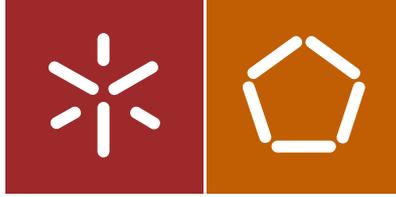




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Filipe da Cunha Teixeira

Alimentação de Sensores Através
de Energia de Radiofrequência



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Filipe da Cunha Teixeira

Alimentação de Sensores Através
de Energia de Radiofrequência

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Agostinho Gil Lopes Teixeira

DECLARAÇÃO

Nome: Tiago Filipe da Cunha Teixeira

Endereço eletrónico: a65371@alunos.uminho.pt

Telefone: 917722238

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14154710

Título da dissertação: Alimentação de Sensores Através da Energia de Radiofrequência

Ano de conclusão: 2017

Orientador: Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia

Escola: Universidade do Minho - Azurém

Departamento: Departamento de Eletrónica Industrial

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: Tiago Filipe da Cunha Teixeira

Resumo

As ondas de radiofrequência são campos eletromagnéticos variantes no tempo utilizados em comunicações sem fios, pois permitem a transmissão de informação sem a necessidade de uma ligação física. A televisão, o rádio *FM*, os *walkie-talkies* e os telemóveis são exemplos onde a comunicação por radiofrequência é utilizada. Como todas estas tecnologias partilham o mesmo meio de comunicação, o ar, para que possam coexistir recorrem a diferentes frequências de funcionamento. Para além da tradicional função do envio de informação, as ondas eletromagnéticas, também podem ser utilizadas para o envio e receção de energia elétrica. É sobre esta possibilidade que o projeto em estudo desta dissertação se vai debruçar.

Com esta dissertação pretende-se desenvolver um transmissor de sinais de radiofrequência e topologias de conversores *RF-DC* eficientes para recolha e conversão da energia existente nesses sinais.

Ao nível aplicacional este tema é muito vasto, no entanto o objetivo principal do projeto em estudo nesta dissertação é conseguir alimentar de um sistema com sensores sem fios que permita a recolha de dados de estufas de cogumelos para posterior análise. Com este sistema torna-se desnecessário o recurso a baterias, bem como a existência de alimentação por cabo.

O foco deste estudo é a avaliação da eficiência do produto, isto é, avaliar a quantidade de energia que se consegue armazenar nos condensadores ao fim de um determinado tempo. Com este produto pretende-se aumentar o período de descarregamento das pilhas ou baterias em dispositivos de baixo consumo e mesmo a possibilidade de as eliminar, retirando qualquer tipo de manutenção e intervenções, tornando assim os dispositivos totalmente autónomos.

Palavras-chave: Radiofrequência, Transferência de Energia sem Fios, Conversor *RF-DC*.

Abstract

Radiofrequency waves are time-varying electromagnetic fields used in wireless communications, since they allow the transmission of information with no need of physical connection. Television, FM radio, walkie-talkies and mobile phones are examples where radiofrequency communication is used. As all these technologies shares the same communication medium, air, all use different working frequencies to coexist. Beyond the traditional information sending function, electromagnetic waves can also be used to send and receive electric energy. The study of this dissertation project focuses on this possibility.

With this dissertation, it is intended to develop a radiofrequency signals transmitter and topologies of RF-DC (receptors) converters efficient enough to gather and convert existent energy from those signals.

At the application level, this topic is very wide, however the main goal of the project being studied in this dissertation is to allow feeding a wireless sensors system that enables data gathering from mushrooms greenhouses for further analysis. With this system, the use of batteries becomes unnecessary, as well as the existence of cable power supply.

The focus of his study is the efficiency evaluation of the product, in other words, evaluate the amount of energy possible to store in the capacitors after a certain time. With this product, the unloading period of batteries in low consumption devices is sought and even the possibility of eliminating them, withdrawing any type of maintenance and interventions, thus making the devices totally autonomous.

Keywords: Radiofrequency, Wireless Energy Transfer, RF-DC Converter.

Agradecimentos

Durante o decorrer desta dissertação, foram várias as pessoas que de alguma forma tiveram um papel fundamental no sentido de tornar possível a sua realização e conclusão.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família especialmente aos meus pais e irmã pelo apoio constante ao longo desta longa caminhada.

À Raquel Rocha deixar um agradecimento especial por todo apoio, compreensão, dedicação e companheirismo em todos os momentos ao longo deste percurso.

Deixar também uma palavra de apreço a todos os meus amigos, em especial ao Paulo Santos, Marco Cruz, Vitor Pacheco, Romeu Gonçalves, João Cunha e António Martins, por estarem sempre presentes, e por toda a entreatajuda partilhada nos momentos que assim o exigiam.

Agradecer ao meu orientador, Dr. Agostinho Gil Lopes, pela confiança depositada em mim para realizar este projeto. Agradecer também toda a motivação e força em momentos de maior ceticismo, a sua orientação e ajuda prestada.

Por último deixar também um agradecimento à empresa Bioinvitro, nomeadamente ao Sr. Bruno e à D. Sandra que sempre tiveram disponíveis para colaborar.

A todas estas pessoas que de alguma forma facilitaram e tornaram possível a realização deste trabalho, deixo um profundo agradecimento.

Índice

Resumo.....	I
Abstract.....	III
Agradecimentos.....	V
Índice.....	VII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tabelas.....	XV
Lista de abreviaturas e siglas.....	XVII
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Organização do documento.....	4
Capítulo 2 - Estado da Arte.....	5
2.1. Investigation of RF Signal Energy Harvesting.....	6
2.2. POWERCAST.....	11
2.2.1 Transmissor.....	11
2.2.2 Recetores.....	12
Capítulo 3 - Fundamentos Teóricos.....	16
3.1. Ondas de rádio.....	17
3.2. Linha de Transmissão.....	18
3.2.1 Impedância da linha de transmissão.....	18
3.2.2 Potência incidente e refletida e ondas estacionárias.....	19
3.3. Antena.....	22
3.3.1 Circuito equivalente de uma antena.....	22
3.3.2 Campo elétrico e campo magnético sobre uma antena.....	24

3.3.2.1	Circuito oscilador fechado.....	24
3.3.2.2	Circuito oscilador aberto.....	25
3.3.3	Polarização da antena.....	30
3.4.	Espaço livre.....	31
3.4.1	Atenuação da onda devido ao espaço livre.....	31
3.5.	RFID.....	32
3.5.1	Acoplamento magnético.....	34
3.5.2	Acoplamento eletromagnético.....	35
Capítulo 4 -	Metodologia.....	38
4.1.	Transmissor.....	40
4.1.1	Circuito do VCO.....	41
4.1.2	Pré-amplificador.....	43
4.1.3	Amplificador de potência RF.....	46
4.1.4	Phase-locked loop.....	47
4.1.5	Circuito final do transmissor.....	49
4.2.	Recetor.....	51
4.2.1	Consumos da carga a alimentar.....	51
4.2.2	Calculo da capacidade do condensador do barramento CC.....	53
4.2.3	Recetor com retificador de onda completa.....	54
4.2.4	Recetor com multiplicador de tensão.....	56
4.3.	Circuito terminal de 50Ω.....	57
4.4.	Calibrar o transmissor.....	58
4.5.	Antenas.....	60
Capítulo 5 -	Resultados.....	63
5.1.	Testes do transmissor.....	64
5.2.	Testes nos recetores.....	65

5.2.1	Testes em campo aberto	65
5.2.2	Resultados na estufa	73
5.2.3	Testes no interior do Laboratório.....	79
5.2.4	Comparação entre recetores.....	85
Capítulo 6 -	Conclusões e trabalhos futuros	87
6.1.	Conclusões	88
6.2.	Trabalhos futuros	88
Capítulo 7 -	Referências	91

Índice de figuras

Figura 1: Espectro no campus da universidade de Sharjah [2]	7
Figura 2: Espectro em local da cidade	7
Figura 3: Espectro em local da cidade	7
Figura 4: Antena GSM incorporada [2]	9
Figura 5: Circuito global implementado [2].....	9
Figura 6: Recetor de energia RF [2].....	9
Figura 7: Led ligado com energia RF [2].....	10
Figura 8: Calculadora alimentada por energia RF [2]	10
Figura 9: Transmissor TX91501 Powercast [4].....	11
Figura 10: Tensão de saída do recetor P2110B [6]	13
Figura 11: Antenas para os recetores [3]	14
Figura 12: Kits de desenvolvimento [3]	14
Figura 13: Kit de desenvolvimento P2110-EVAL-01 [3].....	15
Figura 14: Onda eletromagnética (adaptado de [8]).....	18
Figura 15: Representação das potências incidente e refletida (adaptado de [9]).....	19
Figura 16: Medidor ROE	20
Figura 17: Circuito oscilador LC esticado até ficar um fio retilíneo [12]	23
Figura 18: Campo magnético e campo elétrico gerado num dipolo [12].....	24
Figura 19: Fluxo de energia num circuito oscilador LC [13]	25
Figura 20: Campo elétrico no condensador [14].....	26
Figura 21: Campo elétrico entre as placas em vários ângulos [14]	26
Figura 22: Campo magnético entre fios a vários ângulos [14].....	27
Figura 23: Campo magnético sobre uma antena de meia-onda (adaptado de [14])	27
Figura 24: Formação dos campos elétrico e magnético durante uma semi-oscilação [12]	28
Figura 25: Campos elétricos e campos magnéticos irradiados pelo dipolo [14]	29
Figura 26: Característica radial de um dipolo [11]	29
Figura 27: Rotação da polarização das ondas [12]	30
Figura 28: Esquema geral RFID	33
Figura 29: Transferência de energia em RFID (adaptado de [15])	34
Figura 30: Intensidade do campo magnético (B) versus distância (adaptado de [15]).....	35
Figura 31: Acoplamento magnético (adaptado de [15])	35

Figura 32: Acoplamento Eletromagnético (adaptado de [15])	36
Figura 33: Esquema geral com transmissor e recetores	39
Figura 34: Diagrama de blocos do emissor	41
Figura 35: Esquema elétrico do VCO.....	42
Figura 36: Curva característica de um diodo varicap	43
Figura 37: Esquema elétrico pré-amplificador.....	44
Figura 38: Equivalente passa-banda.....	44
Figura 39: Simulação filtro passa banda do pré-amplificador	45
Figura 40: Esquema elétrico amplificador de potência RF.....	46
Figura 41: Simulação filtro passa banda amplificador de potência	47
Figura 42: Esquema elétrico PLL	48
Figura 43: Organização dos bits das palavras de dados A e B.....	48
Figura 44: Formato de envio	49
Figura 45: Transmissor construído.....	50
Figura 46: Diagrama de blocos genérico do recetor	51
Figura 47: Diagrama de blocos do recetor com ponte retificadora.....	54
Figura 48: Esquema elétrico do recetor com ponte retificadora.....	55
Figura 49: Recetor com ponte retificadora construído.....	55
Figura 50: Diagrama de blocos recetor com multiplicador de tensão	56
Figura 51: Esquema elétrico do recetor com multiplicador de tensão.....	56
Figura 52: Recetor com multiplicador de tensão construído.....	57
Figura 53: Circuito terminal de 50Ω.....	58
Figura 54: Ligação do medidor de ondas estacionárias.....	59
Figura 55: Antena Santiago 1200	61
Figura 56: Base Magnética para Santiago 1200	61
Figura 57: Antena do recetor	62
Figura 58: Potência medida à saída do transmissor pelo medidor ROE.....	65
Figura 59: Testes em campo aberto.....	66
Figura 60: Potência recebida (μW) a várias distâncias e alturas em campo aberto	67
Figura 61: Influência na receção na proximidade da antena emissora.....	68
Figura 62: Potência recebida a várias distâncias e alturas (polarização horizontal)	69
Figura 63: Influência dos recetores colocados lado a lado	70

Figura 64: Influência causada por proximidade de recetores.....	71
Figura 65: Influência causada pelo recetor 2 à frente	71
Figura 66: Influência causada por proximidade de recetores.....	72
Figura 67: Dimensões da estufa.....	73
Figura 68: Posicionamento antena emissora na estufa	74
Figura 69: Medição da tensão nos recetores	74
Figura 70: Potência recebida pelo recetor a várias distâncias e alturas na estufa	75
Figura 71: Influência causada por proximidade de recetores.....	77
Figura 72: Influência causada pela proximidade do recetor com parede metálica.....	78
Figura 73: Laboratório de automação e robótica.....	79
Figura 74: Laboratório de automação e robótica.....	80
Figura 75: Potência recebida pelo recetor a várias distâncias e alturas no Laboratório	81
Figura 76: Potência recebida a várias distâncias e alturas (direção à parede lateral)	82
Figura 77: Potência recebida a várias distâncias e alturas (polarização horizontal)	83
Figura 78: Influência causada por proximidade de recetores.....	84

Índice de tabelas

Tabela 1: Especificações do TX91501.....	12
Tabela 2: Componentes kit P2110-EVAL-01	15
Tabela 3: Percentagem da potência irradiada efetiva [11].....	21
Tabela 4: Atenuação do sinal provocada por alguns materiais	31
Tabela 5: Consumo nominal da carga em modo ativo [16]	52
Tabela 6: Consumo nominal da carga em "stop mode" [16].....	52
Tabela 7: Características antena do transmissor	61
Tabela 8: Características da antena do recetor	62
Tabela 9: Potência (μW) no recetor a várias distâncias e alturas em campo aberto	66
Tabela 10: Potência recebida a várias distâncias e alturas com polarização horizontal	68
Tabela 11: Influência causada por proximidade de recetores	70
Tabela 12: Influência causada por proximidade de recetores	72
Tabela 13: Potência (mW) no recetor a várias distâncias e alturas na estufa.....	75
Tabela 14: Influência causada por proximidade de recetores	76
Tabela 15: Influência causada pela proximidade do recetor com parede metálica	77
Tabela 16: Potência recebida (mW) a várias distâncias e alturas no laboratório	80
Tabela 17: Potência recebida a várias distâncias e alturas (direção à parede lateral).....	81
Tabela 18: Potência (mW) a várias distâncias e alturas (polarização horizontal)	83
Tabela 19: Influência de proximidade dos recetores	84
Tabela 20: Tensão aos terminais do condensador (com e sem carga)	85

Lista de abreviaturas e siglas

RF	Radiofrequency, radiofrequência
RFID	Radiofrequency identification, identificação por radiofrequência
CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
SMA	Conetor SubMiniature version A
BNC	Conetor Bayonet Neill Concelman
PLC	Programmable logic controller
E	Campo Elétrico
H	Campo Magnético
LT	Linha de transmissão
ROE	Relação de ondas estacionárias
VSWR	Voltage standing wave ratio
VCO	Voltage-controlled oscillator, oscilador controlado por tensão
PLL	Phase-locked loop
RFC	Radio frequency chokes
VHF	Very High Frequency
CB	Citizens' Band, Banda do cidadão
IC	Integrated circuit, circuito integrado
FEM	Força eletromotriz
ϵ_0	Permissividade electroestática do meio
ϵ_r	Constante dielétrica
μ_0	Permeabilidade magnética

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Enquadramento

A presente dissertação insere-se no ciclo de estudos do curso Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores da Universidade do Minho, proposta pelo departamento de Engenharia Eletrónica Industrial em parceria com empresa *Bioinvitro*. Esta necessita de um equipamento sem fios que permita estudar as condições favoráveis à produção de fungos em estufas. Face a essa necessidade, o equipamento terá de efetuar medições da temperatura, humidade e luminosidade no interior das estufas e enviar esses dados até outro sistema, para posteriormente poderem fazer uma análise às condições favoráveis para o desenvolvimento das culturas. Outro requisito que foi proposto foi investigar a possibilidade de alimentar do equipamento sem fios, através de ondas de radiofrequência. Desta forma, evita-se a utilização de pilhas, baterias ou alimentação por cabos condutores.

