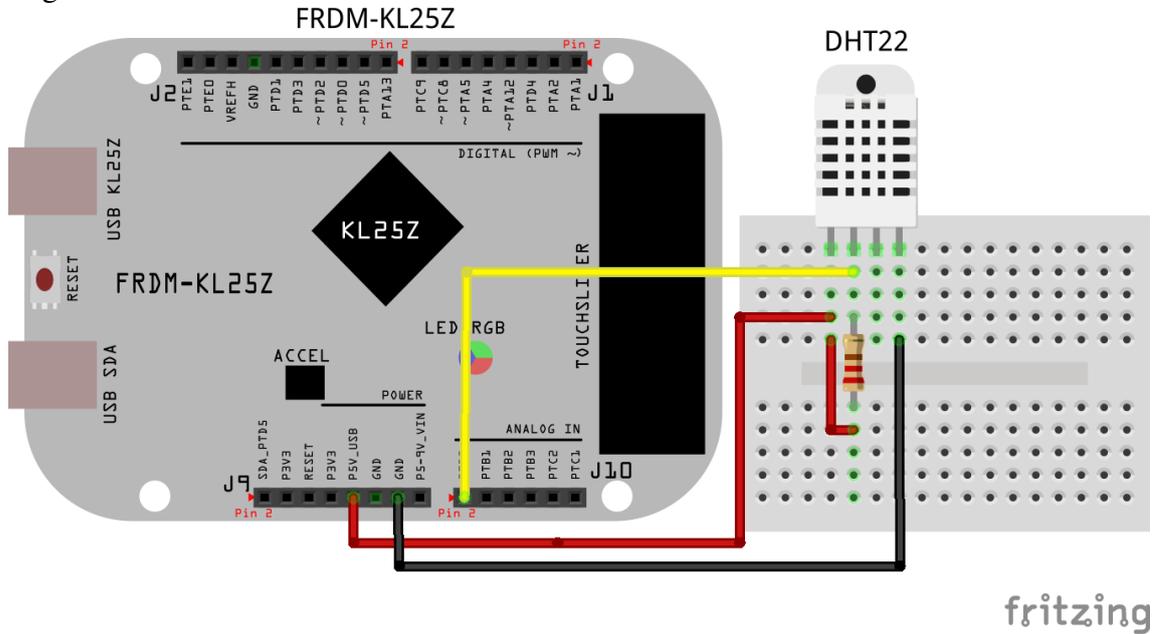
WANDER, P. R.; LOCATELLI, E. R.; HILLIG, M.; SCHNEIDER, V. E. Eficiência Energética - Um Estudo De Caso Na Indústria Moveleira. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 1–9, 2007.

WEISER, M. The Computer for the 21st Century. **Scientific American Ubicomp Paper after Sci Am editing**, 1991. ISSN 00306126.

ZHAO, Y.; YILMAZ, O. N.; LARMO, A. Optimizing M2M energy efficiency in IEEE 802.11ah. **2015 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2015 - Proceedings**, p. 2–7, 2015.

