



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Projeto de Driver para Rádio Transmissor
Lora™ em Sistema Embarcado Texas
Instruments Tiva C EK-TM4C123GXL**

Arthur de Araújo Farias

Campina Grande, PB - Brasil

23 de março de 2018

ARTHUR DE ARAÚJO FARIAS

**Projeto de Driver para Rádio Transmissor Lora™ em
Sistema Embarcado Texas Instruments Tiva C
EK-TM4C123GXL**

Este relatório de estágio contempla as atividades desempenhadas durante o cumprimento do estágio supervisionado obrigatório exigido pelo regimento do curso de graduação em Engenharia Elétrica oferecido pela Universidade Federal de Campina Grande com Ênfase em Controle e Automação.

Área de Concentração: Controle e Automação

Orientador: Alexandre Cunha de Oliveira

Campina Grande, PB - Brasil

23 de março de 2018

Resumo

Este relatório de estágio contempla as atividades desempenhadas durante o cumprimento do estágio supervisionado obrigatório exigido pelo regimento do curso de graduação em Engenharia Elétrica oferecido pela Universidade Federal de Campina Grande.

Tomou-se como base a arquitetura ARM Cortex M4 e a plataforma de desenvolvimento TM4C123GXL da Texas Instruments. O módulo *transceiver* utilizado foi o RFM95W da HopeRF.

As atividades consistem na elaboração de um driver que controla a nível físico os dispositivos *transceiver* para a tecnologia LoRa™. Tratou-se de realizar experimentos de desempenho considerando *round trip time*, *throughput*, *jitter*, taxa de perda de pacotes para diferentes esquemas de modulação a vários níveis de potência de sinal recebido.

Os resultados obtidos mostram que o driver funciona para diferentes esquemas de modulação, mas não atinge o desempenho esperado com respeito a *throughput* em comparação com o descrito pelas próprias folhas de dados do fabricante. Mais experimentos devem ser feitos e novas estratégias de envio e recebimento de informações devem ser testadas a fim de avaliar completamente o funcionamento do driver e do próprio hardware a fim de construir uma folha de dados de desempenho, tornando possível avaliar os casos de empregabilidade da tecnologia.

Palavras-chaves: LoRa, Driver, Tiva, Cortex M, RFM95W, TM4C123GXL, Texas Instruments, IoT, LoRaWAN.

Abstract

This traineeship report covers the activities carried out during the compliance with the mandatory supervised internship required by the degree course in Electrical Engineering offered by the Federal University of Campina Grande.

The ARM Cortex M4 architecture and the development platform TM4C123GXL from Texas Instruments. The transceiver module used was RFRF95 from HopeRF.

The activities consist in the elaboration of a driver that controls at the physical level the transceiver devices for the LoRa technology. It was performed performance experiments considering round trip time, jitter, packet loss rate for different modulation schemes at various levels of received signal strength.

The results show that the driver works for different modulation, but does not achieve the expected performance with respect to compared to that described by the manufacturer's own data sheets. More experiments should be made and new strategies for sending and receiving information should be tested in order to assess the driver and the hardware itself in order to build a data sheet of performance, making it possible to evaluate the employability of the technology.

Keywords: LoRa, Driver, Tiva, Cortex M, RFM95W, TM4C123GXL, Texas Instruments, IoT, LoRaWAN.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama do modelo OSI	17
Figura 2 – Diagrama conceitual da propagação por múltiplos caminhos	26
Figura 3 – Topologia estrela de rede	27
Figura 4 – Star Network Topology	27
Figura 5 – Topologia malha de rede	28
Figura 6 – Módulo LoRa™ RFM95/96/97/98W fabricado pela Hope RF	30
Figura 7 – Módulo LoRa™ RFM95W comercializado pela <i>Adafruit Industries</i>	31
Figura 8 – Kit de Desenvolvimento EK-TM4C123GXL com o Microcontrolador Cortex M4 da Texas Instruments TM4C123GH6PM	32
Figura 9 – Estrutura de um pacote LoRa	34
Figura 10 – Máquinas de Estado da recepção e envio de pacotes	35
Figura 11 – Montagem realizada durante o desenvolvimento do driver	36

Lista de tabelas

Tabela 1 – Orçamento do enlace para diferentes modos de fator de espalhamento .	29
Tabela 2 – Ligações entre terminais do microcontrolador e kit LoRa RFM95W . .	35

Lista de abreviaturas e siglas

BT	Produto entre largura de banda e tempo
CSS	<i>Chirp spread spectrum</i>
dB	Decibel
DSSS	<i>Direct sequence spread spectrum</i>
FSK	<i>Frequency shift keying</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc</i>
LoRa™	<i>Long Range Modulation</i>
PHY	<i>Physical Layer: camada física do modelo OSI</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
CCA	
LoRa	<i>Long Range Low Power Network</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Low Power Wide Area Network</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
ISO	International Organization of Standards
IEC	International Electrotechnical Commission
OSI	Open Systems Interconnection
UIT	União Internacional de Telecomunicações
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
DSSS PHY	<i>Direct Sequence Spread Spectrum Physical Layer</i>

GPS	<i>Global Positioning System</i>
LR-WPANs	<i>Long Range Wireless Personal Networks</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
CR	<i>Correction Factor</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
Hz	<i>Hertz</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
FPU	<i>Floating Point Unit</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
OTG	<i>On The Go</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
ADC	<i>Analog Digital Converter</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UART	<i>Universal Assynchronous Receiver-Transmitter</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
GPIO	<i>General Purpouse Input-Output</i>
NVIC	<i>Nested Vectored Interrupt Controller</i>
I^2C	<i>Integrated-Integrated Circuit</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
MISO	<i>Master Input Slave Output</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Intensity</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	15
1.2	Local do Estágio	15
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1	O Modelo OSI	17
2.1.1	Camada Física	17
2.1.2	Camada de Enlace de Dados	18
2.1.3	Camada de Rede	18
2.1.4	Camada de Transporte	18
2.1.5	Camada de Seção	19
2.1.6	Camada de Apresentação	20
2.1.7	Camada de Aplicação	20
2.2	Camada Física e de Enlace com a tecnologia LoRa™	21
2.2.1	Comunicação em <i>spread spectrum</i>	21
2.2.1.1	O teorema de <i>Shannon-Hartley</i>	21
2.2.1.2	Os princípios do <i>spread spectrum</i>	22
2.2.1.3	<i>Spread spectrum</i> utilizando modulação <i>Chirp</i>	23
2.2.1.4	LoRa™ <i>spread spectrum</i>	23
2.2.1.5	Propriedades e Características	24
2.2.1.6	Orçamento do Enlace LoRa™	25
2.2.2	Elementos de Atenuação e Interferência	26
2.2.2.1	Mecanismos de Propagação Multicaminho	26
2.2.3	Links Limitados de Interferência	26
2.3	Camada de Rede com a tecnologia LoRaWAN™	27
2.3.1	Redes Tipo Estrela	27
2.3.2	Redes Tipo Malha	27
2.3.3	Topologia da rede LoRaWAN™	28
2.4	Planejamento da Rede	28
2.4.1	Capacidade	29
2.4.2	Orçamento do Enlace	29
2.4.3	Otimização do <i>Throughput</i>	30
2.5	Hardware	30
2.5.1	Transceptor LoRa™ sem fio Hope RFs RFM95	30
2.5.2	Kit Adafruit RFM95W	30