O projeto foi então dividido em duas partes: na primeira parte foi proposto desenvolver o protótipo que efetue as leituras dos diversos sensores e envio desses dados. Nesse projeto o baixo consumo do sistema era fulcral, para se tornar possível a alimentação por ondas de rádio. A segunda parte proposta foi desenvolver um protótipo que trate da transferência de energia sem fios para alimentar o projeto anteriormente mencionado. No presente documento é descrito o trabalho relativo a esta segunda parte.

1.2. Motivação

Com este tema de investigação pretende-se construir um protótipo capaz de alimentar um sistema de muito baixo consumo com energia proveniente de ondas de rádio. O tema foi proposto pela empresa "*Bioinvitro – Biotecnologia, Lda.*" [1], esta é capaz de responder a diferentes desafios na produção de plantas selecionadas e na produção de inóculo de cogumelos. A empresa pretende implementar uma rede de sensores sem fios para efetuar a medição de parâmetros como temperatura, humidade e luminosidade no interior das suas estufas.

A energia proveniente das ondas de radiofrequência para alimentação desses sensores mostrou-se interessante para ser investigada, porque o recurso a este tipo de alimentação ainda não é muito comum e apresenta inúmeras vantagens como conjuntos de recetores energia, que funcionam em qualquer lugar dentro do alcance da fonte de energia *RF*, o fornecimento de

energia é de um para muitos, ou seja, apenas com um transmissor é possível alimentar diversos recetores, desde que estes estejam sintonizados na mesma frequência do transmissor e que estejam dentro do alcance do mesmo. O facto de não existirem cabos entre o sistema transmissor e os sistemas recetores, permite a alteração sem qualquer limitação da localização dos recetores. Às vantagens acima referidas ainda se acrescenta o facto de o sistema ser completamente ausente de manutenção, uma vez que este não depende de componentes de carácter temporário como pilhas ou baterias.

Cada vez mais se usa a monitorização e as redes de sensores sem fios, nas mais diversas áreas. O sucesso deste sistema, poderá ser um avanço para muitas aplicações no futuro, pois as ondas de radiofrequência existem quase por todo o lado devido aos diversos equipamentos que as geram. As estações de rádio *FM*, televisão e telemóveis são apenas alguns exemplos.

1.3. Objetivos

O objetivo deste projeto é desenvolver dois protótipos, um protótipo transmissor para gerar o sinal de radiofrequência e um recetor que seja capaz de converter a energia das ondas eletromagnéticas geradas por esse transmissor em energia elétrica e armazená-la num condensador. A energia elétrica armazenada terá como finalidade alimentar um sistema de baixo consumo constituído por um microcontrolador *STM32L053R8T6*, um módulo *nRF905* para comunicação de rádio, um módulo *SHT21* com sensor de temperatura e humidade, um módulo *MAX44009* com um sensor de luminosidade. Este protótipo efetua a leitura dos sensores e posterior envio dessa informação de hora em hora, e o consumo médio deste é de 13,19 μ W.

É importante que o protótipo do recetor tenha o maior rendimento quanto possível, uma vez que se pretende no futuro multiplicar o número de recetores. Desta forma, pode-se distribuir os recetores por vários pontos no interior das estufas, conseguindo-se assim monitorizar as diferenças de parâmetros internas das estufas. Quanto mais eficiente for este protótipo maior será a distância a que este pode ser colocado da antena do transmissor.

Um dos objetivos deste projeto passa também pela construção de duas topologias diferentes de recetores, para que se possa comparar a eficiência destes, e para se analisar de que forma é que um recetor interfere sobre o outro quando estão os dois em funcionamento.

Com todos os protótipos construídos, pretende-se quantificar a energia que se consegue recolher em diversas situações, nomeadamente nas estufas da empresa *Bioinvitro*, uma vez que o sistema foi pensado para ser implementado no interior destas. Também irão ser efetuados testes em outros locais fechados onde existam diversos objetos no seu interior e por fim, testes em campo aberto.

Em suma, pretende-se analisar se a quantidade de energia recolhida nas diversas situações é suficiente para alimentar o sistema de muito baixo consumo referido anteriormente, com o consumo de $13,19\mu\text{W}$.

1.4. Organização do documento

Neste subcapítulo, será descrita a estrutura e organização do documento, resumindo os temas abordados e explorados em cada capítulo.

Após o término do presente capítulo, segue-se o capítulo dois, onde será explorado o estado da arte, isto é, onde serão apresentadas algumas soluções tecnológicas, que se relacionam com os temas em estudo no desenvolvimento deste projeto.

No capítulo três serão apresentados os fundamentos teóricos que apresentam maior relevância para o entendimento do projeto em desenvolvimento. Estes fundamentos serão explorados e aplicados em diversas partes deste projeto.

O quarto capítulo versará sobre os métodos utilizados para realizar o presente trabalho. Neste serão apresentados os circuitos elétricos utilizados, tanto no sistema transmissor como nos sistemas recetores, bem como a sua explicação de forma detalhada. Também serão descritos detalhadamente os métodos de calibração do sistema transmissor.

No capítulo cinco proceder-se-á à apresentação e discussão dos resultados obtidos com a realização deste projeto.

O último capítulo apresentará as conclusões mais importantes que o desenvolvimento deste projeto permitiu apurar. Serão também referidos os passos mais imediatos no processo de continuidade deste projeto.

Capítulo 2 - Estado da Arte

Com o desenvolvimento tecnológico, a energia elétrica que os dispositivos utilizam para o seu funcionamento tem vindo a sofrer um decréscimo sistemático. A alimentação de dispositivos de baixo consumo torna viáveis fontes de energia elétrica que outrora não o eram. Um exemplo de uma fonte deste tipo é a recolha de energia elétrica de ondas eletromagnéticas.

Existem muitos sinais de diferentes frequências no ar que podem ser utilizadas. Apesar de apresentarem uma potência baixa esta pode ser aproveitada para alimentar um microcontrolador ou ser armazenada para posterior utilização. A recolha desta energia tem sido alvo de diversos estudos por parte de investigadores.

Foi feito um estudo sobre projetos académicos que recorressem ao *Power Harvesting RF*. De todos é apresentado em maior detalhe o projeto que melhor demonstra as capacidades e a viabilidade desta tecnologia.

É também apresentado um produto, que utiliza a alimentação de sensores sem fios através de ondas de rádio. Este produto é muito interessante, uma vez que está disponível no mercado e se apresenta como mais um exemplo da evolução desta tecnologia.

É ainda explicado as razões por detrás da escolha pela tecnologia *RFID* (Identificação por radiofrequência) que foi uma das pioneiras da transferência de energia sem fios por radiofrequência.

2.1. Investigation of RF Signal Energy Harvesting

A universidade de *Sharjah* dos Emirados Árabes Unidos realizou um estudo experimental sobre a recolha de energia dos sinais *RF* [2]. O objetivo desse trabalho foi então investigar a quantidade de energia que se podia recolher e adaptá-la a níveis de energia suficientes para alimentar circuitos eletrónicos de baixo consumo. As características do espectro variam de área para área dependendo por exemplo da humidade, da distância ao transmissor. Tendo em conta esta particularidade, os testes foram realizados em dois locais distintos: uma zona com grande densidade populacional (centro da cidade) e uma zona com baixa densidade populacional (campus da Universidade).

A primeira fase passou por investigar a intensidade do sinal ao longo do espectro de frequências *RF*, para isso utilizaram um analisador de espectro (espectrómetro) e uma antena dipolo para efetuar essa medição.

Na Figura 1, mostra os resultados que foram obtidos no campus da Universidade. As medições foram feitas tanto dentro de edifícios como fora tendo-se chegado à conclusão que os

níveis de potência mais elevados estavam na largura de banda de *GSM* (920MHz a 950MHz). Nesta banda a potência máxima do sinal no exterior do campus foi de -1dBm (794,3 μ W). Contudo em algumas localizações no interior dos edifícios foram medidos sinais com -5dBm (316,2 μ W) e mesmo -10dBm (100 μ W).

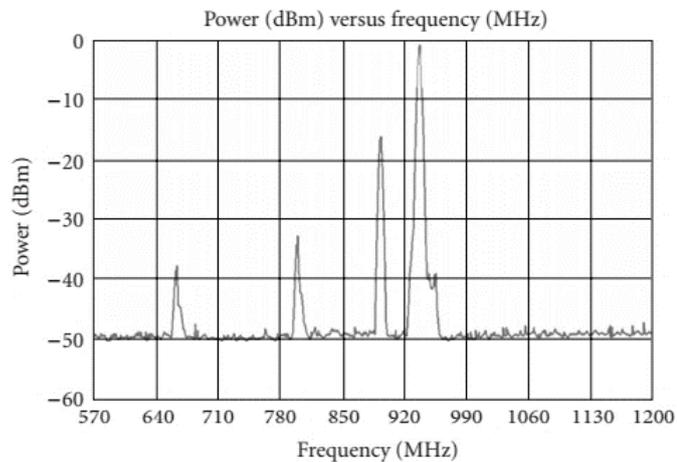


Figura 1: Espectro no campus da universidade de *Sharjah* [2]

As Figura 2 e Figura 3 mostram a intensidade do sinal num local movimentado da cidade. A partir do espectro da Figura 3 foi verificado que os sinais dentro 959MHz a 960MHz transportam a potência máxima com pequenas variações dentro de uma faixa aceitável. Mas com base no espectro da Figura 1, chegaram à conclusão que utilizando uma antena de *GSM*, com largura de banda de aproximadamente 40MHz e com frequência central nos 950MHz, conseguia-se captar mais energia.

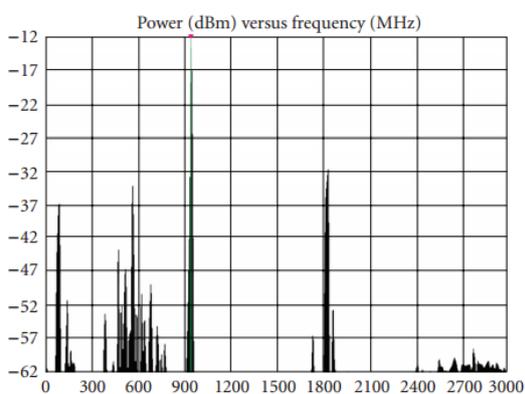


Figura 2: Espectro em local da cidade

(100kHz a 3GHz) [2]

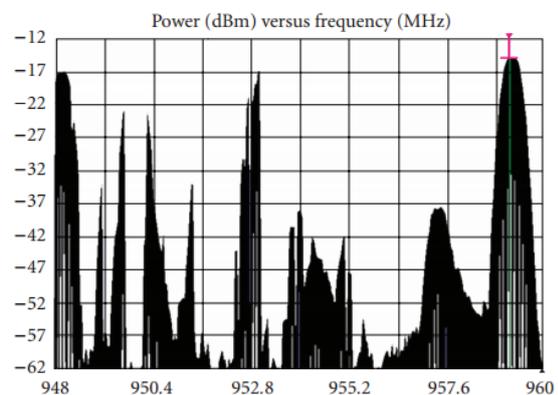


Figura 3: Espectro em local da cidade

(948MHz a 960MHz) [2]

O objetivo principal é melhorar a eficiência do sistema, para isso foram usados componentes passivos. O tamanho do recetor em relação ao número de frequências alvo é também um ponto a ser tido em conta.

Uma vez que diversos sinais de diferentes frequências terão que ser detetados por estes recetores, houve a necessidade de recorrer a uma *microstrip* de lado duplo *GSM* embebida na antena.

Os sinais presentes no ar possuem níveis de potência muito baixos. Para conseguir extrair mais potência desses sinais, houve a necessidade de aumentar o ganho da antena. O ganho da antena é diretamente proporcional à sua diretividade [equação (1)].

$$G_0 = e_t * D_0 \quad (1)$$

Em que:

e_t : é a eficiência da antena

D_0 : é a diretividade da antena

G_0 : é o ganho.

Mas as antenas *microstrip* têm como desvantagem apresentar uma estreita largura de banda, e por este facto, a potência que pode ser recolhida por estas vai ser inferior. Este facto limita a escolha dos sinais para apenas uma ou duas faixas de frequência. Como o sinal *GSM* (a operar nos 960MHz) apresenta os valores mais elevados de potência e existem em quase todos os locais onde existam telemóveis, foi esta a frequência central seleccionada.

A antena *GSM* desenvolvida é apresentada na Figura 4. Como o sinal captado pelo recetor apresenta uma tensão baixa, foi necessário acrescentar um circuito para aumentar essa tensão. O circuito utilizado baseou-se no multiplicador de tensão em cascata e um detetor de pico. O circuito global implementado é ilustrado na Figura 5.

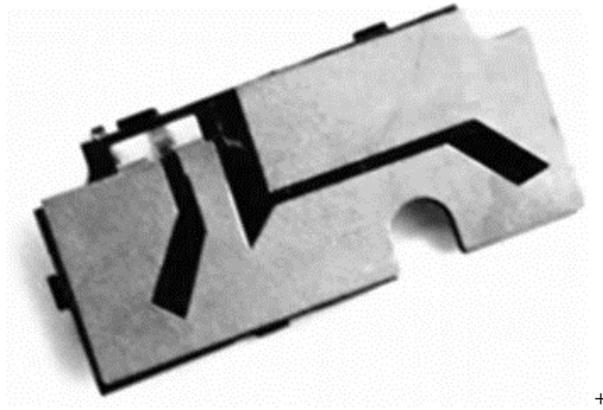


Figura 4: Antena *GSM* incorporada [2]

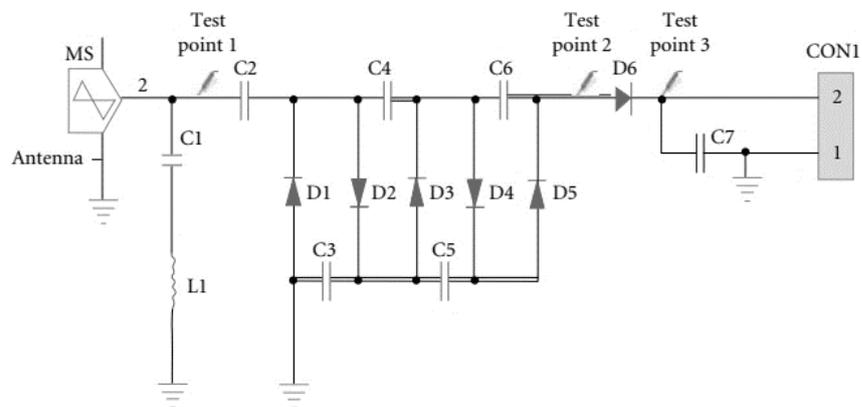


Figura 5: Circuito global implementado [2]

Na Figura 6, é apresentado o circuito final do protótipo. A antena é incorporada na mesma placa do circuito (lado esquerdo da figura).