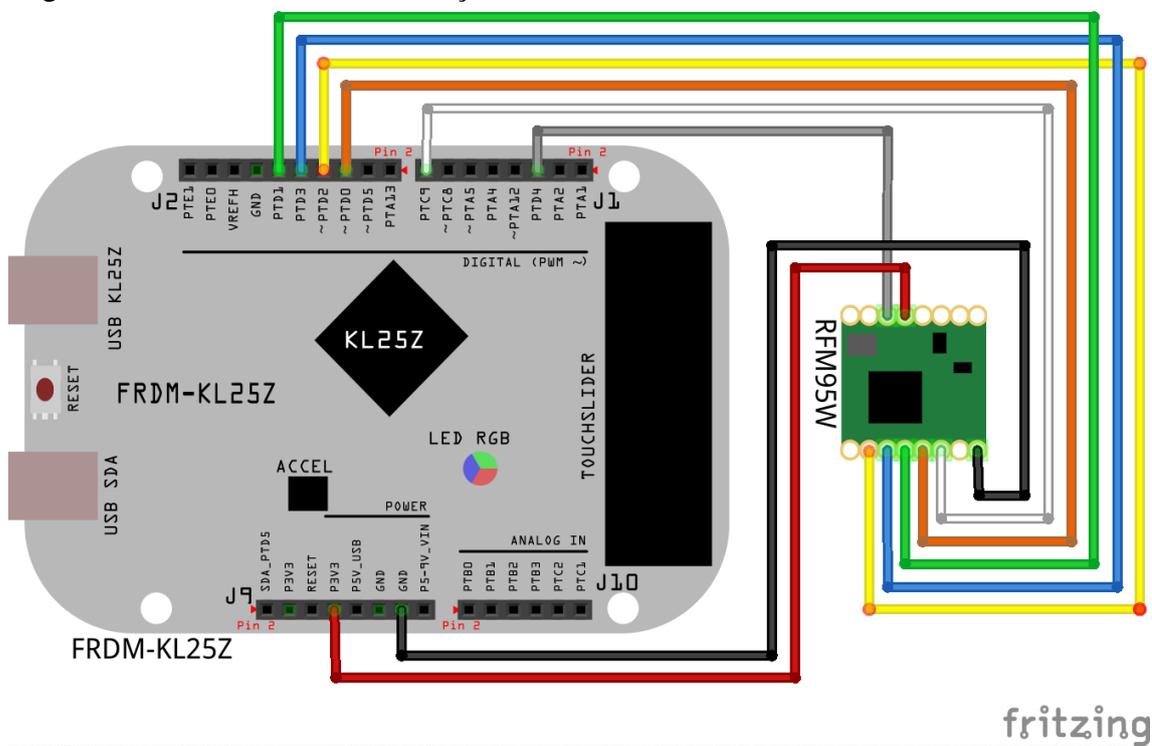
APÊNDICE A – CIRCUITOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Figura 24 – Circuito base



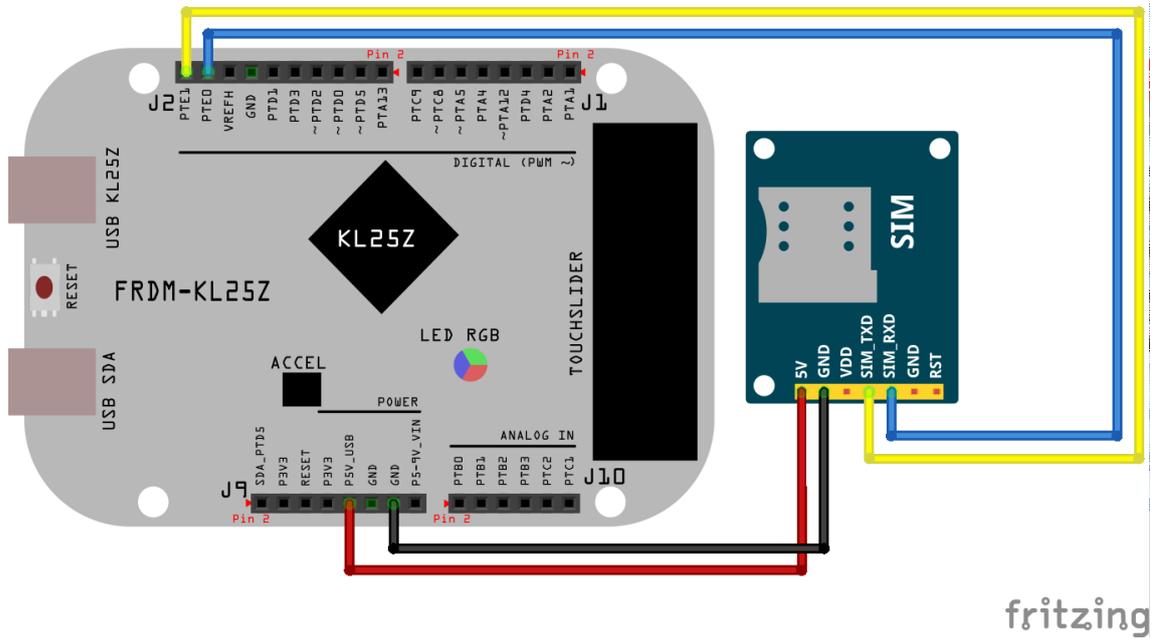
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Circuito da comunicação LoRa®



