



Desenvolvimento de um protótipo nó de comunicação espacial LPWAN

Versão final

Sérgio Luís Souteiro Simões

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Mestrado integrado)

Orientador: Prof. Doutora Anna Guerman
Co-orientador: Engenheiro Jorge Monteiro

Novembro de 2021

Agradecimentos

Quando alguma coisa se torna proibida torna-se a mais apetecida. Desde cedo que o meu pai escondia toda a sua sabedoria em engenharia e me proibia de mexer em qualquer máquina que fosse. Sábio na matéria, não explicava e fazia qualquer coisa que fosse de interessante, o mais longe possível da minha vista.

Ele achava que esta não era a profissão indicada para mim, e afastava-me dela, mas apenas estava a alimentar mais a minha curiosidade. E eu movido pelo misticismo criado à volta das suas engenhocas desmontava qualquer coisa que estivesse em casa. Tudo era aberto durante o dia e fechado na sua hora da sua chegada.

A minha escolha tinha sido feita, não havia nada melhor para mim que num futuro trabalhar com máquinas. Hoje sinto que te dei uma prenda porque nada te dá mais gozo que poder trabalhar ao teu lado. Obrigado, Pai.

Um obrigado também à minha mãe pelo amor dado, este permitiu-me chegar ao fim de mais uma etapa. As saudades e a distância são enormes para nós, mas os grandes esforços permitem grandes feitos.

Não posso deixar de agradecer também à Catarina pelo seu amor e pela sua paciência interminável. O esforço de realizar esta dissertação foi facilitado por ti de uma forma inexplicável.

Um agradecimento ainda aos meus amigos que contribuíram para que estes anos fossem muito especiais.

Para além deles, um especial agradecimento ao meu coorientador e amigo Engenheiro Jorge Monteiro que me incentivou a estudar este tema.

Por fim deixo o meu agradecimento também à minha Orientadora Prof. Doutora Anna Guerman pelo seu auxílio ao longo deste percurso.

Resumo

A progressão tecnológica permitiu desenvolver recentemente placas de rede capazes de comunicar sob longas distâncias e a baixos consumos de energia. Estes dispositivos, do tipo Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), serão abordados neste documento permitindo desenvolver aqui um protótipo que permitirá colmatar algumas falhas desta tecnologia

No decorrer desta obra, o autor demonstrará passo por passo a metodologia necessária ao desenvolvimento de um nó funcional numa rede de comunicação espacial. Permitirá ainda efetuar avanços na literatura com o desenvolvimento de um nó capaz de comunicar sob duas frequências LoRa. Incluindo assim, neste documento, o desenvolvimento de um código e a seleção/modificação do hardware necessário à sua execução.

O desenvolvimento deste trabalho inicia-se com a delineação da arquitetura geral da missão. Após este planeamento, o autor procura selecionar o melhor equipamento para o desenvolvimento de um protótipo sob uma base de estudos e testes realizados ao longo desta dissertação.

Além do hardware, é também escrito o software essencial á missão, desenvolvendo todas as funções necessárias para permitir o bom funcionamento do nó. Foi desenvolvendo ainda um modo de poupança em função de TLE's e um estudo de segurança na rede de comunicações.

O desenvolvimento físico do nó é fundado maioritariamente em três estudos. O estudo de SNR que permite validar a comunicação espacial mediante a seleção do equipamento a implementar. O estudo, *data budget*, que permite calcular as características desta comunicação. E por fim, um estudo *power budget*, que estabelece todas as regras e características que permitirão a criação de um nó eletricamente autónomo.

Palavras-chave

LPWAN;LoRa;Nó de comunicação;Protótipo;SNR;*Data budget*;*Power budget*;

Abstract

The technological progression has recently allowed the development of transceivers capable of communicating over long distances and with low power consumption. These devices, of the Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) type, will be discussed in this document, allowing the development of a prototype that will allow to solve some of the shortcomings of this technology.

Throughout this work, the author will demonstrate step by step the methodology needed to develop a functional node in a space communication network. It will also allow advances in literature with the development of a node capable of communicating under two LoRa frequencies. This document includes the development of a code and the selection/modification of the necessary hardware for its execution.

The development of this work begins with the outlining of the overall mission architecture. After this planning, the author seeks to select the best hardware for the development of a prototype under a base of studies and tests performed throughout this dissertation.

Besides the hardware, the essential software for the mission is also written, developing all the necessary functions to allow the node to work properly. It also develops a sleep mode in function of TLE's and a study of security in the communications network.

The node's physical development is based mainly on three studies. The SNR study that allows validating the spatial communication by selecting the equipment to implement. The data budget study, which allows to calculate the characteristics of this communication. And finally, a power budget study, which establishes all the rules and characteristics that will allow the creation of an electrically autonomous node.

Keywords

LPWAN;LoRa;Communication Node;Prototype;SNR;Power budget;

Índice

1	Introdução	
1.1	Pertinência do Tema	1
1.2	Proposta de Investigação	1
1.3	Objetivos de Investigação	2
1.4	Problemática	3
1.5	Delineação da dissertação	4
2	Estado da arte	7
2.1	Sinais	7
2.2	Modelação de sinal	7
2.2.1	Vantagens de um sinal modelado	8
2.3	LPWAN	9
2.4	Mercado LPWAN	9
2.5	LoRa	11
2.5.1	Equipamento LoRa	14
2.5.2	LoRa para o espaço	15
2.6	Nó	16
2.7	<i>Ground Station</i>	17
2.8	Arquitetura de órbita da missão	17
2.9	<i>Spreading Factor</i>	19
3	Projeto de missão	21
3.1	Arquitetura de sistemas da missão	21
3.2	Árvore de subsistemas	22
4	Desenvolvimento do protótipo	25
4.1	Hardware	25
4.1.1	Módulo de processamento	25
4.1.2	Módulo de comunicação	29
4.1.2.1	SDR para LoRa	31
4.1.2.2	Antena	32
4.1.2.3	Polarização	32
4.1.3	Módulo de energia	38
4.1.3.1	Bateria	39
4.1.3.2	Célula fotovoltaica	42
4.1.3.3	Regulador de carga	43
4.1.4	Módulo de aquisição de dados	43
4.2	Software	45
4.2.1	Programação de pins	45
4.2.2	Modo económico recorrendo à variável TLE	45
4.2.2.1	Influência da elevação mínima no modo económico recorrendo à variável SNR	47
4.2.3	Desenvolvimento do código para o nó final	48
4.2.4	Segurança na mensagem	50

4.3 SNR	53
4.3.1 Potência de transmissão	53
4.3.2 Perdas no cabo e nas conexões	54
4.3.3 Ganho da antena	54
4.3.4 Largura de banda do sinal	56
4.3.5 <i>Free Space Path Loss</i>	57
4.3.6 Perdas na atmosfera	59
4.3.7 <i>Ionospheric Scintillation</i>	60
4.3.8 Atenuação por precipitação	61
4.3.9 Ruído térmico do sistema	61
4.3.10 <i>Link Margin</i>	64
4.3.11 Constante de Boltzmann `s	64
4.3.12 Resultados	64
4.3.13 Pré-Conclusões de Subcapítulo	65
4.4 Limites da comunicação em função de θ	66
4.5 <i>Data budget</i>	68
4.5.1 Pré-Conclusões de Subcapítulo	71
4.5.2 Transmissão máxima em 24h	72
4.6 <i>Power budget</i>	73
4.6.1 Variáveis de cálculo do <i>Power budget</i>	74
4.6.2 Cálculos de consumo	75
4.6.3 Bateria	79
4.6.3.1 Tipos de circuitos de baterias	79
4.6.3.1.1 Circuito em série	80
4.6.3.1.2 Circuito em paralelo	81
4.6.3.1.3 Circuito série e paralelo	81
4.6.4 Desenvolvimento do circuito série e paralelo	82
4.6.4.1 Célula Fotovoltaica	83
4.6.4.1.1 Potência máxima da célula fotovoltaica	84
4.6.4.1.2 Tensão máxima e mínima da célula fotovoltaica	85
4.6.4.1.3 Potência mínima da célula fotovoltaica	85
4.7 Pré-conclusões de capítulo	89
5 Conclusões e trabalhos futuros	95
6 Bibliografia	97

Lista de Figuras

Figura 1 Modelação e demodulação de um sinal retirado de (Marcuccio, 2012)	8
Figura 2-Número de conexões LPWAN nas tecnologias LoRa, Sigfox, NB-iot, LTE-M e outras, (Statista, 2021).	10
Figura 3- Sinal sob modelação FSK	12
Figura 4-Sinal sob modelação LoRa, adaptado de (The Things Network, 2020)	12
Figura 5- Representação de 1 Chirp, adaptado de (The Things Network, 2020).	13
Figura 6-- Chip LoRa SX1276, (Semtech Corporation, 2020)	15
Figura 7- Nó Final	16
Figura 8- Nó Intermédio	17
Figura 9-Tamanho do chirp em função de diferentes SF's(7,8,9,10,11,12), adaptado de (The Things Network, 2020).	20
Figura 10- Arquitetura de sistemas da missão	21
Figura 11- Nó final	22
Figura 12- Nó intermédio	23
Figura 13- Exemplo de 1 microcontrolador, ATmega328p	26
Figura 14- Dragino LoRa Shield v1.4	30
Figura 15- Propagação da polarização linear e circular no espaço, (Marcuccio, 2012).	33
Figura 16- Alinhamento das antenas receptoras em relação à polarização da antena do emissora (seta vermelha) e direção da radiação (seta azul), (Burkholder, 2019).	34
Figura 17- Adaptado de (Ta, 2015)	35
Figura 18 (MathWorks, 2021)	36
Figura 19- Multi-fillar antena, adaptado de (Decai Wang, 2017)	36
Figura 20- Tri-fillar antena	37
Figura 21- Análise de desempenho através de um Vector Network Analyzer	38
Figura 22- SAMSUNG SDI ICR18650-26H	42
Figura 23-Exemplo de uma célula fotovoltaica	43
Figura 24- Sensor ITEAD STUDIO, modelo DHT11	44
Figura 25- Print do programa Gpredict a calcular as próximas passagens do satélite LACUNASAT-3 (04/05/2021).	47
Figura 26- Notação dos Fluxogramas (Santos, 2006)	48
Figura 27- Fluxograma do código a correr no nó final.	50
Figura 28- Ângulos formados em relação aos eixos de referência da antena pelo satélite, adaptado de (Kymeta Corporation, 2019).	55

Figura 29- Diagrama de radiação da antena RF Things RT-CP3-QL-XXX-YYY-ZZZ, adaptado de (RF Things, 2020)	56
Figura 30- Atenuação teórica vertical unidirecional desde uma altitude específica até ao topo da atmosfera. A parcela assume 7,5g/m ³ de vapor de água à superfície, e não inclui o efeito da atenuação da chuva ou da nuvem, (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999)	60
Figura 31 Coeficiente de atenuação para gotículas de água, (Crane, 1971).	61
Figura 32- Gráfico da função <i>SNR_{dB} obtida</i> .	65
Figura 33- gráfico de interseção da curva SNR com os valores de SNR limite para cada patamar de SF.	67
Figura 34- Ângulos θ e β em órbita circular terrestre	69
Figura 35- Representação de movimentos orbitais β e 2β .	71
Figura 36- Esquema da medição realizada através do multímetro.	75
Figura 37- Fotografia da experiência de medição realizada através do multímetro	76
Figura 38- Exemplo de um possível gráfico de consumo em função do tempo.	77
Figura 39- Circuito em série para as baterias SAMSUNG SDI ICR18650-26H.	80
Figura 40- Circuito em paralelo para as baterias SAMSUNG SDI ICR18650-26H.	81
Figura 41- Circuito em série e paralelo para as baterias SAMSUNG SDI ICR18650-26H.	82

Lista de Tabelas

Tabela 1-Plano de frequências por região	3
Tabela 2- Comparação entre LoRa e NB-IoT, demonstrando a melhor modelação consoante o requisito, (Sinha, 2017).	11
Tabela 3-Duty cycle para valores de frequência compreendidos entre 868,000 e 869,200, adaptado de (European Telecommunications Standards Institute, 2012).	14
Tabela 4- Estudo trade-off entre as placas de desenvolvimento ATmega328p -based, ESP32-based e Raspberry Pi.	27
Tabela 5- Esclarecimento da pontuação mediante o desempenho para o estudo trade-off da tabela 6	39
Tabela 6- Estudo Trade-off para 4 diferentes baterias recarregáveis.	40
Tabela 7- Características SAMSUNG SDI ICR18650-26H, adaptado de (SAMSUNG SDI).	42
Tabela 8- Especificações de algumas características do sensor ITEAD STUDIO, modelo DHT11, (ITEAD STUDIO, 2013)	44
Tabela 9-Capacidades do software descarregado da Github	52
Tabela 10- Opções de largura de banda para o chip LoRa SX1276, adaptado de (Semtech Corporation, 2020)	57
Tabela 11- Valores assumidos e obtidos no cálculo da temperatura de ruído TS .	63
Tabela 12-LoRa Spreading Factors (125 kHz bw), (Semtech Corporation, 2020).	66
Tabela 13- Intervalos do ângulo de abertura que permitem estabelecer comunicação em função do SF.	67
Tabela 14- Relação entre SF e bitrate do chip nº SX1276 da Semtech, (Semtech Corporation, 2020).	68
Tabela 15- Resultados do estudo de data budget em função do SF.	72
Tabela 16-- Valores do tempo de transmissão da mensagem, tamanho de 1 mensagem durante essa passagem, tamanho total das mensagens possíveis de transmitir em 1 dia e o número passagens diárias necessárias para o realizar em função do SF.	73
Tabela 17- Resultados obtidos das medições realizada através do multímetro.	76
Tabela 18- Valores típicos das características de carregamento de baterias lithium-ion, (Battery University, 2018)	85
Tabela 19- Variabilidade mensal de irradiação na localidade de Castelo Branco, adaptado de (Intituto Português de Energia Solar; Instituto Português do Mar e Atmosfera ; Cátedra Energias Renováveis; Instituto de Ciências da Terra , 2016)	86

Tabela 20- Recursos do protótipo	89
Tabela 21- Especificações do protótipo	93

Lista de Acrónimos

IoT	<i>Internet of Things</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
GS	<i>Ground Station</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
NB-IoT	<i>NarrowBand-Internet of Things</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution Machine Type Communication</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
FSK	<i>Frequency-shift keying</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
TLE`s	<i>Two-line element sets</i>
TLE	<i>Two-line element set</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
LP	<i>Linear Polarization</i>
CP	<i>Circular Polarization</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>
SS	<i>Slave Select</i>
SGP4	<i>Simplified General Perturbation 4</i>
LoRaWan	<i>Long range wide area network</i>
ABP	<i>Authentication By Personalisation</i>
LHCP	<i>Left Hand Circular Polarization</i>
RHCP	<i>Right Hand Circular Polarization</i>
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>
Sc.D.	<i>Doctor of Science</i>
LNA	<i>Low-noise amplifier</i>

Nomenclaturas

L_{lr}	Perdas no cabo e nas conexões do recetor
L_{lt}	Perdas no cabo e nas conexões do transmissor
G	Ganho
G_t	Ganho da antena do emissor
G_{rp}	Ganho da antena recetora
θ	Ângulo de abertura em relação ao eixo da antena
α	Ângulo de elevação
ϕ	Ângulo de abertura em relação ao plano de referência vertical
BW	Influência da largura de banda do sinal para o estudo SNR

P_r	Potência recebida
P_t	Potência transmitida
I	Intensidade
A_{eff}	<i>Antenna capture area</i>
d	Distância
f	Frequência
α	Ângulo de elevação
R_E	Raio da Terra
H	Altitude da órbita
L_a	Perdas na atmosfera
L_i	<i>Ionospheric Scintillation</i>
L_r	Atenuação por precipitação
T_S	Ruído térmico do sistema
T_{eq}	Temperatura equivalente
T_A	Temperatura de ruído da antena
F	<i>Noise figure</i>
G_r	Razão da potência obtida
T	Temperatura ambiente
L_m	<i>Link Margin</i>
k	Constante de <i>Boltzmann</i> `s
β	Ângulo de elevação em relação ao referencial centro da terra
O	Centro da terra
A	Superfície terrestre
t	Tempo de transmissão
T	Período
a	Raio da órbita
μ_{terra}	Constante gravitacional da terra
t_0	Tempo de funcionamento em modo económico
t_1	Tempo de funcionamento em transmissão 433 Mhz
t_2	Tempo de funcionamento em transmissão 868 Mhz
t_3	Tempo que o equipamento se encontra em fase de receber informação
a	Número de transmissões 433 Mhz
b	Número de transmissões 868 Mhz
c	Número de vezes que o nó se encontra em processo de receber mensagens
I_m	Intensidade média da corrente
I_0	Intensidade da corrente em modo económico
I_1	Intensidade da corrente em modo 433 Mhz
I_2	Intensidade da corrente em modo 868 Mhz
t_d	Tempo total de duração
$P_{célula}$	Potência da célula fotovoltaica
V_B	Tensão de carregamento da bateria
I_B	Intensidade da corrente em modo económico
$V_{célula}$	Tensão na célula fotovoltaica
Q_{24h}	Carga total
P_{24h}	Potência diária mínima da célula
$P_{real/24h}$	Potência real para 24h

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Pertinência do tema

Ao longo da história da humanidade procurámos desenvolver métodos e ferramentas que transportassem as nossas mensagens a todo o globo. No ano de 1969 criámos a primeira *network* e enviámos o primeiro mail através deste protótipo. De momento, numa fase mais avançada e com um protocolo de comunicações *standard* possuímos a Internet (Georgia, 2021). Esta é atualmente tão valiosa que se tornou-se imprescindível ao nosso dia a dia e está presente na maioria das nossas casas.

Mas a ambição perdura, o ser humano pretende hoje estender esta conexão a veículos, sensores e dispositivos. Procuramos que todos os objetos do nosso dia a dia estejam também conectados à internet. Esta extensão que agora pretendemos instalar denominamos de Internet das Coisas, IoT (So-Eun Lee, 2017).

Contudo, o seu desenvolvimento e a sua implementação encontram-se numa fase inicial e existem ainda aspetos que devem ser solucionados e reformulados nesta rede. Neste documento o autor apresenta uma possível solução para um destes problemas característicos, sob o qual as empresas no setor se deparam atualmente.

1.2 Proposta de investigação

A Spaceway é uma empresa portuguesa que tem destacado a sua posição no setor espacial português. Esta, de momento, foca-se na tentativa de conectar sensores inteligentes à rede de internet. Porém, tal como outras empresas no setor, depararam-se com problemas típicos da extensão IoT.

Alguns destes problemas são apresentados ao autor e seguidamente é proposto que os solucione na sua dissertação de mestrado.

1.3 Objetivos de investigação

Anteriormente à enumeração dos objetivos, pretende-se esclarecer já, que neste documento o nó é abordado como um equipamento capaz de comunicar com um outro dispositivo distante, através de uma ligação sem fios.

O objetivo da Spaceway é transmitir uma pequena mensagem entre dois pontos terrestres através de um ponto intermédio colocado em órbita. Esta mensagem é proveniente de um sensor localizado numa região remota e deverá chegar a uma base de dados, gastando a menor quantidade de energia possível.

A empresa dita que esta mensagem deverá ser transmitida através de uma comunicação do tipo LPWAN, *Low Power Wide Area Network*. Aspeto este, que fornecerá características próprias à comunicação, como esclarecido no capítulo 2.

O desenvolvimento deste documento baseia-se nos seguintes objetivos e requisitos, definidos pela empresa:

- Deve ser selecionada e desenvolvida a arquitetura geral da missão.
- O nó de comunicação LPWAN deve permitir o sensor e o satélite comunicar.
- As comunicações efetuadas pelo nó, deverão ser possíveis de estabelecer por todo o espaço físico que envolve o planeta Terra, mediante as restrições de banda regional LPWAN.
- O sinal transmitido deve ter potência suficiente para estabelecer comunicações terra-espaço ou espaço-terra. Para um satélite em órbita circular de aproximadamente 500 km de altitude.
- Mediante as características da comunicação, deve ser calculada a quantidade de informação possível de transmitir.
- O nó deve ser energeticamente autónomo.
- Como prova de conceito, o nó deve recolher e transmitir medições das condições ambientais envolventes.

1.4 Problemática

Uma comunicação do tipo LPWAN é possível através de diversas formas de modelação do sinal emitido (K. Mekki, 2018). Porém, diversos fatores, enumerados no capítulo 2, ditam que a modelação LoRa será a selecionada para o desenvolvimento do equipamento nesta dissertação.

Os nós de modulação LoRa, que o leitor poderá encontrar atualmente no mercado, operam apenas numa frequência específica. Funcionando assim unicamente em determinadas regiões. Tal facto explica-se pelo motivo da modelação LoRa ocupar diferentes frequências em múltiplas partes do globo (ECO, 2021), (The Things Industries, 2020). Em exemplo segue a tabela 1.

433 MHz, 868 MHz	Europa
915 MHz	Austrália e América do Norte
865 MHz to 867 MHz	Índia
923 MHz	Ásia

Tabela 1-Plano de frequências por região

Ou seja, um nó programado para uma determinada frequência será funcional apenas numa determinada região geográfica. Assim sendo, se o utilizador que pretenda desenvolver um satélite de comunicações LoRa, este não poderá funcionar em grande parte da sua órbita. De outra forma, caso se pretenda desenvolver uma GS, esta não será capaz de comunicar com todos os satélites LoRa em órbita nem possuirá liberdade de movimentação entre regiões.

Este trabalho procura desenvolver um nó inovador capaz de permutar a sua frequência de funcionamento mantendo a modelação LoRa e permitindo assim uma globalidade no serviço. Mais resumidamente, obtém-se:

- Um satélite capaz de alterar a sua frequência de emissão, consoante a região sobre a qual se encontra a orbitar, mantendo a modelação LoRa.
- Um nó que comunicará com todos os satélites das diferentes frequências LoRa, não estando assim limitado a operar apenas com um grupo.

- Um nó que poderá ser colocada em qualquer ponto do globo, permitindo efetuar comunicações LoRa sobre toda a superfície terrestre.
- Uma GS, *Ground Station*, que comunicará não apenas com um grupo de satélites, mas sim com os diversos mencionados na tabela.
- Uma GS que pode ser colocada em qualquer ponto do globo, permitindo efetuar comunicações LoRa sobre toda a superfície terrestre.

1.5 Delineamento da dissertação

Este documento é dividido em capítulos e a descrição do seu conteúdo é apresentado de seguida:

No capítulo 1 o autor apresenta a pertinência do tema desta dissertação e a entidade que propôs o estudo deste tópico. Delineiam-se ainda, os problemas necessários de resolver perante os requisitos de desenvolvimento propostos.

O capítulo 2 auxilia o entendimento de toda a dissertação através do esclarecimento das engenharias necessárias a esta investigação. Inicia-se por explicar conceitos fundamentais na transmissão de um sinal, mais propriamente, numa comunicação do tipo LPWAN. Parte seguidamente para o esclarecimento das funções e das características do equipamento envolvido para realizar uma comunicação espacial do tipo LoRa.

O capítulo 3 apresenta um possível projeto da missão. Aqui o autor expõe e alcança a arquitetura de comunicação base para o desenrolar do estudo deste projeto.

O capítulo 4 englobará o desenvolvimento de todo o protótipo. Iniciar-se-á com a seleção do hardware base necessário ao nó e com o posterior desenvolvimento do software nele programado. Seguidamente efetuam-se 3 estudos fundamentais:

- O estudo SNR que permite calcular os momentos que possibilitarão o nó de comunicar mediante a posição do satélite
- O estudo *data budget*, que calcula a quantidade de informação possível de transmitir

- Por último o estudo *power budget*, que obtém as características necessárias para o desenvolvimento de um módulo de energia energeticamente autónomo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões possíveis de retirar desta dissertação.

Capítulo 2

2 Estado da Arte

2.1 Sinal

Ao longo do tempo, com a evolução da tecnologia, foi surgindo a necessidade de estabelecer comunicações entre dois dispositivos eletrônicos, não conectados fisicamente. Desenvolveram-se assim os primeiros sinais de comunicação sem fios. Estes, sucintamente, representam impulsos ou ondas eletromagnéticas de alta frequência (Marcuccio, 2012).

2.2 Modelação de sinal

Previamente à transmissão, a mensagem avança no equipamento através de um sinal de baixa frequência, mas para que este se propague através do meio, deve ser acoplado a uma onda transmissora. Esta acoplação é feita através de processos de modulação da onda de baixa frequência no corpo da onda transportadora (Marcuccio, 2012).

O procedimento de modulação de um sinal consiste na mutação das características da onda transportadora. Estas alterações são efetuadas através de variações de amplitude, fase, frequência ou polarização. Permitindo a codificação e transmissão da informação, através de um sinal radio (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999).