2.6	Microcontrolador Texas Instruments TM4C123GH6PM	31
2.6.1	Kit Launchpad EK-TM4C123GXL	31
3	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	33
3.1	Desenvolvimento de driver para o módulo RFM95W em arquitetura TM4C	33
3.1.1	Especificações da Comunicação com Módulo RFM95W	33
3.1.1.1	Comunicação SPI	33
3.1.1.2	Características do Driver	33
3.1.2	Estrutura do pacote LoRa	34
3.1.3	Rotinas de Envio e Recebimento de Pacotes	34
3.1.4	Esquemas Físicos de Ligação e Montagem	34
3.2	Testes de comunicação	35
3.2.1	<i>Throughput</i>	36
3.2.2	<i>Round Trip Time</i>	37
3.2.3	<i>Packet Loss</i>	37
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
4.1	Escalabilidade	39
	REFERÊNCIAS	41

1 Introdução

A evolução do novo paradigma máquina-para-máquina (M2M, do inglês *machine to machine*) e internet das coisas (IOT, do inglês *internet of things*) sugerem aplicações dos mais variados propósitos. Porém, as características das comunicações M2M são desafiantes em termos de conectividade, eficiência e capacidade com respeito às opções tradicionais de redes de telecomunicações. Em particular, redes para dispositivos relacionados ao novo paradigma IoT podem ser instauradas em ambientes amistosos e em grande quantidade. Sendo assim, este tipo de rede requer uma solução peculiar em relação aos sistemas de telecomunicações tradicionais.

Redes de baixa potência para grandes áreas encontram-se disponíveis há alguns anos. Porém a demanda por dispositivos de baixo custo que atendam os requisitos de conectividade com a internet e exigências em termos de diminuição de potência tem aumentado. Melhorias nas tecnologias de fabricação de semicondutores baixou o consumo de potência dos dispositivos sensores a níveis que tornaram viáveis a criação de nós de sensores alimentados à bateria. Tornou-se viável, então, a utilização de bandas de rádio de longo alcance abaixo da faixa de GHz não reguladas que podem ser mais econômicas em relação ao custo que as bandas de telefonia celular.

O termo LPWAN do inglês *low-power wide-area network*, que significa rede de baixa potência e longo alcance, tem sua primeira aparição em 2014 em artigo publicado na 10ª Conferência Internacional de Comunicações sem Fio (XIE; XU; LEI, 2014). No artigo, o autor avalia a aplicação das LPWANs a fim de selecionar um método de Avaliação Clara de Canal (*Clear Channel Assessment* ou CCA) aplicável.

Após o ano de 2014, houve uma explosão de referências científicas com foco direto em redes com as características citadas, apesar de patentes como a do transmissor *Low Power Long Range* (SELLER; SORNIN, 2014) ou comercialmente LoRa™, adquirida posteriormente pela empresa Semtech, terem sido registradas anos antes.

Atualmente no mercado existem diversas soluções para este tipo de rede. Dentre elas, as mais populares subdividem-se em dois grupos básicos:

LoRa™: tecnologia de modulação de rádio *chirp spread spectrum* utilizado pelo padrão LoRaWAN™ mantido pela LoRa™ Alliance™.

UNB (*Ultra Narrow Band*): tecnologia de modulação de rádio em banda estreita (< 1 kHz) para conseguir propagações em distâncias superiores a 5 km em áreas urbanas utilizadas por padrões como SigFox.

As redes LPWAN necessitam que sua própria infraestrutura seja lançada, isto é, não é possível reaproveitar a estrutura das redes de telecomunicações preexistentes para sua implantação. O processo de adoção de LPWANs era bastante lento devido a baixa demanda por aplicações e pelo motivo anteriormente citado. O primeiro motivo, o que refere-se a aplicações, tem crescido cada vez mais devido a demanda por uma maior quantidade de informações dos ambientes urbanos. O segundo motivo, deixou de ser um impedimento, uma vez que, usando as bandas abaixo dos GHz, tornou-se possível que um número menor de estações seja requerida para suportar uma grande quantidade de nós sensores sem fio. Sendo assim, o custo para lançar uma nova infraestrutura de telecomunicações tem baixado consideravelmente.

Existem diferentes opiniões dentre os desenvolvedores de redes para sensoriamento. Tecnologias como a LoRaTM da Semtech podem ser usadas para construir LPWANs privadas para um grupo de nós sem fio. Ou redes como SIGFOX podem ser usadas para evitar a instalação e conexão de estações base. Outros tipos de LPWAN estão sendo desenvolvidas com novos protocolos como a *Weightless*. A escolha por um tipo de rede LPWAN determina a escolha do transceptor sem fios para o dispositivo de sensoriamento. Sendo assim, um estudo dos requisitos da aplicação deve ser feito para garantir que a rede atenda as necessidades da aplicação.

Apesar de cumprirem papéis equivalentes e terem desempenhos semelhantes as tecnologias dominantes são essencialmente distintas, uma vez que a tecnologia LoRaTM emprega modulação em banda larga, enquanto que a tecnologia UNB emprega modulação em banda ultra estreita.

A modulação em banda ultra-estreita utiliza um hardware muito mais simples que a tecnologia de modulação de sinal *chirp* em espectro espalhado. Ambas as tecnologias garantem baixa potência e longo alcance apesar de essencialmente distintas.

A modulação em banda-larga tem uma taxa de transmissão maior e utiliza um hardware mais complexo, o que significa maior consumo energético, mesmo assim, a tecnologia consegue obter desempenho semelhante as redes de banda estreita introduzindo ganho por codificação.

Como resultado, dentre as duas tecnologias que prevalecem, os desempenhos são similares, sem grandes diferenças quando a taxa de transmissão e o alcance. Optou-se pela tecnologia LoRaTM devido o fato de que o hardware já estava disponível para utilização no momento do estágio.

1.1 Objetivo

O presente trabalho de estágio tem como objetivo o desenvolvimento técnico, posteriormente construtivo, de uma rede de sensores LoRaTM para aquisição de dados bem como a integração a uma infraestrutura de monitoramento baseada em internet das coisas.

Como atividades deste projeto enumeram-se:

1. Construção de rotinas para utilização do Kit LoRaTMRFM95W da Adafruit com o kit de desenvolvimento *Lauchpad* da Texas Instruments EK-TM4C123GXL.
2. Teste da infraestrutura.

1.2 Local do Estágio

O estágio obrigatório supervisionado foi realizado no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas - LEIAM, cujo mesmo está localizado no bloco CH da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O LEIAM é um laboratório que concentra as seguintes linhas de pesquisa:

- Eletrônica de Potência;
- Acionamento de Máquinas;
- Fontes alternativas de Energia;
- Qualidade de Energia;
- Sistemas de simulação em tempo real;
- Conversores Estáticos;
- Sistemas embarcados.