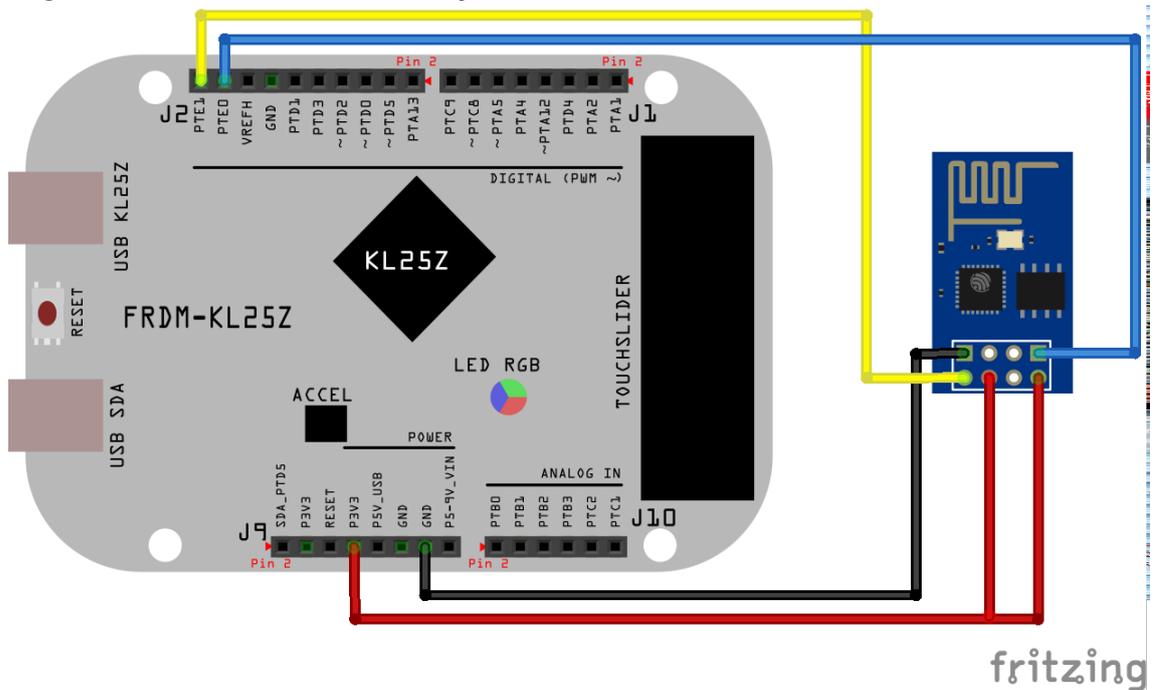
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Circuito da comunicação GPRS



Fonte: Elaborada pelo autor.

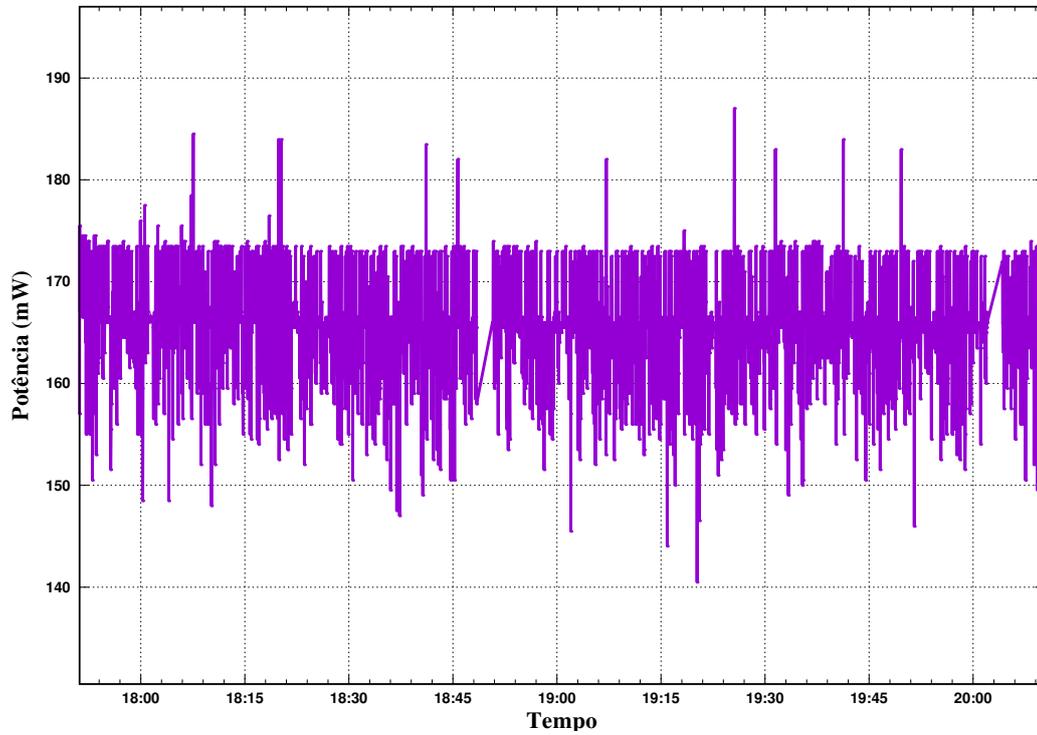
Figura 27 – Circuito da comunicação Wi-Fi



Fonte: Elaborada pelo autor.