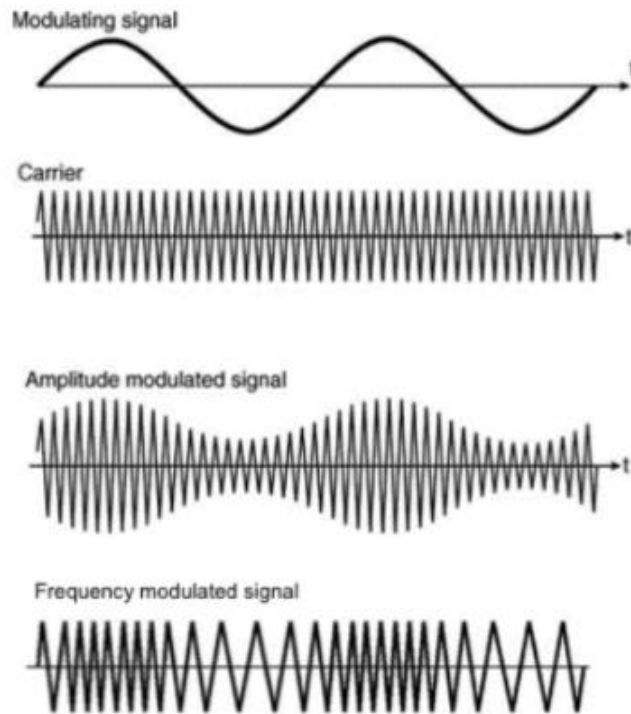


Figura 1 Modelação e demodulação de um sinal retirado de (Marcuccio, 2012)

2.2.1 Vantagens de um sinal modelado

A escolha correta da modulação permite ajustar o sinal às necessidades do serviço, havendo assim a necessidade de executar um estudo de performance que definirá a melhor modelação para a pressuposta missão (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999). Diferentes classes de comunicação devem assim ser definidas em função dos atributos necessários à tecnologia em desenvolvimento. Para o objetivo deste trabalho o autor dará prioridade à classe *Low Power Wide Area Network*, LPWAN, que apresenta as seguintes vantagens (Song, 2017):

- Baixo consumo
- Longo alcance
- Baixo custo

2.3 LPWAN

LPWAN é uma classe de comunicação, que usa específicas técnicas de modulação. Esta permite longos alcances da sua transmissão, através de reduzidos consumos de energia, quando comparado com produtos similares (Song, 2017).

Criada pelas necessidades do mercado de implementar dispositivos sem recorrer as redes móveis telefónicas de WiFi ou de satélite. O desenvolvimento de um produto que recorresse às estas redes pré-existentes torná-lo-ia menos desejado, uma vez que as redes móveis telefónicas operam através de enormes consumos de energia (Kanwal, 2017), a rede WiFi não possui a cobertura terrestre desejada e a rede comunicações satélite tradicional é demasiado dispendiosa (Graydon, 2019).

O desenvolvimento desta classe de comunicação permitiu a introdução no mercado de produtos IOT. Produtos estes que requerem muitas vezes comunicações de longa distância e uma total independência da rede de energia pública. Tal independência acarreta a necessidade de desenvolver produtos que consumam baixos valores de energia e sejam autónomos.

Para tal, desenvolve-se assim um conjunto de modelos de comunicação que ocupam uma camada, até então, livre nas comunicações. Porém um dispositivo que empregue tais vantajosas características prescindirá de alguns benefícios, ou seja este produto carece de uma boa taxa de transferência de dados (Wang, 2020).

2.4 Mercado LPWAN

Diferentes modelos da tecnologia LPWAN estão já disponíveis, no mercado. Salienta-se ainda que, entre os vários, LoRa e NB-IoT dominam a procura. Como se pode verificar no gráfico da figura 2.

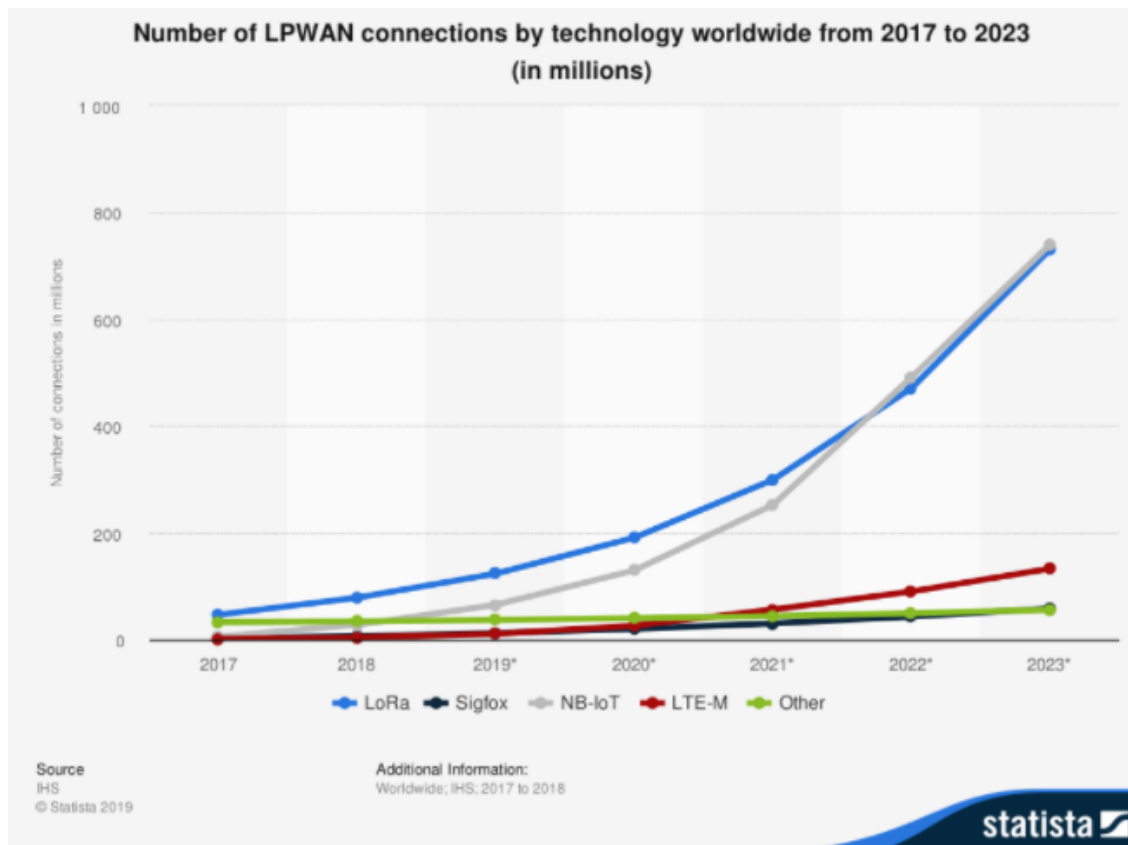


Figura 2-Número de conexões LPWAN nas tecnologias LoRa, Sigfox, NB-IoT, LTE-M e outras, (Statista, 2021).

Com o objetivo de atender as tendências de mercado, o autor foca-se no estudo destas duas tecnologias dominantes. Tentando abranger, desta forma, um público maior.

De uma forma inicial será elaborada uma breve comparação entre as duas, onde serão demonstradas as suas principais diferenças (Sinha, 2017).

A modelação LoRa:

- Possui consumos energéticos ligeiramente menores
- Tem um custo menor
- Serve-se de bandas de frequência livre de utilização

A modelação NB-IoT:

- Possui maior taxa de transferência de dados por segundo

- Possui uma maior segurança

Esta comparação é transposta para a tabela 2, de forma a permitir uma melhor visualização.

	Melhor consumo	Melhor custo	Frequência livre	Melhor taxa de transferência de dados	Melhor segurança
LoRa	V	V	V		
NB-IoT				V	V

Tabela 2- Comparação entre LoRa e NB-IoT, demonstrando a melhor modelação consoante o requisito, (Sinha, 2017).

Percebe-se que não existe uma escolha facultativa entre estas. Assim sendo, o utilizador necessitará, em função dos requisitos e funcionalidades do dispositivo, definir qual a melhor modelação a implementar. Porém, é possível de prever que em zonas remotas o mercado LoRa domine, já que NB-IoT recorre ao equipamento LTE das operadoras telefónicas, por vezes indisponível nestas localizações (Adhikary & Wang, 2016) e (Sinha, 2017).

Perante os requisitos da Spaceway, esta necessidade na tecnologia NB-IoT de recorrer ao equipamento LTE das operadoras telefónicas, torna-a não funcional para a missão. Avançando-se desta forma na dissertação, através da modelação LoRa.

2.5 LoRa

LoRa, Long Range. Os primeiros *chips* desta modelação foram comercializados após 2012 pela Semtech, recorrendo à modelação do espectro de emissão de um sinal inspirada na técnica CSS, Chirp Spread Spectrum (Semtech, 2020).

Ao contrário da modulação típica FSK, onde o sinal digital é acoplado à onda transportadora através de uma simples alteração intermitente da frequência, a modulação LoRa apresenta uma alteração contínua da frequência entre a largura da sua banda (Vangelista, 2017) . Como demonstrado nas figuras 3 e 4.

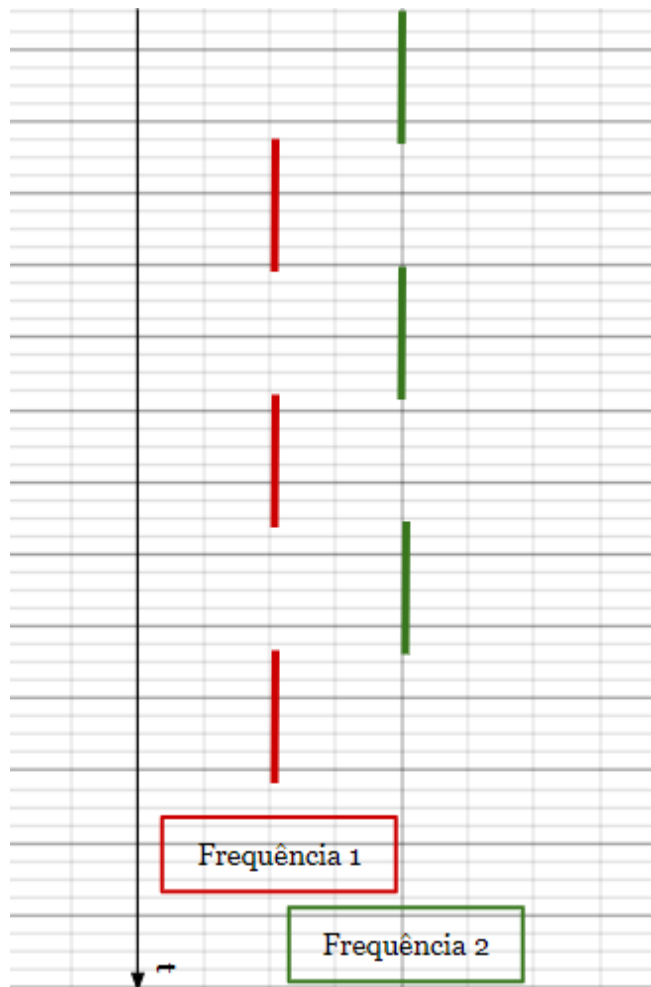


Figura 3- Sinal sob modelação FSK

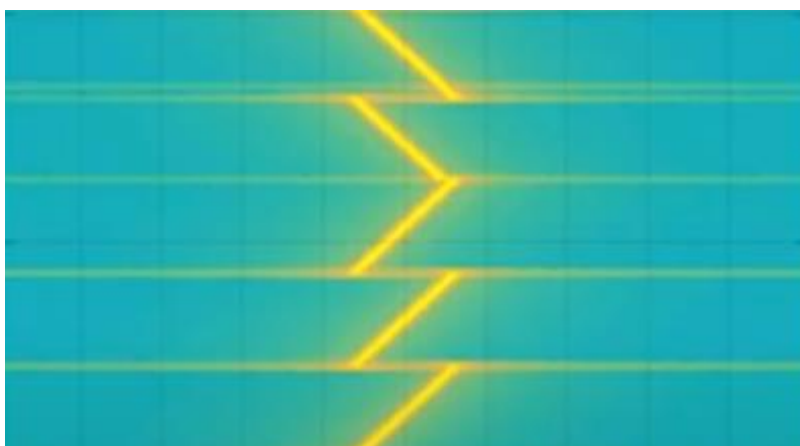


Figura 4-Sinal sob modelação LoRa, adaptado de (The Things Network, 2020)

Estes momentos de alteração contínua da frequência denominados por *chirp`s*, podem ser positivos ou negativos, permitindo assim a modelação do sinal digital. Quando a frequência estiver a aumentar a onda diz-se em *up-chirp*, se ela estiver a diminuir, está em *down-chirp* (Springer, 2000).

A figura 5 representa 1 *chirp*:

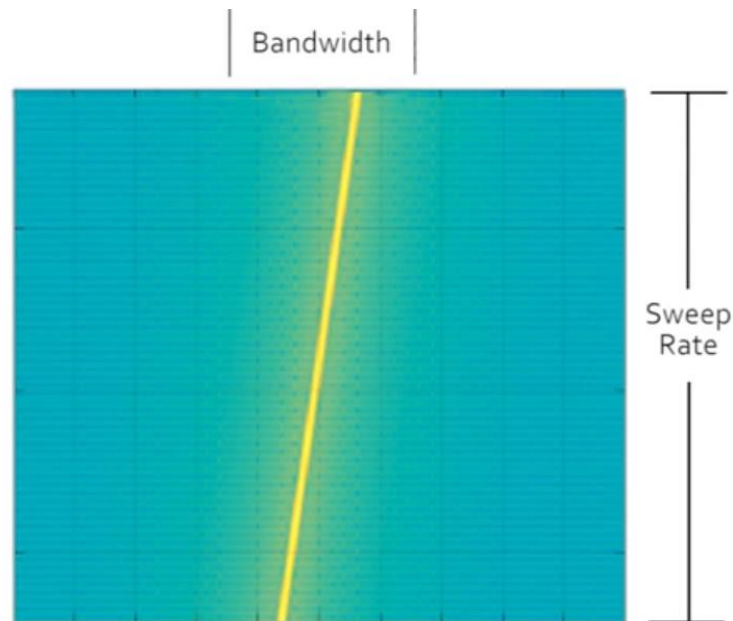


Figura 5- Representação de 1 Chirp, adaptado de (The Things Network, 2020).

Os equipamentos LoRa da Semtech permitem criar uma plataforma capaz de comunicar longas distâncias através de um baixo consumo energético e tal como visto anteriormente, esta característica, torna-os um bom candidato para as aplicações IoT. Este tipo de aplicações dominam o principal serviço destes equipamentos, podendo desta forma serem encontrados com alguma facilidade em: cidades inteligentes, agricultura inteligente, medições, logística inteligente e muito mais (Zhou, 2019).

A sua modelação ocupa restritamente algumas bandas de rádio sem licença, como 433 MHz e 868 MHz na Europa, 915 MHz na Austrália e na América do Norte ou 923 MHz na Ásia (ECO, 2021) (The Things Network, 2020). E estas bandas devem ser respeitadas de modo a não provocar interferência com outros dispositivos alocados.

Além das bandas de frequência pré-definidas, os dispositivos LoRa têm que respeitar certas normas de *duty cycle*. Estas normas representam a fração de tempo que um dispositivo poderá legalmente transmitir e são reguladas na União Europeia pelo European Telecommunications Standards Institute. Os seus valores são regulados em função da frequência e podem ser consultados na tabela 3.

Banda de frequência	<i>Duty cycle</i>
868,000 MHz a 868,600 MHz	1 %
868,700 MHz a 869,200 MHz	0.1 %

Tabela 3-Duty cycle para valores de frequência compreendidos entre 868,000 e 869,200, adaptado de (European Telecommunications Standards Institute, 2012).

2.5.1 Equipamento LoRa

Para o estudo deste documento deve-se ainda clarificar que todos as placas de rede, com a finalidade de transmitir e receber uma modelação do tipo LoRa, devem conter um chip modelador/demodelador autorizado pela Semtech. Esta empresa possui a patente número EP2763321A1, intitulada *Low power long range transmitter*, sobre a modelação.

Mediante a patente mencionada anteriormente consegue-se perceber o número restrito de marcas produtoras de equipamento que de/codifiquem esta modelação e a necessidade de averiguar a legitimidade dos produtos desta gama. O autor deixa ainda em nota que esta dissertação se desenvolve na base de chips produzidos pela Semtech, evitando futuros conflitos com a patente, no protótipo final.

O chip SX1276 LoRa da Semtech, utilizado nesta dissertação, possibilita uma potência máxima de transmissão de 100 mW, -148dBm de sensibilidade mínima, um *bitrate* programável até 300kbps, uma largura de banda também programável e a função de demodular/modelar sinais LoRa (Semtech Corporation, 2020).



Figura 6-- Chip LoRa SX1276, (Semtech Corporation, 2020)

2.5.2 LoRa para o espaço

O longo alcance de transmissão permitido por esta tecnologia traduz umas das suas principais vantagens. A Semtech afirma, através de casos de estudo, conseguir estabelecer conexões de 48.28 km em zonas rurais (terra-terra) (Semtech, 2020). Alcances, por vezes, ainda não suficientes para algumas zonas remotas onde a Spaceway pretende implementar o seu protótipo.

Contudo experienciou-se através de tentativas realizadas pela Lacuna, umas das empresas envolvidas no direcionamento de LoRa para o mercado espacial, que conexões (terra-espaço) atingem consideravelmente maiores distâncias. Estabelecendo atualmente um recorde mundial de 832 km para este tipo de conexão (Lacuna.Space, 2020) .

Esta falha existente no mercado, impulsionada pelas descobertas mencionadas no parágrafo anterior, apressaram a comunidade científica a desenvolver satélites capazes de comunicar com a terra através de modelação LoRa. Porém dois grupos de indivíduos podem aqui ser subdivididos, mediante a estratégia de implementação abordada:

- Os que usam o satélite como nó intermédio em órbita. Este recebe e reenvia a mensagem sob modelação LoRa para uma *ground station* (Fossa Systems, s.d.).
- Os que usam o satélite como *gateway* em órbita. Ou seja, este faz a conversão da mensagem recebida sob modelação LoRa e envia para a *ground station* sob um outro protocolo de comunicações (Lacuna.Space,Repositories, 2021).

Estas soluções anteriormente mencionadas estão a ser desenvolvidas por entidades como a Lacuna Space, a Fossa, a Fleet, a Swarm ou a Hiber. Contudo, estas empresas ainda se deparam com a problemática base deste documento, ou seja, como as suas frequências de transmissão são imutáveis não possibilitam uma rede de conexão global.

2.6 Nó

Um nó é um dispositivo eletrónico que recebe e transmite sinais (Farahani, 2008). Este sistema pode ser subdividido em módulos que executam diferentes tarefas, entre eles devemos considerar como primários: o módulo de comunicação, o módulo de energia e o módulo de processamento. Podemos ter ainda outros módulos, não essenciais ao funcionamento, mas que executem tarefas extraordinárias às funções dos mencionados anteriormente, como a monitorização dos parâmetros das condições ambientais ou a execução de tarefas exteriores ao equipamento através de atuadores.

Para uma fácil caracterização, estes nós, serão divididos em 2 grupos: os nós intermédios e os nós finais. Os finais têm a tarefa de receber e transmitir a informação para o exterior, já os intermédios servem mais propriamente como ponte de ligação.

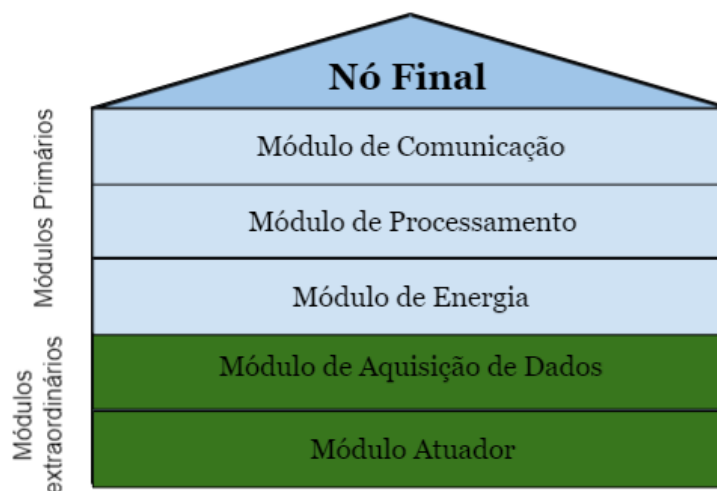


Figura 7- Nó Final

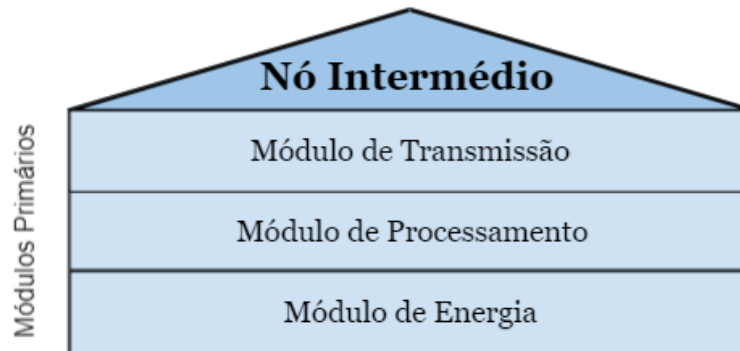


Figura 8- Nó Intermédio

Na figura 7 é demonstrada a arquitetura de um nó um final, a ser colocado no terreno. Seguidamente demonstra-se ainda, na figura 8, um nó intermédio a ser colocado num satélite.

2.7 Ground station

Uma GS é uma estação localizada na superfície terrestre com o objetivo de efetuar comunicações com outros dispositivos. Munida com pelo menos um transmissor e/ou pelo menos um recetor de sinal e toda o equipamento necessário para efetuar essa ação (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999).

Neste trabalho, este equipamento possuirá uma *gateway* e tal como mencionado anteriormente, uma *gateway* permitirá realizar a interface entre duas comunicações com protocolos de comunicação diferentes. No momento que a informação atravessar este nó, a mensagem será demodelada e passará para um protocolo IP, canalizando assim a mensagem pela rede de internet acessível em qualquer computador doméstico.

2.8 Arquitetura de órbita da missão

Com o objetivo de desenvolver um protótipo de comunicação espacial, primeiramente foi estudada a geometria formada entre a órbita do satélite e o nó final. Aqui o autor demonstrará a influência de 4 diferentes geometrias na arquitetura da comunicação. Entre elas:

- Órbita Geoestacionária
- Órbita de baixa altitude, *Store and Forward*
- Órbita Geoestacionária com *Crosslink*
- Órbita de baixa altitude com *Crosslink*

Na primeira geometria um satélite ocupa sempre a mesma posição em relação ao corpo que orbita (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999). Assim sendo, este encontra-se sempre disponível para estabelecer comunicação.

A geometria de órbita baixa altitude *Store and Forward* é normalmente usada em órbitas de baixa altitude, menores de 1000m. Aqui o satélite recebe a informação e retém-na até passar pela próxima *ground station* (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999). Esta torna a integração mais complexa, pois será necessário perceber os espaços temporais possíveis de estabelecer comunicação. Estes espaços serão dados em função de TLE`s, que representam matematicamente a órbita atualizada do satélite (Kahr, 2013). Como esta geometria não possibilita a disponibilidade permanente do satélite, obriga a que se realize um estudo data budget. Este será necessário para perceber a informação possível de transmitir para o satélite.

Órbita Geoestacionária com *Crosslink*. Quando a *ground station* não consegue comunicar diretamente com o satélite que possui a mensagem, este necessitará de transmitir o sinal para um segundo satélite mais próximo. Neste tipo de geometria as mensagens são retransmitidas, até à GS de destino, através de uma malha de comunicação espacial (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999).

Órbita baixa com *Crosslink*, nesta geometria existirá uma constelação de satélites em movimento. A mensagem será transmitida para o satélite que estiver de momento mais próximo do nó final e posteriormente canalizada através da constelação até à *ground station* (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999).

2.9 Spreading Factor

A compreensão do *Spreading Factor* nesta dissertação é essencial, uma vez que este influencia o tempo de duração de cada *chirp*. Este valor de SF pode ser dado por (Reynders, 2016):

$$t_{chirp} = \frac{\text{Spreading Factor}}{\text{largura de banda}} \quad (1)$$

Esta variação de tempo, por sua vez, altera significativamente as características da comunicação. Pois a sensibilidade do *chip* LoRa, a um sinal, aumenta significativamente com o aumento do SF (Semtech Corporation, 2020), ou seja, um SF maior permite estabelecer comunicações a uma maior distância.

Da mesma forma, um SF maior dita um *chirp* maior e um tempo necessário para transmitir a mesma mensagem também maior. Como é possível de observar na figura 9.