Figura 6: Recetor de energia *RF* [2]

Este circuito final foi testado em ambientes diferentes e foi analisada a resposta deste a diferentes potências de entrada. Num primeiro teste, o circuito foi colocado a cerca de 500 metros de distância da estação base da operadora móvel e numa zona onde não existiam muitos telemóveis em funcionamento. Foi então medida a tensão nessa situação e o resultado foi de 429mV. Com essa tensão já conseguiam acender um led como mostra a Figura 7.

Foi realizado um segundo teste em que retiraram as pilhas e o sistema de células solares de uma calculadora e ligaram o recetor de energia. Foi colocado um telemóvel a fazer de transmissor ao seu lado e conseguiram obter energia suficiente para alimentar a calculadora, como mostra a Figura 8.

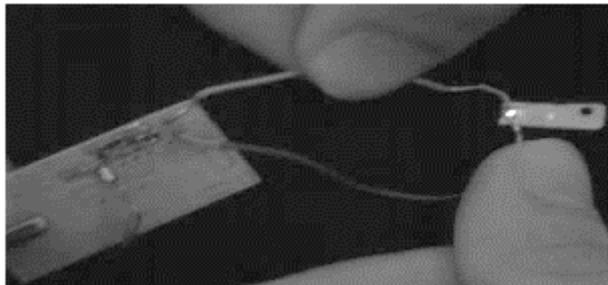


Figura 7: Led ligado com energia *RF* [2]

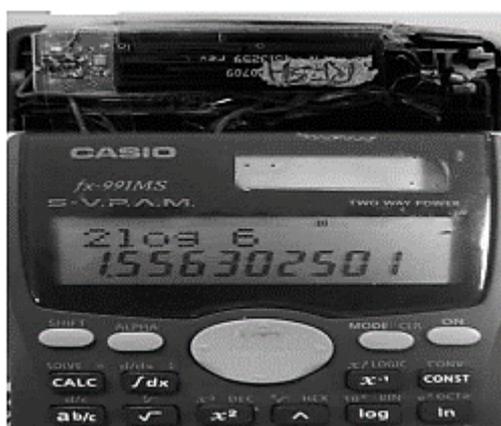


Figura 8: Calculadora alimentada por energia *RF* [2]

Como este estudo, os autores estimaram que a eficiência do circuito era de cerca de 5%. O limiar de entrada era cerca de -25dBm ($3,16\mu\text{W}$) e a potência na saída do recetor de energia era de 158nW .

Com este trabalho concluíram que apesar da baixa energia potência que se pode receber neste método, é o suficiente para aplicações de baixo consumo, mostrando assim a viabilidade do projeto da receção de energia das ondas *RF*.

2.2. POWERCAST

A *Powercast* [3] é uma empresa que trabalha com sistemas de energia sem fios baseado em energia *RF*. Recentemente, começaram a lançar soluções de micro-alimentação sem fios que permitem que sensores e outros dispositivos de baixo consumo sejam alimentados remotamente e automaticamente.

As soluções da *Powercast* apresentadas a seguir representam bem o que se pretende conseguir com o projeto desta dissertação, uma vez que partilham do mesmo objetivo principal que é o de alimentar de sensores de baixo consumo através de ondas eletromagnéticas.

Para isso, a empresa tem disponível no mercado vários produtos, entre eles, transmissores, recetores que convertem o sinal *RF* em corrente contínua e antenas.

2.2.1 Transmissor

Em relação aos transmissores, a empresa tem disponível no mercado duas versões semelhantes, em que a diferença entre as duas versões concentra-se na potência de saída. Na Figura 9 é apresentado o transmissor da *Powercast*.

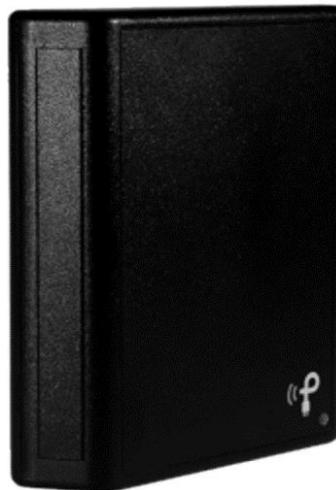


Figura 9: Transmissor *TX91501 Powercast* [4]

O transmissor *TX91501* [4] da *Powercast* conta com duas versões, e tal como já foi referido, a potência de saída é o que as distingue. O transmissor *TX91501 – 3W – ID* apresenta na saída um valor de potência de 3 Watt e a versão *TX91501 – 1W – ID* apresenta à saída 1 Watt de potência. Na Tabela 1 apresenta-se as principais especificações deste transmissor.

Tabela 1: Especificações do *TX91501*.

Frequência	915 MHz
Potência de saída (Não ajustável)	Tx91501 – 3W – ID: 3 Watt TX91501 – 1W – ID: 1 Watt
Antena	Antena integrada direcional Polarização Vertical (o emissor tem de estar com o logotipo na vertical)
Temperatura de operação	-20 °C a 50 °C
Potência entrada	5VDC/1A
Dimensões	171,45 x 158,75 x 41,4 (mm)
Peso	450gr

Por consequência da diferença da potência apresentada à saída dos transmissores, surgem outros fatores que são relevantes na escolha entre as duas versões. O primeiro fator relaciona-se com a distância a que se podem colocar os dispositivos a alimentar do transmissor, uma vez que, naturalmente com o emissor de 3 Watt podem colocar-se os dispositivos recetores a uma distância superior.

A diferença de preços entre as duas versões é outro fator, e está é bem distinta. O transmissor de 1 Watt apresenta o preço de 98,09 euros, enquanto que o transmissor de 3 Watt tem o custo de 203,62 euros. [5]

2.2.2 Recetores

Em relação aos recetores, existem também 2 versões, uma com o circuito integrado *P1110 Powerharvester Receiver* e outra com o circuito integrado *P2110B Powerharvester Receiver*) [3].

As diferenças entre o *P1110* e *P2110B* estão relacionadas com a distância com que se pode colocar os recetores do transmissor, e com o tipo de sinal à saída. No recetor *P1110* o sinal da tensão de saída é um sinal contínuo, ou seja, os sensores podem fazer leituras permanentemente que a alimentação é garantida. Contudo a distância que se pode colocar este recetor do transmissor só pode atingir os 3 metros. Nos recetores *P2110B*, o sinal de tensão de saída é um sinal “pulsado”, isto é, os sensores só podem efetuar as leituras em determinados períodos de tempo. Este tipo de recetor, utiliza um condensador para armazenar energia, e nos períodos que os sensores não efetuem leituras é como se estivessem desligados fisicamente e o

condensador nesse período vai carregar. Quando os sensores precisam de fazer leituras, utilizam a energia pré-armazenada no condensador. Este condensador deve ser escolhido de acordo com o tipo de aplicação a utilizar, tendo em consideração que utilizando um condensador com capacidade menor, demora menos tempo a carregar/descarregar, e um condensador com capacidade maior vai demorar mais tempo a efetuar a carga ou descarga. Na Figura 10 pode ver-se o sinal da tensão de saída dos recetores *P2110B*.

TIMING DIAGRAM

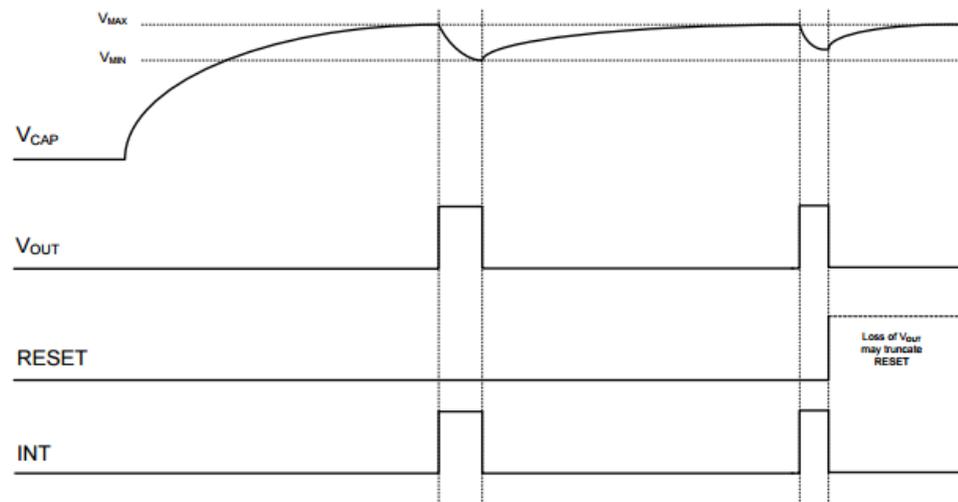


Figura 10: Tensão de saída do recetor *P2110B* [6]

O sinal V_{CAP} é a tensão no condensador de armazenamento de energia. O Sinal V_{OUT} é a tensão de saída que alimenta os dispositivos. O pino de *RESET* é uma entrada para o recetor, ele recebe a indicação que por exemplo os sensores já efetuaram a leitura e pode assim desligar a saída V_{OUT} , poupando mais energia e permitindo que o condensador recarregue mais depressa. O pino *INT* é uma interrupção que é gerada para dar a indicação que existe tensão no pino V_{OUT} e desta forma já pode ser utilizada.

Com esta solução, estes recetores podem trabalhar até 10 metros de distância do transmissor.

A *Powercast* tem duas antenas (*Dipole antenna* e *Patch antenna*) que se podem utilizar nos dois tipos de recetores. As antenas foram dimensionadas para a frequência de 915MHz, têm conetores *SMA* para ligação das mesmas às placas. A *Dipole antenna* (Figura 11a), é uma antena plana e tem o conetor na parte inferior da antena. Esta antena é do tipo omnidirecional com polarização vertical e tem um ganho linear de 1,25. A *Patch antenna* (Figura 11b) tem duas

camadas e o conector fica localizado na parte de trás. Esta antena é do tipo direcional com um feixe de energia de 122° na horizontal e 68° na vertical e o seu ganho linear é de 4,1.



Figura 11: Antenas para os recetores [3]

Estas duas antenas vêm incluídas nos kits de desenvolvimento dos recetores. O *kit P110-EVB (Powerharvester Evaluation Board)* já com as duas antenas têm o custo de 156,26 euros e o *kit P2110-EVB* tem o preço de 162,89 euros [5]. As imagens dos *kits* são apresentadas na Figura 12a e Figura 12b respetivamente.

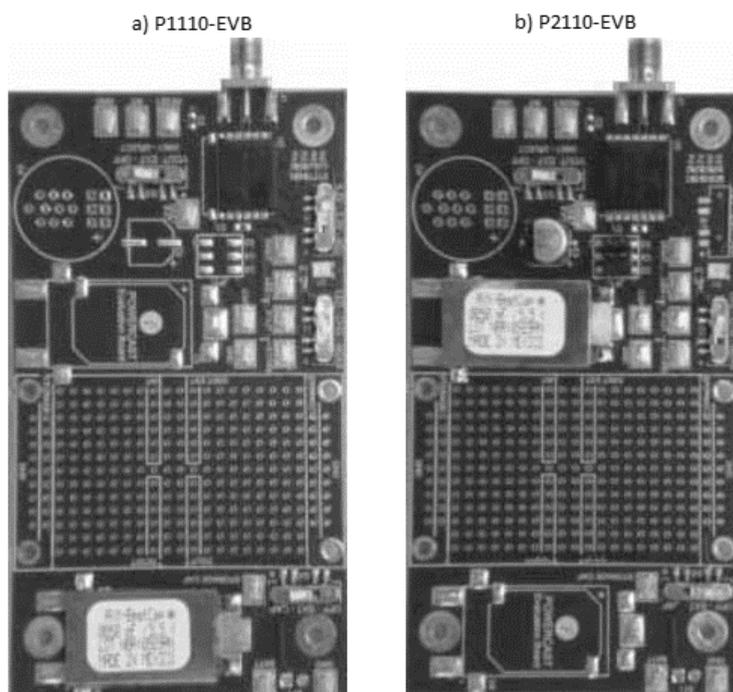


Figura 12: Kits de desenvolvimento [3]

Adquirindo um *kit* completo (Figura 13) com todos os componentes apresentados na Tabela 2, o preço é de 1183,82 euros. [5]

Tabela 2: Componentes *kit P2110-EVAL-01*

Quantidade	Descrição
1	Transmissor (TX91501-3W-ID) - 3W, 915MHz
2	P2110 evaluation boards (P2110-EVB)
2	Dipole antenna (incluídas no P2110-EVB)
2	Patch antenna (incluídas no P2110-EVB)
2	Placas de sensores wireless (temperatura, humidade e luz) (WSN-EVAL-01)
1	Placa desenvolvimento XLP Microchip 16-bit
1	Microchip MRF24J40 PICtail/PICtail Plus daughter card
1	Microchip PICkit3 programmer/debugger



Figura 13: Kit de desenvolvimento P2110-EVAL-01 [3]

Capítulo 3 - Fundamentos Teóricos

Neste capítulo, vão ser abordados alguns conceitos que são fundamentais na projeção deste trabalho. Um tópico importante a ser abordado relaciona-se com as ondas de rádio, como é que estas se propagam no espaço e como são irradiadas e/ou recebidas pelas antenas. Outro tópico importante prende-se com as linhas de transmissão, isto é, analisar o que acontece quando não existe um casamento perfeito de impedância entre o circuito transmissor, a linha de transmissão e a antena. Por fim serão vistos alguns conceitos importantes sobre antenas.

3.1. Ondas de rádio

Ondas de rádio ou ondas eletromagnéticas são campos eletromagnéticos de alta frequência, não visíveis e não audíveis pelo ser humano, irradiados por uma antena.

Como os campos eletromagnéticos são capazes de transmitir energia até uma determinada distância propicia-se o transporte de informação sem a necessidade de fios. Este tipo de comunicação utiliza-se fundamentalmente em rádio, televisão e telemóveis.

A primeira teoria da existência de ondas eletromagnéticas foi comprovada em 1864, por James Clerk Maxwell (físico escocês). Este provou matematicamente que a eletricidade e o magnetismo estão relacionados, confirmando que os campos elétrico e magnético interligam-se dando origem a ondas eletromagnéticas [7].

O primeiro a verificar experimentalmente que as ondas eletromagnéticas existiam, foi Henrich Hertz, em 1887, este gerou as ondas eletromagnéticas recorrendo a circuitos oscilantes detetando-as depois através de circuitos sintonizados na mesma frequência.

A onda eletromagnética é composta por um campo elétrico (\vec{E}) e um campo magnético (\vec{B}) perpendiculares entre si a deslocarem-se no espaço à velocidade da luz [Figura 14]. O campo magnético varia com o tempo e, como consequência disso, surge um campo elétrico no plano ortogonal com as mesmas características (intensidade e polaridade). De forma mais concreta, cada linha representativa do campo magnético gera uma linha de campo elétrico, num plano ortogonal. Daí um campo magnético gera outro elétrico e um campo elétrico gera outro magnético, este ciclo é repetido sucessivamente sendo desta forma que as ondas eletromagnéticas se propagam.