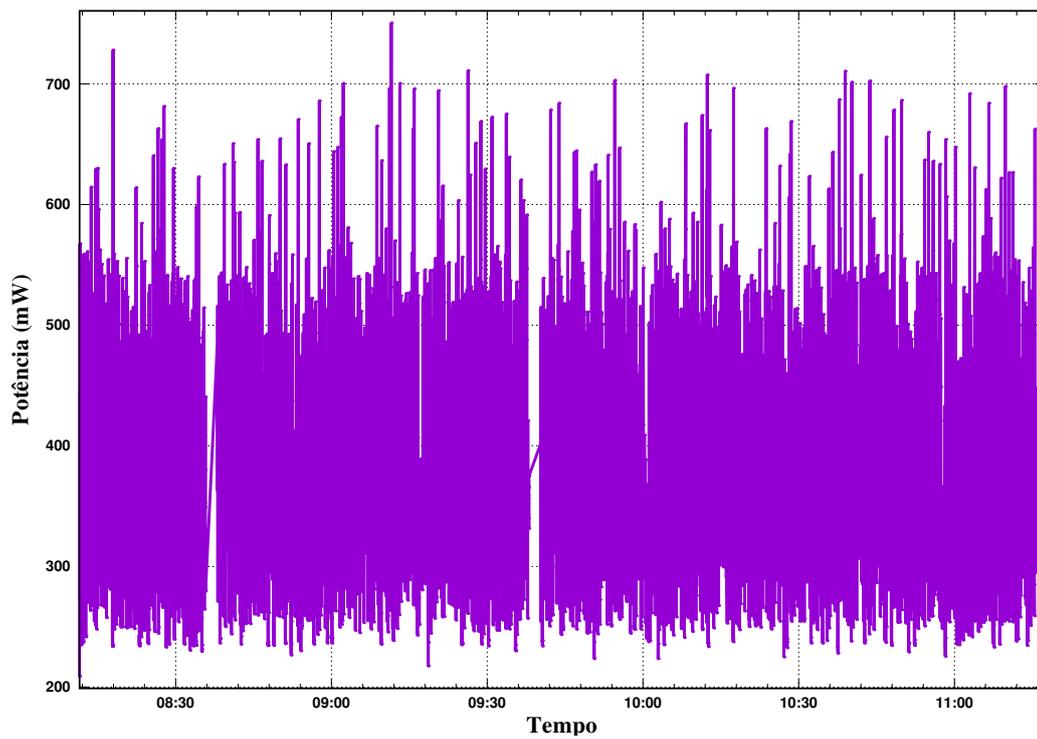
APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS EXPERIMENTOS