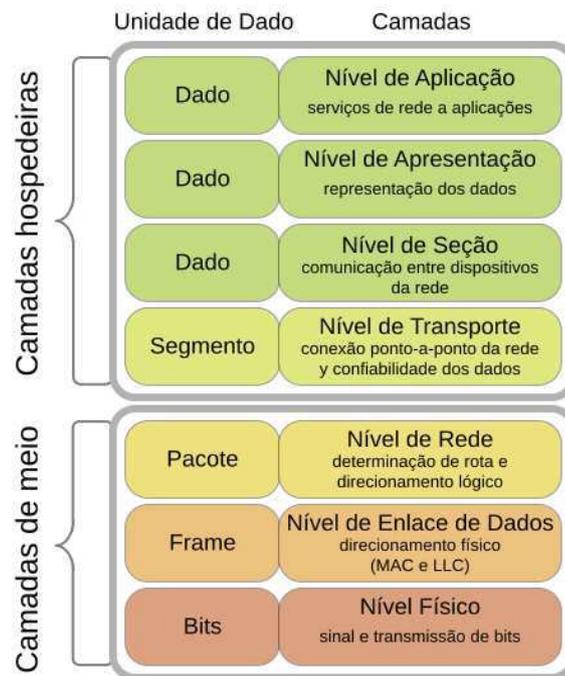
2 Fundamentos Teóricos

Neste ponto, introduzir-se-á o hardware utilizado durante o estágio para construção da solução de rede, bem como os detalhes técnicos referentes a construção da rede LoRa™.

2.1 O Modelo OSI

O modelo de conexão de sistemas abertos ISO/IEC 7498-1 mais conhecido como modelo OSI (do inglês *Open System Interconnection*) é um modelo de referência para os protocolos de rede de arquitetura em camadas, criado no ano de 1980 pela Organização Internacional de Normatização (ISO, *International Organization for Standardization*). Foi publicada em 1983 pela União Internacional de Telecomunicações (UIT) e desde 1994, a ISO também o publicou como padrão.

Figura 1 – Diagrama do modelo OSI



Fonte: (COMMONS, 2017)

2.1.1 Camada Física

É a primeira camada do modelo OSI e se encarrega da topologia da rede e das conexões globais do computador até a rede, nesta camada encontra-se o meio físico e a forma em que se transmite a informação.

O escopo da camada física é composto pelos seguintes itens básicos:

- Definir os meios físicos da comunicação.
- Definir as características funcionais da interface.
- Manejar sinais elétricos do meio de transmissão.

No caso da tecnologia LoRaTM, a camada física trata-se justamente do meio: radio-frequência, os esquemas de modulação utilizados pela tecnologia. Posteriormente, a parte física da tecnologia será apresentada com detalhes e assim, portanto, serão esclarecidos os detalhes sobre a camada física com maior riqueza de detalhes.

2.1.2 Camada de Enlace de Dados

Esta camada é responsável pela detecção de erros, distribuição ordenada de nós, por o controle do fluxo de dados e o acesso ao meio. Um conjunto de dados a ser entregue para transmissão na camada física é denominado *frame*. A camada de enlace encarrega-se de garantir que pacotes da camada de rede sejam entregues ao elemento imediatamente conectado através do meio físico.

Na tecnologia LoRaTM, a detecção de colisões ocorre por uma escuta preliminar do canal e na observação durante a transmissão se há alguma recepção. A técnica assemelha-se ao do protocolo ALOHAnet([ALLIANCE, 2018](#)).

2.1.3 Camada de Rede

O nível de rede no modelo OSI refere-se ao nível em que ocorre o encapsulamento da informação em pacotes. O objetivo da camada de rede é fazer com que dados originados em um nó cheguem a um destino, mesmo que eles não estejam conectados diretamente.

Entre nós de uma rede LoRa, a parte dos records, o máximo de distância que uma transmissão pode chegar é em torno de 10 Km. A camada de rede encarrega-se de construir um protocolo em que a informação possa ultrapassar a fronteira dessa limitação inicial utilizando outros nós da rede.

Na internet, por exemplo, a camada de rede refere-se ao protocolo IP. No contexto das redes LPWAN aqui discutidas, a tecnologia LoRAWANTM implementa as funcionalidades da camada de rede para dispositivos que usam a tecnologia LoRaTM.

2.1.4 Camada de Transporte

Os propósitos da camada de transporte consistem basicamente em prover transferência transparente de dados entre entidades de seção. Entende-se por entidades de seção,

aplicações que implementam as funcionalidades inerentes a camada de seção. Sendo assim, o serviço que a camada de transporte oferece é o de gerenciar a confiabilidade da comunicação. O protocolo TCP pertencente a pilha da internet garante a confiabilidade da conexão e é considerado um protocolo de transporte.

Na tecnologia LoRa™ ou LoRaWAN™ não há um protocolo de transporte que efetivamente entregue funcionalidades necessárias para saber se há ou não uma conexão entre dois pontos.

2.1.5 Camada de Seção

Para o entendimento da camada de seção, deve-se levar em conta as seguintes definições:

Gerenciamento de símbolos Uma faculdade de um serviço de seção é permitir que entidades de apresentação controlem o direito de exercer certos serviços de seção.

Modo *duplex*: Um modo de interação entre entidades de apresentação que concorrentemente mandam ou recebem dados;

Modo *half-duplex*: Um modo de interação em que uma dada instância apenas uma de duas entidades de apresentação tem permissão de enviar ou receber dados;

Sincronização de conexão de seção: Uma capacidade de um serviço de seção que permite que entidades de apresentação definam e identifiquem pontos de sincronização e resetem uma conexão de seção a um estado predeterminado e permita acordar um ponto de resincronização.

O propósito da camada de seção é prover meios necessários para cooperação entre entidades de apresentação, organizar e sincronizar os seus diálogos e gerenciar a troca de informação. Para tal, a camada de seção provê serviços para estabelecer uma conexão de seção entre duas entidades de apresentação e suportar o ordenamento de transferência de dados.

Para redes sem conexão a camada de seção corresponde apenas ao provimento de mapeamento entre um endereço de seção e um endereço de transporte.

Um endereço de seção mantém geralmente uma relação de um para muitos endereços de transporte. Mesmo ocorrendo a existência deste tipo de relação, multiplexação não faz parte do escopo da camada de seção. Sendo assim, observa-se que a manutenção de diversas conexões simultaneamente faz parte do escopo da camada em questão.

2.1.6 Camada de Apresentação

A camada de apresentação encarrega-se da codificação e decodificação dos dados provenientes da camada de aplicação, servindo a um propósito abstrato como a compressão da informação.

É interessante que, para um sistema com grandes restrições de banda, uma camada de apresentação faça-se presente. Quando há poucas restrições quanto a banda de um sistema, como é o caso da internet, a camada de apresentação é geralmente descartada da pilha de comunicação. Como exemplo de um sistema de comunicação que tipicamente não foi desenvolvido com vistas em desempenho e não implementa uma camada de apresentação em sua definição, tem-se a pilha TCP/IP. De forma concreta o HTTP, camada de aplicação sobre a pilha TCP/IP, a priori não define nenhuma apresentação compacta da informação que veicula.

2.1.7 Camada de Aplicação

As seguintes definições são pertinentes à compreensão da camada de aplicação no modelo OSI:

Entidade de Aplicação: Um elemento ativo em um processo de aplicação, incorpora um conjunto de capacidades que serve a um propósito além da rede em si;

Sintaxe Abstrata: A especificação de unidades de dados para um protocolo de aplicação utilizando regras de notação independentes da técnica de codificação utilizada para representá-la.