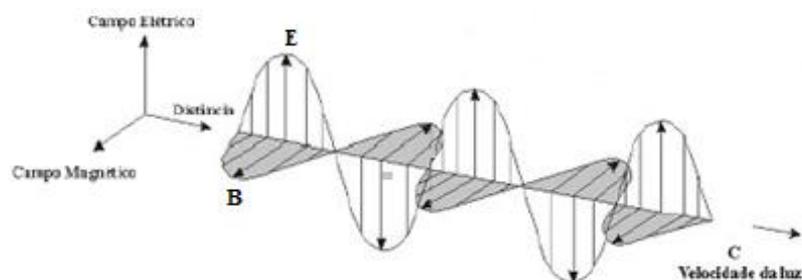


Figura 14: Onda eletromagnética (adaptado de [8])

3.2. Linha de Transmissão

Os condutores elétricos que ligam o transmissor à antena ou a antena ao receptor, têm o nome de linha de transmissão ($L\bar{T}$). Quando estas transportam sinais de baixas frequências, cujo o comprimento de onda é muito superior ao comprimento da linha de transmissão, estas não apresentam grandes problemas. No entanto em regime de alta frequência, como o comprimento de onda é muito próximo ou inferior às dimensões da linha de transmissão, estas apresentam características que não podem ser ignoradas.

3.2.1 Impedância da linha de transmissão

O atributo elétrico mais importante, de uma linha de transmissão é a sua impedância característica Z_0 . Quando circula uma corrente alternada numa linha de transmissão em regime de alta frequência, existe uma impedância que se opõe à passagem da mesma. A impedância de uma linha de transmissão é dada pela equação (2). [9] [10]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}} \quad (2)$$

Em que:

- R: resistência por unidade de comprimento;
- C: a capacitância por unidade de comprimento;
- L: indutância por unidade de comprimento;
- G: a condutância por unidade de comprimento.

Na prática, para frequências elevadas, o valor da resistência (R) e da condutância (G), são muito pequenos quando comparados com os valores das reactâncias. Então na equação (3) é apresentada a simplificação da equação anterior [10].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j2\pi fL}{j2\pi fC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

A partir desta equação, conclui-se que a impedância característica de uma linha de transmissão depende essencialmente da indutância e da capacidade dos condutores que a constituem. A indutância L depende do diâmetro dos condutores, ou seja, quanto maior for o diâmetro dos condutores, menor a indutância por unidade de comprimento. A capacidade C depende da distância que separa os condutores [10].

3.2.2 Potência incidente e refletida e ondas estacionárias

A função de uma linha de transmissão, é transportar a energia do transmissor até à antena, para que possa ser irradiada. Contudo, para que toda a energia chegue até à antena, é necessário garantir um casamento de impedância perfeito entre o transmissor e a linha de transmissão e entre a linha de transmissão e a antena [9].

Na prática, o conjunto linha de transmissão e antena, não irradia toda a energia enviada pelo transmissor. Existem sempre dissipações térmicas na linha de transmissão e na própria antena, devido às suas próprias resistividades.

Qualquer casamento de impedâncias imperfeito, vai fazer com que a potência da onda incidente (onda gerada pelo transmissor) não seja completamente transferida para a antena, surgindo assim uma potência refletida em sentido oposto [Figura 15]. Esta potência refletida, provoca uma dissipação parcial de potência sobre os transístores do estágio de saída do transmissor [9].

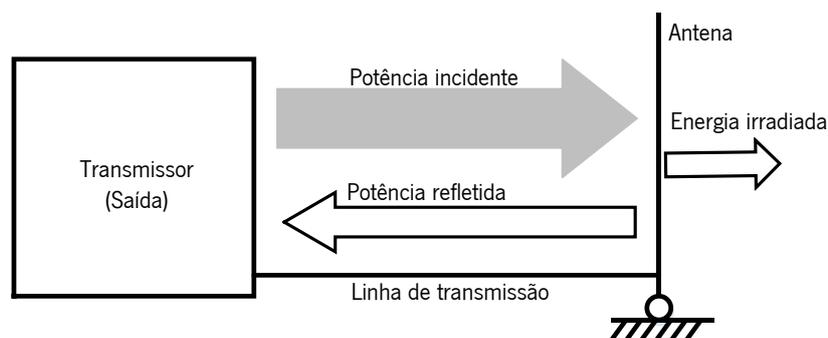


Figura 15: Representação das potências incidente e refletida (adaptado de [9])

As ondas incidentes e as ondas refletidas vão somar-se ou subtrair-se alternadamente devido às suas diferenças de fase relativas e formam assim as ondas estacionárias.

As ondas refletidas acarretam sérios problemas, uma vez que ao voltarem para o transmissor vão provocar sobreaquecimento no transistor do estágio de potência [9]. A existência dessas ondas também provoca uma diminuição do rendimento da transmissão, uma vez que essa potência não é irradiada.

É então imperial que se consiga o melhor casamento de impedâncias possível, não só para não colocar em risco o transistor do estágio final do transmissor, mas também para tirar melhor partido da transmissão. Quanto maior for a potência irradiada maior é a amplitude do sinal recebido pelo recetor.

Para avaliar na prática as ondas estacionárias, pode recorrer-se a um medidor *ROE* (Relação de Ondas Estacionárias) [Figura 16].



Figura 16: Medidor ROE

O medidor *ROE* (relação de ondas estacionárias) ou *VSWR* (*Voltage Standing Wave Ratio*), compara as tensões da onda incidente e da onda refletida pela antena, indicando valores entre 1 a ∞ (infinito). O valor 1 representa a situação ideal, ou seja, toda a potência incidente é irradiada pela antena. O valor infinito é a pior das situações, onde toda a potência incidente é refletida de volta ao transmissor. Este último caso surge quando a linha de transmissão termina em circuito aberto ou quando lhe é provocado um curto-circuito. Quanto maior for a *ROE*, maior será a incompatibilidade das impedâncias [9].

Na Tabela 3, são apresentados os valores de potência irradiada por um transmissor de 4 Watt para alguns valores de *ROE* apresentados pelo medidor.

Tabela 3: Percentagem da potência irradiada efetiva [11]

ROE	% DE PERDA	% Potência Irradiada	Potência Irradiada (W)
1.0:1	0.0%	100.0%	4.00
1.1:1	0.2%	99.8%	3.99
1.2:1	0.8%	99.2%	3.97
1.3:1	1.7%	98.3%	3.93
1.4:1	2.8%	97.2%	3.89
1.5:1	4.0%	96.0%	3.84
1.6:1	5.3%	94.7%	3.79
1.7:1	6.7%	93.3%	3.73
1.8:1	8.2%	91.8%	3.67
2.0:1	11.1%	88.9%	3.56
2.2:1	14.1%	85.9%	3.44
2.4:1	17.0%	83.0%	3.32
2.6:1	19.8%	80.2%	3.21
3.0:1	25.0%	75.0%	3.00
4.0:1	36.0%	64.0%	2.56
5.0:1	44.4%	55.6%	2.22
6.0:1	51.0%	49.0%	1.96
7.0:1	56.3%	43.8%	1.75
8.0:1	60.5%	39.5%	1.58
9.0:1	64.0%	36.0%	1.44
10.0:1	66.9%	33.1%	1.32

O medidor, apresentado da Figura 16, tem 2 terminais de ligação. O terminal *RTX* (lado esquerdo), deve ser ligado à saída do transmissor e o terminal *ANT* (lado direito) deve ser ligado à antena.

3.3. Antena

A antena é um dos elementos chave para uma transmissão e recepção com qualidade dos sinais eletromagnéticos. Não basta ter um bom transmissor, ou um bom receptor, para que a recepção ou transmissão tenha qualidade. É mais vantajoso ter um emissor de qualidade média com uma boa antena, do que ter um emissor de muito boa qualidade com uma antena com parâmetros inadequados ao sistema. [12]

As antenas podem classificar-se de diversas formas: pela frequência central, pela largura de banda, pela impedância característica, pela potência máxima de emissão ou recepção, pela direccionalidade, pelo ganho, entre outras.

As antenas utilizadas na transmissão ou na recepção têm características recíprocas. A mesma antena pode ser utilizada para emitir ou para receber, desde que os parâmetros (apresentados no parágrafo anterior) estejam dentro dos limites para a aplicação que se pretende. [12]

Numa antena em transmissão, é-lhe fornecido um sinal *RF* e esta transforma-o em energia radiante (ondas eletromagnéticas). Já em antenas para recepção, o processo é exatamente o contrário, as ondas eletromagnéticas são recebidas na antena e esta converte-as em energia elétrica.

A localização da antena também é um ponto fulcral para o desempenho do sistema, uma vez que estas devem estar o mais afastado possível de obstáculos devido aos fenómenos de reflexão e refração. Os obstáculos localizados na proximidade da antena em determinados casos também podem influenciar significativamente a sua impedância característica. [9] [12]

3.3.1 Circuito equivalente de uma antena

Para explicar o funcionamento das antenas, optou-se por abordar primeiro o seu circuito equivalente. Uma antena é representada por um circuito oscilador aberto, na Figura 17-a está representado o oscilador *LC*, cuja sua frequência de ressonância é dada na equação (4).

$$f_r = \frac{1}{2 \pi \sqrt{LC}} \quad (4)$$

Para se verificar a afirmação feita no parágrafo anterior, vai-se manipular o circuito da Figura 17. A capacidade do condensador (*C*) é determinada pela permissividade eletrostática do meio (ϵ_0), pela constante dielétrica do dielétrico (ϵ_r), pela área das placas (*A* em m²) e pela distância entre elas (*d* em metros) [Equação (5)]. Quanto mais pequena for a área das placas e

maior for a distância entre elas, menor será a capacidade do condensador. A indutância da bobina (L) é determinada pelo comprimento da bobina (l em metros), pela sua secção (S em m^2), pelo número de espiras (N) e permeabilidade magnética do seu núcleo ($\mu_0 = 4 * 10^{-7}$ para o vácuo) [Equação (6)]. Quanto menor for a secção e o número de espiras, e maior for o comprimento da bobina, menor será o valor da indutância da bobina.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \quad (6)$$

No condensador, à medida que a área das suas placas vai diminuindo e/ou a distância entre elas vai aumentando, a capacidade deste vai diminuindo apresentando sempre uma capacitância acima de zero.

O mesmo acontece com a bobina. Se se a esticar ao ponto de esta ficar um fio retilíneo (sem espiras) não deixa de ser uma bobina, pois existe sempre um valor de indutância associado. É isso que está representado na Figura 17, na qual se pode ver que as placas dos condensadores se estão a separar e as espiras da bobina estão a ser esticadas até ficar um fio retilíneo. A fazer-se isso a frequência de ressonância aumentou consideravelmente. Desta forma é possível perceber que uma antena apresenta as mesmas propriedades de um circuito oscilador LC . Uma antena construída por um fio retilíneo é conhecida como dipolo [12].

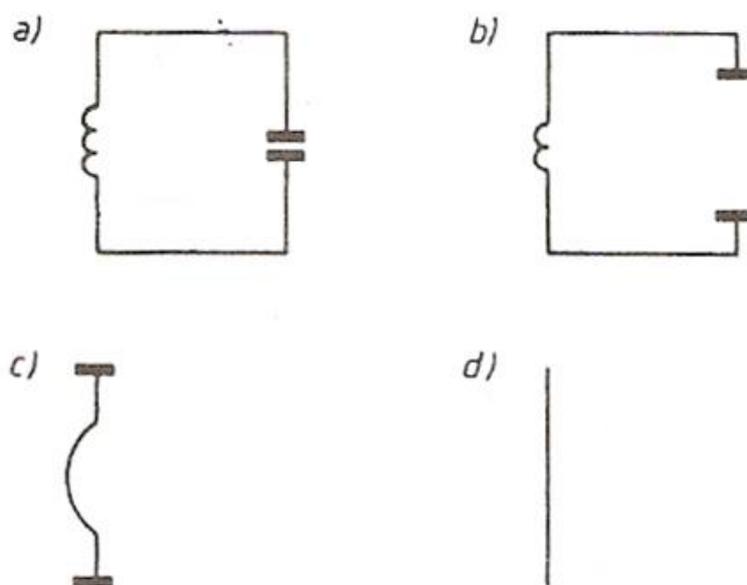


Figura 17: Circuito oscilador LC esticado até ficar um fio retilíneo [12]

3.3.2 Campo elétrico e campo magnético sobre uma antena

Antes de se analisar como é que são criados os campos elétricos e magnéticos num circuito oscilador aberto (antena), é apresentado o comportamento dos circuitos osciladores fechados.

3.3.2.1 Circuito oscilador fechado

Sempre que um condutor é percorrido uma corrente elétrica, gera um campo magnético em redor do mesmo (Figura 18-a) e sempre que há diferença de potencial entre dois pontos gera um campo elétrico (Figura 18-b). A bobina armazena energia sob a forma de campo magnético e o condensador armazena energia sobre a forma de campo elétrico.

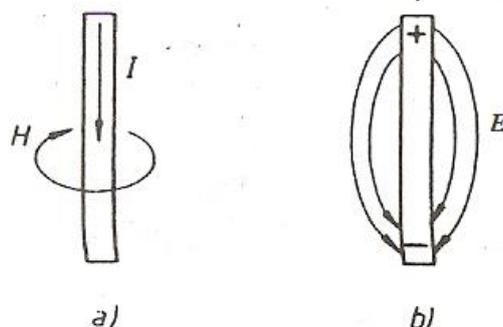


Figura 18: Campo magnético e campo elétrico gerado num dipolo [12]

Na seqüência ilustrada na Figura 19, é possível perceber-se de que forma é gerada uma onda sinusoidal a partir de um circuito ressonante LC . Para explicar o funcionamento do circuito, considera-se que os componentes bobina (L) e condensador (C) são ideias.

Na Figura 19a, o condensador encontra-se completamente carregado, implicando que os terminais da bobina vão ficar submetidos à tensão do condensador. Como a bobina opõe-se a passagens bruscas de corrente, então, e como esta ilustrado na Figura 19b, esta vai começar a armazenar a energia sob forma de campo magnético gradualmente. Na Figura 19c a bobina já se encontra completamente carregada e a sua tensão induzida (de sentido oposto) gera uma corrente que vai voltar a carregar o condensador [Figura 19d].

Nesta fase, o campo magnético da bobina extingue-se e o condensador está novamente carregado, mas desta vez com polaridade invertida [Figura 19e]. Estando o condensador carregado com polaridade oposta, este inicia novamente a descarga sobre a bobina, circulando uma corrente na bobina, mas desta vez com sentido oposto à primeira [Figura 19f]. Quando a

bobina está toda carregada [Figura 19g] dá-se novamente a descarga para o condensador [Figura 19h], e no final este polarizado como inicialmente [Figura 19a].

Este processo num circuito ideal (bobina e condensador ideais) repete-se infinitamente, pois não há transferência de energia para o exterior.