Figura 28 – Gráfico de consumo do software genérico



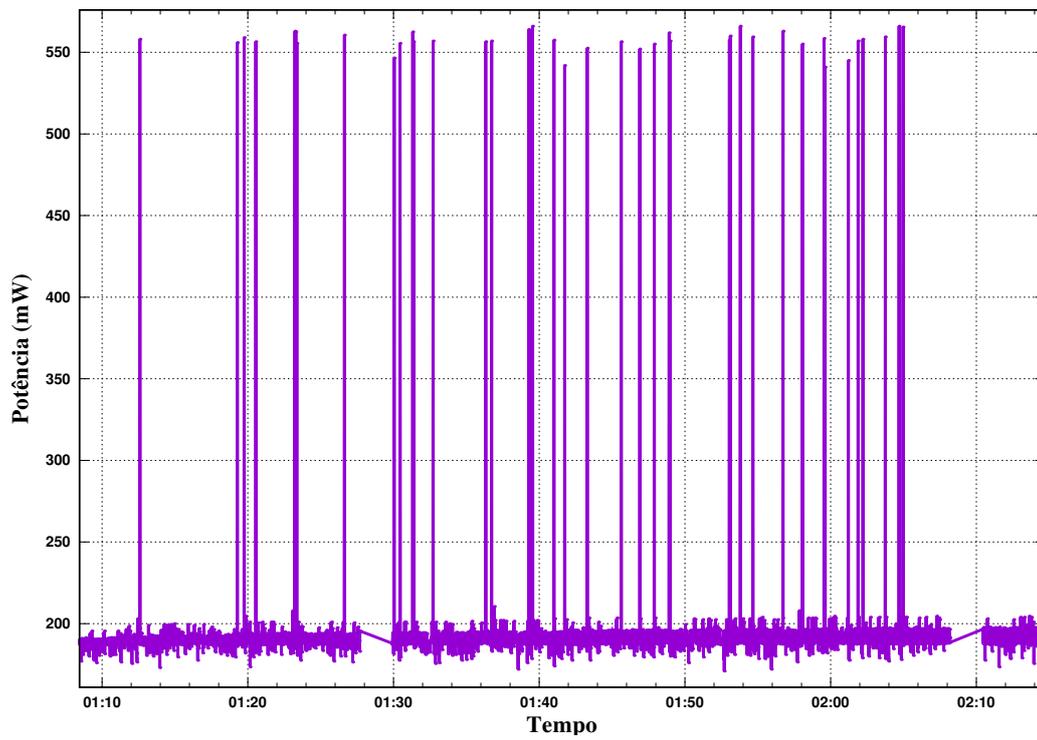
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Gráfico de consumo GPRS



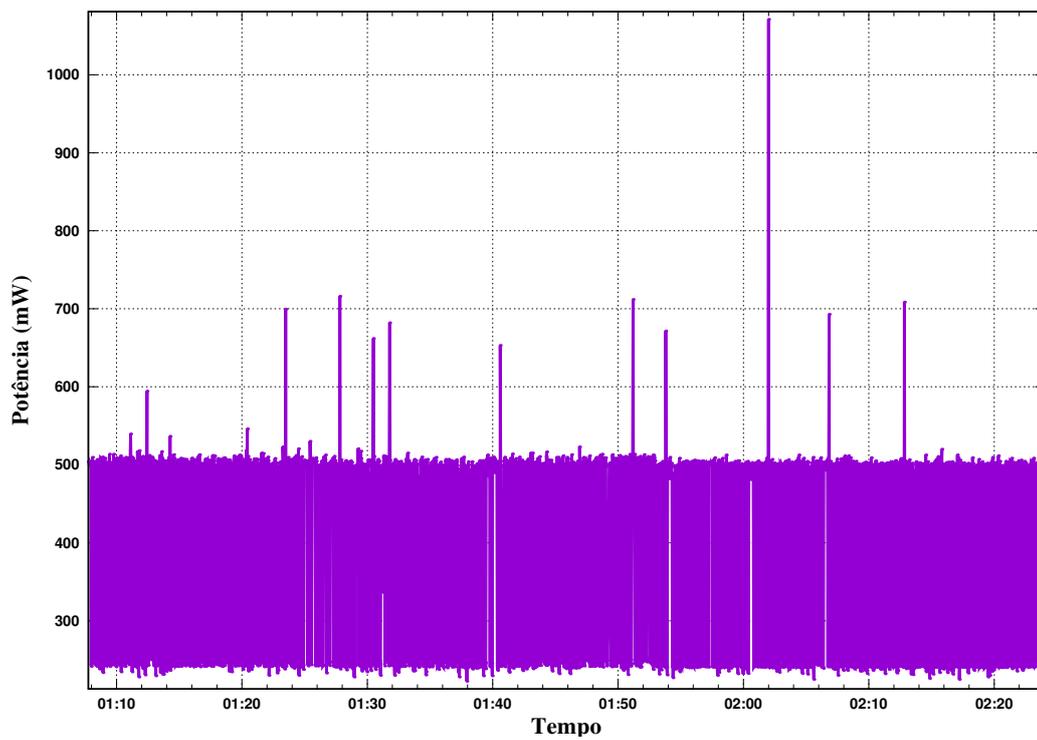
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Gráfico de consumo LoRa®