O propósito da camada de aplicação é servir entidades de aplicação. Cada entidade define uma sintaxe abstrata. Cada entidade de aplicação está associado a um serviço.

Como exemplo a apresentação de hiper-texto em computadores pessoais é um serviço para o qual o protocolo HTTP define uma sintaxe abstrata independente de codificação, sendo assim, a implementação de dado protocolo configura-se como uma entidade de aplicação.

No caso do sistema em questão, a recepção de dados de sensores é um serviço que pode ser definido através de um protocolo independente de codificação de caracteres, sendo assim, a implementação deste protocolo utilizando a interface fornecida pelo protocolo LoRaTM pode ser, de forma grosseira, encarada como uma entidade de aplicação.

2.2 Camada Física e de Enlace com a tecnologia LoRa™

2.2.1 Comunicação em *spread spectrum*

2.2.1.1 O teorema de *Shannon-Hartley*

Fundamentalmente, é prudente antes de abordar a comunicação *spread-spectrum*, realizar uma breve revisão sobre o teorema de Shannon-Hartley. O teorema em questão debruça-se sobre a máxima taxa de transferência de informações dada uma largura de banda em um canal de comunicação com a presença de ruído.

O teorema estabelece que a capacidade do canal para um *link* de comunicação define a taxa máxima que a informação deve ser transferida em uma largura de banda específica na presença de ruído. A capacidade, segundo o teorema, é então definida pela [Equação 2.1](#).

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.1)$$

onde:

C Capacidade em (bits/s)

B Largura de banda (Hz)

S Potência média do sinal recebido (Watts)

N Ruído médio ou potência da interferência (Watts)

S/N Relação entre o sinal e o ruído (SNR)

Segue que, manipulando a [Equação 2.1](#), da base binária para a neperiana é possível encontrar a relação dada pela [Equação 2.4](#).

$$\frac{C}{B} = 1.433 \frac{S}{N} \quad (2.2)$$

Para aplicações *spread spectrum* a relação sinal-ruído é pequena, desde que a potência do sinal seja tipicamente abaixo do nível de ruído. Assumindo um nível de ruído tal que $S/N \ll 1$, a [Equação 2.4](#) pode ser reescrita como.

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (2.3)$$

ou

$$\frac{N}{S} = \frac{B}{C} \quad (2.4)$$

Da [Equação 2.4](#) pode ser visto que para transmitir uma informação sem erro em um canal com uma relação sinal ruído fixa, a única necessidade é que a largura de banda do canal tenha que ser aumentada.

2.2.1.2 Os princípios do *spread spectrum*

Nota-se acima que o aumento da largura de banda do sinal pode compensar a degradação do sinal dado o aumento do ruído. Em sistemas *spread spectrum* de sequência direta, a fase da portadora da transmissão muda de acordo com a sequência de codificação. O processo é geralmente obtido através da multiplicação do dado por uma codificação de espalhamento conhecida como sequência chip. A sequência *chip* ocorre a uma taxa muito mais alta que a do sinal, espalhando o sinal para uma banda além da largura de banda original do sinal.

No receptor, o dado pode ser recuperado pela multiplicação com uma réplica local da sequência de espalhamento. Este processo de multiplicação no receptor efetivamente comprime o dado novamente à largura de banda do espectro original após filtragem.

A quantidade de espalhamento, para a sequência direta, é dependente da quantidade de "chips por bit". A taxa da sequência *chip* para a taxa de dados é requerida é referida como o ganho de processamento G_p . Típicamente expressa em dB.

$$G_p = 10 \log_{10} \left(\frac{R_C}{R_b} \right) (dB) \quad (2.5)$$

onde

R_C refere-se a taxa de *chip* (*chips* por segundo)

R_b refere-se a taxa de bits (bits por segundo)

A interferência é reduzida pelo ganho de processamento no receptor advinda do algoritmo de correção de erros presente no protocolo.

O espectro espalhado de síntese direta é amplamente utilizado em transmissões de transferência de dados. Porém, baixo custo e restrições em potência torna esta tecnologia desafiante no âmbito das redes de longo alcance e baixa potência.

Típicamente, como é o caso do GPS ou do DSSS PHY do padrão IEEE 802.15.4k, o sistema requer uma fonte de *clock* muito precisa, o que significa custo elevado. Adicionalmente, quando mais longo o código de espalhamento, maior o tempo requerido para o receptor realizar a correlação entre todo o comprimento da sequência.

2.2.1.3 Spread spectrum utilizando modulação Chirp

A modulação *chirp spread spectrum* foi desenvolvida para aplicações de radar em meados de 1940. Foi tradicionalmente utilizada em diversas aplicações militares e de segurança. Ao longo de vinte anos, esta técnica vem sendo adotada pelo seu custo relativamente baixo em relação às necessidades de potência, além de robustez em relação à degradação do canal como múltiplos caminhos, desvanecimento, efeito doppler e outros.

Um transmissor *chirp spread spectrum* foi adotado pelo IEEE para redes pessoais sem fio de baixa taxa de transmissão (LR-WPANs) no padrão 802.15.4 para aplicações que requerem um maior alcance e mobilidade conseguidas com outras formas de modulação.

2.2.1.4 LoRa™ spread spectrum

Na modulação LoRa, o espectro espalhado é conseguido através da geração de um sinal *chirp* que varia continuamente em frequência. Uma vantagem desse método é que a temporização e os offsets em frequência entre o transmissor e o receptor são equivalentes, reduzindo em grande parte a complexidade do desenho do receptor. A largura de banda em frequência do sinal *chirp* é equivalente a largura de banda espectral do sinal original.

O dado é modulado pela técnica de espectro espalhado e modulado posteriormente com o sinal *chirp*. A relação entre a taxa de dados e a taxa de símbolos requerida para a comunicação LoRa™ pode ser expressa da forma dada pela [Equação 2.6](#).

$$R_b = SF \left[\frac{1}{\left(\frac{2^{SF}}{BW} \right)} \right] \quad (2.6)$$

Onde,

SF fator de espalhamento (7 ... 12)

BW largura de banda (Hz)

Define-se o período do símbolo, T_S como:

$$T_S = \frac{2^{SF}}{BW} \text{ segundos} \quad (2.7)$$

A taxa de símbolos, portanto, é a recíproca de T_S :

$$R_S = \frac{1}{T_S} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ símbolos/segundo} \quad (2.8)$$

Finalmente nós podemos definir a taxa de *chip* R_C , como:

$$R_C = R_S \cdot 2^{SF} \text{ chips/segundo} \quad (2.9)$$

Logo

$$R_C = BW \quad (2.10)$$

A técnica de modulação LoRaTM também inclui um esquema de correção de erro que aumenta a robustês do sinal transmitido. Define-se a taxa nominal de bits do sinal como:

$$R_b = SF \frac{\left(\frac{4}{4+CR}\right)}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \quad (2.11)$$

onde

SF fator de espalhamento (7 ... 12)

CR taxa de codificação (1 ... 4)

BW largura de banda (Hz)

Define-se a taxa de codificação como:

$$\text{Taxa de Codificação} = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.12)$$

Sendo assim, a taxa nominal de bits pode ser reescrita como:

$$R_b = SF \frac{\text{Taxa de Codificação}}{\frac{2^{SF}}{BW}} (\text{bits/segundo}) \quad (2.13)$$

2.2.1.5 Propriedades e Características

A modulação LoRaTM é duplamente escalável em banda e em frequência. É possível utilizá-la com salto em frequência em banda estreita, ou aplicações de modulação em sequência direta. A técnica LoRaTM pode ser adaptada para ser facilmente utilizada em ambos os modos de operação.