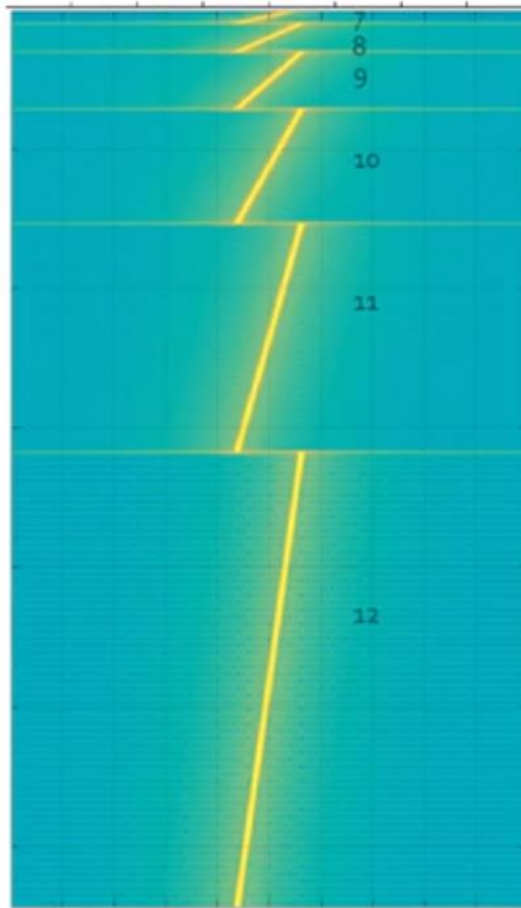


Figura 9-Tamanho do chirp em função de diferentes SF's(7,8,9,10,11,12), adaptado de (The Things Network, 2020).

Esta metodologia implica que o utilizador encontre um ponto de equilíbrio no SF, pois a um valor demasiado alto acarreta desperdícios no tempo de transmissão do sinal. Estes valores acrescidos no tempo de transmissão acarretarão, também como consequência, aumentos no consumo energético. Já que o envio da mesma mensagem implicaria uma maior demora a transmitir. Como será demonstrado mais a frente no capítulo 4.5, Data budget.

De outro modo SF's demasiados baixos não permitirão o recetor estabelecer a comunicação por consequência da sensibilidade mínima do chip a um sinal.

Capítulo 3

3 Projeto de missão

3.1 Arquitetura de sistemas da missão

Perante as necessidades descritas pelo utilizador, o autor apresenta a arquitetura de sistemas base para o desenvolvimento desta dissertação, permitindo uma maior facilidade na compreensão deste documento.

A arquitetura escolhida é apresentada na figura 10.

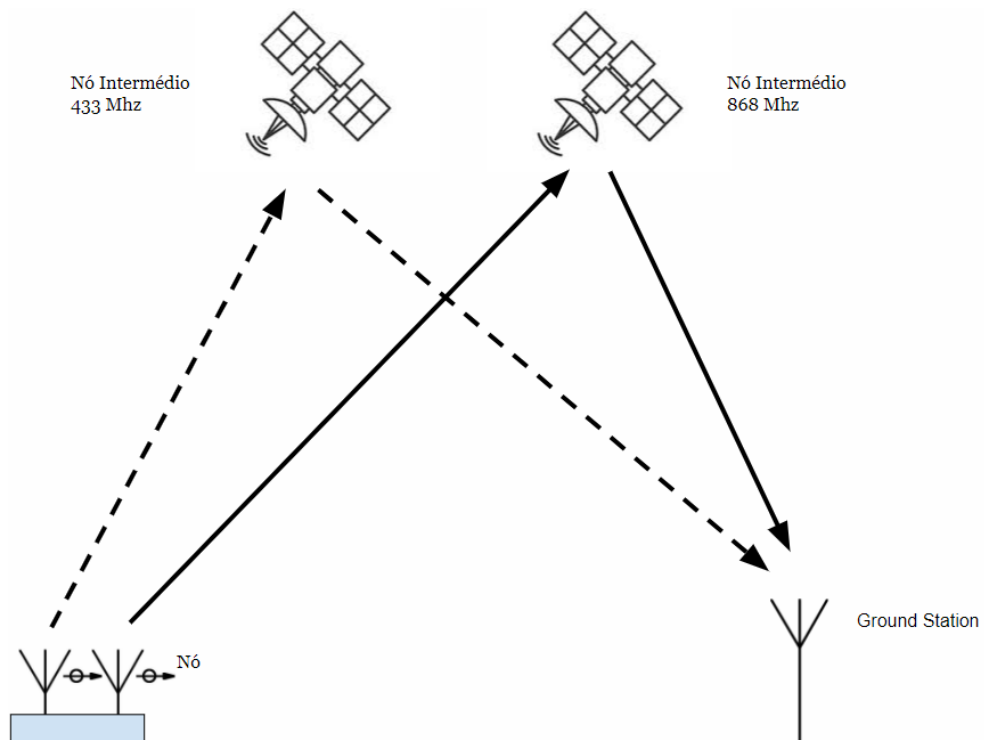


Figura 10- Arquitetura de sistemas da missão

Neste caso é possível de verificar que o nó intermedio se encontra colocado em posição orbital, dentro de um satélite. De outra forma, o nó final e a GS colocados na superfície terrestre.

De esclarecer ainda que, a Spaceway deverá prolongar esta arquitetura mediante as suas necessidades. Num produto final, esta GS deverá ser conectada a um servidor e à *internet*, permitindo o desenvolvimento de inúmeras outras aplicações e múltiplas interações com outros dispositivos para os seus projetos.

No processo de seleção desta arquitetura poderiam surgir duas estratégias de implementação, tal como mencionado no capítulo 2.3. Porém a escolha recai na implementação de um nó intermédio em órbita, pois um dos principais parceiros da Spaceway assim decidiu avançar no seu desenvolvimento do seu satélite.

3.2 Árvore de subsistemas

Previamente ao desenvolvimento da prova de conceito, o autor necessitará de delinear os subsistemas necessários ao protótipo. Para a elaboração do nó final o autor contará com um módulo de comunicação, um módulo de processamento, um módulo de energia e um módulo de aquisição de dados. Estes serão conectados por ligações de transmitem energia ou informação, possíveis de observar a amarelo e preto na figura 11 pela mesma ordem.

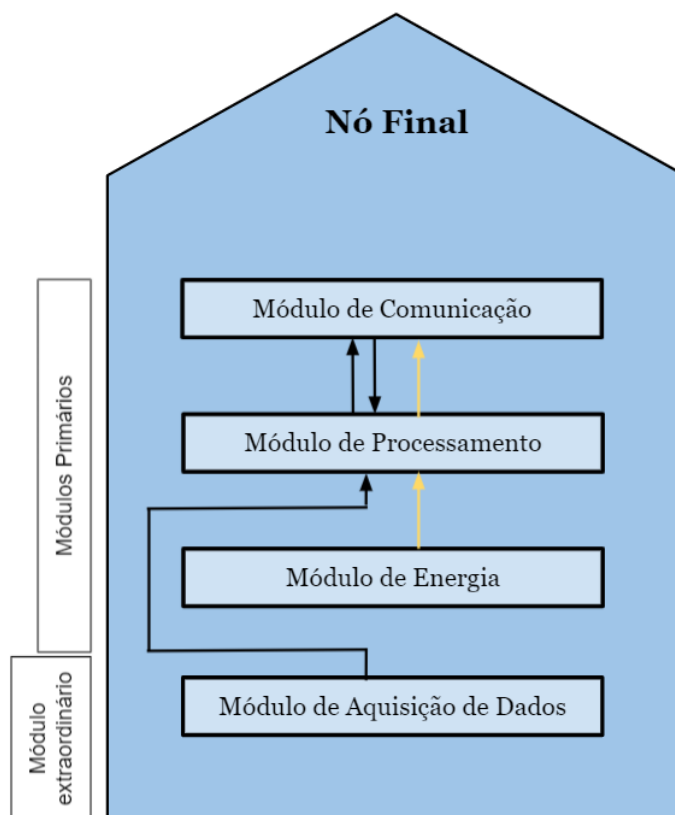


Figura 11- Nó final

Para a elaboração do nó intermédio, a ser colocado em órbita, o autor contará apenas com um módulo de comunicação, um módulo de processamento, um módulo de energia. Estes serão também conectados por ligações de transmitem energia ou informação, possíveis de observar a amarelo e preto na figura 12 pela mesma ordem.

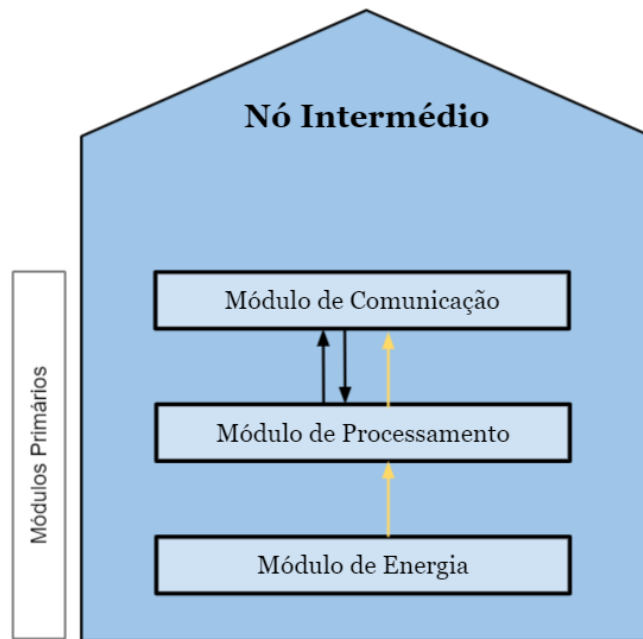


Figura 12- Nó intermédio

Capítulo 4

4 Desenvolvimento do protótipo

4.1 Hardware

Neste capítulo dá-se início à escolha do *hardware* para o projeto, esta fração da dissertação é subdividido em subcapítulos que analisam os diferentes subsistemas essenciais ao protótipo. Entre eles:

- Módulo de processamento 4.1.1
- Módulo de comunicação 4.1.2
- Módulo de energia 4.1.3
- Módulo de aquisição de dados 4.1.4

4.1.1 Módulo de processamento

Inicia-se agora a escolha do hardware para o projeto. Para a elaboração do protótipo será necessário um microcontrolador que processará toda a informação interna e externa.

Um microcontrolador é um sistema eletrônico do tipo *System On Chip*, caracterizado pelo seu baixo consumo e pequeno tamanho. Estes tipos de sistemas não possuem um sistema operativo, sendo assim necessário desenvolver um programa que o controle (Barrett, 3^a edição). Nesta dissertação, este equipamento, deverá ser capaz de receber e/ou fornecer informação ao exterior, podendo ainda a processar e armazenar.

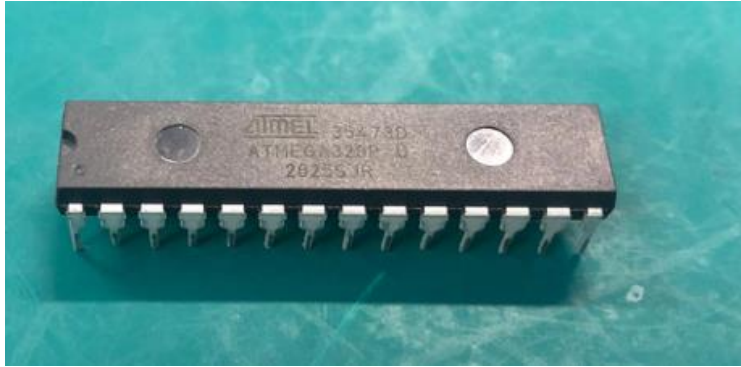


Figura 13- Exemplo de 1 microcontrolador, ATmega328p

Numa primeira instância, durante a fase de prototipagem, foi adotado o uso de placas de desenvolvimento. Estas placas fornecem uma maior facilidade de trabalho, uma vez que possuem um microcontrolador e os circuitos básicos para a sua operação. Os circuitos básicos mencionados anteriormente incluem o circuito de energia, o circuito de interface de programação e os circuitos de entrada e saída dos pins de comunicação física.

Entre as inúmeras placas de desenvolvimento existentes no mercado, o autor decidiu estudar três possíveis para o desenrolar da dissertação. Entre elas, uma assente no microcontrolador ATmega328p, outra no ESP32 e por fim um Raspberry Pi.

Placas assentes em microcontroladores ATmega328p e ESP32 são normalmente aclamadas de ATmega328p -based e ESP32-based e assim serão denominadas a partir deste momento da dissertação.

O *trade-off* da tabela 4 permite a seleção da placa de desenvolvimento mais indicada para o protótipo mediante diferentes critérios.

		Placa de desenvolvimento			Peso (0-1)
		<i>ATmega328p-based</i>	<i>ESP32-based</i>	<i>Raspberry Pi</i>	
Parâmetros <i>Trade-off</i>	Funcionalidade	5	5	4	0.25
	Fiabilidade	4	3	4	0.25
	Disponibilidade de componentes no mercado	4	4	3	0.20
	Custo	3	4	2	0.15
	Simplicidade de programação e linguagem	3	2	4	0.1
	Informação disponível	4	2	4	0.05
Pontuação total		4	3,7	3,5	
Lugar		1 ^o	2 ^o	3 ^o	

Tabela 4- Estudo trade-off entre as placas de desenvolvimento *ATmega328p-based*, *ESP32-based* e *Raspberry Pi*.

Através deste estudo *trade-off* é possível concluir após a avaliação dos diferentes atributos dos microcontroladores em causa, que a placa de desenvolvimento *ATmega328p-based* vence. E as avaliações foram dadas segundo os seguintes critérios:

- A funcionalidade foi medida pela facilidade de adaptar as diferentes placas de desenvolvimento à função durante o processo de desenvolvimento.

- A fiabilidade do produto foi avaliada perante erros de compilação e de funcionamento no decorrer deste trabalho. Critica-se aqui que o seu peso não contém uma válida avaliação científica, mas apenas vinda da prática de trabalho do autor.
- A valorização da disponibilidade de componentes foi medida mediante a facilidade que o autor encontrou na demanda dos produtos através da compra online.
- O autor desenvolveu nós de comunicação através das três placas mencionadas acima, deparando-se maioritariamente com diferenças na interface de programação. As placas assentes no ESP-32 demonstraram por sua vez uma maior complexidade de interface e falta de informação disponível para consulta.
- A avaliação, informação disponível, é dada mediante toda a procura científica necessária em sites, livros, publicações e *datasheets* do produto em causa ou de equipamento emparelho a este.

De outra forma, os pesos atribuídos nos diferentes atributos foram dados mediante as necessidades e os critérios do utilizador. A empresa exigiu em primeiro lugar que o protótipo fosse de qualidade e que os componentes nele existentes fossem de fácil acesso no mercado. Posteriormente presa o custo e a facilidade de desenvolver o protótipo.

Mediante os resultados, é optado pelo autor escolher uma placa ATmega328p -based para o desenvolvimento do protótipo. Porém este deixa em nota, que numa fase seguinte à prototipagem existe a necessidade de diminuir os custos de fabricação do equipamento. Para isso poderá ser usada uma placa customizada e não uma placa de desenvolvimento. Nesta placa customizada existirá o microcontrolador ATmega328p e apenas os circuitos necessários à tarefa do protótipo. Removendo assim, de exemplo, o circuito de interface de programação e os circuitos de entrada/saída de pins em não utilização.

De notar ainda que o autor se encontra a desenvolver, de momento, um protótipo funcional para operar na superfície terrestre. Contudo este deverá ser implementado, em fases consequentes, no espaço. Para a sua boa implementação em zona espacial, devem-se implementar materiais do tipo *space-grade*. Estes são capazes de

sobreviver às vibrações durante o lançamento, às extremas temperaturas e às radiações espaciais (Baumann, 2014) (Mehta, 2018).

4.1.2 Módulo de comunicação

O módulo de comunicação é o equipamento que permitirá a transferência das mensagens entre os nós. Nele se inclui: a placa de rede que possui o chip da Semtech e os outros componentes que possibilitam o seu funcionamento para de/modelar o sinal; a antena e as ligações que permitem a sua conexão ao módulo de processamento.

Como enumerado anteriormente, a Spaceway pretende que a comunicação se efetue através de duas frequências LoRa diferentes. Contudo, as placas de rede essenciais para este módulo vêm previamente configuradas de fábrica para uma frequência específica (Draguino, 2020). Com o objetivo de solucionar este problema, o autor decide que será necessário utilizar mais que uma placa de rede e o número total de placas é dado em função do número de frequências pretendidas pelo utilizador. Neste caso a Spaceway pretende comunicar através de duas frequências, ou seja, o nó incorporará no mínimo 2 placas de rede.

Neste ponto da dissertação, será agora iniciada a escolha das placas de rede. Perante os diferentes obstáculos, que o autor se deparou na sua seleção, o mesmo elege 5 pontos essenciais que não devem ser desprezados. Estes são enumerados seguidamente e esclarecidos à posteriori:

- Funcionalidade
- Compatibilidade no hardware
- Compatibilidade no software
- Legitimidade

A placa de rede deve ser capaz de receber mensagens digitais do microcontrolador, as modelar e posteriormente transmitir para uma antena. Por outro lado, deverá ainda permitir o caminho contrário do sinal, ou seja, deve receber mensagens provenientes da antena, fazer a sua demodulação e enviá-la para o microcontrolador (Crols, 2003).

É fundamental que a placa de rede deve permita a compatibilidade no hardware e no software entre os diferentes módulos. A comunicação entre eles deve ser possível, havendo assim a necessária compatibilidade na interface física e digital. Para uma escolha correta deve assim ser feito um pequeno estudo dos protocolos de comunicação intermodulares, que selecionarão as placas de rede aptas a comunicar com o módulo de processamento. Ou seja, a placa de desenvolvimento do módulo de processamento e a biblioteca de código que aí se encontra a correr limitam já aqui algumas possibilidades de seleção.

Por último a questão da legitimidade. O leitor já foi capaz de perceber, através da leitura do estado da arte desta dissertação, que um dispositivo que emita/receba uma mensagem LoRa deve conter um chip capaz de efetuar essa de/modelação. Porém existem outros formas que contornam e possibilitam este tipo de transmissão sem recorrerem a este tipo de chip. Essa matéria abrange uma carga de conhecimentos algo extensa e o autor por questões de organização formula um subcapítulo inteiro para esta questão. Subcapítulo este 4.1.2.1

Mediante os aspetos mencionados anteriormente, o autor seleciona a placa de rede da marca Dragino, modelo LoRa Shield v1.4



Figura 14- Dragino LoRa Shield v1.4

4.1.2.1 SDR para LoRa

Uma questão bastante debatida e por consequência também imposta pela Spaceway ao autor é a possibilidade de usar um SDR como módulo de comunicação para efetuar as comunicações LoRa.

Um SDR (*Software Defined Radio*) é um sistema wireless de multibanda que suporta mais que uma banda de frequências. Possui ainda um software integrado que permite ao operador modelar ou demodular os sinais de rádio transmitidos e recebido. O desenvolvimento nesta área inicia-se se nos anos 80 porem só muito recentemente um produto completamente desenvolvido foi disposto no mercado como (Jondral, 2005):

- HackRF One- ano 2014
- BladeRF- ano 2013

Uma abordagem superficial sob esta tecnologia possivelmente permitirá concluir que é possível usar SDR`s para efetuar comunicações LoRa. Porém não deve ser esquecido que a Semtech possui esta modelação patenteada, obrigando a que qualquer *chip* que use esta modelação necessite de ser acreditado.

Contudo, algumas entidades, dedicaram-se através de engenharia reversa a determinar as características desta modelação. Estas, por sua vez, ainda foram capazes de criar um código que efetuasse a de/modulação LoRa automaticamente. Permitindo assim implementar LoRa num dispositivo SDR. Este código pode, por sua vez, ser facilmente acedido e descarregada de algumas plataformas online (myriadrf,GitHub, 2020).

Para conclusão deste tema, o autor remata que é possível usar SDR`s como módulo de comunicação para efetuar as comunicações LoRa, porém deixa-se frisado que a sua utilização pode não ser ética nem legal e será necessário um maior estudo.

4.1.2.2 Antena

Ainda dentro do subsistema, módulo de comunicação, o autor necessitará agora de selecionar uma antena que permita irradiar, da melhor forma, o sinal proveniente da placa de rede.

Para que se inicie a escolha da antena, primeiro será necessário delinear aspectos essenciais à mesma. Perante os requisitos referidos anteriormente, foram nomeadas as seguintes características e funções essenciais para este equipamento:

- Nó de baixas dimensões. Esta característica pressupõe obrigatoriamente também uma antena de pequenas proporções e um nó de janela de comunicação não mutável. Este tipo de janela não permite a antena seguir o movimento do seu alvo de comunicação, porém prescinde da utilização de rotor que aumentaria significativamente o seu tamanho (BUCHEK, 2014).
- As antenas devem focar a potência da sua transmissão para o satélite, aumentando a sua eficiência.
- Um *Beamwidth* largo. Este aspeto representa o ângulo sob qual a antena divide grande parte da sua potência (Stutzman, 1998), permitindo assim cobrir, não só as mais altas elevações, mas também as médias. Em consequência será obtido um maior tempo de comunicação.
- A antena deve estar otimizada para as frequências em trabalho (868 e/ou 433 Mhz).
- Baixo custo e alta disponibilidade no mercado.
- Alta robustez, ou seja, deve ter a capacidade de ser implementada em espaços exteriores.

4.1.2.3 Polarização

As antenas ainda podem ser subdivididas, pela sua polarização, em grupos. Para uma escolha customizada às funções do nosso nó, será necessário compreender estas diferenças.

Uma antena de polarização linear, possui um campo elétrico que oscila apenas segundo a frequência de operação, transmitindo unicamente as suas ondas de rádio sob o plano vertical ou o plano horizontal. Já uma antena de polarização circular, o seu campo elétrico roda segundo a frequência de operação, transmitindo a sua onda em múltiplos planos (Steven (Shichang) Gao, 2014).

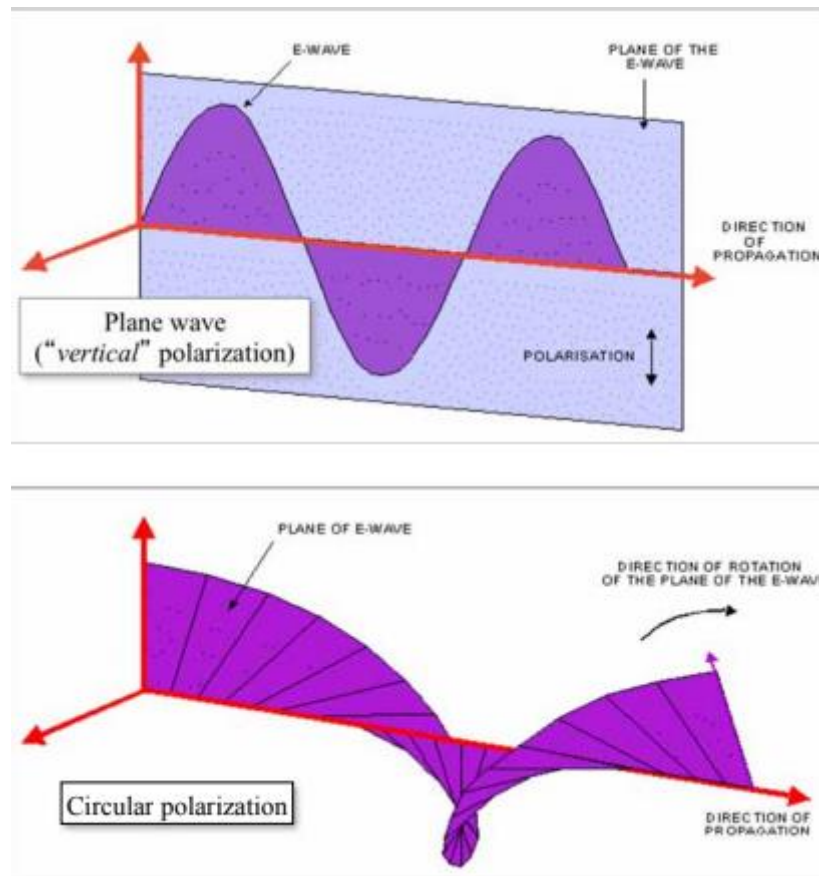


Figura 15- Propagação da polarização linear e circular no espaço, na parte de cima da figura é possível observar uma onda de polarização linear a propagar-se no espaço ocupando apenas um plano e na parte de baixo da figura uma onda de polarização circular a ocupar diferentes quadrantes durante a sua propagação (Marcuccio, 2012).

O autor pede especial atenção para este tópico, pois a orientação da antena no satélite pode não ser constante, devido a mudanças na atitude do satélite. De outra forma a necessidade pela parte da Spaceway de alterar a posição do nó final ditará também que a orientação da antena neste protótipo poderá ser inconstante.

Esta primeira, e principal característica influencia significativamente a transmissão de polarização linear. Neste tipo de transmissão deve-se ter em conta a posição da antena recetora, pois no momento que as orientações das ondas recebidas não

coincidir com a orientação da antena existirão consideráveis perdas de sinal (Carpes, 2020).

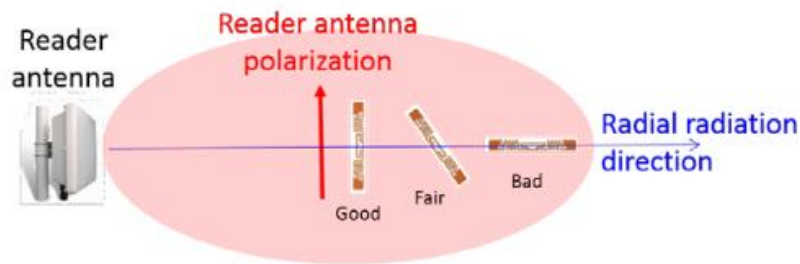


Figura 16- Alinhamento das antenas receptoras em relação à polarização da antena do emissor (seta vermelha) e direção da radiação (seta azul), (Burkholder, 2019).