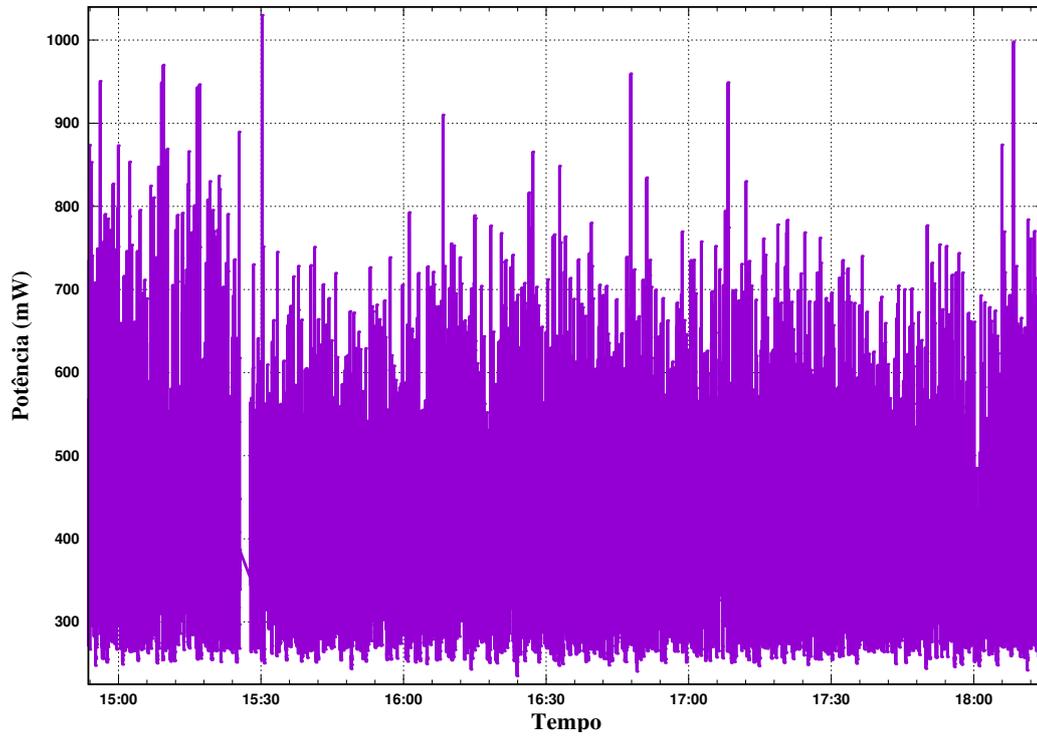
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Gráfico de consumo Wi-Fi



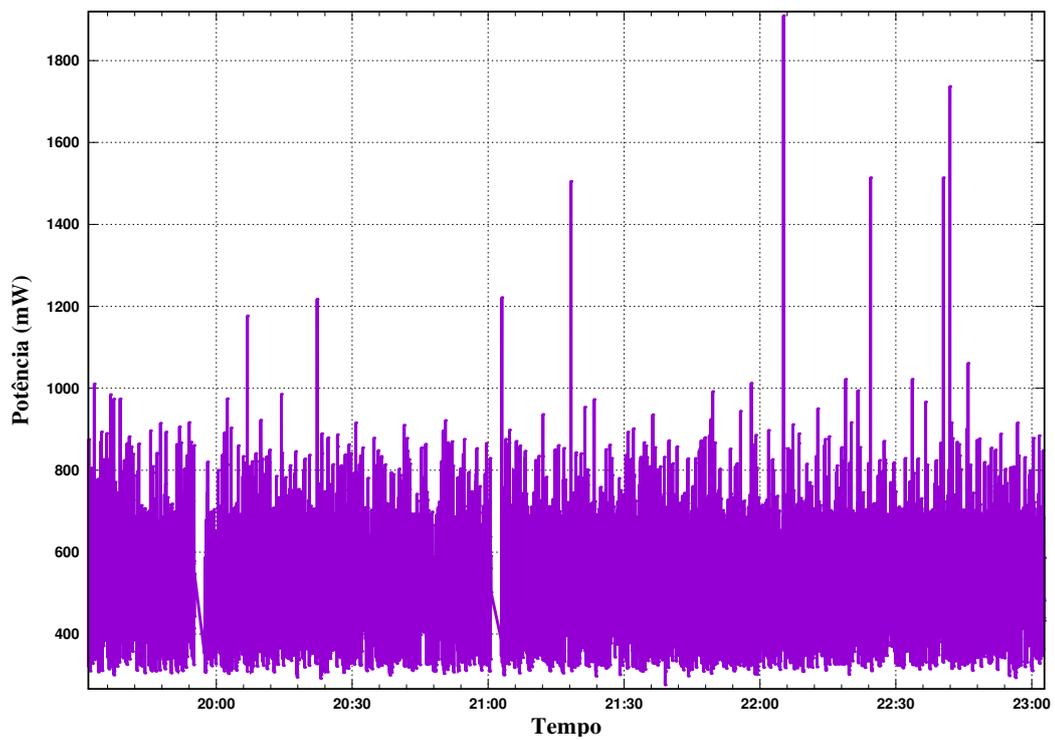
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Gráfico de consumo GPRS e LoRa®