De forma semelhante à modulação FSK, LoRa™ possui um esquema de modulação com envelope constante. Sendo assim, os estágios de amplificação de potência de alta eficiência, desenvolvidos para a técnica FSK, podem ser reutilizados sem modificação quando o transceptor integra as duas técnicas, como é o caso do RFM95W. Em adição, devido ao ganho por processamento, a potência de saída do transmissor pode ser reduzida comparada a técnicas convencionais como a modulação FSK, mantendo o mesmo ou até melhor o custo do enlace de comunicação.

A modulação *chirp* é um sinal de banda relativamente larga, portanto, LoRa™ oferece imunidade a múltiplos caminhos e desvanecimento, tornando-a ideal para ambientes urbanos.

Redes baseadas na modulação LoRa™ são ideais para aplicações em movimento, uma vez que, variações devido ao efeito dopler introduzem apenas pequenas variações no domínio do tempo na banda base do sinal original. Tornando a técnica aplicável em leitores de etiquetas, sensores automotivos e para infraestrutura de transporte.

Para uma potência fixa, um link LoRa™ pode ser mais caro que uma modulação FSK pura. Quando levado em consideração o conjunto de robustês (técnicas de correção de erros, *spread spectrum*), o alcance para uma mesma potência é maior com um link LoRa™ do que com a modulação FSK. Para conseguir o mesmo desempenho, a modulação FSK geralmente necessita de quatro vezes mais potência que um link LoRa™.

2.2.1.6 Orçamento do Enlace LoRa™

O orçamento do enlace de um sistema sem fio é a medida que contabiliza os ganhos e perdas tanto transmissor quanto do canal de propagação para o receptor alvo. Estes ganhos e perdas incluem ganhos do sistema e perdas associadas à antena, às redes de casamento e às perdas associadas ao canal de propagação propriamente dito (por modelagem ou por medição).

Os mecanismos que variam aleatoriamente, como os desvanecimentos multi-caminhos e efeito Doppler, são levados em conta pela adição fatorada da margem antecipada de severidade. Sendo assim, é possível expressar o orçamento do enlace através da seguinte equação:

$$P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + G_{sistema}(dB) - L_{sistema}(dB) - L_{canal}(dB) - M(dB) \quad (2.14)$$

Onde,

P_{RX} corresponde à potência incidente no receptor;

P_{TX} corresponde à potência transmitida;

$G_{sistema}$ corresponde ao ganho do sistema como aos associados a antenas, etc;

$L_{sistema}$ corresponde às perdas devido ao canal de propagação, calculado através de dados empíricos ou modelos da região onde o canal será utilizado;

M Margens de desvanecimento, novamente calculado ou obtida através de dados empíricos.

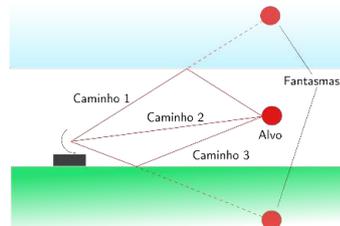
Um canal de comunicação é dito limitado em enlace quando as perdas associadas ao canal causam ao nível de potência incidente, no receptor, ser menor que o requerido para atender os requisitos de relação sinal ruído para uma demodulação correta.

2.2.2 Elementos de Atenuação e Interferência

2.2.2.1 Mecanismos de Propagação Multicaminho

Multicaminho é um fenômeno de propagação que ocorre quando o receptor recebe o mesmo sinal por mais de um caminho distinto, como por exemplo a reflexão em construções, montanhas e grandes corpos lóticos. Esse fenômeno dá origem a interferência construtiva e destrutiva. No último caso, o da interferência destrutiva, é observado desvanecimento das bordas do sinal.

Figura 2 – Diagrama conceitual da propagação por múltiplos caminhos



Fonte: (CONTRIBUTORS, 2017)

Os mecanismos de desvanecimento podem ser considerados planos ou seletivos em frequência. No caso em que é plano, a largura de banda do canal de propagação é maior que o sinal transmitido.

2.2.3 Links Limitados de Interferência

A operação dentro de faixas não licenciadas não garantem qualidade de serviço, uma vez que estão sujeitos a interferência ao invés de limitação no orçamento do enlace. Um cenário típico é o de muitos transmissores transmitindo simultaneamente, em um mesmo espaço, ao passo que tentam acessar a mesma banda de frequências, no mesmo período de tempo.

Existem diversos mecanismos que almejam a mitigação de situações como a apresentada anteriormente, seja por regulamentação, seja por mecanismos de concessão voluntária do meio. Sistemas de banda estreita geralmente implementam o *frequency hopping* para evitar operações repetidas no mesmo canal de frequência. Este recurso também é utilizado para mitigar o problema de múltiplos caminhos, contudo, os saltos em frequências podem levar a perda de pacotes e sincronia, uma vez que o salto pode ocorrer em um canal já ocupado.

Dado que modulação LoRa™ prevê a utilização da tecnologia em questão, sua utilização no módulo RFM95W é facultativa.

2.3 Camada de Rede com a tecnologia LoRaWAN™

2.3.1 Redes Tipo Estrela

As redes do tipo estrela são as formas mais comuns de topologia de rede, principalmente para as redes em que existem nós com restrições de consumo de potência. Essas redes são relativamente simples de implantar, pois todo o tráfego é coordenado por um nó central.

A coordenação do nó central ajuda a diminuir o tráfego na rede, sendo facilmente gerenciável, uma vez que a substituição de um nó na extremidade da rede não quebra a comunicação de outros nós. Por outro lado, se o nó central quebra, toda a comunicação da rede está comprometida.

Figura 3 – Topologia estrela de rede

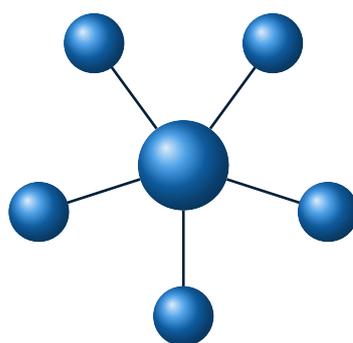


Figura 4 – Star Network Topology

Fonte: Autoria Própria

2.3.2 Redes Tipo Malha

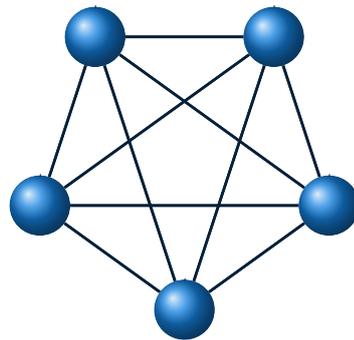
As redes do tipo malha são caracterizadas por uma topologia em que todos os nós podem ser responsáveis pela transmissão de dados, propagam dados redundantemente,

empregam tabelas de roteamento e são auto roteáveis.