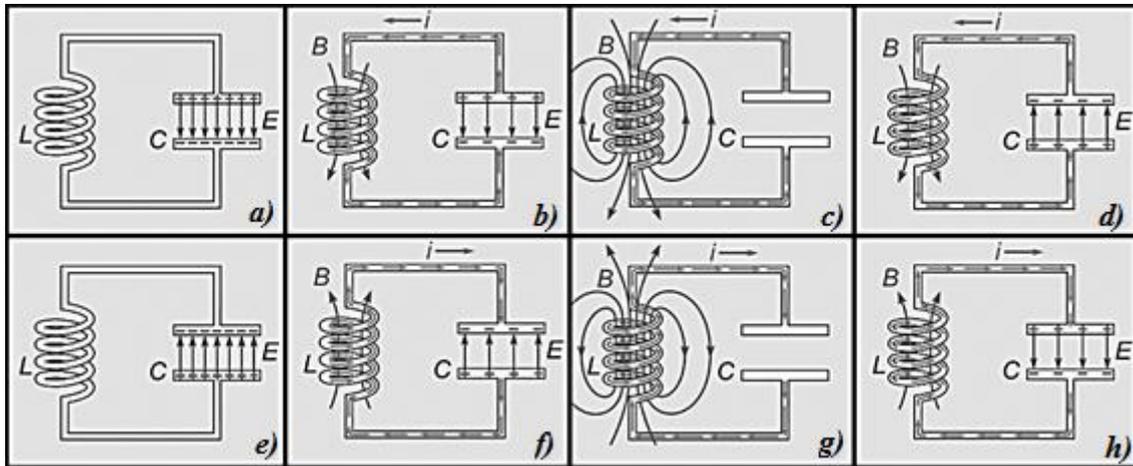


Figura 19: Fluxo de energia num circuito oscilador LC [13]

A sua frequência de ressonância é a frequência com que a energia armazenada na bobina passa para o condensador e posteriormente do condensador para a bobina.

A fórmula que expressa a frequência de ressonância foi já apresentada na Equação 5.

3.3.2.2 Circuito oscilador aberto

Quando um condensador é ligado a uma fonte de tensão (Figura 20), este é carregado com uma determinada quantidade de energia, dependendo da tensão e da capacidade do condensador. Devido à *fem* (força eletromotriz) da bateria, as cargas negativas fluem para a placa inferior, ficando a placa superior carregada positivamente. As linhas do campo elétrico são direcionadas das cargas positivas para as cargas negativas e perpendiculares às placas do condensador. [14]

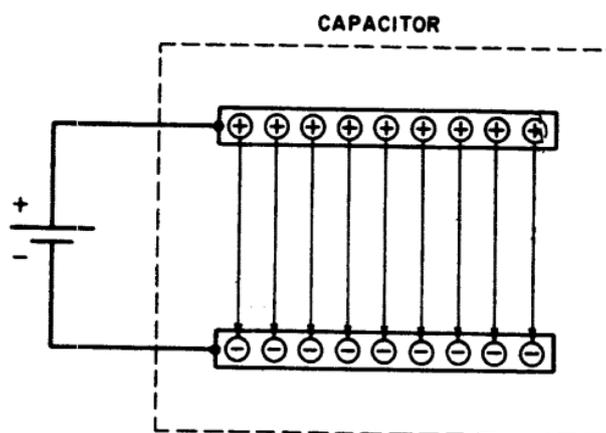


Figura 20: Campo elétrico no condensador [14]

O comportamento de um circuito oscilador aberto pode ser exemplificado por duas placas de um condensador a separarem-se uma da outra como demonstra a Figura 21. Como as linhas de campo elétrico têm que formar um ângulo reto com as placas do condensador, à medida que estas se vão afastando as linhas de campo elétrico vão-se curvando. Na Figura 21A as linhas de campo elétrico são retas, mas à medida que as placas se vão afastando, estas vão-se curvando até formarem aproximadamente semicírculos como ilustrado na Figura 21C. Em vez de placas de metal planas, como no condensador, os dois elementos podem assumir a forma de hastes metálicas ou fios.

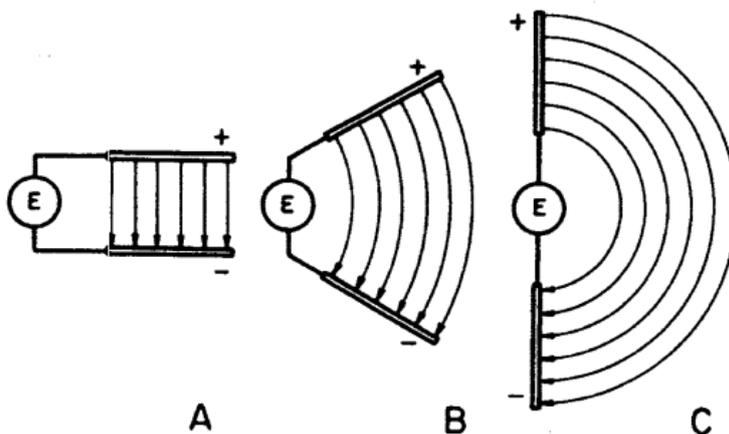


Figura 21: Campo elétrico entre as placas em vários ângulos [14]

A vista tridimensional da Figura 22 representa o comportamento do campo elétrico com maior detalhe. Na Figura 22A as hastes do dipolo estão separadas por aproximadamente 30° e as linhas do campo magnético são projetadas radialmente a partir da haste carregada positivamente para a haste carregada negativamente.

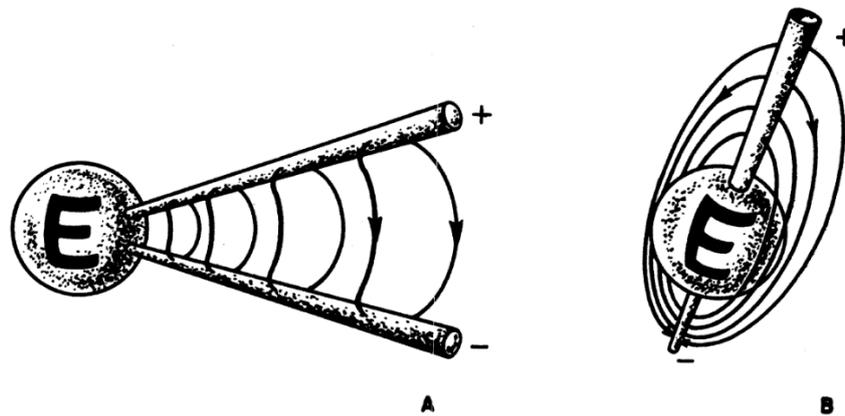


Figura 22: Campo magnético entre fios a vários ângulos [14]

Uma carga ao deslocar-se ao longo de um condutor constitui uma corrente elétrica e produz um campo magnético em torno do condutor. Portanto, o fluxo de carga ao longo de uma antena também será acompanhado por um campo magnético. A intensidade deste campo é diretamente proporcional ao fluxo de carga.

O campo magnético no espaço em torno de um fio condutor tem uma configuração específica (Figura 23). No campo magnético, as linhas de campo são desenhadas de acordo com a regra da mão direita. O campo magnético pode ser idealizado como circunferências concêntricas ao fio condutor e, o valor do campo magnético, altera de forma inversamente proporcional à distância perpendicular ao fio condutor. Dito de outra forma o campo magnético é superior próximo do condutor e vai diminuindo com o afastamento ao fio condutor. Se o polegar da mão direita indica o sentido corrente elétrica, por sua vez, os restantes dedos indicam a direção do campo magnético.

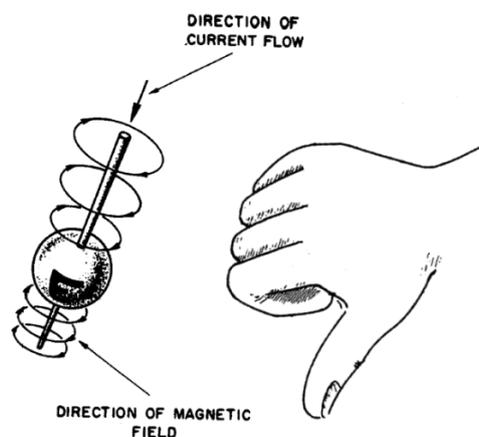


Figura 23: Campo magnético sobre uma antena de meia-onda (adaptado de [14])

Na Figura 24 está representado de forma gráfica uma linha de força do campo elétrico E e do campo magnético H durante uma semi-oscilação. As linhas de força do campo elétrico têm origem nas cargas positivas e terminam nas cargas negativas. Na Figura 24-a) a carga positiva e a carga negativa ainda estão próximas, logo formam uma linha de força do campo elétrico pequena. À medida que as cargas se afastam o campo elétrico aumenta, sendo que a tensão máxima que o dipolo apresenta é nas suas extremidades. Como tal, quando as cargas estão mais afastadas (extremidades do dipolo) tem-se o ponto de maior amplitude de tensão. À medida que voltam para o centro a intensidade do campo elétrico volta a diminuir. No momento em que as cargas se equilibram [Figura 24-d)] as linhas de força cortam-se, e afastam-se do dipolo. Na próxima separação de cargas, aparece novamente uma série de linhas de força à volta do dipolo, mas desta vez em sentido contrário ao anterior.

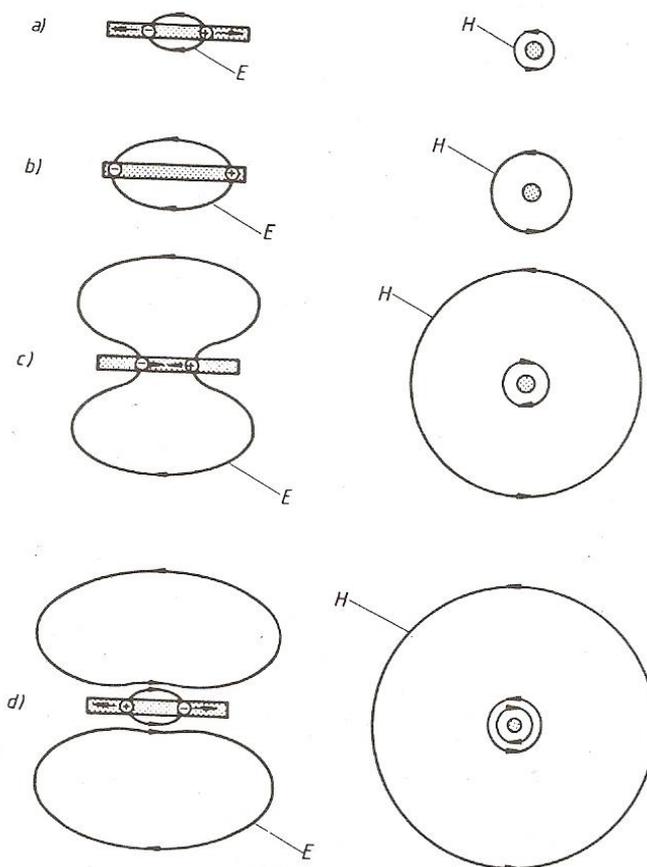


Figura 24: Formação dos campos elétrico e magnético durante uma semi-oscilação [12]

Como as linhas de campo são impelidas para o exterior, estas não conseguem devolver energia ao circuito oscilador aberto, então este perde energia constantemente. Por esse motivo o transmissor de energia RF tem de fornecer essa energia de forma contínua.

Na Figura 25 são apresentadas as linhas de força dos campos elétrico e magnético bem como as ondas eletromagnéticas irradiadas pelo dipolo.

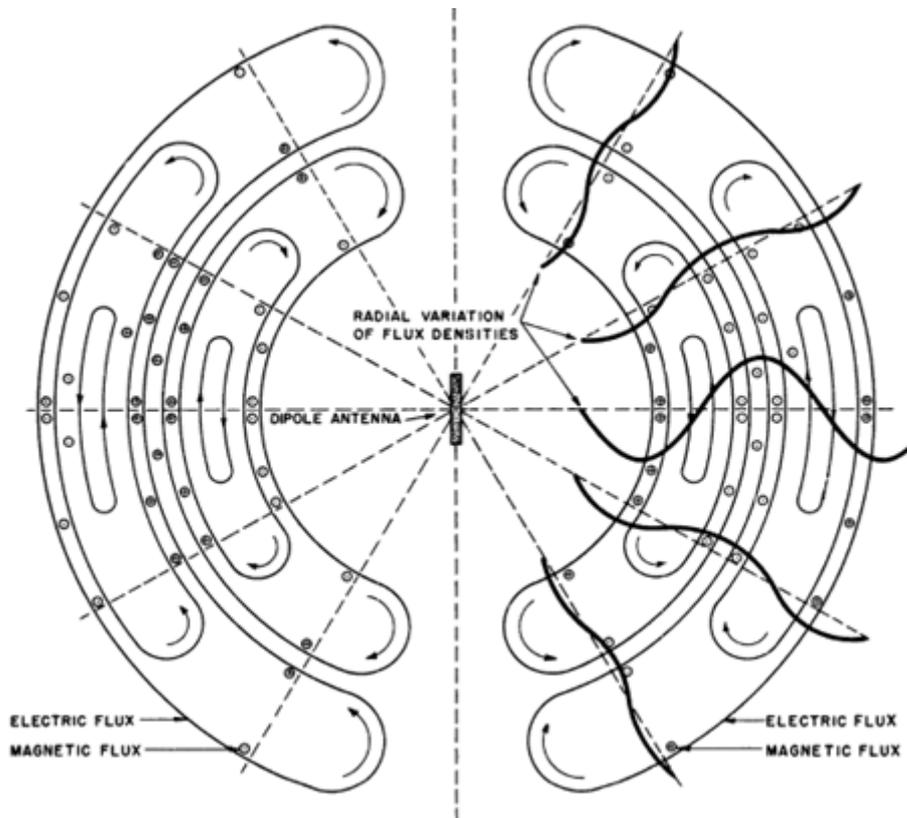


Figura 25: Campos elétricos e campos magnéticos irradiados pelo dipolo [14]

De notar que numa antena do tipo dipolo, as ondas são propagadas pelas laterais desta [Figura 26], e não pelas extremidades. Então se uma antena recetora do tipo dipolo for colocada na vertical, sobre uma antena emissora igual também na vertical, na antena recetora não vai aparecer qualquer sinal oriundo da antena emissora (colocada a baixo), a menos que surjam fenómenos como reflexões e/ou refrações em objetos perto das imediações das antenas.

Mínimo de energia irradiada

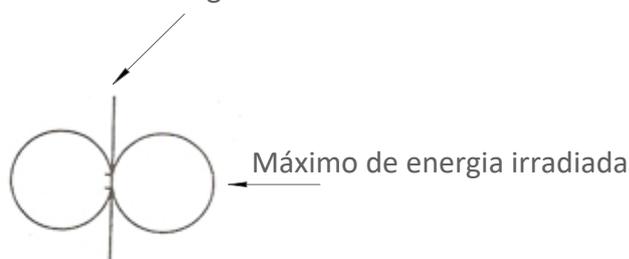


Figura 26: Característica radial de um dipolo [11]

3.3.3 Polarização da antena

A polarização da antena é um ponto de enorme importância. As linhas de força da intensidade do campo elétrico têm a mesma direção que a antena. Se uma antena emissora é vertical, as linhas de força do campo elétrico por ela produzidas também são verticais, então neste caso diz-se que a polarização é vertical. Caso a antena emissora esteja na posição horizontal diz-se que a polarização é horizontal. [12]

Quanto à recepção, o princípio mantém-se, para uma antena receber uma onda polarizada verticalmente, esta deve de ser instalada verticalmente.