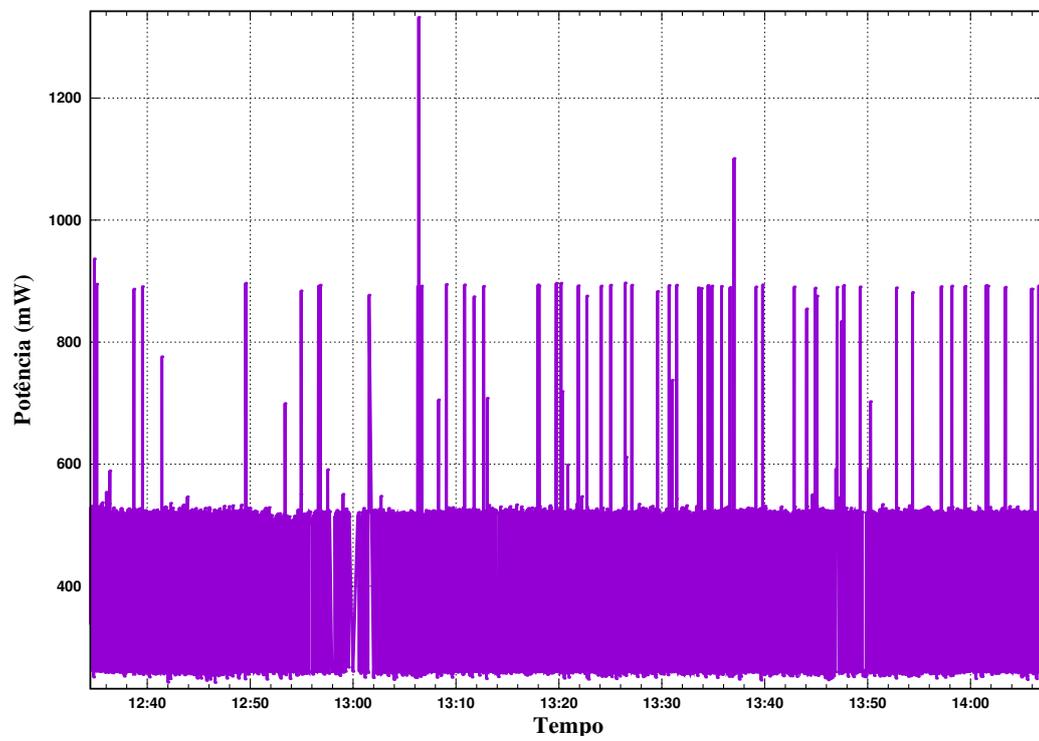
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Gráfico de consumo GPRS e Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Gráfico de consumo LoRa® e Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – CÓDIGOS-FONTES UTILIZADOS PARA O ESTUDO

Código-fonte 1 – Leitura do sensor DHT22

```
1 #include "mbed.h"
2 #include "DHT.h"
3
4 int main() {
5     while(true) {
6         DHT sensor(PTB0, DHT22);
7         sensor.readData();
8         printf("\rTemperatura: %f\n", sensor.ReadTemperature(
9             CELCIUS));
10        printf("\rUmidade: %f\n", sensor.ReadHumidity());
11        wait_ms(200);
12    }
13 }
```

Código-fonte 2 – *Software* para o envio de dados coletados

```
1 #include "mbed.h"
2 #include "DHT.h"
3 #include "communication.h"
4
5 int main() {
6     COMM comm(TYPE_COMM);
7     while(true) {
8         DHT sensor(PTB0, DHT22);
9         sensor.readData();
10
11        comm.send(sensor.ReadTemperature(CELCIUS), sensor.
12            ReadHumidity());
13        wait(2);
14    }
15 }
```

13	}
14	}