A vantagem destas redes é a capacidade de serem seguras no caso de único ponto de falha. Nesse caso, a informação é transmitida através de um caminho alternativo.

Este tipo de rede possui também desvantagens, como a complexidade de sua implantação devido a quantidade de dados que a topologia, por definição, faz com que a rede tenha que lidar, gerando assim um alto tempo de atividade. Este tipo de rede, geralmente não se aplica a requisitos em que os nós possuem restrições no consumo de energia.

Figura 5 – Topologia malha de rede



Fonte: Autoria Própria

2.3.3 Topologia da rede LoRaWAN™

Com a tecnologia LoRa™, é possível optar pela implementação de qualquer uma das topologias mencionadas, uma vez que o protocolo reside na camada física da pilha OSI. LoRaWAN™, por sua vez, implementa a topologia tipo estrela, cujo o nó coordenador da rede é tipicamente denominado *gateway*, pois, atua como uma interface entre a rede LoRaWAN™ e outro protocolo de rede, como TCP/IP.

2.4 Planejamento da Rede

Conforme supracitado, a rede de sensores LoRaWAN™ foi concebida com topologia estrela, onde existem nós satélites e um concentrador que recebe todos os dados da rede. O esquema de endereçamento permite até 254 endereços para nós satélites, um endereço de broadcast e um endereço para o concentrador.

Cada nó da rede é composto por um elemento microcontrolador e um transceptor (*transceiver*) LoRa™ RFM95W. O nó concentrador da rede é composto por um transceptor LoRa™ e uma Raspberry Pi 3 Model B. Os nós satélites são dispositivos atômicos que enviam dados de sensoriamento e recebem dados desde o nó concentrador para atuação. Cada pacote enviado ou recebido na rede possui até 256 bytes, os quais podem ser codificados de acordo com o tipo de informação a ser transmitida.

O protocolo LoRaTM está no nível físico. Encapsula-se um novo protocolo orientado à aplicação, dado que o protocolo LoRaTM não deve ser contemplado por este relatório uma vez que a abertura do mesmo implica em desvantagens com respeito à segurança das aplicações a serem desenvolvidas pelo laboratório.

2.4.1 Capacidade

Considerando um canal de 125 kHz e tomando vantagem do fator de espalhamento ortogonal, a capacidade do canal pode ser calculada como mostrado a seguir.

$$\begin{aligned} \text{Capacidade}_{LoRa} &= 1 \times (SF12 + SF11 + SF10 + SF9 + SF8 + SF7 + SF6) \\ &= 293 + 537 + 976 + 1757 + 3125 + 5968 + 9375 \\ &= 21,531kb/s \end{aligned}$$

Como é possível ver, a modulação LoRaTM provê uma capacidade total de 21,5 kb/s e, comparado com a capacidade do canal de uma modulação FSK comum, tem-se um ganho de 50%, visto que a capacidade do mesmo canal utilizando a modulação FSK é em torno de 14,4kb/s.

2.4.2 Orçamento do Enlace

Com diferentes fatores de espalhamento a [Tabela 1](#) mostra o custo do enlace para cada tipo de esquema de modulação. Observa-se uma sensibilidade mínima de -137 dBm para um fator de espalhamento 12 ($2^{12} = 4096$ símbolos ou *chips*).

Tabela 1 – Orçamento do enlace para diferentes modos de fator de espalhamento

Modo	Taxa de bits equivalente(kb/s)	Sensibilidade (dBm)
LoRa TM SF = 12	0.293	-137
LoRa TM SF = 11	0.537	-134.5
LoRa TM SF = 10	0.976	-132
LoRa TM SF = 9	1.757	-129
LoRa TM SF = 8	3.125	-126
LoRa TM SF = 7	5.468	-123
LoRa TM SF = 6	9.375	-118

Fonte:

2.4.3 Otimização do *Throughput*

Para redes sem fio, é esperado que as perdas de propagação aumentem com a distância entre o nó final e o coordenador da rede. Para estender o alcance das redes tipo estrela a adição de repetidores faz-se necessária.

As redes LoRaTM podem minimizar os custos tomando vantagem da propriedade de sinais com um diferente fator de espalhamento. Nós que localizam-se perto do coordenador, onde as perdas são menores, podem transmitir a uma taxa de dados maior. Quando as perdas aumentam devido ao distanciamento, o *throughput* pode ser diminuído aumentando o fator de espalhamento ou reduzindo a largura de banda.

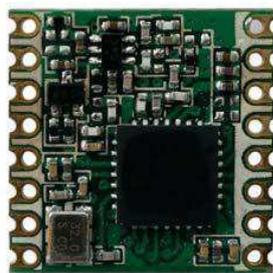
2.5 Hardware

2.5.1 Transceptor LoRaTM sem fio Hope RFs RFM95

O transceptor LoRaTM possui um modem de longo alcance que provê comunicações em espectro espalhado com alta imunidade a interferência consumindo uma mínima corrente.

Utilizando a técnica de modulação LoRaTM, o módulo pode alcançar até -148 dBm de sensibilidade a um baixo custo. O módulo integra um amplificador de potência que entrega 20 dBm a saída do sistema, sendo adequado a aplicações que necessitam robustês e distância.

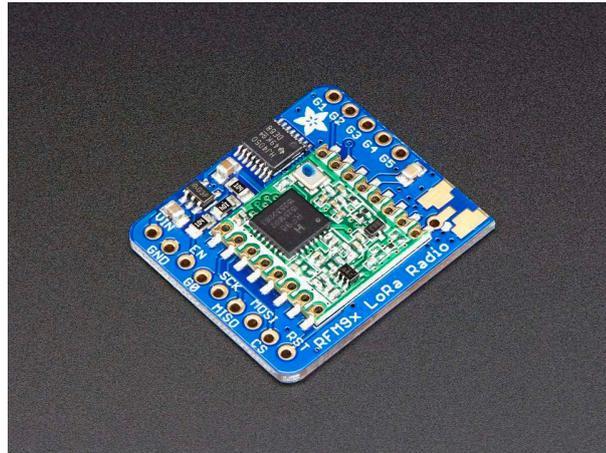
Figura 6 – Módulo LoRaTM RFM95/96/97/98W fabricado pela Hope RF



Fonte: Disponível em ([HOPERF, 2018](#))

2.5.2 Kit Adafruit RFM95W

Para prototipagem rápida, escolheu-se o kit fabricado pela empresa *Adafruit Industries* RFM95W que utiliza o rádio RFM95W da Hope RF, mas integra um conversor de nível e um regulador de tensão para manter a compatibilidade elétrica com dispositivos que operam a 5 V, uma vez que a tensão suportada pelo dispositivo é de no máximo 3.3V.

Figura 7 – Módulo LoRaTM RFM95W comercializado pela *Adafruit Industries*

Fonte: Disponível em ([ADAFRUIT, 2018](#))

2.6 Microcontrolador Texas Instruments TM4C123GH6PM

O microcontrolador TM4C123GH6PM é um dispositivo da família ARM Cortex M4 com um conjunto amplo de funcionalidades integradas. Possui uma FPU (*floating point unit*) que permite a realização de cálculos em ponto flutuante com uma maior velocidade. Além disso, possui diversas outras funcionalidades, como módulos criptográficos integrados.