Quando a polarização da onda incidente coincide com a polarização da antena de recepção (situação ideal) diz-se que existe adaptação das polarizações. [9]

Na prática, a polarização da antena de recepção não é a mesma que a polarização da onda recebida (incidente), isto causa desadaptação de polarizações. As reflexões e refrações das ondas eletromagnéticas em objetos causam rotações da polarização das ondas [Figura 27]. Devido a isso, por vezes a energia captada pela antena recetora vertical pode ser menor do que quando colocada na horizontal. [9]

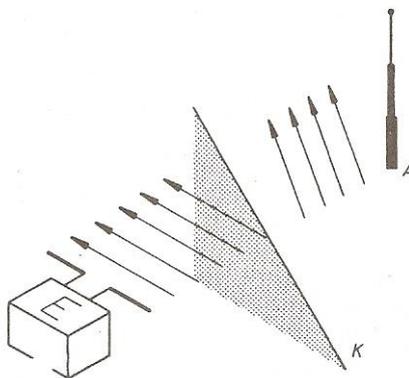


Figura 27: Rotação da polarização das ondas [12]

Na Figura 27, o transmissor E emite com polarização horizontal, e o recetor A possui antena vertical. A antena recetora capta os sinais gerados pelo emissor graças à rotação da onda, que é proporcionada pelas reflexões e refrações provocadas pelo obstáculo K existente entre elas.

3.4. Espaço livre

Depois de uma onda eletromagnética ser transmitida por uma antena tem que percorrer o espaço aberto até chegar à antena recetora. O comportamento de uma onda eletromagnética no espaço aberto é também um ponto crucial para um sistema de transmissão *RF*.

3.4.1 Atenuação da onda devido ao espaço livre

A atenuação do sinal significa a perda da força do sinal medido em decibéis (dB). Todas as comunicações sem fios que utilizam ondas eletromagnéticas sofrem perdas na potência do sinal desde a sua transmissão. Existem várias razões para ocorrer atenuação. Quanto maior for a distância percorrida desde transmissor até ao recetor, maior será a perda de potência das ondas eletromagnéticas. O alcance de um dispositivo é um fator importante para determinar a sua melhor posição, devido ao tipo de atenuação que sofre.

As condições ambientes também influenciam a propagação das ondas eletromagnéticas. Por exemplo, a humidade do ar representa uma influência na atenuação de sinal, já que as partículas de água presentes no ar absorvem as ondas eletromagnéticas, enfraquecendo o sinal.

Outro fator que influencia na atenuação do sinal de rádio é a interferência de outras ondas rádio ou mesmo obstáculos físicos. A quantidade de obstáculos encontrados entre o dispositivo emissor e recetor e mesmo o material constituinte do obstáculo influencia na quantidade de atenuação que o sinal sofre. Na Tabela 4, estão listados alguns dos materiais mais comuns nestes casos e a sua respetiva atenuação.

Tabela 4: Atenuação do sinal provocada por alguns materiais

Material	Atenuação (dB)
Janela de vidro	2
Porta de madeira	3
Parede de gesso	3
Parede de tijolos	8
Bloco de cimento	5
Pedra mármore	5

Se entre a antena emissora e a antena receptora for traçada uma linha reta e não existir interceção com nenhum obstáculo, considera-se que a atenuação do sinal é mínima. Friis criou uma fórmula, que foi batizada com o seu nome, que define matematicamente o comportamento de um sinal rádio em condições ideais. A fórmula de Friis é uma equação de transmissão que calcula a potência recebida por uma antena, em condições ideais [Equação (7)]. Esta equação relaciona a potência recebida (P_r) e transmitida (P_t) com os ganhos da antena na transmissão (G_t) e na recepção (G_r), do comprimento de onda (λ) e da distância (R) percorrida pelo sinal em metros.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (7)$$

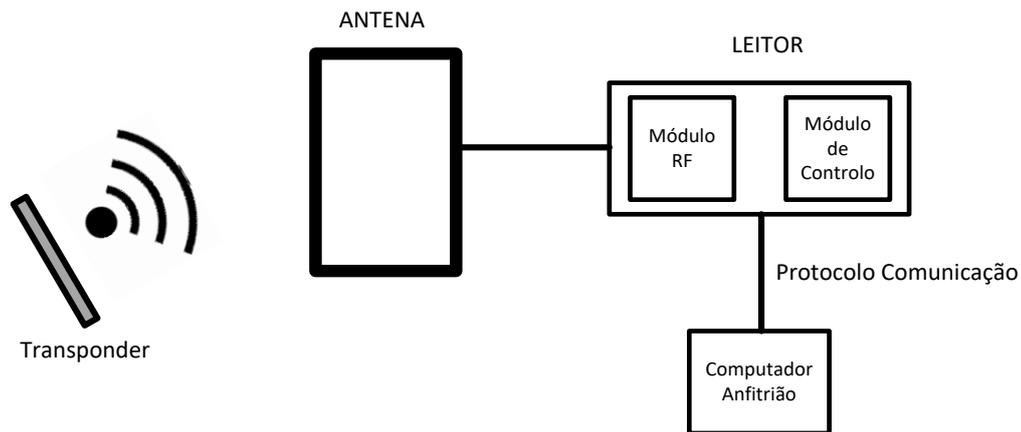
A importância de saber o valor da atenuação é permitir o cálculo da potência recebida. Assim conhecendo a potência transmitida, e não contabilizando os outros fatores de atenuação, permite estimar a potência que deve ser recebida pelo receptor.

3.5. RFID

A identificação por radiofrequência ou *RFID* (do inglês “*Radio-Frequency IDentification*”) é um método de identificação automática através de sinais de rádio. A *RFID* consiste num sistema que transmite um sinal de rádio para um *transponder* ou *tag*, e este, na presença desse sinal, responde com outro sinal de rádio.

Um sistema de *RFID* é constituído pelas etiquetas (*transponders*), por um sistema de leitura (leitor e antena) e um meio de transmitir os dados para um computador anfitrião ou para um sistema de gestão de informação.

Quando uma etiqueta entra na área de leitura, os dados são recolhidos pelo leitor e podem ser transmitidos através de interfaces standard para um computador anfitrião ou *PLC* para armazenamento dos mesmos ou qualquer outra operação. Um esquema geral pode ser visto na Figura 28.

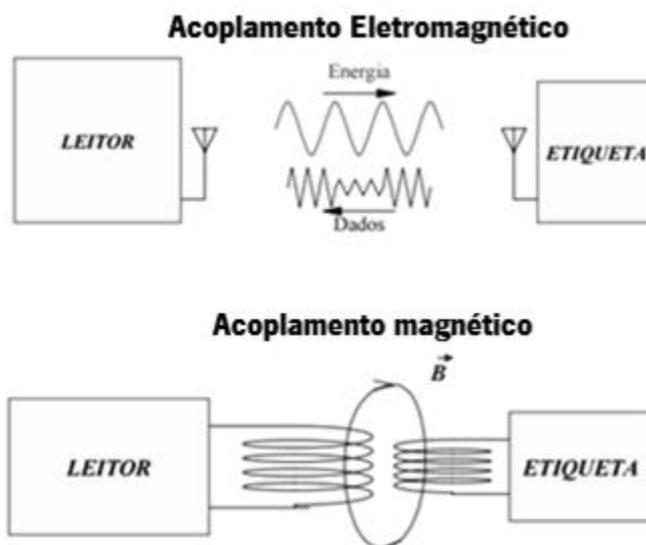
Figura 28: Esquema geral *RFID*

As etiquetas podem ser divididas em etiquetas ativas ou passivas [15].

A principal característica das etiquetas ativas é que estas são alimentadas por uma bateria interna. Estas normalmente permitem quer a leitura como a escrita de dados, permitindo assim que a informação possa ser alterada. Como as etiquetas são componentes fechados, a bateria presente no seu interior e que é necessária para o seu funcionamento, limita a vida útil das etiquetas. O custo destas em relação às etiquetas passivas também é mais elevado.

Por sua vez as etiquetas passivas, funcionam sem necessitar de fonte de alimentação própria. A tensão de alimentação necessária para o seu funcionamento é conseguida através do campo magnético induzido ou do campo eletromagnético irradiado pela antena do leitor. A tensão obtida na antena da etiqueta é retificada e utilizada para carregar um condensador, fornecendo desta forma uma tensão contínua ao circuito. Quando a tensão atinge o valor necessário para o funcionamento da etiqueta, esta inicia automaticamente o envio dos dados gravados na sua memória. Estas etiquetas apresentam uma dimensão mais reduzida e um custo inferior quando comparadas com as etiquetas ativas. Este tipo de etiquetas, em teoria, apresentam um ciclo de vida infinito uma vez que não dependem de componentes de carácter temporário.

Para alimentar as etiquetas passivas, utilizam-se normalmente dois tipos de acoplamento: acoplamento magnético e acoplamento eletromagnético [15]. Na Figura 29Tabela 15, pode observar-se o esquema geral dos dois acoplamentos.

Figura 29: Transferência de energia em *RFID* (adaptado de [15])

3.5.1 Acoplamento magnético

O princípio de funcionamento do acoplamento magnético, é equivalente ao de transformador com núcleo de ar. A energia é obtida através da retificação da tensão induzida na bobina da etiqueta e de seguida armazenada num condensador. Os dados são enviados da etiqueta para o leitor através da variação da carga imposta na sua antena (no secundário do transformador). Esta solução é mais vantajosa quando se utilizam frequências abaixo dos 100MHz. A grande desvantagem associada a esta técnica é o facto de que a distância entre as etiquetas e o leitor tem que ser reduzida. Frequentemente não se conseguem distâncias de leitura superiores a 15cm. O valor da distância máxima de leitura dependerá essencialmente da capacidade que a antena do leitor possui para projetar o mais longe possível as linhas do campo magnético. A distância entre a etiqueta e o leitor decresce com o inverso do cubo da distância [15] como mostra a Figura 30. No eixo dos yy é dada a intensidade do campo magnético (B) e no eixo dos xx é a distância da espira a um ponto P do espaço.

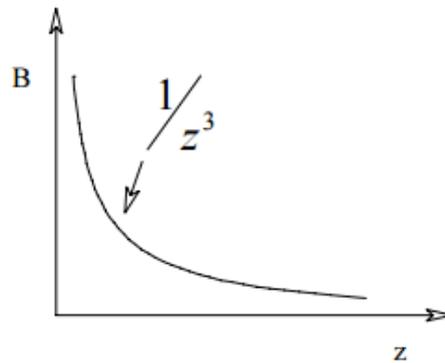


Figura 30: Intensidade do campo magnético (B) versus distância (adaptado de [15])

Na Figura 31 é apresentado, em maior detalhe, um esquema de um acoplamento magnético.

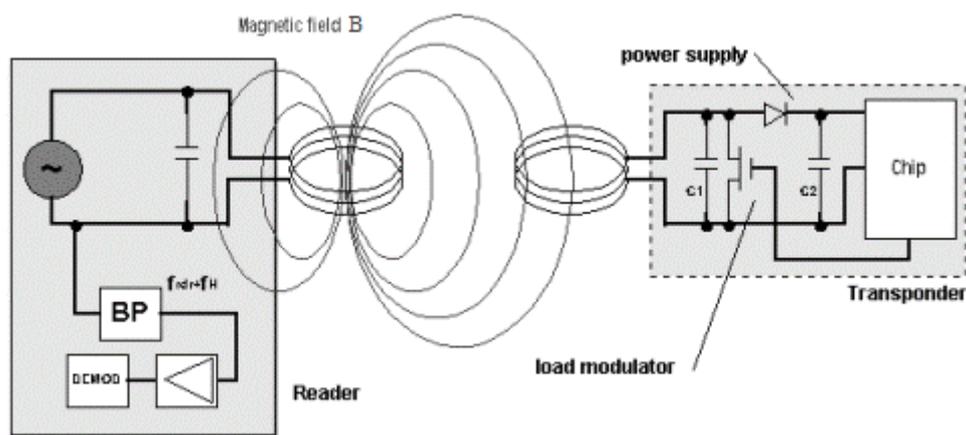


Figura 31: Acoplamento magnético (adaptado de [15])

3.5.2 Acoplamento eletromagnético

No acoplamento eletromagnético, a radiação do campo eletromagnético requer antenas que tenham tipicamente um tamanho que seja metade do comprimento de onda (dípolo de meia onda) [equação (8)] do sinal utilizado.

$$\lambda = \frac{C}{F} \quad (8)$$

em que:

λ , é o comprimento de onda (m);

C , é a velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8$) (m/s);

F , é a frequência da onda (Hz).

É por este facto que, em sistemas *RFID* para baixas frequências é impraticável utilizar acoplamento por campo eletromagnético irradiado. Por exemplo, numa aplicação que se utilize

um sinal com a frequência de 1MHz (comprimento de onda = 300 metros) o comprimento da antena teria que ser de 150 metros.

A densidade de energia radiada diminui com o inverso do quadrado da distância entre o leitor e a etiqueta [15]. As etiquetas passivas, que utilizam o sinal eletromagnético irradiado pelo leitor, como fonte de energia, têm uma distância de leitura limitada. Esta limitação está relacionada com a potência máxima permitida pela legislação em vigor. Note-se que para distâncias superiores é necessária a utilização de etiquetas ativas.

Na Figura 32 pode ser observado um esquema de *RFID* com acoplamento por campo eletromagnético.

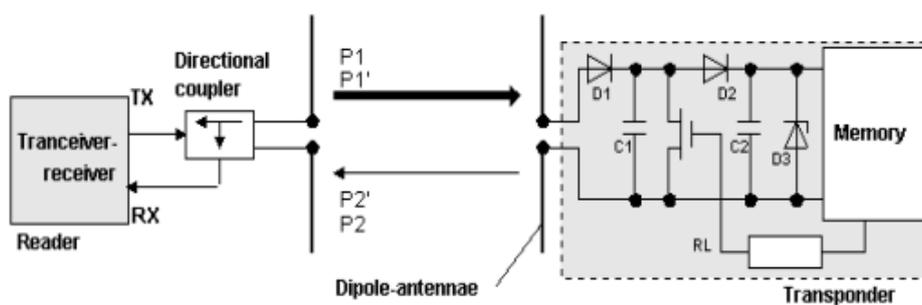


Figura 32: Acoplamento Eletromagnético (adaptado de [15])

Do estudo dos sistemas acima apresentados infere-se que o acoplamento que mais se enquadra no projeto desta dissertação é o acoplamento eletromagnético.

Capítulo 4 - Metodología

Na primeira fase de desenvolvimento deste projeto visitaram-se as instalações da empresa *Bioinvitro* para efetuar o levantamento das especificações do projeto. Desta forma, inferiram-se quais os elementos e métodos necessários para o cumprimento dos requisitos impostos.

Com a visita às instalações da empresa *Bioinvitro* concluiu-se que a ideia inicial de aproveitar as ondas eletromagnéticas oriundas de equipamentos como telemóveis ou televisões não iria ser possível, devido ao facto de as suas instalações serem totalmente metálicas. Esta limitação alterou a ideia inicial do projeto, pois obrigou o desenvolvimento não só de um sistema recetor, mas também de um transmissor capaz de gerar as ondas eletromagnéticas à frequência desejada.

Na Figura 33, apresenta-se o esquema geral do projeto.