Resumidamente, dois cenários na comunicação influenciarão significativamente esta escolha. A possível orientação inconstante da antena do satélite ao longo da sua órbita e a orientação inconstante da antena no nó final devido a sua mobilidade. Deste modo, é aconselhado pelo autor desta dissertação que use uma antena de polarização circular.

Para finalizar, um outro aspeto bastante importante que não deve ser refutado, é o facto de existirem perdas de sinal entre antenas de diferente polarização. Com o objetivo de diminuir as perdas de sinal a polarização da antena emissora e recetora devem ainda coincidir. (Carpes, 2020)

Com a implementação de antenas circulares, a Spaceway obterá ainda outras vantagens nas comunicações estabelecidas através dos nós (FRC Group):

- Esta polarização não tende a receber interferência do tipo *multi-path*
- Esta polarização diminui as perdas por efeito Faraday. A passagem da onda pelas diferentes camadas da atmosfera altera as suas características. Numa comunicação LP estas perdas podem reduzir até 9.3 dB da potência recebida de uma onda a 830 MHz. Já um sinal circularmente polarizado não sofre qualquer alteração na sua potência por efeito faraday (Takashi Iida, 2003).

A Polarização circular é ainda subdividida em dois subgrupos, a de rotação à direita RHCP e a de rotação à esquerda LHCP, característica esta que define o sentido de rotação do campo elétrico (FRC Group). Não foram encontradas pelo autor

vantagens relevantes para o projeto, entre as mesmas. Porém torna-se importante de salientar que, para um bom funcionamento, tanto o recetor como o emissor devem ter a mesma orientação de polarização (Carpes, 2020).

Em conclusão perante as vantagens enumeradas anteriormente, foi então decidido avançar o desenvolvimento do protótipo com a seleção de uma antena de polarização circular para o nó final. Assim sendo, dentro da vasta variedade de antenas circulares foi determinado pelo autor restringir a escolha às quatro seguintes possibilidades:

- As antenas do tipo Ceramic patch. São antenas que irradiam grande parte da sua potência sob os octantes positivos do seu espaço de atuação (Ta, 2015). Porém apesar de serem robustas são dispendiosas e pesadas (Ferrero, 2020).

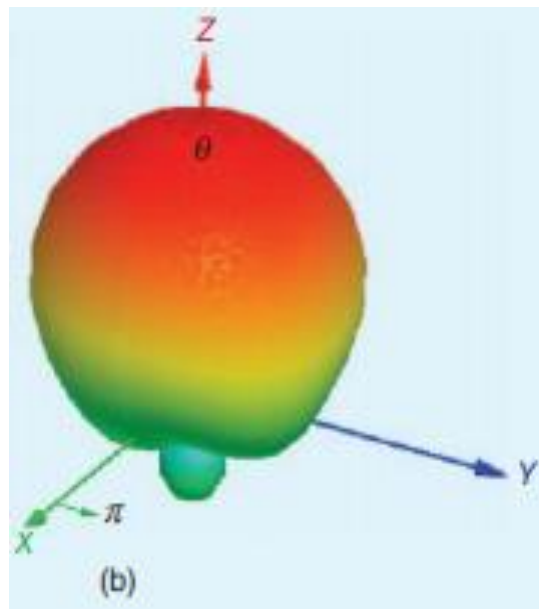


Figura 17- Adaptado de (Ta, 2015)

- Cross dipole, a sua potência é irradiada sob os 8 octantes do seu espaço de atuação (Ta, 2015). Emitindo pouco beneficemente metade do seu sinal para o planeta Terra.

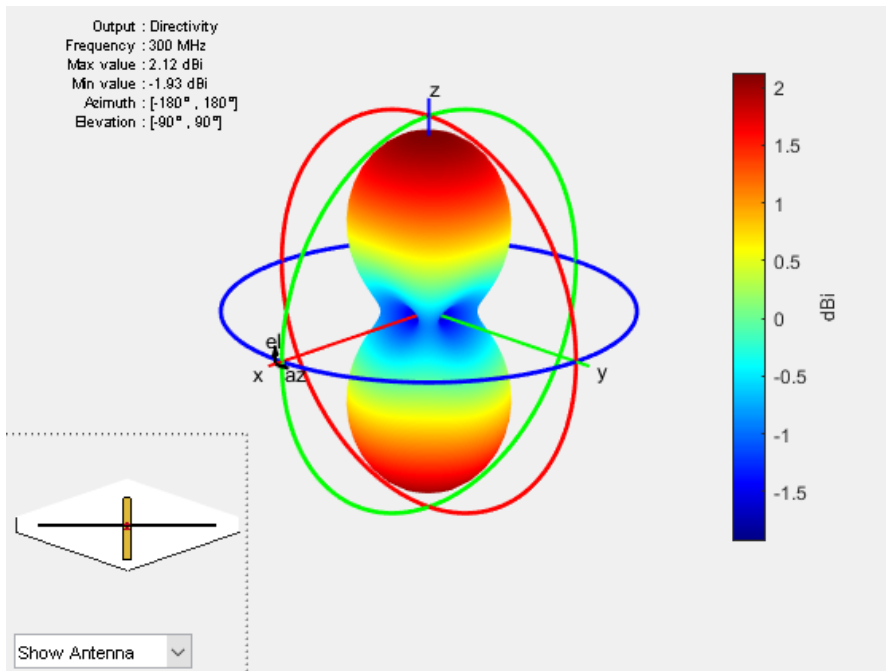


Figura 18 (MathWorks, 2021)

- Tri-filar e Quadri-filar (beamwidth largo). São antenas que irradiam grande parte da sua potência sob os octantes positivos do seu espaço de atuação e apresentam um custo de fabricação baixo (Ferrero, 2020).

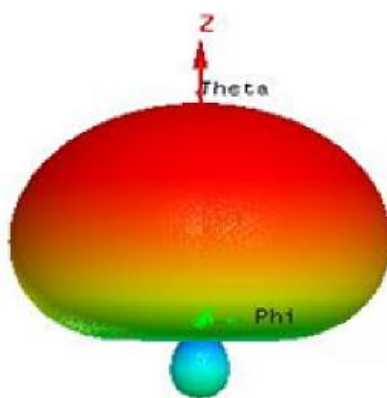


Figura 19- Multi-filar antena, adaptado de (Decai Wang, 2017)

As características demonstradas pelas duas primeiras opções refutam facilmente a sua escolha. Desta forma, o autor inclinará a sua decisão entre as duas últimas opções.

Torna-se ainda possível através do estudo dos cientistas WANG Decai, FENG Mei, CHEN Bo, LUO Wuqiong, LIU Yaling de perceber que as diferenças entre as características da radiação de uma antena Tri-filar e a uma antena Quadri-filar são bastante semelhantes. A seleção, entre estas, decai assim sob a baixa oferta de antenas Quadri-filar existente no mercado. Particularidade esta, que tornaria inviável o desenvolvimento e a venda de um produto em grande escala.

Após uma análise de mercado o autor seleciona a antena circular *tri-filar* da marca RF Things. Entre as demais, deste género específico, seleciona-se esta pelo seu bom desempenho.



Figura 20- Tri-filar antena

O seu desempenho anteriormente mencionado foi analisado através de um *Vector Network Analyzer*, permitindo assim, avaliar o parâmetro S_{11} da antena. Através deste parâmetro é possível representar a potência que a antena reflete de volta para o VNA (Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG).

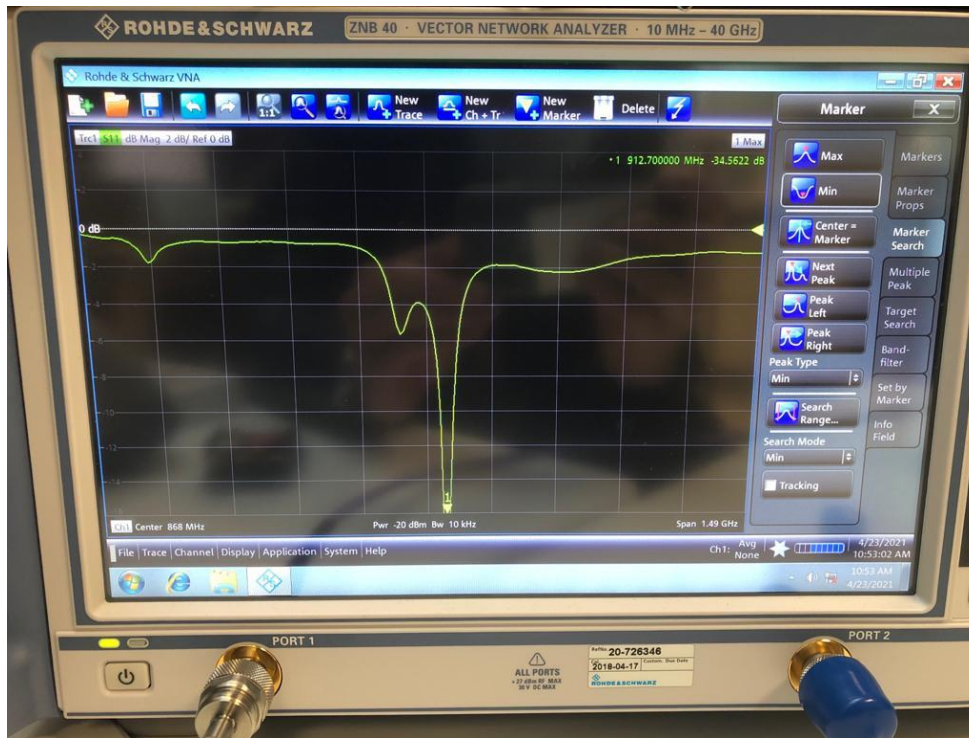


Figura 21- Análise de desempenho através de um Vector Network Analyzer

4.1.3 Módulo de energia

O módulo de energia inclui todos os componentes eletrônicos que tenham como função produzir, armazenar ou distribuir a energia elétrica antes de chegar módulo de processamento. Este subsistema necessitará de fornecer total independência energética os nós. De forma a permiti-lo, este deverá possuir uma série de baterias recarregáveis e uma célula fotovoltaica que as carregue.

A implementação de uma bateria recarregável exige um certo trabalho de engenharia como será demonstrado mais a frente no subcapítulo 4.6, porém aqui de forma muito abrangente serão explicados alguns conceitos base deste módulo e serão selecionados os componentes necessários ao seu funcionamento.

4.1.3.1 Bateria

Entre os diversos componentes do módulo de energia, será analisado em primeiro lugar a bateria. Quatro tipos de baterias recarregáveis se destacam no mercado, entre elas as baterias Lead-acid, Ni-Cd, Ni-MH e Li-ion.

Diferentes características chaves caracterizam o seu funcionamento e as mesmas podem ser consultadas na tabela 5. Os valores atribuídos às características nesta tabela são fundados nas publicações de (Pistoia, 2005) e (Jang Wook Choi, 2016). O autor aproveitará a mesma tabela ainda para executar um estudo *trade-off* que permitirá mais facilmente selecionar a bateria indicada para a missão.

Neste estudo, as diferentes características serão pontuadas da seguinte forma:

Pontuação	1 ponto	2 pontos	3 pontos	4 pontos
Intervalo	pior valor	0.25*valor melhor	0.50*valor melhor	0.75*valor melhor
	até	até	até	até
	0.25*valor melhor	0.50*valor melhor	0.75*valor melhor	melhor valor

Tabela 5- Esclarecimento da pontuação mediante o desempenho para o estudo *trade-off* da tabela 6

Após o esclarecimento da pontuação, demonstra-se agora a tabela alusiva ao estudo *trade-off*.

Bateria		<i>Lead-acid</i>	<i>Ni-Cd</i>	<i>Ni-MH</i>	<i>Li-ion</i>	Peso (0-1) ou
Parâmetros Trade-off	Tensão (V)	2.0	1.2	1.2	3.7	0.2
	Temperatura de funcionamento (°C)	-20 - 60	-40 - 60	-20 - 60	-20 - 60	0.2
	Nº ciclos até a capacidade total ser 80% da capacidade inicial	300	1500	1000	500 - 2000	0.15
	Energia específica (Wh/L)	60 - 110	150 - 190	140 - 300	350 - 700	0.15
	Toxicidade	Elevada	Elevada	Baixa	Baixa	0.1
	Tempo de carregamento rápido (h)	8 - 16	1	1 - 4	≤1	0.1
	Autodescarga mensal (%)	5	20	30	<10	0.05
	Tolerância ao sobrecarregamento	Elevada	Média	Baixa	Baixa	0.05
	Energia específica (Wh/Kg)	30 - 50	40 - 60	60 - 120	170 - 250	0
Pontuação total		20	21	23	32	
Lugar		4º	3º	2º	1º	

Tabela 6- Estudo Trade-off para 4 diferentes baterias recarregáveis.

No estudo elaborado anteriormente, a característica energia específica (Wh/Kg), diretamente relacionada com a variação da massa da bateria, representa um fator redundante no desenvolvimento deste protótipo e é expressa com um peso de 0. Com peso 0.05 no *trade-off*, características que não influenciam significativamente o protótipo, como os valores reduzidos de perda de carga. Com peso 0.1, características que podem ser facilmente contornadas como a necessidade de enclausurar fisicamente a bateria perante possíveis acidentes. Com peso 0.15, características que influenciarão significativamente o desenvolvimento como o tamanho das baterias do nó. Por último com peso 0.2 características que o autor entende como fundamentais e serão no subcapítulo 4.6 clarificadas.

Após a observada vitória no estudo anterior será agora necessário selecionar uma bateria *li-ion*. O número de baterias *li-ion* existente no mercado é incalculável, porém aqui a escolha recai mais uma vez na importância de selecionar um produto que dificilmente esgote no mercado.

Uma bateria com excelentes características, fabricada por uma marca bastante conceituada, barata e bastante banal no mercado perante a pesquisa realizada pelo autor é a bateria SAMSUNG SDI ICR18650-26H. Esta bateria será utilizada no seguimento da dissertação e possui as seguintes principais características:

Característica	Especificação
Capacidade nominal	2600mAh
Tensão de carregamento	4.2 +/- 0.05 V
Tensão nominal	3.63V
Método de Carregamento	CC-CV (Tensão constante com intensidade de corrente limitada)
Intensidade da corrente em carregamento	Carregamento normal: 1300mA Carregamento rápido: 2600mA
Temperatura de funcionamento	Carregar: 0 a 45° C Descarregar: -20 a 60° C



Figura 22- SAMSUNG SDI ICR18650-26H

4.1.3.2 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica transforma a energia da radiação solar em energia elétrica e permitirá recarregar as baterias. A sua seleção ainda não é possível neste ponto da dissertação pois será necessário de garantir que a carga fornecida por este equipamento permitirá repor totalmente o gasto.

Algumas características definem a célula fotovoltaica, como a potência e a tensão. Mais a frente no subcapítulo 4.6, será executado um estudo *power budget* que permitirá definir a potência mínima e a tensão de carga mínima da célula em função do gasto anteriormente mencionado. Também será necessário de garantir, na seleção da célula, que a intensidade máxima e a tensão de carregamento que devem respeitar os valores limite da bateria expressos na tabela 7.

Após estudar e analisar os pontos mencionados, no subcapítulo 4.6, o autor será capaz de selecionar a célula fotovoltaica indicada.



Figura 23-Exemplo de uma célula fotovoltaica

4.1.3.3 Regulador de carga

As baterias do tipo *li-ion* são baterias que exigem algum cuidado no seu funcionamento e o regulador de carga é um equipamento que necessitará de garantir que o processo de carregamento e descarregamento da bateria estão dentro das condições operacionais mencionadas na tabela 7. Este deve ser adicionado ao nó pois a bateria anteriormente selecionada possui um valor de corrente máximo de carregamento que ultrapassado poderá provocar danos (SAMSUNG SDI).

4.1.4 Módulo de aquisição de dados

Este subsistema incluirá o equipamento necessário para obter as medições das condições ambientais envolventes ao nó. Possuirá assim um sensor capaz de detetar as características físicas do meio e apto para as transformar num sinal analógico. Este sinal por sua vez será conduzido até microcontrolador do módulo de processamento.

Os objetivos desta dissertação não passam por selecionar o sensor mais indicado para o módulo de aquisição de dados, uma vez que este apenas servirá para provar um conceito e a Spaceway futuramente necessitará de o adaptar às necessidades de cada utilizador final. Assim sendo, o autor opta aleatoriamente pelo sensor da

empresa ITEAD STUDIO, modelo DHT11. Equipamento este que permite quantificar não só a humidade como a temperatura do meio (ITEAD STUDIO, 2013).

Característica	Especificação
Tensão de funcionamento	3,3 ou 5V DC
Intervalo de medições	20 a 95%RH 0 a 50°C
Valores	Apresentados com 8 bits
Precisão	Máxima de +/- 5% RH (0 a 50°C) Típica +/- 4% RH (25°C) Mínima +/- 1°C Máxima de +/- 2°C

Tabela 8- Especificações de algumas características do sensor ITEAD STUDIO, modelo DHT11, (ITEAD STUDIO, 2013)

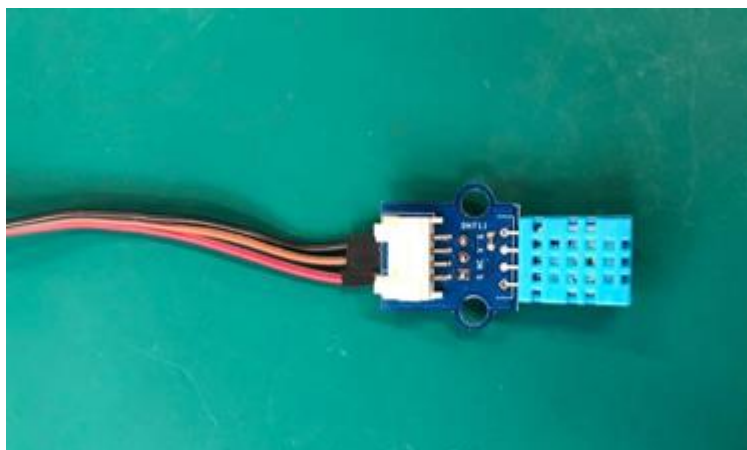


Figura 24- Sensor ITEAD STUDIO, modelo DHT11

4.2 Software

Como já referido anteriormente o microcontrolador aplicado no módulo de processamento necessita de um código que processe e execute as necessidades deste protótipo. Neste subcapítulo o autor demonstrará as dificuldades/requisitos encontrados na elaboração deste estágio e a demonstração gráfica através de um fluxograma do código implementado, em linguagem c++.

4.2.1 Programação de pins

Como referido anteriormente este projeto necessita de duas placas de rede em funcionamento, uma para cada frequência. Porém pela análise das placas selecionadas foi possível perceber que havia um conflito nos pins necessários ao seu funcionamento. Ou seja, as placas de rede necessitavam simultaneamente de se conectar às mesmas portas da placa de desenvolvimento. Foi assim necessário realizar alterações nos pins de comunicação, com o objetivo de permitir esta simultânea conexão.

Este processo não foi simples já que apesar do Arduíno ter diversos pins disponíveis existia paridade nos pins digitais 2, 9,10,11,12 das placas de rede. Os pins 10,11,12 operam por protocolo *Serial Peripheral Interface* comunicando entre si em modo "*full duplex*" usando uma arquitetura "*master-slave*" (Draguino, 2020). Assim sendo ambos podiam ser partilhados à exceção do pin SS, necessitando o autor de formular e programar a sua alteração. O pin 9 funciona como "*reset*" e como as placas não funcionam em simultâneo não existe a necessidade da sua alteração. Por fim o pin 2 do tipo "dioa" necessitará também de ser alterado, evitando mais uma vez possíveis conflitos.

4.2.2 Modo económico recorrendo à variável TLE

Nos componentes de um nó a placa de rede é tipicamente o componente de maior consumo de energia. Comparando o consumo de um microcontrolador ou o dos sensores, a placa de rede usualmente consome 10 vezes mais energia. Isto explica-se porque o processo de modulação e demodulação do sinal consome imensa energético (Farahani, 2008).

Contudo a modelação LoRa, em uso neste deste documento, não atinge os consumos típicos referidos no paragrafo anterior (Semtech Corporation, 2020). Como demonstrado em testes laboratoriais efetuados no capítulo subcapítulo 4.6, a carga necessária para alimentar o microcontrolador é muito semelhante á necessária para alimentar uma placa de rede LoRa. Porém foi previamente objetivado, que apesar dos consumos da placa de rede serem baixos, estes de alguma forma, devem ainda ser mais reduzidos na sua iteração.

O estudo que efetuará os cálculos do consumo do nó final é realizado no capítulo 4.6 Power budget mais à frente, contudo é previamente concedida na fase de programação, uma configuração que permitirá diminuir ainda mais este consumo. Foi assim programado um modo económico de energia, para os momentos que o nó não se encontre em funcionamento. Desta forma, o autor desenha uma arquitetura onde a variável de entradas deriva de TLE`s, Two-line element sets, desligando a placa de rede quando a mesma não esteja a ser usada.

As TLE`s foram usadas para obter a informação do momento específico que o satélite esteja em posição de possível comunicação com o nó. Estes são carregadas na base de dados do dispositivo e permitirão ligar e desligar a placa de rede mediante as necessidades. Em suma, a placa de rede irá apenas ser ligada quando o satélite esteja próximo o suficiente para que a transmissão seja possível.

TLE`s são *mean elements* ajustados e calculados segundo um conjunto de observações através de um dos seguintes modelos SGP4/SDP4. Estes modelos permitem a rápida previsão da localização de objetos espaciais (Kelso, 1998).

Contudo “O modelo SGP4, *Simplified General Perturbation 4*, é fundado na teoria de Brouwer (Brouwer, 1959) usando o modelo *power-law density* (Lane, 1965). Desta forma este potencia e reflete o desatualizado conhecimento à data dos anos 1960´s sobre o ambiente espacial” (David A. Vallado, 2012). A somar à citação anterior, a precisão das TLE`s dependente de uma série de fatores, como a sensibilidade dos sensores usados, a quantidade de informação recolhida, o tipo de órbita e as inúmeras condições do ambiente espacial (Kelso, 1998). Assim sendo, conclui-se que estes elementos necessitam de ser continuamente atualizados no *software* do nó final, já que a certeza da posição do satélite diminui com o passar do tempo.

Para obter os TLE's, o autor recorre à base de dados da CelesTrak. Estes elementos são posteriormente introduzidos no programa Gpredict que permite obter uma lista de passagens do satélite definidas por intervalos de tempo. Contudo, após a sua introdução o autor necessitará também de definir as variáveis que lhe fornecerão alertas de passagem, como: a posição do nó final no globo e a elevação mínima possível para efetuar a comunicação.

4.2.2.1 Influência da elevação mínima no modo económico recorrendo à variável SNR

Através das TLE's é possível obter a posição do satélite em função do tempo, ou seja, é já possível saber qual a elevação do satélite em relação ao nó final ao longo do tempo, porém ainda não é possível de concluir qual a elevação mínima que permitirá realizar a comunicação. Esta elevação influenciará diretamente a distância entre o nó final e o nó intermédio no satélite e dependerá de diversos fatores que serão calculados no capítulo 4.3, mais à frente.

Após obter as TLE'S, a elevação mínima que possibilita a comunicação e as coordenadas do nó final é agora possível extrair do programa, uma lista de passagens definidas apenas por intervalos de tempo. Esta lista será finalmente introduzida no nó final e permitirá que este intercale entre modo económico e modo de transmissão.

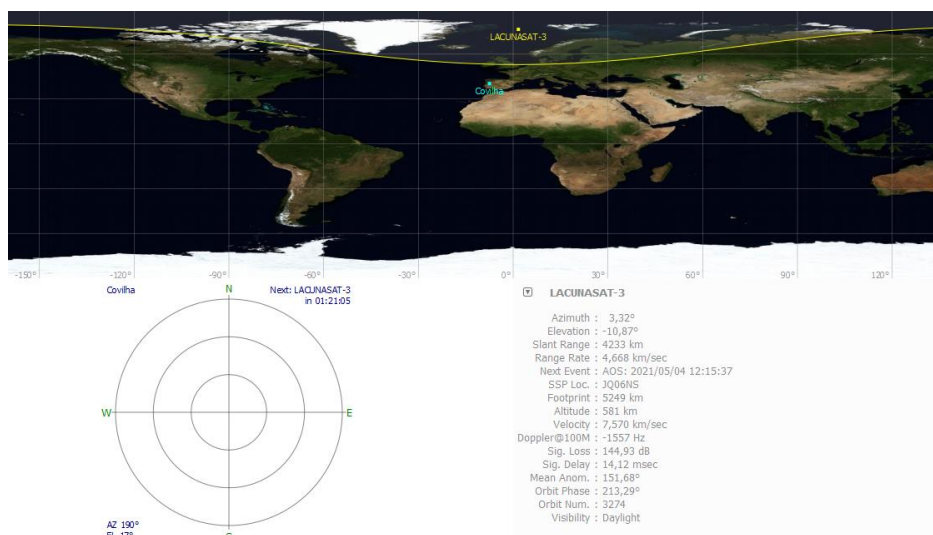


Figura 25- Print do programa Gpredict a calcular as próximas passagens do satélite LACUNASAT-3 (04/05/2021).