Para este projeto, o Cortex M foi escolhido como processador para a aplicação por suas capacidades de monitoramento e economia de energia, bem como as possibilidades de desenvolvimento, pois dispõe de uma biblioteca padrão suportada pelo próprio fabricante a *TivaWare*.

2.6.1 Kit Launchpad EK-TM4C123GXL

O kit de desenvolvimento Launchpad EK-TM4C123GXL utiliza um microcontrolador TM4C123GH6PM com uma infraestrutura pronta para utilização como:

- Porta de depuração USB 2.0 (*In circuit Debugging Interface*);
- Porta USB 2.0 Host/Device/OTG + PHY;
- Um LED multicolor RGB;
- Conversores analógicos digitais com 12 bits de resolução (ADC);
- Modulação por largura de pulso (PWM);
- Transceptor Assíncrono universal (UART);

- Barramento inter circuitos integrados (I^2C);
- Barramento interface de periféricos seriais (SPI);
- Portas de entrada e saída de propósitos gerais (GPIO);
- Tabela de interrupções programável com 255 registros (NVIC);
- Botões soldados à placa base para uso como entrada digital;
- Botão de reset;
- Memória flash 256 KB;
- Memória RAM Estática 32 KB.

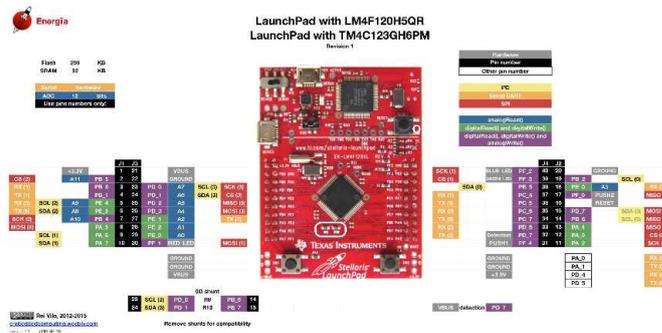


Figura 8 – Kit de Desenvolvimento EK-TM4C123GXL com o Microcontrolador Cortex M4 da Texas Instruments TM4C123GH6PM

Fonte: Disponível em (ENERGIA.NU, 2018)

3 Atividades Desenvolvidas

A nível de estágio foram desenvolvidas atividades com foco em compatibilizar o microcontrolador TM4C123GH6PM com o módulo RFM95W. Além disso, testes de comunicação foram realizados entre os nós da rede a fim de comprovar o funcionamento dos trabalhos realizados.

3.1 Desenvolvimento de driver para o módulo RFM95W em arquitetura TM4C

3.1.1 Especificações da Comunicação com Módulo RFM95W

O módulo RFM95W da Hope RF possui uma interface SPI escrava e seis portas digitais de entrada e saída com função configurável. O módulo ainda possui registradores acessíveis da interface SPI com propósitos predeterminados a depender do modo de funcionamento, uma vez que o módulo possui dois modos de funcionamento, FSK/OOK e LoRa™.

3.1.1.1 Comunicação SPI

O módulo de radiofrequência é controlador através de seus registradores endereçados em um espaço de sete bits. Cada endereço é fornecido através de uma palavra de 8 bits sendo o último bit o sinal de escrita ou leitura. Seguindo o endereço, fornece-se o valor de escrita ou um valor genérico para que o sinal de *clock* seja passado e os dados sejam introduzidos na linha MISO (*master in slave out*) do barramento SPI.

Caso seja necessário escrever mais de um byte no endereço fornecido, como é o caso da FIFO de entrada e saída, os bytes são fornecidos seguindo o primeiro byte de dados sem desabilitar a linha de SS (*slave select*). Esta só é desativada quando toda a informação é transferida.

3.1.1.2 Características do Driver

Construiu-se um driver que torna possível a escrita e leitura de registradores do módulo RFM95W. O driver também possui uma máquina de estados que regula a escrita, leitura de pacotes na FIFO e acesso a mídia através do tratamento do estado CAD (*Channel Activity Detection*) do módulo RFM95W.

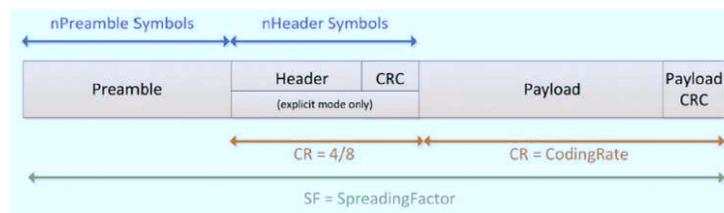
O driver parte de uma concepção monolítica que implementa funcionalidades pertencentes aos níveis inferiores do modelo de rede da pilha OSI. Mas é suficiente para

abstrair a comunicação entre dois nós de uma rede previamente configurados. Sendo assim, ele serve como um ponto de partida para implementação de abstrações mais robustas e versáteis.

3.1.2 Estrutura do pacote LoRa

Um pacote LoRaTM possui uma estrutura definida pelo pacote da Figura 9.

Figura 9 – Estrutura de um pacote LoRa



Fonte: <www.open-electronics.org>

Observa-se na estrutura do pacote a presença de um preâmbulo (*preamble*), um cabeçalho (*header*) e um conteúdo (*payload*). O Preâmbulo é utilizado pelo modem LoRaTM a fim de sincronizar a recepção. O cabeçalho detalha as características do conteúdo. O cabeçalho é opcional, uma vez que o modem pode trabalhar com um cabeçalho implícito ou explícito.

O modo explícito corresponde ao modo em que o cabeçalho existe no pacote LoRa e será utilizado pelo rádio a fim de decodificar o conteúdo. No modo implícito não há cabeçalho e toda a configuração da forma em que o payload é codificado deve ser realizada previamente nos modems.

3.1.3 Rotinas de Envio e Recebimento de Pacotes

Para enviar ou receber um pacote o modem segue um protocolo específico ilustrado pelas máquinas de estado das Figura 10a e Figura 10b.

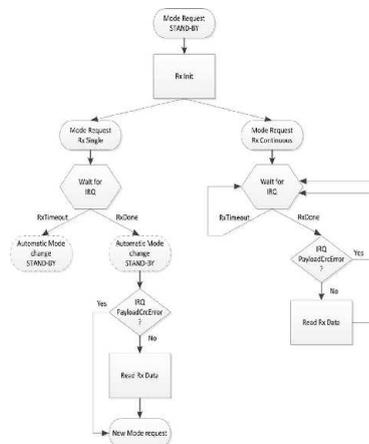
Para a máquina de estado de recepção, descartou-se a recepção em modo único evitando aumento de complexidade do driver construído.

3.1.4 Esquemas Físicos de Ligação e Montagem

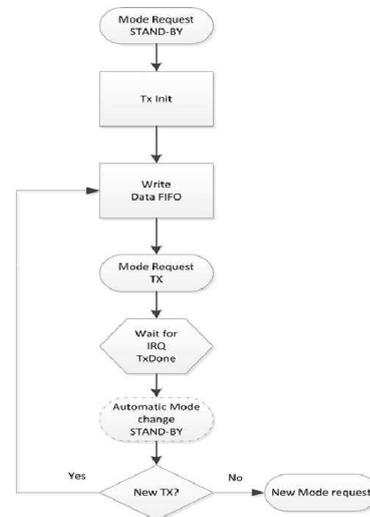
Uma tabela de ligações entre terminais do módulo RFM95W e o módulo EK-TM4C123GXL mostra as ligações realizadas a fim de manter a comunicação entre os dois dispositivos.