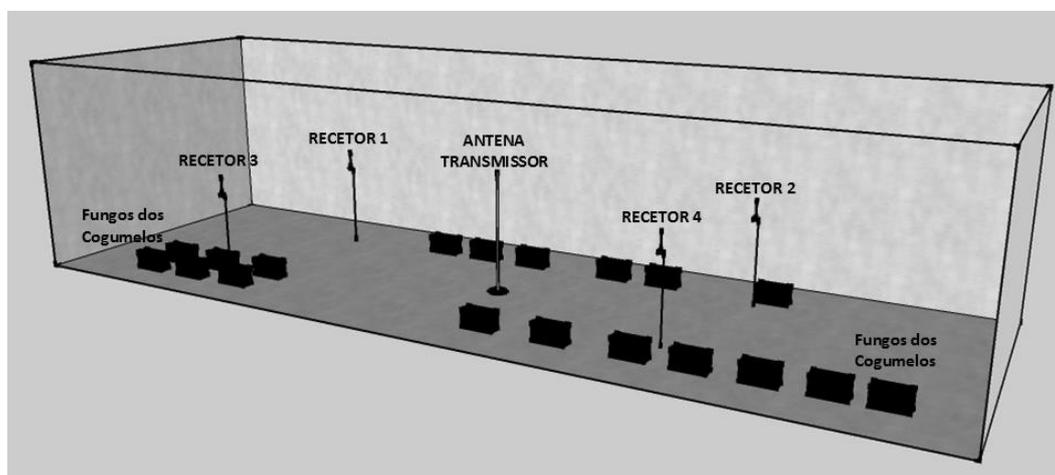


Figura 33: Esquema geral com transmissor e recetores

No esquema do projeto são apresentadas todas as partes integrantes do projeto, desde o sistema transmissor, aos recetores espalhados aleatoriamente pela estufa sem a necessidade de permanecerem numa posição fixa.

Depois da elaboração do esquema de todo o projeto, foram selecionados todos os elementos de hardware utilizados, desde a antena, aos transistores *RF*, entre outros.

Neste capítulo serão então abordados com detalhe o desenvolvimento do sistema transmissor e recetor e a calibração do sistema transmissão.

A carga que se pretende alimentar com este sistema de alimentação é também exposta neste capítulo. Neste são explicados os métodos utilizados para verificar se o sistema consegue garantir a alimentação do sistema de muito baixo consumo (dispositivo de telemetria). São também apresentadas as características das antenas utilizadas na emissão e receção.

4.1. Transmissor

Na fase inicial do desenvolvimento do projeto foi necessário selecionar a frequência de funcionamento do sistema. A escolha da frequência foi sugerida pelo orientador, uma vez este pretendia que explorasse as potencialidades de bandas livres como a banda do cidadão situada nos 27MHz para transmissão de energia sem fios.

Na transmissão de energia sem fios normalmente utilizam-se frequências da banda do *GSM* na ordem dos 900MHz, desta forma com a escolha dos 27MHz tenta-se provar que com frequências mais baixas também podem ser utilizadas neste tipo de aplicações.

A escolha da banda de frequência, teve implicações diretas na seleção do material, uma vez que em sistemas com frequência de funcionamento na ordem dos 900MHz o material é mais caro que em frequências mais baixas, como neste caso em concreto.

O principal objetivo deste projeto como já foi referido é a transferência de energia sem fios, como tal, no transmissor apenas é necessário formar a onda portadora, sendo dispensada qualquer tipo de modulação sobre a mesma, uma vez que, não se pretende transmitir informação.

A onda portadora é um sinal com forma de onda sinusoidal caracterizado por três variáveis, a amplitude, a frequência e a fase. A equação da onda portadora é dada pela equação (9) em que u é a amplitude instantânea da onda para o instante t , o U_{max} a amplitude máxima da onda, o ω a frequência angular da onda portadora e o φ a fase da onda portadora.

$$u(t) = U_{max} * \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

Na Figura 34 é apresentado o diagrama de blocos do sistema transmissor, sendo de seguida explicado detalhadamente a função de cada um dos blocos do sistema apresentado, de modo a explicar de que forma é formada a onda portadora e os seus estágios envolventes para que esta chegue à antena nas melhores condições para ser irradiada.

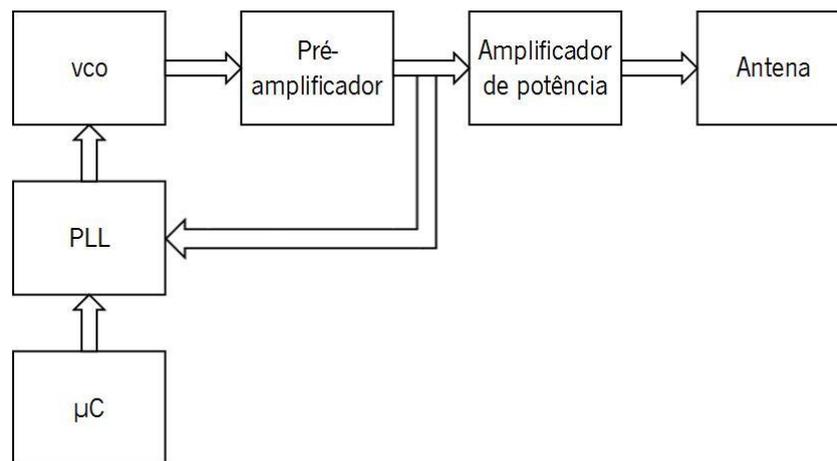


Figura 34: Diagrama de blocos do emissor

O bloco *Voltage-Controlled Oscillator (VCO)* é o gerador do sinal sinusoidal da onda portadora. Este permite a variação da frequência da onda sinusoidal em função do nível de tensão aplicado à entrada do bloco. Quem fornece essa tensão ao *VCO* é o bloco *PLL (Phase-locked loop)*, este mede o sinal à saída do pré-amplificador e compara com a frequência desejada definida pelo microcontrolador. À saída do bloco *VCO*, o sinal entra no pré-amplificador para o elevar a tensão da portadora a valores apropriados para a entrada do estágio final.

O último estágio do circuito é o amplificador de potência *RF* que tem como função amplificar o sinal para que este depois possa ser irradiado pela antena.

4.1.1 Circuito do VCO

Os circuitos osciladores são responsáveis por gerar as oscilações elétricas e no circuito do transmissor este é quem gera a onda sinusoidal (portadora) à frequência desejada.

Em geral, os osciladores estão divididos em três circuitos um circuito oscilante, um circuito amplificador e uma rede de realimentação. Estes utilizam uma parte da energia contida no circuito oscilante e amplificam-na para depois ser inserida novamente no circuito oscilante através de realimentação positiva, ou seja, com a mesma fase que é gerada no circuito oscilante.

O circuito oscilante está encarregue por gerar as oscilações, sendo este o circuito ressonante *LC* apresentado em 3.3.2.1 *Circuito oscilador fechado*. Nesse tópico, foram considerados componentes ideais como condensadores e bobinas, porque nessa situação a oscilação descrita persistiria sempre com a mesma intensidade ininterruptamente. Na prática, isto não acontece dessa forma, já que a bobina tem associada uma resistência associada devido ao fio do enrolamento, que em cada oscilação vai provocar dissipação de energia sob forma de

calor. A forma de compensar essa perda de energia é amplificar as oscilações, mediante um amplificador e depois através de um circuito de realimentação devolver parte da energia ao oscilador.

Na Figura 35, é apresentado o circuito do oscilador controlado por tensão implementado.

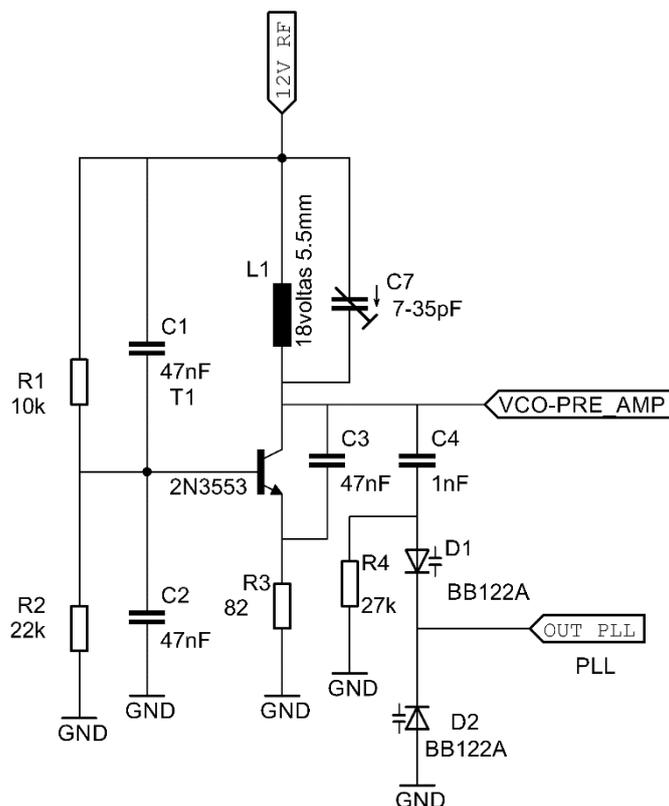


Figura 35: Esquema elétrico do VCO

O oscilador apresentado utiliza um transistor do tipo *NPN 2N3553* [16], sendo a sua função amplificar parte da energia proveniente do circuito *LC* de modo a compensar a energia perdida. As resistências *R1* e *R2* são responsáveis pela polarização do transistor. O que define a frequência de ressonância é o conjunto formado pela bobina *L1* com a capacidade do condensador variável *C7* e dos diodos *varicap* *D1* e *D2* (circuito ressonante *LC*). Os condensadores *C1* e *C2* têm a função de realimentar a base do transistor com o sinal proveniente do circuito de ressonância *LC*. O condensador *C4* por sua vez bloqueia a componente contínua de 12V proveniente da fonte do circuito formado pelos diodos *varicap*. A resistência *R4* tem como função garantir que no ânodo do *varicap* *D1* tenha o potencial da

massa (*GND*). Deste modo os dois díodos ficam submetidos à mesma diferença de potencial e consecutivamente com a mesma capacidade.

A fórmula da frequência de ressonância do circuito é a mesma que a do circuito ressonante *LC* e é dada pela equação (10).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10)$$

Um diodo *varicap* é um diodo que tem uma capacidade variável em função da tensão aplicada. São basicamente díodos construídos especificamente para funcionarem como condensadores variáveis cuja capacidade varia de acordo com a tensão aplicada. Na Figura 36 mostra a relação entre a capacidade de um diodo *varicap* e a tensão aos seus terminais. Quanto maior a tensão aplicada aos terminais menor é a capacidade e quanto menor a tensão aplicada maior a capacidade.

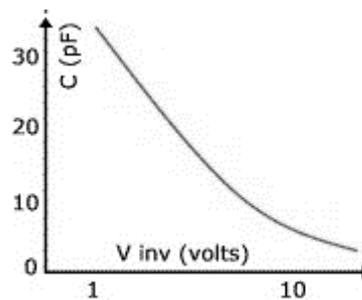


Figura 36: Curva característica de um diodo varicap

A capacidade dos díodos utilizados varia entre 15pF a 50pF. Como no circuito equivalente os díodos *varicap* estão em série e as suas capacidades são iguais, formando assim um condensador com a capacidade máxima de 25pF. A fórmula do cálculo da capacidade equivalente dos condensadores associados em série é apresentado na equação (11).

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (11)$$

4.1.2 Pré-amplificador

No circuito do pré-amplificador, o sinal de entrada é proveniente do *VCO*. A função do pré-amplificador é amplificar o sinal para níveis de tensão que sejam suficientes para excitar o

transistor de potência. Este bloco também impede que possíveis variações na carga afetem o bom funcionamento do circuito oscilador (*VCO*). O circuito do pré-amplificador é apresentado na Figura 37.

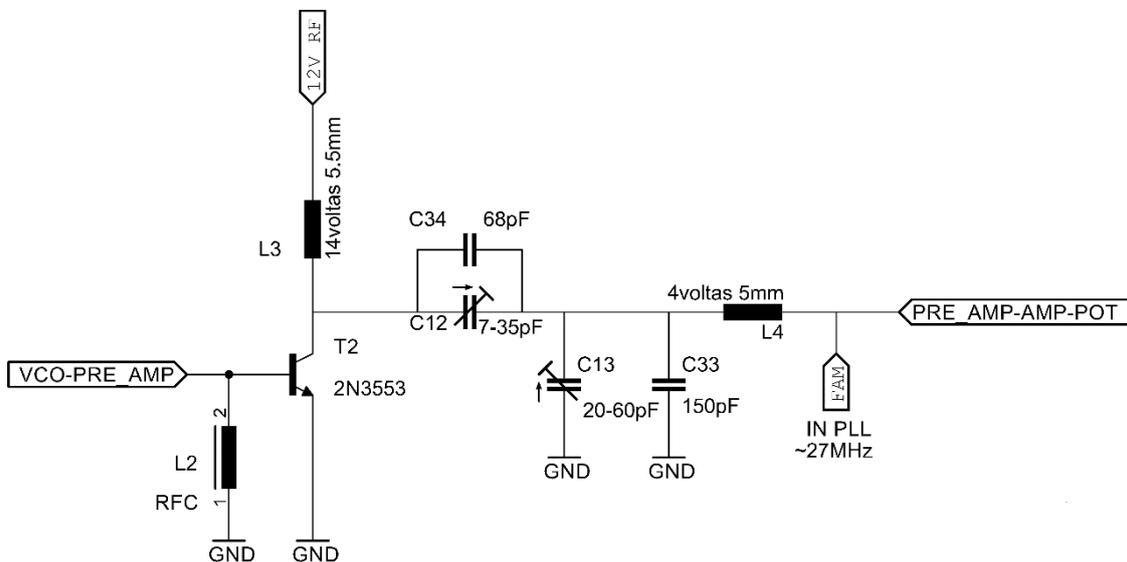


Figura 37: Esquema elétrico pré-amplificador

Neste circuito, a bobina *RFC* (Chock radio frequency) tem como função impedir que a componente alternada dos 27MHz passe para a fonte de corrente contínua.

O circuito é constituído pelas bobinas *L3* e *L4* e pelos condensadores *C12*, *C34*, *C13* e *C33* que formam um filtro passa-banda. Os condensadores *C34* e *C12* estão ligados em paralelo, pelo que no circuito equivalente estes aparecem apenas como se fosse apenas um condensador, a mesma situação ocorre para os condensadores *C13* e *C33*. O circuito equivalente é mostrado na Figura 38.

O condensador *C2* do circuito equivalente corresponde ao paralelo dos condensadores de *C34* com *C12*, a bobina *L2* corresponde à bobina *L3*, a bobina *L1* à bobina *L4* e o condensador *C1* ao paralelo de *C12* com *C33*.

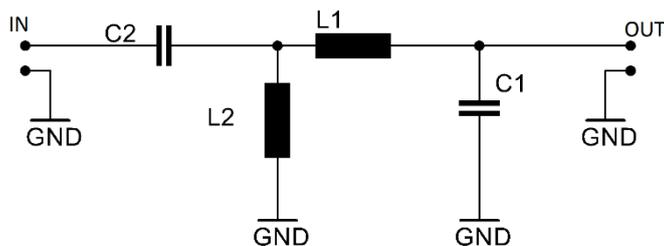


Figura 38: Equivalente passa-banda

A função de transferência do circuito equivalente [Figura 38] é dada pela equação (12) apresentada a seguir.

$$H(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{(j\omega L1 + j\omega L2) * \frac{1}{j\omega C1}}{j\omega L1 + j\omega L2 + \frac{1}{j\omega C1}} \quad (12)$$

$$\frac{1}{j\omega C2} + \frac{j\omega L2 * (j\omega L1 + \frac{1}{j\omega C1})}{j\omega L2 + j\omega L1 + \frac{1}{j\omega C1}}$$

A função transferência foi inserida no *software Matlab*, de modo a obter o diagrama de *Bode*. Os valores dos componentes foram inseridos e foi efetuada a análise e o estudo da resposta em frequência do filtro. O resultado obtido no software é apresentado na Figura 39. Note-se que na parte superior da Figura 39 tem a amplitude em decibéis (dB) do diagrama de *Bode* e na parte inferior é a respetiva fase apresentada em graus.