4.2.3 Desenvolvimento do código para o nó final

Após delinear as variáveis que influenciarão a programação do microcontrolador do módulo de processamento, será agora necessário construir um algoritmo que instrua o dispositivo segundo as suas funções.

Este código foi desenvolvido em linguagem c++, compilado e posteriormente colocado no microcontrolador. Seguidamente será representado o algoritmo, de forma gráfica para melhor compreensão.

Esta representação é elaborada através de um fluxograma utilizando a notação da figura 26.

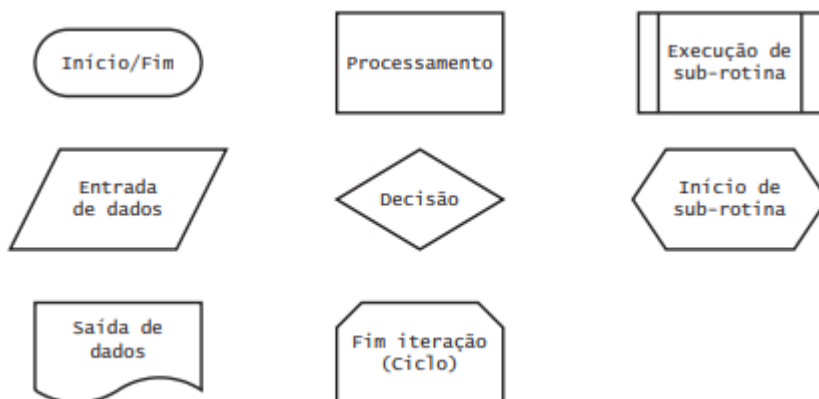
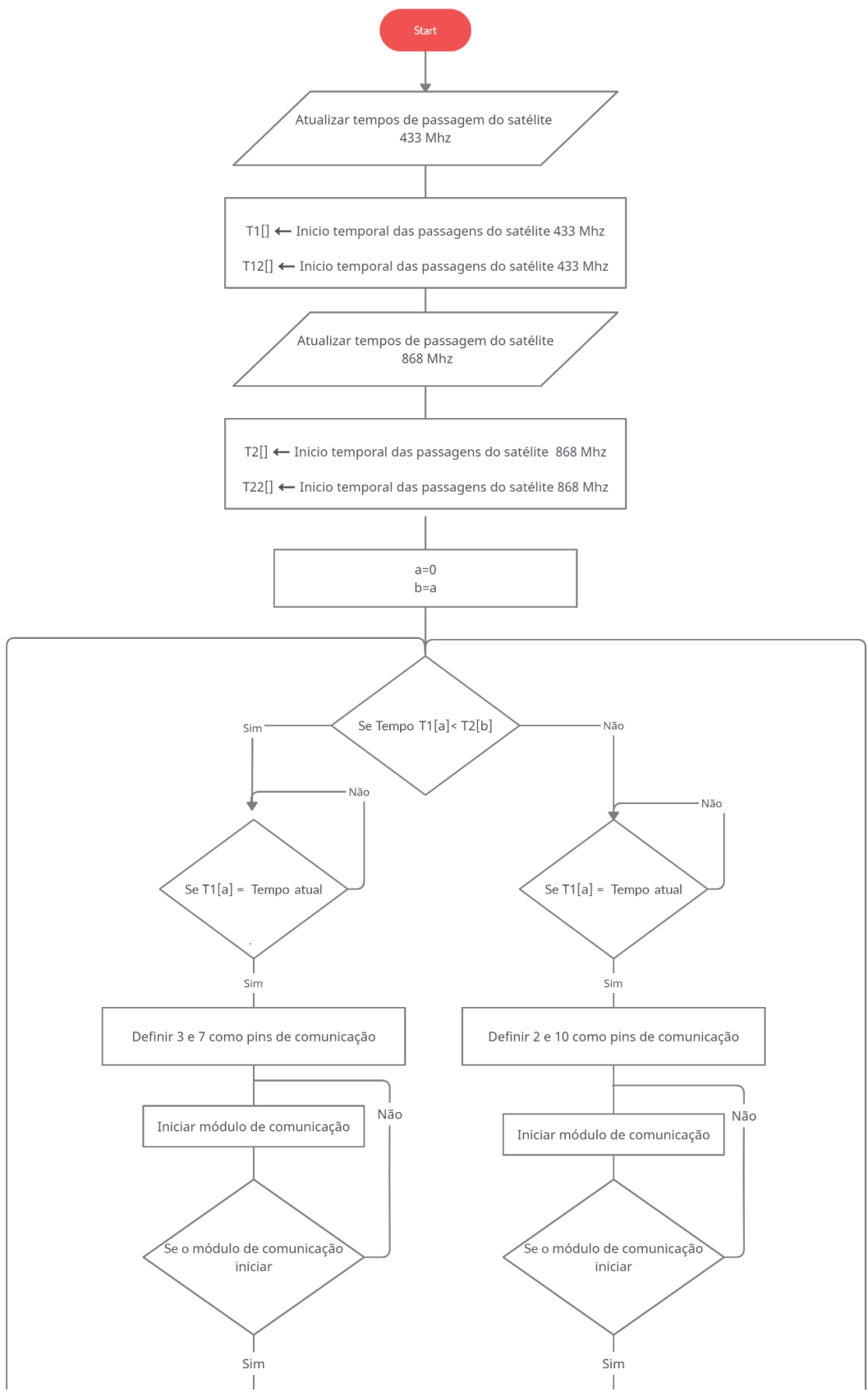


Figura 26- Notação dos Fluxogramas (Santos, 2006)

Representação gráfica:



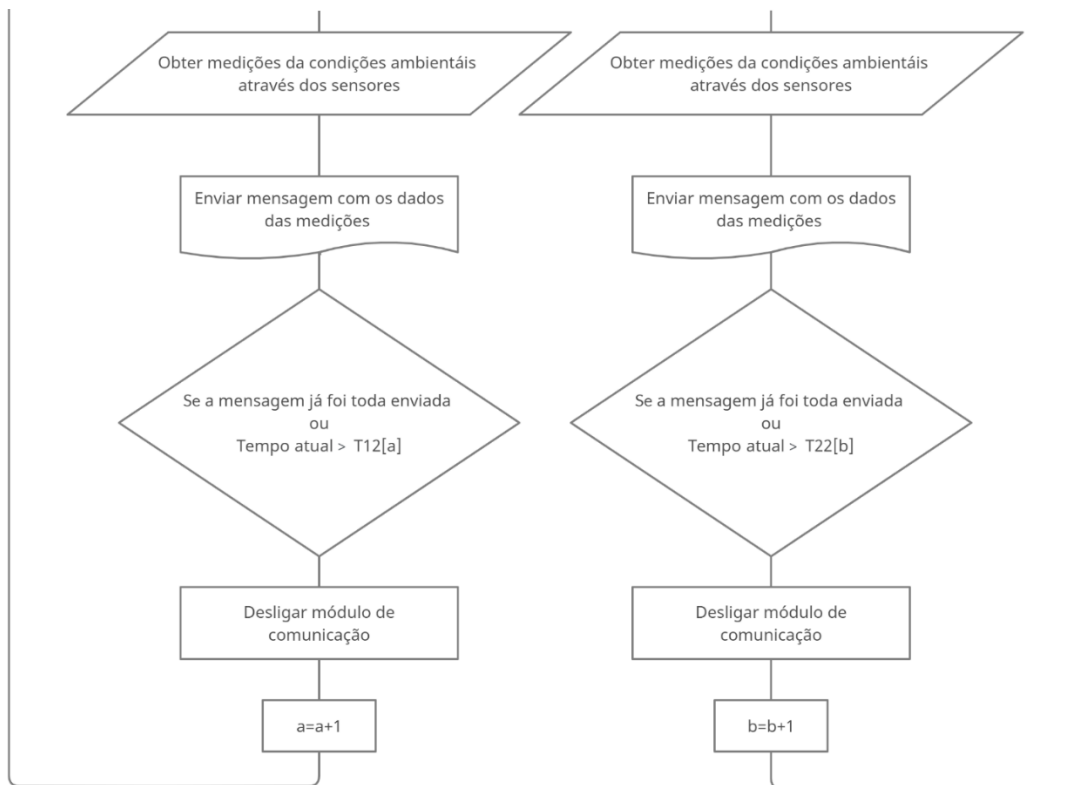


Figura 27- Fluxograma do código a correr no nó final.

4.2.4 Segurança na mensagem

IoT é uma tecnologia que se encontra atualmente em expansão pelas diversas ciências, sendo atualmente já implementada em inúmeros equipamentos críticos. (So-Eun Lee, 2017). Equipamentos estes que executam tarefas importantes do nosso dia-a-dia e requerem alguma segurança contra os ataques informáticos que podem provocar falhas catastróficas.

A insipiência perante esta necessidade ou a falta de conhecimento de algumas empresas para a implementar barreiras de segurança a ataques cibernéticos pode facilitar a entrada de muita tecnologia insegura no mercado.

IoT é um conceito muito recente e de enorme tentação aos investigadores pela sua inovação. Diferentes indústrias estão a tentar entrar neste mercado o mais rapidamente possível, saltando passos na construção de um sistema ideal, não realizando testes de segurança e oferecendo má ou até nenhuma encriptação do equipamento (Cerrudo, 2020).

Existem vários motivos que levam a execução destes ataques, entre eles (Chen Han, 2014):

- Extorsão de dinheiro
- Terrorismo cibernético
- Ataques governamentais (guerra geopolítica, conflito de interesses)
- Ativismo

Na tentativa de colmatar esta falha, um grupo de empresas desenvolveu um protocolo de comunicação que afirmam fornecer alguma segurança para as comunicações LoRa (Alliance, 2020) . Contudo este protocolo, denominado LoRaWan, possui uma falha crítica na sua implementação. As chaves de encriptação para as mensagens estão a ser distribuídas sem rigor pelos fabricantes e investigadores (Cerrudo, 2020). Resumidamente, possuímos mensagens seguras sob uma boa fechadura, mas existe uma enorme facilidade de adquirir as suas chaves.

Entrando no sistema um *hacker* pode executar várias operações como (Muhammed Zekeriya, 2020):

- *Message sniffing*
- Adicionar mensagens no canal
- Desconexão do equipamento
- *Jamming*

Provocando danos, acidentes, perdas monetárias ou até vidas. Assim sendo, algumas entidades sentiram-se obrigadas a desenvolver *softwares* que fornecessem alguma proteção extra. Estes *softwares* alertam o utilizador se este estiver a ser atacado ou se a rede já foi atacada no passado, permitindo ainda testar algumas possíveis fragilidades.

Estes softwares podem ser descarregados da Github e o autor pode constatar que as mesmas eram capazes de:

Executar ofensivamente	Executar defensivamente
<ul style="list-style-type: none"> Traffic sniffing, ou seja, capturar o tráfego mensagens. 	<ul style="list-style-type: none"> Análise de tráfego Dispositivos ativados através de método ABP
<ul style="list-style-type: none"> Spoofing, ou seja, fingir falsamente a identidade de um nó. 	<ul style="list-style-type: none"> Verificar possíveis chaves fracas
<ul style="list-style-type: none"> Fuzzing, ou seja, sobrecarregar o canal com demasiada informação 	<ul style="list-style-type: none"> Detetar Informação injetada na rede
<ul style="list-style-type: none"> Descobrir chaves 	<ul style="list-style-type: none"> Detetar sessões duplas
	<ul style="list-style-type: none"> Número de dispositivos conectados

Tabela 9-Capacidades do software descarregado da Github

Trata-se de um software que tanto executa tarefas ofensivas para testar a nossa rede como defensivas com a sua implementação. Pede-se assim prudência na sua utilização, já que as suas capacidades ofensivas quando executado com propósitos maliciosos, que não sejam os de testar a nossa própria rede, trarão efeitos danosos para outras pessoas.

Como conclusão, percebeu-se que as comunicações LoRa possuem algumas falhas de segurança e a Spaceway deverá utilizar algum tipo de ferramenta que as combata. Deverá ainda alterar todas as chaves de encriptação de origem e não as fornecer a ninguém.

4.3 SNR

O autor possui neste momento, da dissertação, o equipamento selecionado, porém ainda não existe forma de saber se o mesmo terá capacidade para transmitir até um outro nó colocado em posição orbital. Esta dúvida poderá, contudo, ser resolvida através de um complexo estudo *Signal-to-noise ratio*.

A elaboração de um estudo SNR é um passo importante para o desenvolvimento de um dispositivo de comunicação sem fios. Através deste será possível obter os resultados teóricos do desempenho do equipamento, com a contagem dos ganhos e das perdas sob condições específicas da experiência (Jim Zyren, 1998). Permitindo o seu posterior ajuste.

Com o objetivo de colmatar esta falha, no decorrer deste capítulo, irá ser realizado o estudo anteriormente mencionado para uma mensagem em *uplink*. Ou seja, compreender se o equipamento irradia potência suficiente para transmitir até uma posição orbital de 500 km de raio. E caso consiga, qual a elevação mínima do satélite que a permitirá realizar.

Como primeiro objetivo começar-se-á por perceber as variáveis que influenciarão a receção do sinal, posteriormente estas serão incluídas numa fórmula que permitirá ao autor elaborar as suas conclusões.

4.3.1 Potência de transmissão

P_t , a primeira variável que influenciará a receção, representa o valor de potência em watts que o rádio consegue transmitir. Devido à patente efetuada pela Semtech, todas as placas de rede LoRa devem ser obrigatoriamente equipadas com chips legalmente fabricados. Segundo esta restrição, o autor selecionou já anteriormente o chip nº SX1276 da Semtech, para o qual o seu *datasheet* garante uma potência de transmissão máxima de 100mW.

Para a inclusão desta variável em estudo SNR, a potência de transmissão deve ser convertida para dBW. E pode ser feito através da seguinte fórmula (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999):

$$P_{dBW} = 10 \log_{10}(P_w) ; P_w = 0.100W \quad (2)$$

$$P_t = -10dBW$$

4.3.2 Perdas no cabo e nas conexões

As L_l expressam-se em unidades de dB e englobam as perdas de sinal entre a placa e a antena, representando assim as perdas no cabo e nas conexões. Durante o processo de prototipagem, o autor opta por implementar um cabo de pequenas dimensões, o que significa que a antena se encontrará a uma curta distância da fonte de potência. Nestes casos e para a banda de frequências em estudo, é assim usual assumir um valor de perdas no transmissor igual a $L_{lt}=0.5$ dB (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999). No mesmo seguimento assume-se também um valor de $L_{lr}=0.5$ dB para as perdas no recetor.

4.3.3 Ganho da antena

G, unidade expressa em dBi. Representa o acréscimo na força do sinal, na direção pretendida, que as antenas selecionadas permitirão em comparação com uma antena isotrópica. Ou seja, em relação a uma antena que irradia a mesma intensidade em todas as direções (Thomas Norman CPP, PSP, CSC, 2014).

Para este cálculo, é necessário considerar o ganho permitido pelas duas antenas desta comunicação. G_t representará assim o ganho da antena do emissor e G_{rp} o ganho da antena recetora.

Na determinação do ganho de uma antena circular deve-se ter em atenção algumas variáveis fundamentais, como (Kymeta Corporation, 2019):

- O ângulo de abertura, θ , do satélite em relação ao eixo da antena.
- O ângulo de elevação, α , do satélite em relação ao plano horizontal da antena
- O ângulo de abertura do satélite em relação ao plano de referência vertical da antena, ϕ . Neste ponto, é necessário formular que a antena anteriormente

selecionada não possui significativas variações do seu ganho em função de ϕ , como é possível de observar na figura 29. Acabando este por ser ignorado.

- O ganho máximo da antena.
- O *cosine rol-off*, que representa a diminuição do ganho da antena pelo aumento do angulo de abertura.

Para uma maior facilidade de entendimento das variáveis anteriormente mencionadas, pede-se atenção à figura 28.

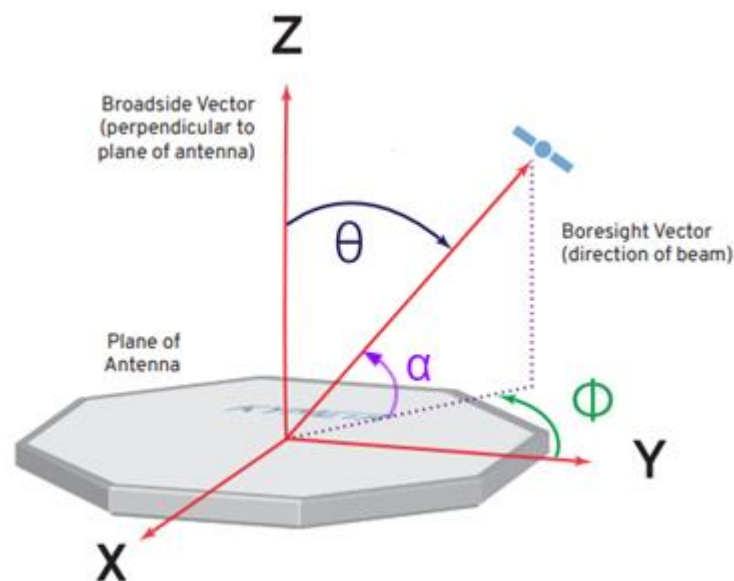


Figura 28- Ângulos formados em relação aos eixos de referência da antena pelo satélite, adaptado de (Kymeta Corporation, 2019).

Por fim, é assim possível obter o ganho em função de θ , na equação demonstrada seguidamente, (Kymeta Corporation, 2019).

$$G(dB_i) = \text{Ganho máximo}(dB_i) - \text{cosine roll-off} \times 10 \times \log(\cos \theta) \quad (3)$$

Contudo, inesperadamente, a antena que autor pretende implementar não possui um *cosine rol-off* explícito na sua documentação de venda. Em alternativa, foi possível obter do vendedor do diagrama final de radiação $G(dB_i)$. Porém, esta diagrama não

serve de muito, o que o autor pretende é a função que a origina, para a poder implementar no estudo SNR.

Como solução a este problema é assim decidido obter uma função aproximada do diagrama $G(dB_i)$ apresentado.

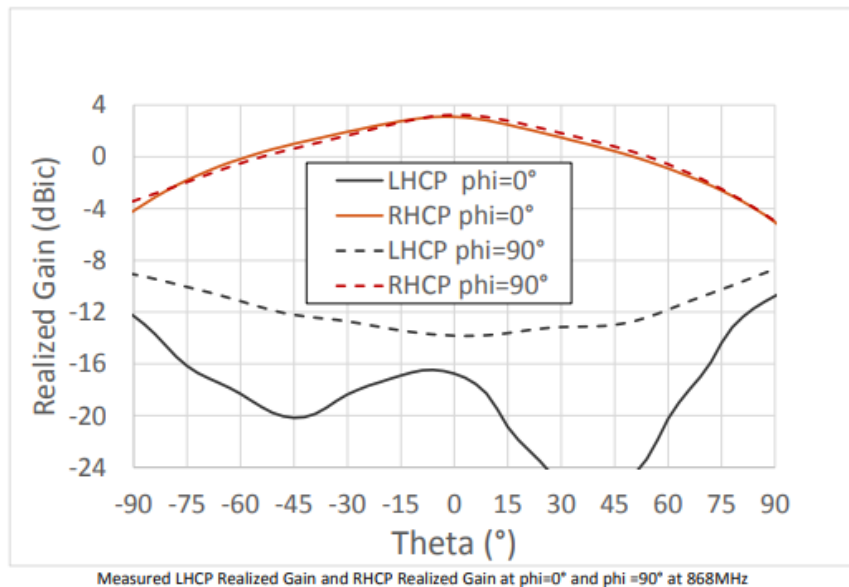


Figura 29- Diagrama de radiação da antena RF Things RT-CP3-QL-XXX-YYY-ZZZ, adaptado de (RF Things, 2020)

Esta função aproximada, foi assim obtida através de uma interpolação de Lagrange das coordenadas obtidas do diagrama da figura 29, alcançando por fim o seguinte polinómio:

$$G(dB_i) = 6.172839506172 \times 10^{-7}\theta^3 - 0.000888889\theta^2 - 0.0105556\theta + 2.7 \quad (4)$$

De outra forma G_{rp} , ou seja o ganho da antena do satélite, foi fornecido por um dos parceiros da Spaceway. Este apresenta um valor constante de 2.37 dBi.

4.3.4 Largura de banda do sinal

Alguns protocolos de comunicação LoRa disponíveis no mercado restringem a largura de banda aos valores 125 KHz 250 KHz e 500 KHz (The Things Industries, 2021). Porém, na comunicação espacial, a indústria por vezes opta pela utilização de protocolos próprios e customizados (Fossa Systems, s.d.), que se restringem a seus

próprios valores. Contudo, não pode ser escolhido um valor arbitrário para a largura de banda, pois os chips da Semtech têm os seus próprios limites de funcionamento (Semtech Corporation, 2020). De exemplo os chips SX1276 facultam ao utilizador 10 possíveis patamares demonstrado na tabela 10.

Signal Bandwidth	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BW_L [kHz]	7.81	10.42	15.63	20.83	31.25	41.67	62.5	125	250 ¹	500 ¹

Tabela 10- Opções de largura de banda para o chip LoRa SX1276, adaptado de (Semtech Corporation, 2020)

A influência da largura de banda do sinal para o estudo SNR expressa-se em dBHz e é obtida através da seguinte formula (Kymeta Corporation, 2019):

$$BW=10 \log_{10} \left(\frac{\text{channel BW}}{1 \text{ Hz}} \right) \quad (5)$$

Para uma largura de banda típica de 125 kHz foi obtido um valor de BW de aproximadamente 50.97 dB Hz.

4.3.5 Free Space Path Loss

FSPL, representa a atenuação do sinal pela sua propagação no espaço livre, num percurso onde duas placas de rede estejam em linha de visão um com o outro (Syad Kamrul Islam, 2010). Não calculando assim as suas perdas por atenuação do sinal, mas sim pela sua propagação no meio (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993).

FSPL deriva da fórmula de transmissão Friis e como será demonstrado seguidamente o seu valor aumenta com a distância entre as antenas (emissora e recetora) e diminuindo com o comprimento de onda do sinal (Friis, 1964).

Adaptação da fórmula de transmissão Friis :

$$\frac{P_r}{P_t} = D_t \cdot D_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 ; P_r \text{ potencia recebida} ; P_t \text{ potencia transmitida} \quad (6)$$

Porém o valor de FSPL não é diretamente retirado da fórmula de Friis, esta ainda deve ser modificada. Pode-se assim formular o FSPL através dos fatores seguintes:

1. A intensidade (I), uma vez que após a transmissão a densidade das ondas rádio diminuem com o quadrado da distância de acordo com a lei da inversa do quadrado.
2. *Antenna capture area* (A_{eff}), este fator representa a quantidade de energia captada pela antena recetora e é proporcional a um outro fator denominado *antenna aperture*. Este por sua vez aumenta com o quadrado do comprimento de onda, (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993).
3. A diretividade da antena transmissora e da recetora influenciam também o FSPL, porém nesta formulação intermédia assume-se que o equipamento é isotrópico. Declarando a diretividade da antena recetora igual à diretividade da antena emissora e ambas com valor igual a 1.

Neste ponto o autor é já capaz de formular o FSPL, e o mesmo pode ser dado por:

$$FSPL = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2, \lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

Mas mais uma vez, este valor deve ser dado sob variável que representa a alteração da força de sinal. Ou seja, em decibéis:

$$FSPL \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \right) \quad (8)$$

Ou, mais simplificadamente:

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \quad (9)$$

Mediante as unidades da frequência aplicadas na fórmula anterior, pode-se ainda representá-la sob as seguintes formas:

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92.45; \quad d[\text{km}], f[\text{GHz}] \quad (10)$$

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 87.55; \quad d[\text{m}], f[\text{KHz}] \quad (11)$$

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 27.55; \quad d[\text{m}], f[\text{MHz}] \quad (12)$$

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44; \quad d[\text{km}], f[\text{MHz}] \quad (13)$$

Chegando a este ponto, o autor deverá agora substituir o resto das suas variáveis. A distância, d , é dada em função do ângulo de elevação, α , e pode obtida por (Cakaj, Kolici, Shurdi, & Kamo, 2011):

$$d = R_E \left[\sqrt{\left(\frac{H+R_E}{R_E}\right)^2 - \cos^2(\alpha)} - \sin^2(\alpha) \right] \quad (14)$$

Onde R_E é o raio da Terra e H a altitude da órbita. Obtendo assim:

$$d = 6378 \left[\sqrt{\left(\frac{500+6378}{6378}\right)^2 - \cos^2(\alpha)} - \sin^2(\alpha) \right] \quad (15)$$

Por sua vez a fórmula de FSPL substitui-se assim para:

$$\text{FSPL}(dB) = 20 \log_{10} \left(6378 \left[\sqrt{\left(\frac{500+6378}{6378}\right)^2 - \cos^2(\alpha)} - \sin^2(\alpha) \right] \right) + 20 \log_{10}(f) + 32.4; \quad d[\text{km}], f[\text{MHz}] \quad (16)$$

Para finalizar, sabe-se ainda que $\alpha = 90 - \theta$, obtendo finalmente:

$$\text{FSPL}(dB) = 20 \log_{10} \left(6378 \left[\sqrt{\left(\frac{500+6378}{6378}\right)^2 - \cos^2(90 - \theta)} - \sin^2(90 - \theta) \right] \right) + 20 \log_{10}(868) + 32.44, \quad d[\text{km}], f[\text{MHz}] \quad (17)$$

4.3.6 Perdas na atmosfera

L_a é a atenuação do sinal pela sua passagem na atmosfera. A medida que o sinal atravessa a atmosfera as diferentes moléculas aí presentes absorvem a energia do sinal a diferentes razões em função da sua frequência, (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999)

As perdas de energia pela sua propagação na atmosfera terrestre são demonstradas na figura 30.