Figura 10 – Máquinas de Estado da recepção e envio de pacotes

- (a) Máquina de Estado da recepção de um pacote
 (b) Máquina de Estado do envio de um pacote



Fonte: <<http://www.hoperf.com>>



Fonte: <<http://www.hoperf.com>>

Tabela 2 – Ligações entre terminais do microcontrolador e kit LoRa RFM95W

EK-TM4C123GXL	RFM95W
+3.3V	VIN
GND	GND
PD0	GO
PD1	RST
PA5	MOSI
PA4	MISO
PA3	CS
PA2	SCK

A ligação preliminar para testes foi realizada com fios para prototipagem, o módulo foi conectado respeitando o descrito na Tabela 2 e o resultado da montagem de testes apresenta-se na Figura 11.

3.2 Testes de comunicação

Para experimentar o funcionamento do sistema, utilizou-se um esquema ponto a ponto, que envolve apenas dois dispositivos comunicando-se através do protocolo LoRaTM. Realizaram-se assim, experimento de *throughput*, *jitter*, *round-time-trip* e perda de pacote sob diferentes níveis de força de sinal recebido (*received signal strength intensity*, RSSI). O intuito dos experimentos é o de investigar as capacidades de comunicação que o sistema



Figura 11 – Montagem realizada durante o desenvolvimento do driver

Fonte: autoria própria

dispõe.

3.2.1 *Throughput*

O *throughput* de um sistema é a soma das taxas de dados que trafegam entre os terminais de uma rede. Considerando o sistema como a rede em questão, constata-se que o *throughput* é limitado por vários fatores, que incluem:

- o meio físico;
- gargalos de processamento;
- características dos protocolos que tomam a rede como meio.

Quando todos esses fatores são levados em conta, os dados úteis transferidos pelo sistema podem ser bastante inferiores do que o máximo *throughput* conseguido. Por sua vez, denomina-se *goodput* a parte útil dos dados que são transmitidos a nível de aplicação em uma rede. No caso deste trabalho, não há protocolos de aplicação desenvolvidos sobre a rede em questão, portanto, não há como realizar a determinação do *goodput* para o referido protocolo.

Realizou-se o teste de *throughput* sobre a rede enviando pacotes de 255 bytes. Escolheu-se o conjunto largura de banda maior, menor correção de erros e um fator de espalhamento quase mínimo. Pois esta configuração mostrou-se com maior *throughput*. Contabilizou-se um total de 10 kBytes válidos recebidos e o tempo total necessário para

que os dados fossem enviados com sucesso e reenviados de volta pelo nó oposto. O throughput da rede foi então calculado segundo a [Equação 3.1](#).

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Bytes Válidos Recebidos}}{\text{Tempo Total}} \quad (3.1)$$

Obteve-se que a rede possui um throughput máximo, em um ambiente que garante que não haja perda de pacotes em torno de 300 bytes por segundo o que é uma taxa aceitável para aplicações que necessitam de aplicações rápidas. O round time-trip neste caso ficou em torno de 1200 ms, mais que suficiente para aplicações de sensoriamento típicas em um ambiente industrial.

3.2.2 Round Trip Time

O round-trip time refere-se a quantidade de tempo que um pacote leva para ser enviado, adicionado do tempo em que ocorre uma resposta de *acknowledgement*, informando a quem enviou o pacote, que o mesmo foi recebido com sucesso. No caso da comunicação utilizando a tecnologia LoRa, não é previsto em protocolo a ocorrência de *acknowledgement*. Para simular o comportamento, um cliente tratou de enviar pacotes em broadcast e um servidor em retransmiti-los novamente a fim de verificar a variação do RTT para um esquema de modulação.

Constatou-se independentemente do RSSI o RTT não variou além do normalmente distribuído sobre a média do sinal mais intenso.

3.2.3 Packet Loss

Foi observado nas medições que a taxa de perda de pacotes aumenta com a diminuição da força do sinal. Isto se deve aos motivos discutidos anteriormente. Para quase todos os casos testados. No melhor caso observado, após -95 dBm. A taxa de perda de pacotes tornou-se superior a 50%.

4 Considerações Finais

4.1 Escalabilidade

A aplicação para uso no cliente tinha como intuito inicial preencher as lacunas deixadas pelos módulos de sensores WiFi no contexto das construções inteligentes (*smart buildings*). Observou-se que, diante desta aplicação, os módulos WiFi proporcionavam resposta satisfatória apenas em condições controladas, com distâncias da ordem de poucos metros e com poucos obstáculos. Em suma, esses módulos (WiFi) falharam principalmente quando foi necessário realizar o monitoramento de sistemas hidráulicos que estavam externos ao galpão, ou em ambientes ruidosos como casas de máquinas dos geradores e compressores.

Todavia, na definição da proposta de solução, verificou-se a oportunidade de expandir o conceito de sensores sem fio para módulos de comunicação a radiofrequência, viabilizando assim, não só o sensoriamento e a supervisão de estados como também a atuação em processos produtivos.

A solução com transceptores LoRaTM mostrou-se versátil ao passo que, ao investir tempo na definição da arquitetura da rede e no desenvolvimento dos drivers para as plataformas de prototipagem escolhidas, os recursos de hardware do sistema embarcado associado ficaram disponíveis, assumindo o rádio como ferramenta de comunicação, similar ao uso de *shields* (placas de circuito impresso compatíveis em pinagem que implementa alguma funcionalidade de hardware extra aos da placa base).

Referências

- ADAFRUIT. *Adafruit RFM95W LoRa Radio Transceiver Breakout - 868 or 915 MHz - RadioFruit*. 2018. Disponível em: <<https://www.adafruit.com/product/3072>>. Citado na página 31.
- ALLIANCE, L. *Lora Alliance Technology*. 2018. [Online; accessed 02-March-2018]. Disponível em: <<https://www.lora-alliance.org/what-is-lora>>. Citado na página 18.
- COMMONS, W. *File:OSI Model v1.svg — Wikimedia Commons, the free media repository*. 2017. [Online; accessed 20-February-2018]. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:OSI_Model_v1.svg&oldid=250373413>. Citado na página 17.
- CONTRIBUTORS, W. *Multipath propagation — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2017. [Online; accessed 20-February-2018]. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Multipath_propagation&oldid=808533194>. Citado na página 26.
- ENERGIA.NU. *Guide to the TM4C123 LaunchPad (EK-TM4C123GXL)*. 2018. Disponível em: <http://energia.nu/pin-maps/guide_tm4c123launchpad/>. Citado na página 32.
- HOPERF. *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module V1.0*. 2018. Disponível em: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf>. Citado na página 30.
- SELLER, O.; SORNIN, N. *Low power long range transmitter*. Google Patents, 2014. EP Patent App. EP20,130,154,071. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/EP2763321A1?cl=en>>. Citado na página 13.
- XIE, Z.; XU, R.; LEI, L. A study of clear channel assessment performance for low power wide area networks. In: *10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 311–315. Citado na página 13.