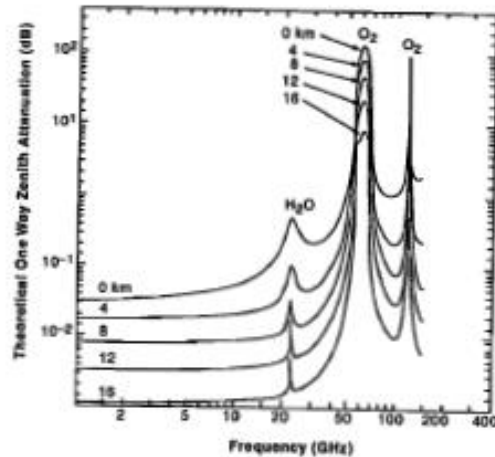


Figura 30- Atenuação teórica vertical unidirecional desde uma altitude específica até ao topo da atmosfera. A parcela assume 7,5g/m³ de vapor de água à superfície, e não inclui o efeito da atenuação da chuva ou da nuvem, (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999)

A figura fornece valores de atenuação para um contacto posicionado a 90° de elevação. Ou seja, representam o momento que o satélite está sob o eixo da antena. Porém para ângulos de elevação α superiores a 5°, o valor da atenuação é dado pelos valores da figura divididos por $\sin(\alpha)$ (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999).

Contudo uma breve análise da figura, demonstra que o valor em causa, para as frequências em trabalho deste documento, é pouco significativo. Optando o autor por o ignorar.

4.3.7 Ionospheric Scintillation

L_i situada em zonas de alteração do índice de refração que provoca efeitos de *scattering e multipath*. Para frequências a baixo 1000 MHz o efeito de *ionospheric scintillation* pode causar significantes flutuações na amplitude na fase da receção, possibilitando até mesmo a sua interrupção (Capela, 2012). Para compensar tais atenuações no sinal provocadas por este fator, o autor decide adicionar uma margem de segurança. Margem esta denominada aqui de *link margin*, permitindo a tolerância deste fenómeno.

4.3.8 Atenuação por precipitação

L_r , representa a atenuação do sinal pela sua passagem em altas concentrações de vapor de água presente na atmosfera, ou seja, pela precipitação. Este valor dependerá de inúmeros fatores, como a altitude das nuvens, a sua densidade, a taxa de precipitação mm/h, a sua polarização, frequência e localização (Kymeta Corporation, 2019).

Por análise do trabalho elaborado de Sc.D. Crane em 1971 foi possível de perceber que mais uma vez a banda de frequências em estudo neste documento não é afetada significativamente pela precipitação. Já que à medida que a frequência se aproxima de valores perto de 1 GHz os valores de atenuação em função da distância percorrida pelo sinal em espaço sob precipitação tendem para zero. Como se pode ver na figura 31.

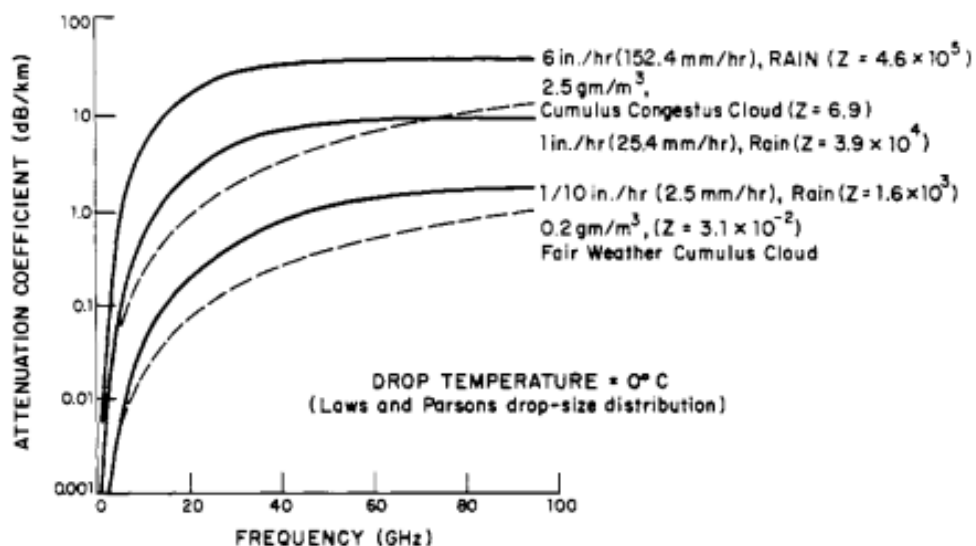


Figura 31 Coeficiente de atenuação para gotículas de água, (Crane, 1971).

4.3.9 Ruído térmico do sistema

T_s , representa as atenuações no sinal provocadas pela temperatura do sistema. Este termo é usualmente usado para quantificar o ruído gerado pelos componentes do sistema de recepção (Diggelen, 2014). Para maior precisão no cálculo do SNR o autor determinará seguidamente estas perdas por ruído térmico.

Entre os componentes do sistema de recepção, inicialmente será analisada a camada analógica do hardware, ou seja, o caminho que o sinal percorre no equipamento de recepção antes de ser convertido a digital. Aqui será incluído assim a antena, o cabo de conexão ao *low-noise amplifier*, o próprio LNA, o seu cabo de conexão ao *Down Converter* e o próprio *Down Converter*.

A soma em cascata das temperaturas de ruído dos diferentes componentes no circuito é denominada de temperatura equivalente, T_{eq} , que por sua vez corresponde ao valor T_s pretendido. Este valor, T_{eq} , pode ser calculado pela fórmula de Friss's, considerando assim os diferentes equipamentos mencionados anteriormente, (Diggelen, 2014).

$$T_{eq} = T_A + (F_1 - 1)T + \frac{(F_2 - 1)T}{G_{r1}} + \frac{(F_3 - 1)T}{G_{r1}G_{r2}} + \dots + \frac{(F_n - 1)T}{G_{rn}G_{rn}G_{rn}} \quad (18)$$

Onde:

- T_A , representa a quantidade de ruído que uma antena produz num determinado ambiente.
- F , a *noise figure* dos diferentes componentes. De salientar que componentes ativos como a antena e o LNA, têm um valor específico fornecido pelo fabricante. Já para componentes passivos como os cabos e filtros o seu *noise figure* é dado pelo inverso de G_r , $F = \frac{1}{G_r}$.
- G_r representa a razão da potência obtida, que tal como o, F , expressão uma razão de magnitude.

$$G = 10 \log_{10}(G_r) \quad (19)$$

- T , representa a temperatura ambiente.

Os equipamentos são somados a fórmula no sentido do caminho percorrido pelo sinal, começando pela antena seguida do cabo, seguida pelo LNA, seguida pelo segundo cabo e por último o *Down Converter*.

Em primeiro lugar, de salientar que segundo o modelo de referência atmosférico NRLMSISE-00 para uma altitude de 500 km a densidade das partículas existentes é tão baixa (Picone, Hedin, Drob, & Aikin, 2002), que o autor assume que se encontraria em situação de vácuo. Assim sendo, a temperatura de uma antena

colocada nesta situação não será influenciada pela atmosfera, dependendo apenas da sua frequência (J. Dijk, 1968). Após esta conclusão o autor sabe que deve encontrar algum estudo que relacione T_A apenas com a frequência de operação. Para a frequência pretendida é usual assumir T_A de 290K (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999)

De notar ainda que durante este processo não houve acesso às especificações do equipamento usados no satélite. Dessa forma avança alguns valores usuais para a eletrónica mencionada obtidos através de uma pesquisa de mercado.

Foi também assumida uma possível temperatura ambiente de 290k para o bom funcionamento do equipamento.

	[dB]	Razão
T_A , Antena		290
G_1 , Cabo	-0.25	0.94
F_1 , Cabo		1.06
G_2 , LNA	22	1.17
F_2 , LNA	0.7	158.49
G_3 , Cabo	-0.25	0.94
F_3 , Cabo		1.06
F_4 , Down Converter		7
T_S [K]		372.39
	[K]	
T	290	
T_A , Antena	290	

Tabela 11- Valores assumidos e obtidos no cálculo da temperatura de ruído T_S .

As perdas por ruído térmico do sistema em função da sua temperatura de ruído T_S [K] podem ser dadas por:

$$T_S = 10 \log_{10}(372.39) = 26.5 \text{ dBK} \quad (20)$$

4.3.10 Link Margin

A L_m representa um valor pressuposto e acrescentado para precaver efeitos de perdas não esperados ou impossíveis de contabilizar (Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle, 1999). Incluindo todas as margens de erro anteriormente mencionadas no seguimento do cálculo do SNR. Relativamente a isto considera-se, para este efeito, uma margem final fixa de 15 dBm.

4.3.11 Constante de Boltzmann`s

Representa a mínima sensibilidade teórica de um dispositivo recetor (Kymeta Corporation, 2019). Esta constante, representada pela letra “k”, tem um valor de $-228 \text{ dBW}/(\text{K}\cdot\text{Hz})$.

4.3.12 Resultados

Após introdução do significado das variáveis, inicia-se agora a sua substituição na fórmula. Demonstrar-se-á então a razão de potência em dB da soma dos ganhos e das perdas do sistema na função seguinte.

$$SNR(dB) = P_t(dBW) - L_{lt}(dB) + G_t(Dbi) - BW(dBHz) - FSPL(dB) - L_a(dB) - L_r(dB) - L_i(dB) + G_{rp}(Dbi) - T_s(dBK) - L_{lr}(dB) - L_m(dBm) - k(dBW/(\text{K}\cdot\text{Hz})) \quad (21)$$

Com a substituição, na fórmula, dos valores calculados anteriormente obtém-se:

$$SNR(dB) = -10 - 0.5 + (6.172839506172 \times 10^{-7} \theta^3 - 0.000888889 \theta^2 - 0.0105556 \theta + 2.7) - 50.97 \left(20 \log_{10} \left(637 \left[\sqrt{\left(8 \frac{500+6378}{6378} \right)^2 - \cos^2(90 - \theta)} - \sin^2(90 - \theta) \right] \right) + 20 \log_{10}(868) + 32.44 \right) + 2.37 - 26.5 - 0.5 - 15 + 228.6$$

Representa-se agora de seguida o gráfico da função $SNR(dB)$.

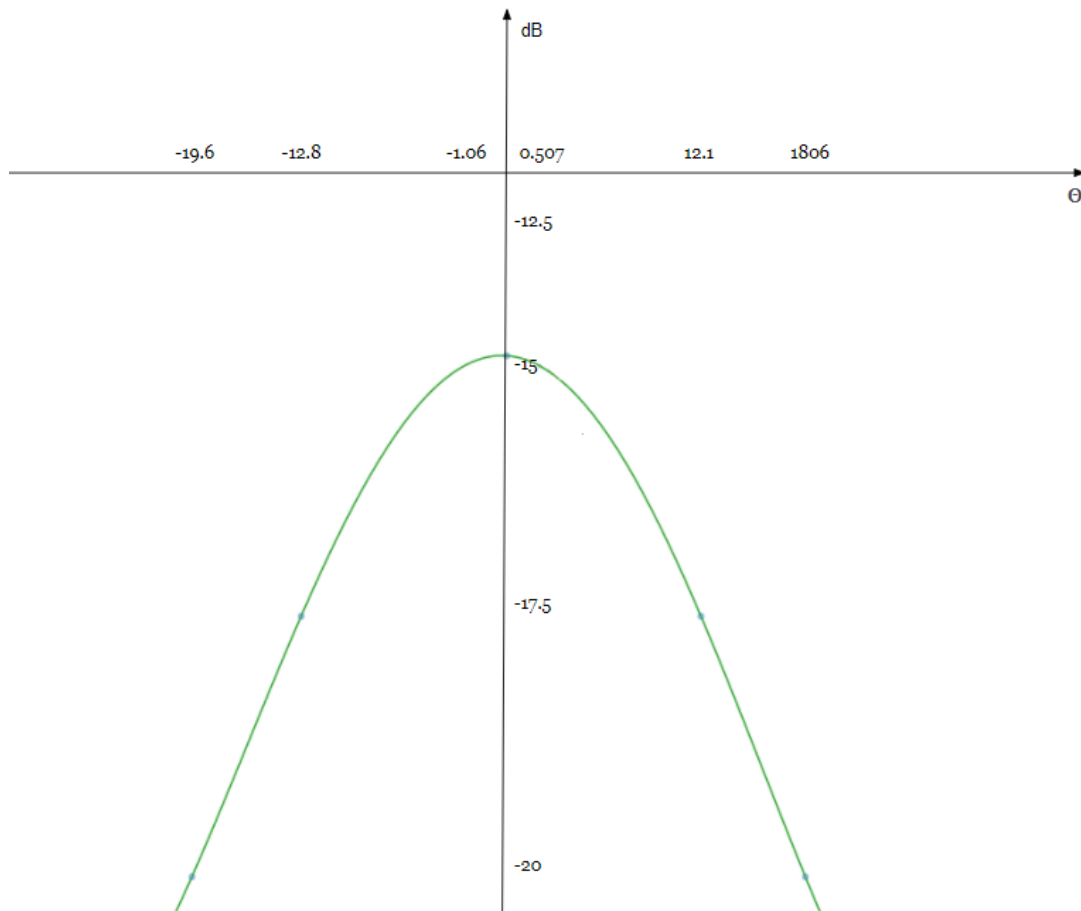


Figura 32- Gráfico da função $SNR(dB)$ obtida.

É possível observar a sua forma em parábola invertida. Onde se conclui que o aumento, em módulo, do ângulo θ diminui consideravelmente o valor de SNR.

4.3.13 Pré-Conclusões de Subcapítulo

Neste momento do estudo é possível determinar qual a força do sinal aquando a sua receção na órbita. Porém não se sabe ainda qual o valor mínimo de SNR que possibilita a comunicação. Ou seja, sabe-se, por exemplo, que para uma posição de $0,507^\circ$ de elevação do satélite em órbita o SNR do sinal chega com um valor de -15, porém não se sabe se o recetor é sensível para este valor. É assim necessário após este passo delinear estes limites.

4.4 Limites da comunicação em função de θ

Estes limites não são assim tão lineares de obter, uma vez que a sensibilidade do recetor depende do SF aplicado no dispositivo (Semtech Corporation, 2020). Ou seja, um aumento do SF permite uma comunicação onde o SNR atinja valores mais baixos, possibilitando assim a comunicação para valores de θ maiores.

Com o objetivo de perceber os valores de θ máximos para cada patamar de SF o autor calcula os pontos de interseção da curva SNR com os valores de SNR limite para cada patamar de SF. Como demonstrado no gráfico da figura 32.

Porém, em primeiro lugar foi necessário obter do fabricante de chips LoRa uma tabela da relação SF com o SNR limite. Esta foi fornecida pela Semtech e encontra-se na tabela 12.

Spreading Factor	Chips/symbol	SNR limit	Time-on-air (10 byte packet)	Bitrate
7	128	-7.5	56 ms	5469 bps
8	256	-10	103 ms	3125 bps
9	512	-12.5	205 ms	1758 bps
10	1024	-15	371 ms	977 bps
11	2048	-17.5	741 ms	537 bps
12	4096	-20	1483 ms	293 bps

Tabela 12-LoRa Spreading Factors (125 kHz bw), (Semtech Corporation, 2020).

Apresenta-se agora o gráfico de interseção que dita uma previsão dos valores máximos de θ para cada patamar de SF.

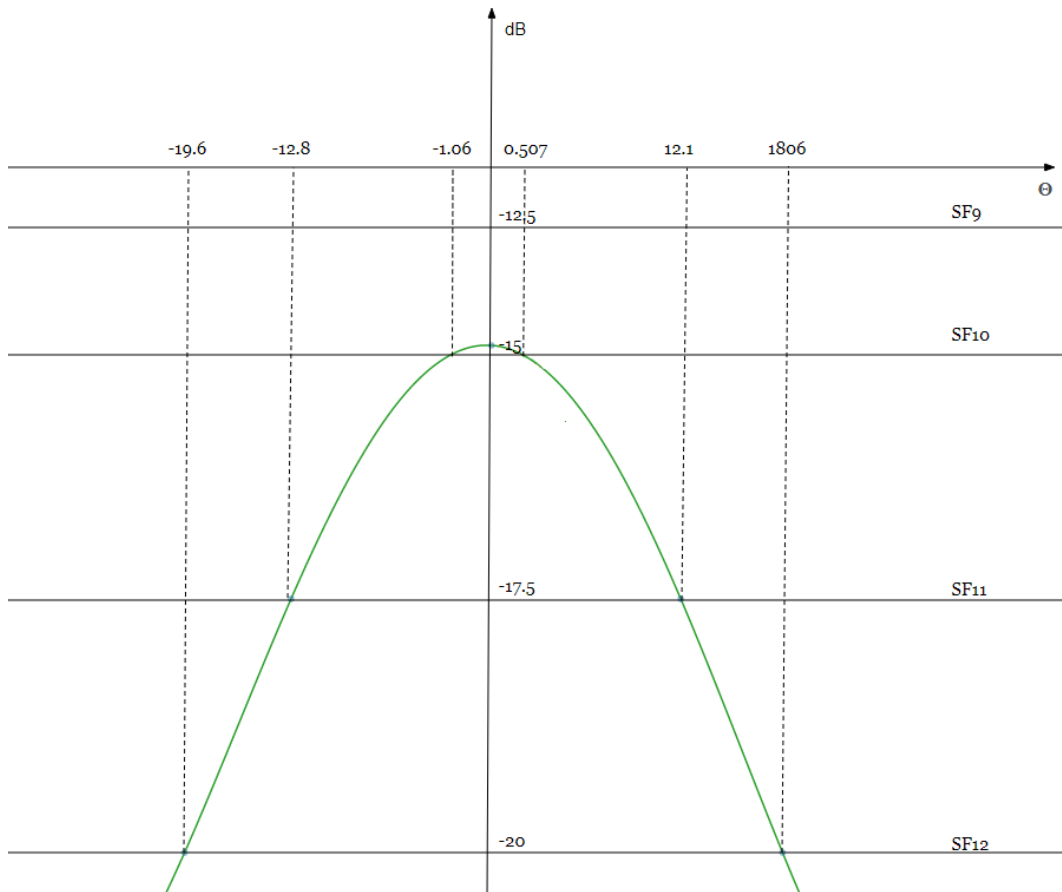


Figura 33- gráfico de interseção da curva SNR com os valores de SNR limite para cada patamar de SF.

Fecha-se assim esta parcela de estudo, com as seguintes conclusões declaradas na tabela 13. Onde se pode observar os intervalos do ângulo de abertura que permitem estabelecer comunicação em função do SF.

SF	θ
SF10	[-1.06, 0.507]
SF11	[-12.8, 12.1]
SF12	[-19.6, 18.6]

Tabela 13- Intervalos do ângulo de abertura que permitem estabelecer comunicação em função do SF.

Em suma, foi obtida a interseção da curva de SNR com os diferentes valores de sensibilidade mínima do recetor para cada patamar de SF. Desta interseção é assim possível retirar o intervalo de elevações que permitem estabelecer comunicação em

função de SF. Por sua vez os limites destes intervalos ditam a elevação mínima, do satélite, que possibilita estabelecer comunicação.

4.5 Data budget

No subcapítulo anterior foi concluído que apenas o SF12, SF11 e SF10 possibilitam estabelecer contacto entre o nó e satélite. Porém as características, das comunicações estabelecidas através destes diferem.

Estas características da comunicação foram já explicadas no estado da arte desta dissertação. Porém, resumidamente, sabe-se que apesar do aumento do SF possibilitar uma maior distância de comunicação e por sua vez uma maior dimensão do intervalo de elevações, a comunicação será realizada sob valores de *bitrate* menores.

SF	Bitrate
SF10	977 bps
SF11	537 bps
SF12	293 bps

Tabela 14- Relação entre SF e bitrate do chip n° SX1276 da Semtech, (Semtech Corporation, 2020).

Este *Bitrate*, representa a porção de informação transferida numa determinada quantidade de tempo (Gupta, 2014). Ou seja, quando maior este valor, maior será o tamanho da mensagem. Com o objetivo de obter o tamanho desta mensagem, o autor precisará primariamente de obter o tempo da transmissão. Este, por sua vez, provém indiretamente da dimensão do valor de θ , calculado anteriormente.

Esta dimensão dar-nos-á, diretamente, o ângulo de β , essencial ao cálculo do tempo de transmissão.

Não é diretamente possível obter o tempo da transmissão em função de θ , pois θ não se relaciona proporcionalmente com a posição orbital do satélite. Existe assim a necessidade de encontrar uma variável intermédia que se relacione com ambas as grandezas referidas anteriormente. Deste modo surge a variável, ângulo β .

A relação entre as 3 entidades explica-se acessivelmente através da figura seguinte, onde se pode observar que a origem do referencial centro da terra é mútua apenas para as identidades: referencial posição orbital e referencial ângulo β .

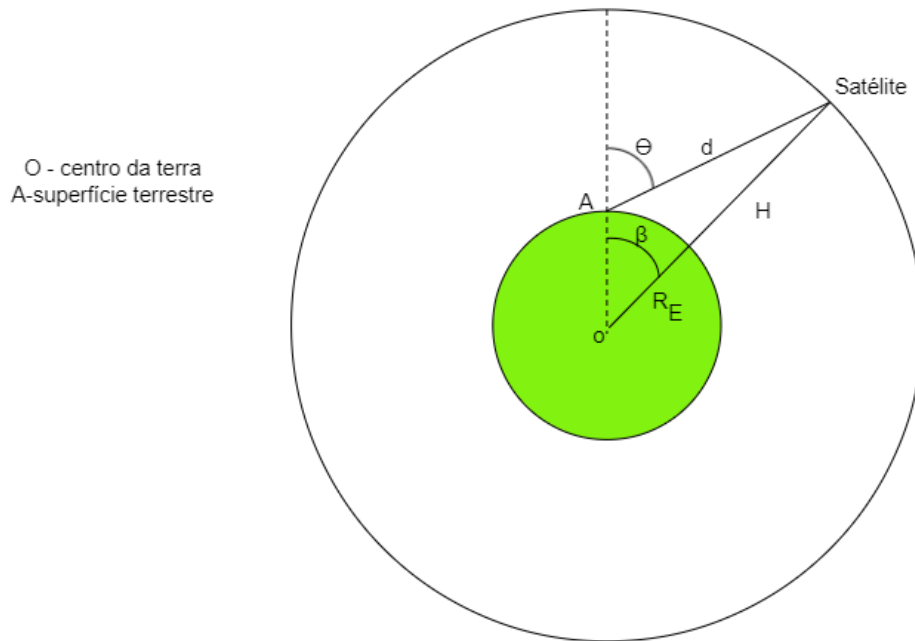


Figura 34- Ângulos θ e β em órbita circular terrestre

Nos passos seguintes deste capítulo o autor relacionará θ com a posição orbital através da variável intermédia β .

Pela lei dos senos sabe-se que:

$$d \sin(\theta) = (H + R_E) \sin(\beta) \quad (22)$$

H representa a altitude da órbita do satélite em relação à superfície terrestre e é fornecido por um dos parceiros de satélites LoRa da Spaceway, possui um valor de 500 Km. R_E , representa o raio da terra e é assumido com um valor de 6378 Km. A variável d é mais uma vez obtida através do trabalho de (Cakaj, Kolic, Shurdi, & Kamo, 2011)

$$d = 6378 \left[\sqrt{\left(\frac{500+6378}{6378}\right)^2 - \cos^2(90 - \theta) - \sin^2(90 - \theta)} \right] \quad (23)$$

Logo:

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{d \sin(\theta)}{6878} \right) \quad (24)$$

Substituindo na equação:

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{6378 \left[\sqrt{\left(\frac{500+6378}{6378}\right)^2 - \cos^2(90 - \theta) - \sin^2(90 - \theta)} \right] \sin(\theta)}{6878} \right) \quad (25)$$

Sabendo que β se relaciona proporcionalmente com a posição orbital. É possível formular o tempo de transmissão, t , em função do período, T , e do ângulo β .

Ou seja:

$$t = \frac{4\beta * T}{360} \quad (26)$$

A fórmula acima, expressa uma divisão equitativa do período segundo a sua órbita. Tal facto deve-se à órbita circular descrita pelo satélite, deste documento. Uma órbita circular caracterizando-se por possuir uma velocidade angular constante (Kluever, 2003) . Que por sua vez dita a variação constante, de posição orbital, em função do tempo. Ou seja, o tempo de translação de um movimento orbital 2β demonstrado na figura 35, em exemplo, é duas vezes superior ao tempo de translação de um movimento orbital β .

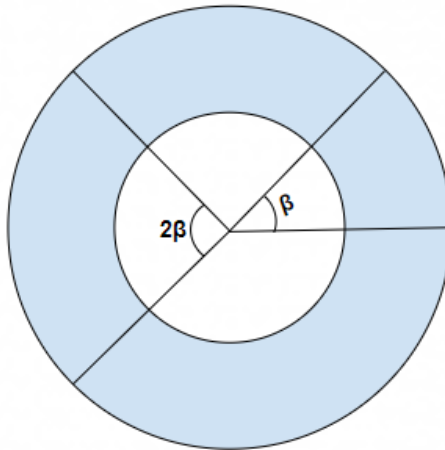


Figura 35- Representação de movimentos orbitais β e 2β .

Para terminar o cálculo do tempo de comunicação, a obtenção do valor do período da órbita ainda deve ser realizada.

O período de uma órbita circular é dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} ; a = R_e + H; \mu_{terra} = 398600 \text{ Km}^3 / \text{s}^2 \quad (27)$$

Obtendo assim 5668 s de período orbital. Resultado que permite a simplificação da fórmula 26 para:

$$t = \frac{\Delta\beta * 5668}{360} \quad (28)$$

4.5.1 Pré-Conclusões de Subcapítulo

O autor sabe agora obter o tempo de uma variação orbital β e conseguiu ainda relacionar β com θ . O que significa que, através dos cálculos anteriormente realizados, é agora possível obter o tempo de uma variação orbital θ . Uma vez obtida esta relação, é finalmente possível obter o tamanho máximo de uma mensagem mediante os intervalos β .

Apresenta-se na tabela 15 os resultados do estudo de data budget. Este quantifica a informação possível de transmitir através dos diferentes SF`s.

SF	θ [graus]	β [graus]	$\Delta\beta$ [graus]	Bitrate [bps]	Tempo [s]	Tamanho da mensagem [bits]
SF10	[-1.06 , 0.507]	[-0.0772 , 0.0369]	0.114	977	1.798	1756.646
SF11	[-12.8 , 12.1]	[-1.23 , 1.13]	2.36	537	37.22	19984.51
SF12	[-19.6 , 18.6]	[-2.45 , 2.24]	4.69	293	73.769	21614.317

Tabela 15- Resultados do estudo de data budget em função do SF.

Uma vez que os intervalos θ introduzidos na tabela representam os limites de elevação que possibilitam comunicar com o satélite, então estes apenas refletem os valores do tamanho da mensagem para uma única passagem do satélite. No capítulo seguinte será obtido o tamanho total de mensagens possíveis de transmitir durante 24h de serviço.

4.5.2 Transmissão máxima em 24h

Como já referido em capítulos anteriores o processo de transmitir uma mensagem rádio LoRa necessita de atender às normas regionais impostas pelas autoridades reguladoras. Estas, por sua vez, impõem um *Duty Cycle* máximo de 1% para este tipo de comunicações (European Telecommunications Standards Institute, 2012). Feitas as contas, o dispositivo desenvolvido terá um tempo de transmissão máximo de 864 s diários.

Na tabela seguinte será demonstrado o número de passagens necessários em um dia de um satélite para obter o tamanho total legalmente possível de transmitir. Nesta tabela o número de passagens é obtido pela divisão do tempo de transmissão máximo pelo tempo 1 mensagem. De outra forma o tamanho total de mensagens possíveis de transmitir em 1 dia é dado pela multiplicação do tamanho de 1 mensagem pelo número de passagens diárias necessárias.

SF	Tempo 1 mensagem [s]	Tamanho de 1 mensagem [Bits]	Tamanho total possível de transmitir em 1 dia [Bits]	Número de passagens diárias necessárias
SF10	1.7980	1756.646	844128	481
SF11	37.2151	19984.5087	463958	24
SF12	73.7690	21614.317	253152	12

Tabela 16-- Valores do tempo de transmissão da mensagem, tamanho de 1 mensagem durante essa passagem, tamanho total das mensagens possíveis de transmitir em 1 dia e o número passagens diárias necessárias para o realizar em função do SF.

Após as conclusões obtidas anteriormente, o autor faz aqui dois pequenos comentários:

- Uma vez que o Duty Cycle apenas limita o ciclo de emissão, deve-se notar que o dispositivo conseguirá operar mais de 864 s. Porém apenas poderá receber mensagens.
- Num cenário atual, e trabalhando com pequenos satélites, a empresa responsável pela componente espacial, provavelmente não estará a operar apenas um satélite *cubsat*, mas sim com uma constelação. Conclui-se assim que este número de passagens pode ser dividido por diferentes satélites, obtendo um número de passagens individual mais baixo.

4.6 Power budget

A necessidade de elaborar um estudo *power budget* na construção de um equipamento é fundamental. Especialmente quando este trate do desenvolvimento de um dispositivo IOT eletricamente autónomo (David Bol, 2015). Este estudo permitirá ao autor saber os consumos do equipamento e implementar o circuito de carregamento indicado.

O nó desenvolvido neste documento deve ter como sua fonte de energia uma série de baterias recarregáveis a energia solar, já que remotamente se poderá tornar impossível ou inviável a alimentação da rede elétrica ou de outra qualquer fonte.

Com a implementação de painéis solares será necessária especial atenção no cálculo do *power budget*, já que as condições externas não são constantes. Esta inconstância promove a adição de uma margem de segurança bastante considerável permitindo a sobrevivência do nó ao longo de dias consecutivos de carência solar, como demonstrado mais a frente neste capítulo.

4.6.1 Variáveis no cálculo do *power budget*

As diferentes variáveis delineadas e estudadas pelo autor, para este estudo foram:

- Energia solar disponível: No momento do cálculo da energia fornecida por uma célula fotovoltaica ter-se-á que ter em atenção que esta só alimentará o circuito em parte do dia. Por sua vez, esta parcela diária é dada em função do número de horas diárias de exposição solar e a percentagem, deste tempo, que o sol não se encontrará obstruído por densas nuvens.
- A potência da célula fotovoltaica.
- A tensão gerada pela célula fotovoltaica.
- Energia armazenada nas baterias, ou seja, capacidade de armazenar a energia solar para períodos de não exposição.
- A intensidade máxima da corrente permitida para o carregamento das baterias.
- A tensão máxima permitida para o carregamento das baterias.
- Consumo total dos equipamentos: A energia consumida na recolha de dados, processamento, envio e todas as perdas associadas a este processo.

Após a enumeração das variáveis necessárias ao estudo *power budget*, nos subcapítulos seguintes serão obtidos os seus referentes resultados.

4.6.2 Cálculos de consumo

O autor chegou à conclusão de que o cálculo dos consumos teórico de um microprocessador é inviável, pois durante o seu processo de funcionamento os consumos eram bastante voláteis mediante as tarefas em execução. Assim sendo, o autor opta por uma abordagem prática. Ele através de uma experiência laboratorial:

- Mediu a intensidade da corrente durante a comunicação 868 e 433 Mhz.
- Mediu a intensidade de corrente durante o modo económico.
- Mediu a intensidade de corrente, na fase intermédia, entre os dois ciclos anteriores

A medição real, direta no circuito, foi feita através de um multímetro, colocado em série logo após a fonte, como demonstrado na figura 36. De referir ainda que a medição obtida no seguimento deste estudo é dada pela letra I (Ampere).

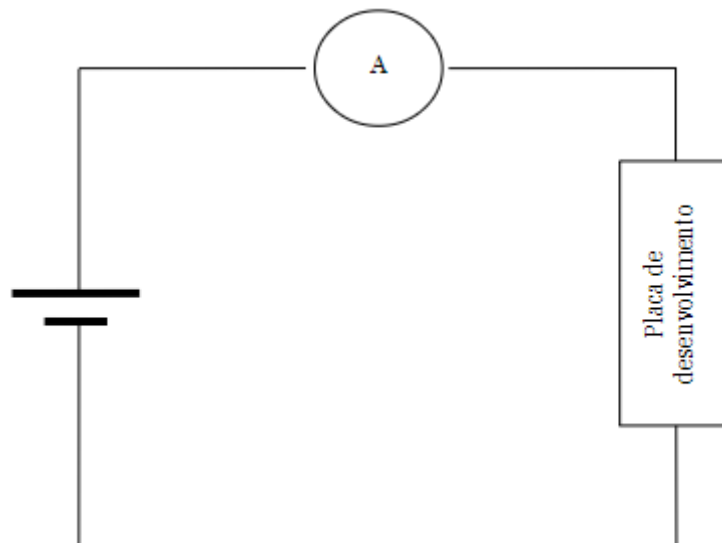


Figura 36-Esquema da medição realizada através do multímetro.

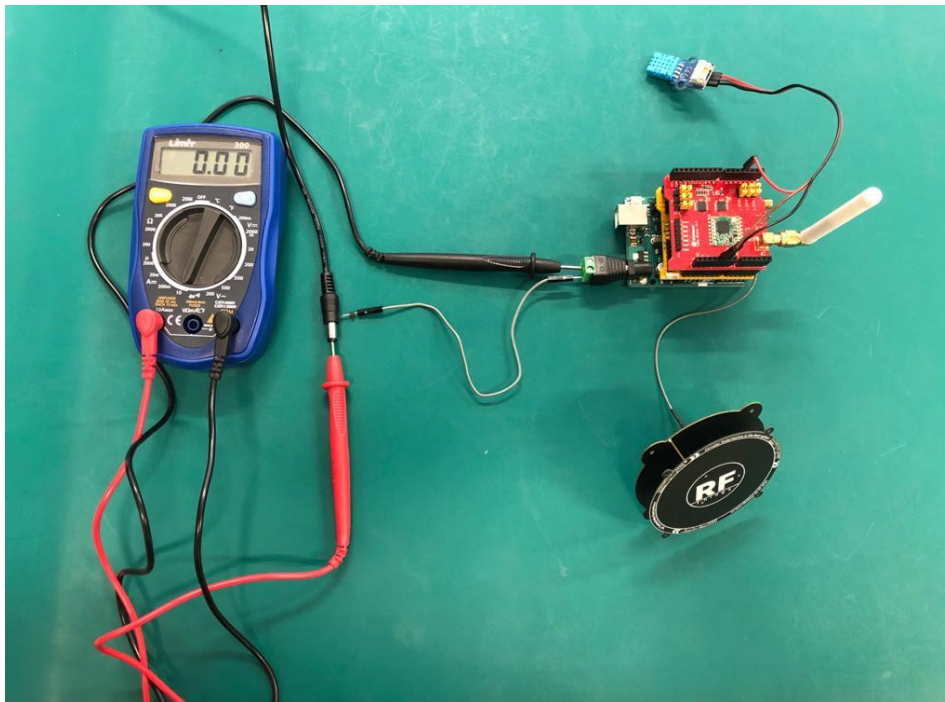


Figura 37- Fotografia da experiência de medição realizada através do multímetro

Para os resultados obtidos e demonstrados na tabela 17 foi programado a transmissão de uma mensagem que continha a temperatura e a humidade local com SF11 de transmissão.

Frequência	868 Mhz	433 Mhz
Modo económico	0.08 A	
Transmissão	0.15 A	0.14 A
Receção	0.09 A	0.09 A

Tabela 17- Resultados obtidos das medições realizada através do multímetro.

De notar que os valores apresentados anteriormente foram obtidos com um multímetro digital com 3 casas decimais. Em acrescento aponta-se ainda que o equipamento não é o mais indicado para o estudo, pois o mesmo, não permitiu registar facilmente picos de intensidade. Assim sendo foi impossível de adicionar ao estudo os valores de intensidade na fase intermédia entre os ciclos, pois esta é bastante momentânea.

Elabora-se agora a demonstração de um possível gráfico de consumo.

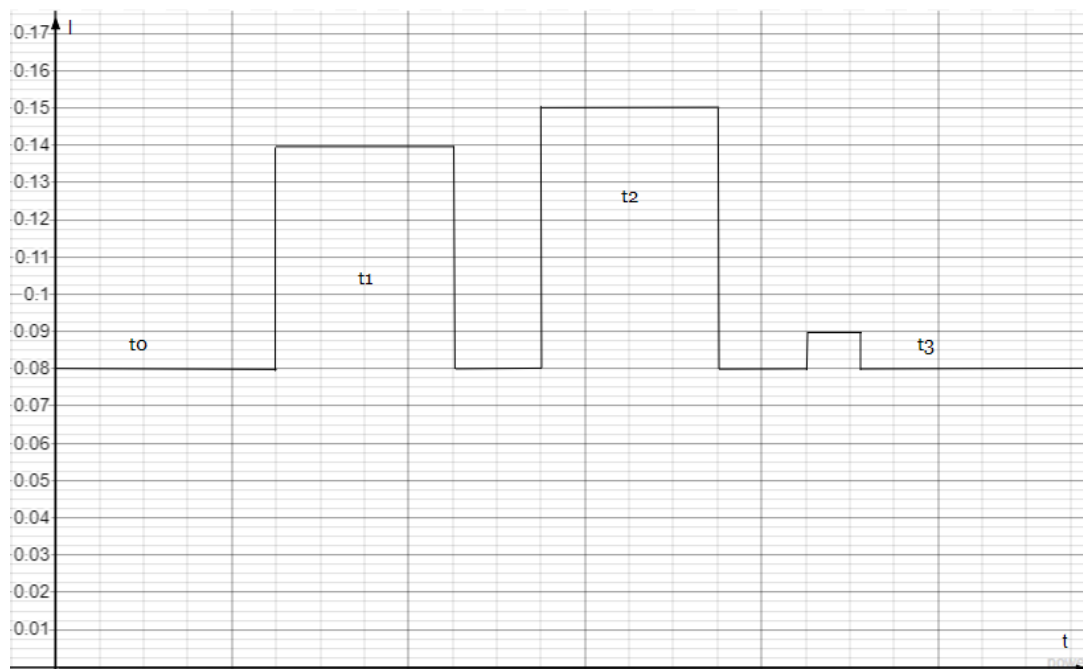


Figura 38- Exemplo de um possível gráfico de consumo em função do tempo.

Onde t_1 , representa o tempo, em segundos, de funcionamento do equipamento em transmissão 433 Mhz. Já t_2 , representa o tempo de funcionamento, em segundos, do equipamento em transmissão 868 Mhz e, t_3 representa o tempo que o equipamento se encontra em fase de receber informação.

Por último, o valor t_0 , representa o tempo, em segundos, de funcionamento em modo económico. Modo este complementar aos anteriores e que se encontra em funcionamento sempre que o nó não esteja a transmitir. Para um ciclo de 1 hora pode assim ser dado por:

$$t_0 = (3600 - (at_1 + bt_2 + ct_3)) \quad (29)$$

Onde a, b representam o número de transmissões dos dois tipos de sinal e c representa o número de vezes que o nó se encontra em processo de receber mensagens.

Não existia, da parte da Spaceway, um requisito para o número de mensagem mínimo que o nó necessitaria de realizar por hora. Porém para a elaboração de um bom estudo laboratorial deve-se perceber esta variável. O autor formula assim que perante a necessidade de obedecer ao valor máximo de *Duty Cycle* legislado, o nó deverá efetuar no máximo 1 ciclo de transmissão LoRa 433Mhz e 1 ciclo de transmissão LoRa 868Mhz por hora. Pois, segundo a tabela 15 para um SF11 será possível transmitir no máximo 24 mensagens, ou seja, no máximo 1 por hora.

Define-se ainda um ciclo de recepção de sinal LoRa por cada hora.

Através de mais alguns valores obtidos no capítulo anterior, onde é possível de perceber que um ciclo de transmissão LoRa 868Mhz terá uma máxima duração de 37.22 s. Porém não foi calculado o tempo máxima de uma transmissão LoRa 433Mhz. Sabe-se, contudo, através da equação 21, que a diminuição da frequência afetará negativamente o tempo de duração, diminuindo-o ligeiramente. Assim sendo, o autor considera ambos os ciclos temporais de 37.22 s, aumentado por sua vez a redundância.

Os ciclos horários de recepção de sinal, pela sua menor necessidade, são considerados inicialmente com um valor mínimo médio de 10s.

Para realizar o cálculo da carga gasta pelo circuito num ciclo de 1h, o autor necessitará primordialmente de perceber a intensidade média da corrente nesse período.

Esta intensidade média, I_m , é dada por:

$$I_m = \frac{I_0(3600 - (t_1 + t_2 + t_3)) + I_1 t_1 + I_2 t_2 + I_3 t_3}{3600} \quad (30)$$

Onde, I_0 , I_1 e I_2 representam a intensidade de corrente nos diferentes modos: modo económico, modo 433Mhz, modo 868Mhz e receção, por esta ordem.

E t_1 , t_2 e t_3 representam os tempos de duração dos ciclos mencionados anteriormente.

A fórmula é assim simplificada para:

$$I_m = \frac{0.08(3600 - (37.22 + 37.22 + 10)) + 0.14 * 37.22 + 0.15 * 37.22 + 0.09 * 10}{3600} \quad (31)$$

Obtendo um resultado aproximado por excesso de:

$$I_m = 0.082 \text{ A} \quad (32)$$

4.6.3 Bateria

É necessário tomar em atenção que a capacidade de uma bateria representa o valor de armazenamento de carga medido usualmente em Amp-hr. Este valor dita a intensidade máxima (ampere) que poderá ser fornecida ao circuito, numa hora, exposto a determinadas condições externas (Gharehpetian & Mousavi, 2017). Contudo esta capacidade não é constante. A temperatura de operação do equipamento, os métodos errados de carregamento/descarregamento e o desgaste provocam a sua variação (Pender, et al., 2020).

De não esquecer, para um bom entendimento dos subcapítulos seguintes que o módulo de processamento necessita de 5 V mínimos à entrada do circuito. E que foi anteriormente selecionada pelo autor, o uso de baterias do tipo SAMSUNG SDI ICR18650-26H. Pois estas permitem uma fácil adaptação à tarefa pretendida, como explicado de seguida.

4.6.3.1 Tipos de circuitos de baterias

O uso de apenas uma bateria não permitiria atingir as necessidades de intensidade e tensão à entrada do microcontrolador. Já que uma unidade apenas permitiria conseguiria debitar 3.63 V de tensão e fornecer 2600mAh de capacidade.

Existem assim algumas configurações que podem ser usadas para atingir os valores desejados, entre elas:

- Desenvolver um circuito de baterias em série
- Desenvolver um circuito de baterias em paralelo
- Desenvolver um circuito de baterias em série e paralelo

4.6.3.1.1 Circuito em série

A seleção de um circuito de baterias em série, possibilita apenas atingir a tensão desejada. Uma vez que a tensão à saída do circuito de baterias dita a soma das tensões individuais de cada bateria (Smith, 1966).

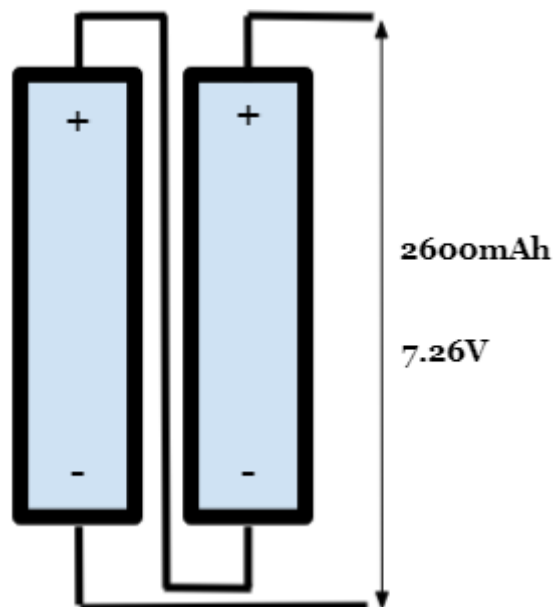


Figura 39- Circuito em série para as baterias SAMSUNG SDI ICR18650-26H.

4.6.3.1.2 Circuito em paralelo

De outra forma a seleção de um circuito em paralelo a capacidade total do mesmo é dada pela multiplicação da capacidade unitária de cada bateria pelo número total de elementos (Smith, 1966).

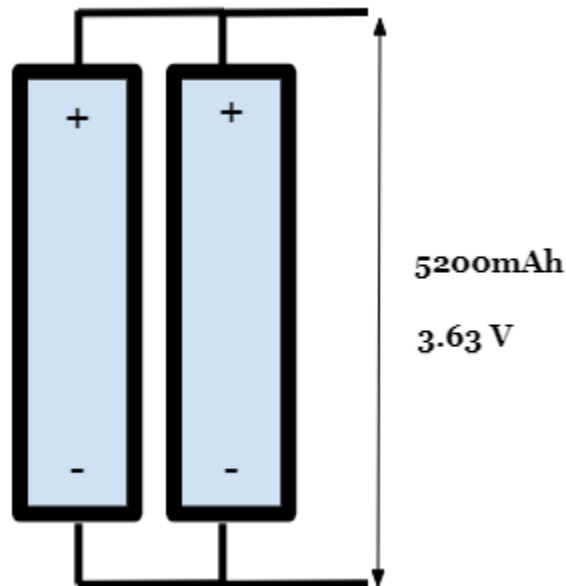


Figura 40- Circuito em paralelo para as baterias SAMSUNG SDI ICR18650-26H.

4.6.3.1.3 Circuito série e paralelo

Os circuitos de baterias apresentados anteriormente não permitem atingir simultaneamente a tensão mínima de 5V e a capacidade desejada consoante a necessidade. Existe assim a possibilidade de elaborar um esquema do circuito que tenha baterias em série e em paralelo.

Um circuito série e paralelo, é um circuito que se introduz dentro de um esquema em série circuitos em paralelo (Baronti, Rienzo, Papazafropulos, Roncella, & Saletti, 2014). Como demonstrado seguidamente, a capacidade total do mesmo é dada pela multiplicação da capacidade unitária de cada bateria pelo número total de elementos e a tensão à saída do circuito de baterias é dada pela soma das tensões individuais de cada bateria.

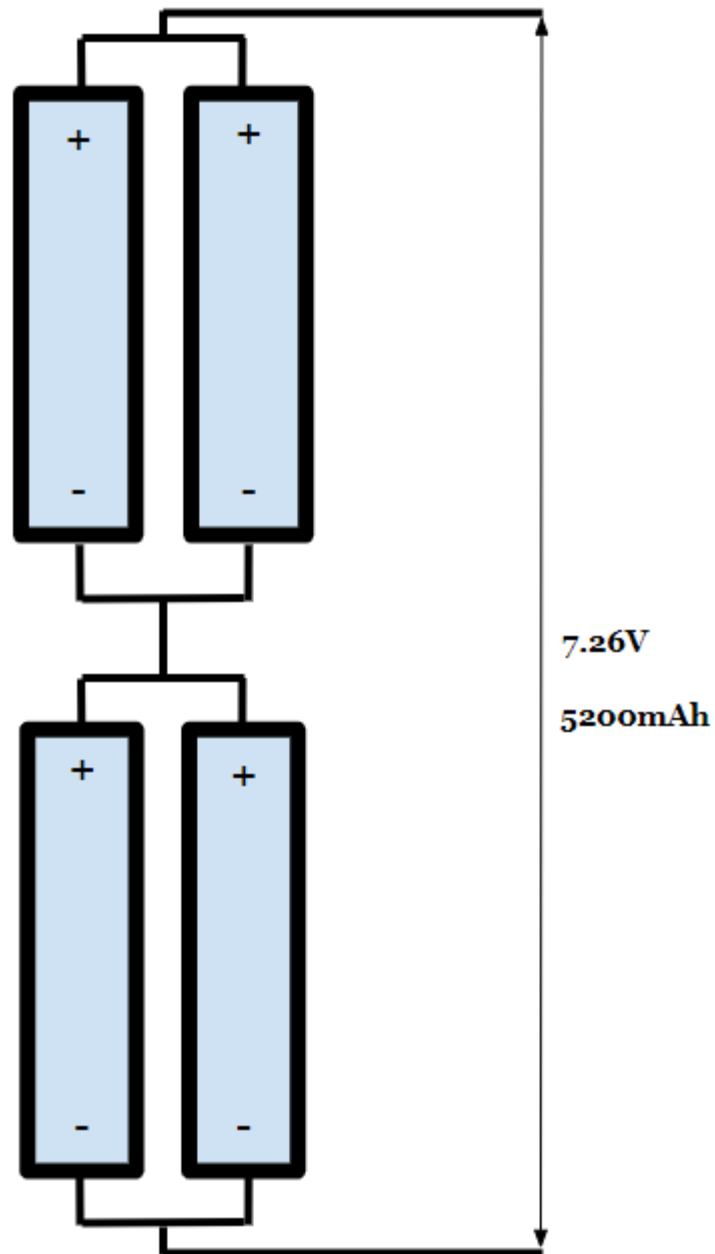


Figura 41- Circuito em série e paralelo para as baterias SAMSUNG SDI ICR18650-26H.

4.6.4 Desenvolvimento do circuito série e paralelo

A capacidade do circuito de baterias deve ser suficiente para fornecer energia ao resto dos circuitos que consomem durante diversos dias de cadência solar. Com o objetivo de obter um nó capaz de sobreviver as mais diversas condições de exposição solar, o autor dita que a capacidade do circuito de baterias deve ser 2 vezes superior ao consumo diário do equipamento.

A bateria em questão possui uma capacidade nominal de 2600mAh, o que significa que esta consegue fornecer ao circuito uma intensidade máxima de 2600mA, durante uma hora.

O tempo total de duração, t_d , de uma unidade de bateria é assim dado por:

$$t_d = \frac{\text{capacidade da 1 bateria}}{I_m} \quad (33)$$

$$t_d = \frac{2.600}{0.082}$$

$$t_d = 31.71 \text{ horas}$$

Para assim obter um nó capaz de sobreviver a 2 dias de cadência solar. O tempo total de duração deve ser superior a $24h * 2$. Ou seja, 48h.

Para tal seriam necessárias, 2 grupos de baterias em paralelo, como demonstrado na equação seguinte:

$$\text{n}^\circ \text{ grupos em paralelo} = \frac{48}{31.71} = 1.51 \quad (34)$$

4.6.4.1 Célula Fotovoltaica

A configuração anterior permitirá ao equipamento operar apenas durante 2 dias, porém após este intervalo de tempo as baterias atingirão a sua carga mínima e o utilizador necessitará de as carregar. Como não existe possibilidade de trocar essas baterias, torna-se necessária a implementação de uma célula fotovoltaica.

A sua seleção dependerá maioritariamente da bateria escolhida anteriormente, da seguinte forma:

- A corrente de carregamento individual de cada bateria, I_B , deve ser inferior a 2600mA já considerando um possível carregamento rápido.
- A tensão de carregamento individual de cada bateria, V_B , deve ser inferior a 4.2 ± 0.05 V.

Valores estes ditados pelo *datasheet* da bateria em questão (SAMSUNG SDI).

4.6.4.1.1 Potência máxima da célula fotovoltaica

Sabe-se agora que o valor de potência da célula fotovoltaica, $P_{\text{célula}}$, máximo que esta pode fornecer ao circuito de baterias em carregamento deve obedecer à equação 35 adaptada da Lei de Ohm:

$$\frac{P_{\text{célula}}}{V_{\text{máximo de carregamento do circuito de baterias}}} < I_{\text{máximo de carregamento do circuito de baterias}} \quad (35)$$

Esta fórmula seria direta de aplicar se o circuito tivesse apenas uma bateria, porém foi selecionado anteriormente um complexo circuito em série e paralelo. O que significa que:

$$V_{\text{máximo de carregamento do circuito de baterias}} = 2 V_B = 2 * 4.2 = 8.4V \quad (36)$$

$$I_{\text{máximo de carregamento do circuito de baterias}} = 2 I_B = 2 * 2600mA = 5200 mA \quad (37)$$

Logo:

$$\frac{P_{\text{célula}}}{2 V_B} < 2 I_B$$

$$P_{\text{célula}} < 2I_B * 2V_B$$

Porém durante o processo de carregamento o resto do circuito encontrar-se-á com um gasto mínimo de 0.08A. O que significa que a potência máxima que a célula fotovoltaica subirá para um máximo de:

$$P_{\text{célula}} < (2I_B + 0.08) * 2V_B$$

Alcançando assim:

$$P_{\text{célula}} < (2 * 2.6 + 0.08) * 2 * 4.2$$

$$P_{\text{célula}} < (2 * 2.6 + 0.08) * 2 * 4.2$$

Obtendo assim, com um arredondamento por defeito:

$$P_{\text{célula}} < 44.3 W$$

4.6.4.1.2 Tensão máxima e mínima da célula fotovoltaica

A tensão em carregamento do circuito de baterias, não deve ultrapassar o limite permitido pelas baterias. Ou seja:

$$V_{\text{célula}} < 2 V_B \quad (38)$$

$$V_{\text{célula}} < 8.4 V \quad (39)$$

Porém, existe a necessidade de perceber que, quanto menor for a tensão na célula fotovoltaica, menor será a capacidade total de carregamento realizada. Como se pode verificar na tabela seguinte de valores típicos de carregamento de baterias lítio-ion.

Charge V/cell	Capacity at cut-off voltage*	Charge time	Capacity with full saturation
3.80	~40%	120 min	~65%
3.90	~60%	135 min	~75%
4.00	~70%	150 min	~80%
4.10	~80%	165 min	~90%
4.20	~85%	180 min	100%

Tabela 18- Valores típicos das características de carregamento de baterias lithium-ion, (Battery University, 2018)

4.6.4.1.3 Potência mínima da célula fotovoltaica

De outra forma será ainda necessário perceber qual, a potência mínima necessária da célula fotovoltaica para repor o gasto diário da bateria.

Num ciclo de funcionamento da célula fotovoltaica deve-se ser capaz de recarregar no mínimo a quantidade de carga gasta pelo equipamento nesse mesmo ciclo.

Esta carga total, Q_{24h} , gasta num ciclo de funcionamento da célula fotovoltaica é dada pela equação 40 de acordo com a lei de Peukert`s:

$$Q_{24h} = I_m * 3600 * 24 \quad (40)$$

$$Q_{24h} = 0.082 * 3600 * 24 = 7084.8 \text{ Amp} - \text{ dia}$$

Esta potência diária mínima da célula, deve ser assim dada por:

$$V_{\text{célula}} < 8.4 V$$

$$P_{24h} = V_{\text{célula}} * Q_{24h}$$

$$P_{24h} = V_{\text{célula}} * 7084.8 = 7084.8 V_{\text{célula}} W - dia$$

Porém não se deve desconsiderar que no processo de carregamento da bateria existem perdas. Foi assim considerado, pelo autor, uma eficiência de 95%. Valor este, associado principalmente as perdas provenientes da placa de controlo de carregamento.

$$P_{\text{real}/24h} = \frac{P_{24h}}{0.95} \quad (41)$$

$$P_{\text{real}/24h} = \frac{7084.8 V_{\text{célula}}}{0.95} = 7457.68 V_{\text{célula}} W dia$$

De notar que, num ciclo de 24h, o tempo de funcionamento da célula representa apenas a porção de tempo que este se encontrar exposto à radiação solar.

$$P_{\text{célula}} > \frac{P_{\text{real}/24h}}{n^{\circ} \text{ horas de funcionamento}} \quad (42)$$

A irradiação representa a disponibilidade média da radiação solar numa determinada região do globo em unidades de kWh/m². Os seus valores em Portugal são calculados pelo instituto português da energia solar e através da estação meteorológica de Castelo Branco, foram obtidos os seguintes valores:

Castelo Branco	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Irradiação (kWh/m ²)	71	93	136	174	218	238	255	220	166	110	73	61	1805
Variabilidade (%)	13,9	16,2	12,9	8,6	8,3	5,2	4,0	6,8	5,1	11,3	16,0	13,4	2,7

Tabela 19- Variabilidade mensal de irradiação na localidade de Castelo Branco, adaptado de (Instituto Português de Energia Solar; Instituto Português do Mar e Atmosfera ; Cátedra Energias Renováveis; Instituto de Ciências da Terra , 2016)

Foi assim possível de perceber que dezembro é o mês com menor irradiação solar, com um valor de $1.97 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$. Sabendo que as condições STC, *standard test conditions*, de Irradiação numa célula fotovoltaica são de $1 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$. Conclui-se, por fim, que uma célula receberá em dezembro 1.97 horas de radiação solar por dia.

Assim sendo:

$$P_{\text{célula}} > \frac{7457.68V_{\text{célula}}}{1.97} \text{ W} - \text{hora}$$

$$P_{\text{célula}} > \frac{3831.8V_{\text{célula}}}{3600} \text{ W}$$

Obtendo por arredondamento:

$$P_{\text{célula}} > 1.1V_{\text{célula}} \text{ W}$$

Não esquecendo ainda, pelos cálculos efetuados anteriormente, que $V_{\text{célula}} < 8.4 \text{ V}$.

4.7 Pré-conclusões de capítulo

Perante o estudo de desenvolvimento do protótipo elaborado no capítulo 4 apresenta-se nas tabelas 20 e 21 a sua ficha técnica.

	Recursos
Módulo de Processamento	Modo económico acionado através de TLE`s dos satélites
Módulo de comunicação	Comunicação de longo alcance Capacidade de estabelecer comunicação entre Terra e o espaço Baixo consumo Duas frequências de operação
Módulo de energia	Carregamento a energia solar
Módulo de aquisição de dados	Capacidade de leitura da temperatura e da humidade relativa local

Tabela 20- Recursos do protótipo

	Especificações
Módulo de Processamento	Microcontrolador Atmega328p
Módulo de comunicação	<p>Modelação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • LoRa <p>Placas de rede:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Draguino, modelo LoRa Shield v1.4 <p>Chip:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Semtech LoRa SX1276 <p>Antena:</p> <ul style="list-style-type: none"> • RHCP, tri-figurar • Marca RFThings • Ganho máximo de 2.7 dBi <p>Frequência:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 868 MHz • 433 MHz <p>Largura de banda:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 125 kHz <p>Spreading Factor</p> <ul style="list-style-type: none"> • SF11

	<p>Bit rate:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 537 bps <p>Ciclo de transmissão</p> <ul style="list-style-type: none"> • 37.22 s <p>Ciclo de recepção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 s <p>Intervalo de elevações do satélite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • [-12.8 ; 12.1] graus <p>Tamanho máximo da mensagem enviada para órbita:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 19984.51 bits <p>Tamanho total máximo de mensagens enviadas em 1 dia para órbita:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 463958 bits
Módulo de energia	<p>Número de baterias:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 unidades em série e paralelo <p>Modelo das baterias:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Li-ion SAMSUNG SDI ICR18650-26h <p>Capacidade:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 63.42 horas

	<p>Tensão nominal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3.63 V <p>Temperatura de funcionamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • a carregar, 0 a 45 °C • a descarregar, -20 a 60 °C <p>Célula fotovoltaica:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência da célula < 44.3 W • Potência da célula > 1.1 tensão de carregamento • tensão de carregamento < 8.4V
<p>Módulo de aquisição de dados</p>	<p>Sensor da ITEAD STUDIO, modelo DHT11</p> <p>Intervalo de medições:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 a 95%RH • 0 a 50°C <p>Valores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Apresentados com 8 bits <p>Precisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Máxima de +/- 5% RH (0 a 50°C) • Típica +/- 4% RH (25°C) • Mínima +/- 1°C • Máxima de +/- 2°C

Outros	<p>Número de transmissões definidas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 ciclo de transmissão 433 MHz por hora • 1 ciclo de transmissão 868 MHz por hora • 1 ciclo de receção por hora <p>Consumo médio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0.082 A <p>Massa:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 307.3 g
--------	--

Tabela 21- Especificações do protótipo

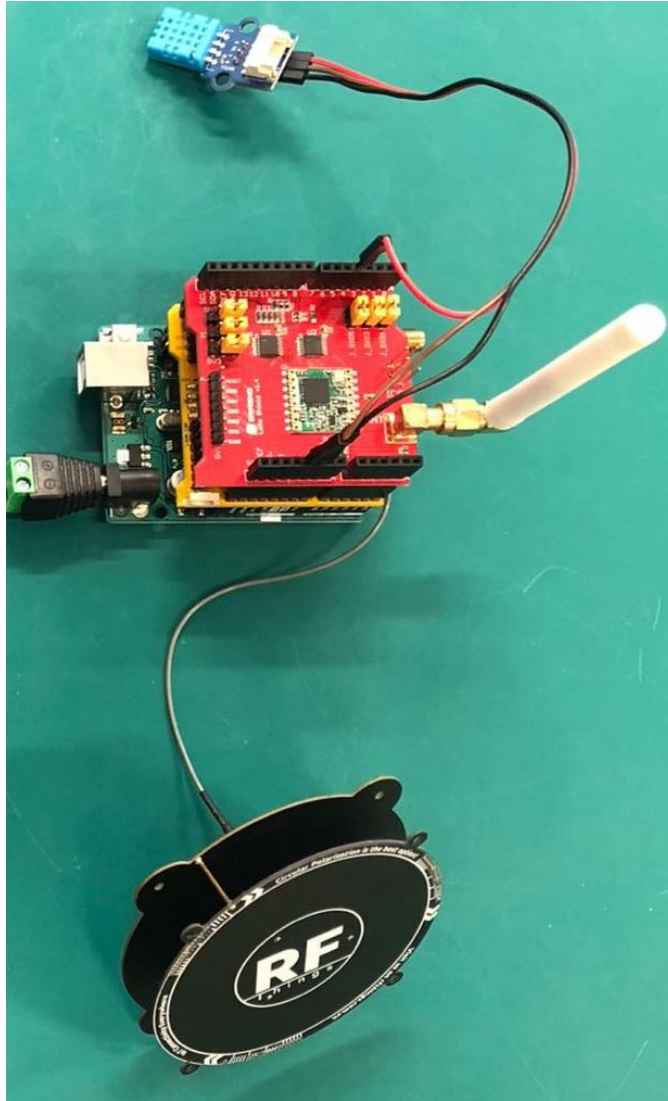


Figura 42- Protótipo

5 Conclusões e trabalhos futuros

A envolvente temática desta dissertação demonstrou ser um tema bastante atual e pertinente. Foi proposta pela Spaceway com a finalidade de solucionar alguns problemas ainda existentes nos recentes produtos da classe de comunicações LPWAN para os quais diferentes empresas na comunidade empresarial também se apressam a solucionar.

Perante a problemática apresentada, o autor desta dissertação desenvolve um conjunto de estudos que procuram da melhor forma desenvolver um conceito solucionador para o setor espacial. Este conceito baseia-se na ideia de desenvolver um nó capaz de comunicar sob duas frequências mantendo a mesma modelação. Perante os requisitos impostos pela Spaceway iniciou a dissertação por eleger LoRA como a melhor modelação LPWAN para o protótipo da empresa. Posteriormente através de um conjunto de estudos trade-off procurou selecionar parte do equipamento necessário perante as características da missão e inicia a programação do microcontrolador que dará as instruções de funcionamento aos nós.

No capítulo 4.3 obtêm-se parâmetros fulcrais através de um exímio estudo SNR. Aqui, o autor valida e conclui que o nó final tem capacidade de comunicar com um nó intermédio colocado em órbita e adquirem-se os valores de elevação mínima para os quais o equipamento selecionado conseguirá comunicar. Estes valores de elevação mínima em conjunto com os TLE`s dos satélites possibilitaram saber exatamente os momentos que o nó final poderá estabelecer comunicações com o nó intermédio. Posteriormente ao cálculo destes valores foi possível programar o nó final de uma forma mais económica, para que este transmita apenas quando o nó intermédio esteja em posições da órbita que possibilitam estabelecer comunicações.

Nos dois capítulos seguintes fornece-se à Spaceway a quantidade de informação, em bits, que o nó final poderá transferir para órbita mediante: as características do equipamento selecionado, o SF programado e as restrições de *duty cycle*. Fornecem-se ainda, em último lugar, o número mínimo de passagens dos satélites que permitirão transmitir para órbita os valores máximos referidos anteriormente.

Por fim inicia-se um estudo de power budget que seleciona um circuito série e paralelo com 4 baterias e dita as características da célula fotovoltaica em função de

medições realizadas ao consumo do equipamento. Daqui foram obtidos os intervalos para a potência e tensão que permitirão ao nó funcionar continuamente.

Como trabalhos futuros, para que esta arquitetura de missão se torne um produto final deve-se ainda desenvolver um nó intermedio, através de algumas adaptações do equipamento do nó final. Pois este equipamento estará exposto às condições espaciais para as quais o nó final é protegido pela atmosfera e que sofrerá também diversos esforços mecânicos no seu lançamento para o espaço. Prevendo-se assim a necessidade de adaptar o nó final para equipamento *space-grade*.

Existe também a necessidade de futuramente desenvolver um estudo SNR para as mensagens que são reenviadas para a Terra pela parte do nó intermédio. Fornecendo desta forma à Spaceway todos os variáveis essenciais e adquiridas já nesta dissertação para o nó final.

Deve-se também elaborar um estudo *power budget* que forneça as características essenciais para o funcionamento do módulo de carregamento pois as características de irradiação diárias em órbita são severamente diferentes das terrestres.

Por fim, o código a ser implementado no módulo de processamento do nó intermédio será bastante diferente e necessitará de ser reformulado. Neste cenário o satélite deverá estar continuamente a receber comunicações pois será bastante complexo atualizar as localizações dos nós finais no nó intermédio, uma vez que estas localizações podem ser inconstantes. Posteriormente à receção, o nó final deve guardar a informação da mensagem e transmiti-la em pontos estratégicos da órbita sob a Terra onde existam *as ground stations* da Spaceway.

BIBLIOGRAFIA

1. Alliance, LoRa (27 de Março de 2020). What is LoRaWAN® Specification.
2. Baronti, F., Rienzo, R. D., Papazafirooulos, N., Roncella, R., & Saletti, R. (2014). Investigation of series-parallel connections of multi-module batteries for electrified vehicles.
3. Barrett, S. F. (3ª edição). Arduino Microcontroller Processing for Everyone! Mitchell Thornton.
4. Battery University. (4 de Agosto de 2018). BU-409: Charging Lithium-ion.
5. Brouwer, D. (1959). Solution of the problem of artificial satellite theory without drag. *Astronomical Journal*.
6. BUCHEK, M. R. (Setembro de 2014). ANTENNA ROTATOR DESIGN AND CONTROL.
7. Cakaj, S., Kolici, V., Shurdi, O., & Kamo, B. (Janeiro de 2011). The Range and Horizon Plane Simulation for Ground Stations of Low Earth Orbiting (LEO) Satellites. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*.
8. Capela, C. J. (Abril de 2012). PROTOCOL OF COMMUNICATIONS FOR VORSAT SATELLITE .
9. Carpes, W. P. (09 de 11 de 2020). Aula 6 , Polarização. Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Federal De Santa Catarina.
10. Cerrudo, C. (2020). LoRaWAN Networks Susceptible To Hacking. The Things conference. Amsterdam.
11. Chen Han, R. D. (Outubro de 2014). Q&A. What Motivates Cyber-Attackers? *Technology Innovation Management Review*.
12. Crane, R. K. (1971). Propagation Phenomena Affecting Satellite Communication Systems Operating in the Centimeter and Millimeter Wavelength Band.
13. Crols, J. &. (2003). CMOS Wireless Transceiver Design.
14. David A. Vallado, P. J. (2012). TWO-LINE ELEMENT SETS – PRACTICE AND USE.
15. David Bol, G. d. (2015). Can We Connect Trillions of IoT Sensors in a Sustainable Way ? A Technology/Circuit Perspective (Invited).
16. Decai Wang, M. F. (2017). Analysis of radiation characteristics of multi-arm helix antenna using theory of circular array.
17. Diggelen, F. v. (2014). An Introduction to Satellite Navigation, with an interactive Worldwide Laboratory using Smartphones. Stanford University coursera module.
18. Dragino. (06 de Outubro de 2020). Datasheet Lora Shield.
19. ECO. (2021). ERC Recommendation of 1997 on relating to the use of Short Range Devices (SRD), Latest amended.

20. European Telecommunications Standards Institute. (Janeiro de 2012). Final draft ETSI EN 300 220-1 V2.4.1.
21. Farahani, S. (2008). ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Newnes.
22. Ferrero, F. (2020). The Things Conference. Circularly Polarized Antenna For LoRaWAN From Space. Amsterdam.
23. Fossa Systems. (s.d.). FOSSASAT-2 Communication Protocol. Github.
24. FRC Group. (s.d.). Why Circular Polarization Antenna? South Benjamin Avenue, Mason City, Iowa 50401.
25. Friis, H. T. (1964). A Note on a Simple Transmission Formula.
26. University System of Georgia. (8 de Junho de 2021). Online Library Learning Center, A Brief History of the Internet.
27. Gharehpetian, G., & Mousavi, M. (2017). Distributed Generation Systems (1ª edição).
28. Graydon, M. &. (2019). “Connecting the unconnected”: a critical assessment of US satellite Internet services.
29. Gupta, P. C. (2014). Data Communications and Computer Networks (Segunda edição). Eastern Economy Edition.
30. Instituto Português de Energia Solar; Instituto Português do Mar e Atmosfera ; Cátedra Energias Renováveis; Instituto de Ciências da Terra . (2016). Radiação Solar Global em Portugal.
31. J. Dijk, M. J. (11 de Março de 1968). Antenna noise temperature.
32. Jang Wook Choi, D. A. (2016). Promise and reality of post-lithium-ion. Macmillan Publishers Limited.
33. Jim Zyren, A. P. (1998). Tutorial on Basic Link Budget Analysis. INTERSIL tm.
34. Jondral, F. K. (2005). Software-Defined Radio—Basics and Evolution.
35. K. Mekki, E. B. (2018). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express .
36. Kahr, E. M. (Março-Abril de 2013). Estimation and Analysis of Two-Line Elements for Small Satellites.
37. Kanwal, K. S.-R. (2017). Energy Management in LTE Networks.
38. Kelso, D. T. (1998). Satellite Times Volume 4 N° 3.
39. Kluever, C. A. (2003). Encyclopedia of Physical Science and Technology (3ª Edição).
40. Kymeta Corporation. (2019). LINK BUDGET CALCULATIONS FOR A SATELLITE LINK WITH AN ELECTRONICALLY STEERABLE ANTENNA TERMINAL.
41. Lacuna.Space. (16 de Abril de 2020). The Things Virtual Conference, LIVE. France.
42. Lacuna.Space,Repositories. (2021). Github.
43. Lane, M. H. (1965). The development of an artificial satellite theory using a power-law atmospheric density representation.
44. Marcuccio, S. (2012). Satellite Instrumentation. Università di Pisa.
45. MathWorks. (5 de Janeiro de 2021). Antenna Element Catalog.

46. Muhammed Zekeriya, G. e. (2020). Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions.
47. myriadrf, GitHub. (4 de Setembro de 2020). LoRa-SDR. GitHub.
48. Pender, J. P., Jha, G., Youn, D. H., Ziegler, J. M., Andoni, I., & Choi, E. J. (2020). Electrode Degradation in Lithium-Ion Batteries.
49. Picone, J., Hedin, A., Drob, D., & Aikin, A. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere : Statistical comparisons and scientific issues, J. Geophys. Res., 107(A12), 1468.
50. Pistoia, G. (2005). Batteries for Portable Devices. Elsevier Science.
51. Reynders, B. &. (2016). Chirp Spread Spectrum as a Modulation Technique for Long Range Communication.
52. RF Things. (19 de maio de 2020). Compact Right Hand Circularly Polarized Antenna Part No. RT-CP3-QL-XXX-YYY-ZZZ.
53. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. (s.d.). Using S-Parameters with R&S NRP-Z Power Sensors. Mühldorfstraße 15 | D - 81671 Munich.
54. SAMSUNG SDI. (s.d.). SAMSUNG SDI Confidential Proprietary. Spec. No. ICR18650-26H Version No. 1.0.
55. Santos, J. (2006). Algoritmia e Programação. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
56. Semtech. (1 de agosto de 2020). What is lora?
57. Semtech Corporation. (2020). SX1276/77/78/79 DATASHEET.
58. Sinha, R. S.-H. (14 de março de 2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT.
59. Smith, R. J. (1966). Circuits, Devices and Systems. New York: Wiley.
60. So-Eun Lee, M. C. (7 de 9 de 2017). How and what to study about IoT: Research trends and future directions from the perspective of social science. p. 3.
61. Song, Y. L. (27 de Agosto de 2017). An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN.
62. Springer, A. G. (2000). Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals.
63. Statista. (17 de Maio de 2021). Global LPWAN connections 2017-2023, by technology.
64. Steven (Shichang) Gao, Q. L. (2014). Introduction to Circularly Polarized Antennas, 2ª Edição. John Wiley & Sons, Ltd.
65. Stutzman, W. L. (1998). Estimating Directivity and Gain of Antennas.
66. Syad Kamrul Islam, M. R. (2010). Sensors and Low Power Signal.
67. Ta, S. X. (2015). Crossed Dipole Antennas.
68. Takashi Iida, H. W. (2003). Encyclopedia of Physical Science and Technology (3ª Edição).
69. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, I. (1993). Standard Definitions of Terms for Antennas.
70. The Things Industries. (17 de Dezembro de 2020). The Things Network. Frequency Plans by Country.
71. The Things Industries. (2021). LoRaWAN Limitations.

72. The Things Network. (4 de Fevereiro de 2020). What are LoRa and LoRaWAN?
73. Thomas Norman CPP, PSP, CSC. (2014). Radio Frequency Systems.
74. Vangelista, L. (2017). Frequency Shift Chirp Modulation:.
75. Wang, A. &. (2020). A review on non-terrestrial wireless technologies for Smart City Internet of Things.
76. Wiley J. Larson, James R. Wertz, Douglas Kirkpatrick, Donna Klungle. (1999). Space Mission Analysis and Design. Microcosm Press.
77. Zhou, Q. Z. (2019). Design and Implementation of Open LoRa for IoT.