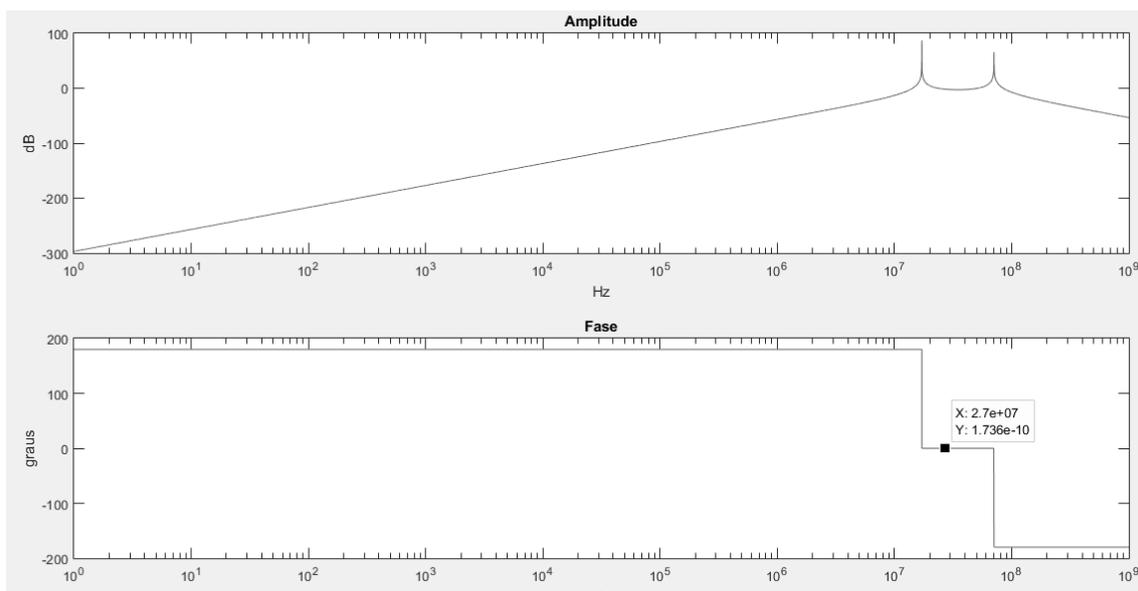


Figura 39: Simulação filtro passa banda do pré-amplificador

O circuito implementado é um filtro passa-banda de segunda ordem, ou seja, fora da banda passante a atenuação é de 40dB por década, estando neste caso a banda passante situada aproximadamente entre os 17MHz e os 70MHz.

É de extrema importância referir que os condensadores variáveis não alteram apenas a frequência de sintonia do filtro. Ao variar a sua capacidade também se está a ajustar a impedância, logo, ajustando esses condensadores está-se a realizar o casamento de impedância entre os estágios do circuito.

4.1.3 Amplificador de potência RF

O circuito do amplificador de potência é semelhante ao apresentado no pré-amplificador. O transistor utilizado foi o *2SC1971* [17] sendo este transistor de radiofrequência com potência nominal de 6 Watt.

As semelhanças com o circuito anterior são evidentes, porque tal como no anterior, neste também existem dois condensadores de capacidade variável que permitem o ajuste da frequência de sintonia do filtro passa-banda e o casamento de impedância.

O circuito equivalente do filtro passa-banda apresentado no pré-amplificador [Figura 38] e a respetiva função transferência apresentada na equação (12) são também aplicáveis no circuito equivalente do amplificador de potência, uma vez que estes são similares.

O circuito do amplificador de potência é apresentado na Figura 40.

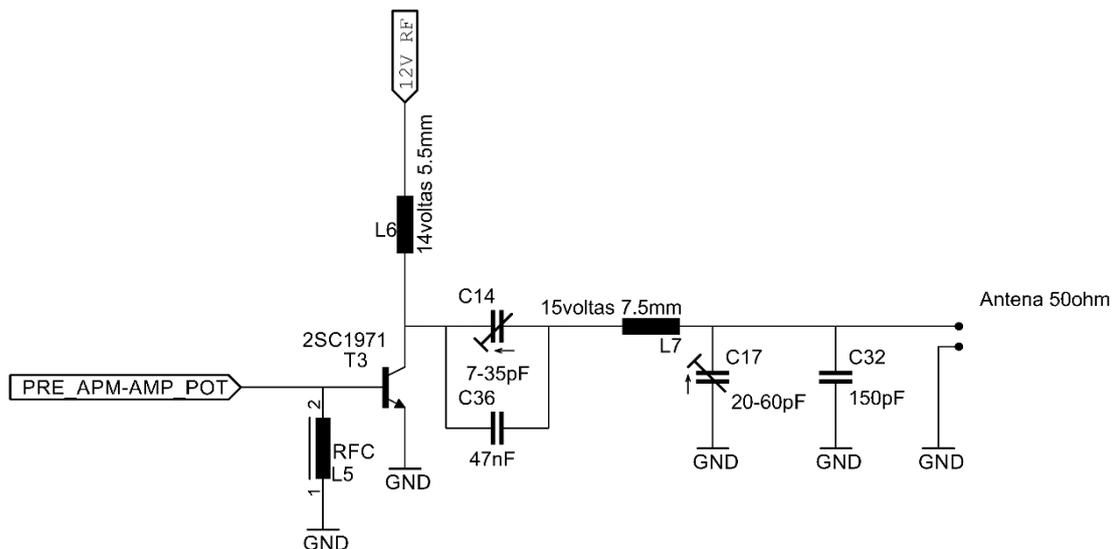


Figura 40: Esquema elétrico amplificador de potência RF

Na Figura 41 é apresentado o diagrama de *Bode* com o resultado da resposta em frequência do filtro passa-banda para o amplificador de potência realizado nas mesmas condições que o circuito pré-amplificador.

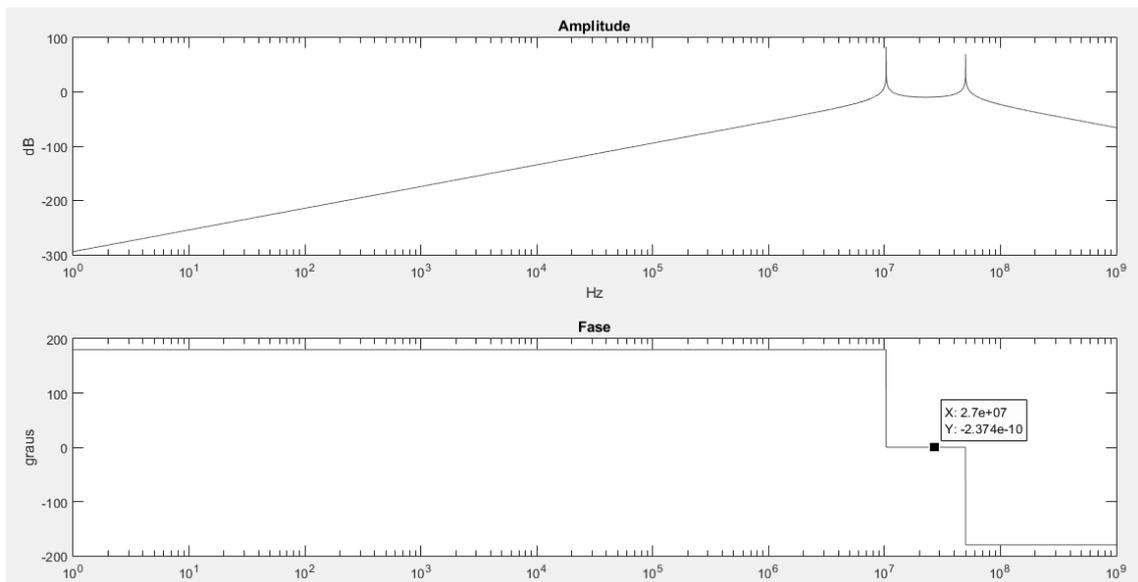


Figura 41: Simulação filtro passa banda amplificador de potência

Desta figura infere-se que a banda passante do filtro está localizada entre os 10MHz e os 50MHz.

4.1.4 Phase-locked loop

A *PLL (Phase-locked loop)* compara a frequência do sinal à saída do pré-amplificador com a frequência desejada e envia uma tensão ao *varicap* do *VCO* para ajustar a frequência do oscilador.

Neste projeto a *PLL* utilizada foi o circuito integrado (*IC*) *SAA1057* [18]. Este é normalmente utilizado em sintonizadores de rádio e possui duas bandas de frequência de funcionamento, uma denominada de *FM* que se encontra no espectro do *VHF* e outra de *AM* que abrange as ondas médias e as ondas longas. Assim no modo *FM* a banda de funcionamento começa nos 70MHz e vai até 120MHz, por sua vez no modo *AM* a gama está compreendida entre os 512kHz e os 30MHz. Neste projeto utilizou-se o modo *AM*.

Na Figura 42 é apresentado o circuito da PLL.

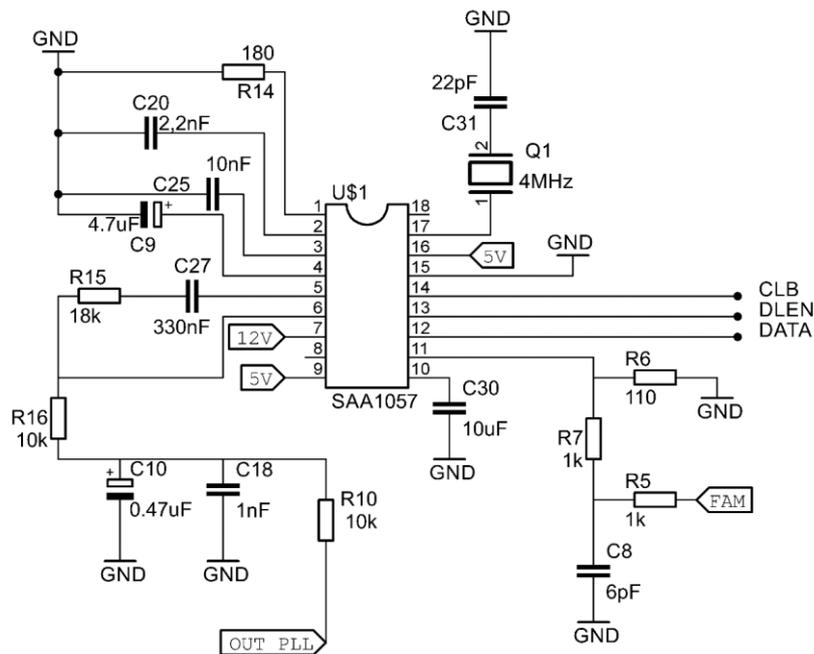


Figura 42: Esquema elétrico PLL

Neste circuito a etiqueta *FAM* liga à saída do pré-amplificador e segue pelo filtro passa-baixo constituído pela resistência *R5* e pelo condensador *C8*. As resistências *R6* e *R7* implementam um divisor de tensão resistivo para adaptar a tensão à entrada da *PLL*. A etiqueta *OUT_PLL* é a saída da *PLL*, ou seja, esta fornece a tensão aos *varicap*.

As entradas representadas pelas etiquetas *CLB*, *DLEN* e *DATA* ligam ao microcontrolador (*MCU*). O *MCU* utilizado foi um *PIC16f628a*, que tem como função o envio de dados relativos à frequência desejada para a *PLL*, sendo necessário para isso enviar duas palavras de dados de 15 *bits*. A palavra *A* corresponde à frequência de sintonia e o seu valor tem de estar compreendido entre 512 e 32767. No modo *AM* o valor a enviar corresponde exatamente à frequência de sintonia dividido por 1000. A palavra *B* é relativa às informações de controlo.

Na Figura 43 mostra os dados relativos às palavras *A* e *B* que tem de ser enviados do microcontrolador para programar a *PLL*.

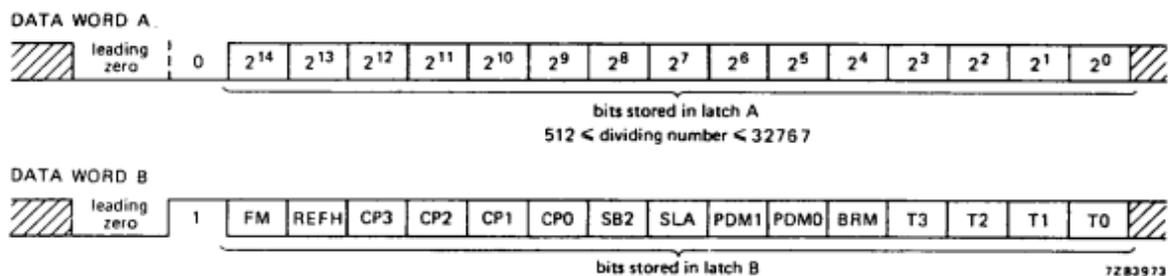


Figura 43: Organização dos bits das palavras de dados A e B.

Na Figura 44 apresenta-se a forma de como os dados devem ser enviados. Quando o *DLEN* passa do estado lógico 0 para 1, a *PLL* espera que o *CLB* tenha uma transição de 0 para 1 também e nesse momento é realizado um teste ao *DATA* pois este deve estar a nível lógico 0. Caso todas as condições se verificarem inicia-se o envio dos dados, sendo transmitido um *bit* em cada período do *CLB*.

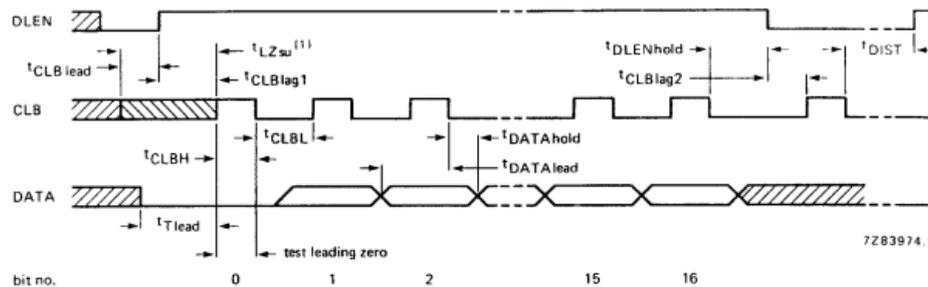


Figura 44: Formato de envio

4.1.5 Circuito final do transmissor

O circuito final do transmissor resulta da junção de todas as partes anteriormente descritas. Em determinados casos foi necessário ter especial atenção certas partes do circuito, nomeadamente a proximidade entre pistas para que não fossem criadas capacidades parasitas que colocassem em causa o bom funcionamento do circuito. Outro dos aspetos a ter em conta foi o comprimento das pistas, porque se estas fossem demasiado longas (próximas do comprimento de onda) originam o efeito bobina, pondo fim ao correto funcionamento do circuito.

Na Figura 45 é apresentado o resultado final do transmissor desenvolvido.

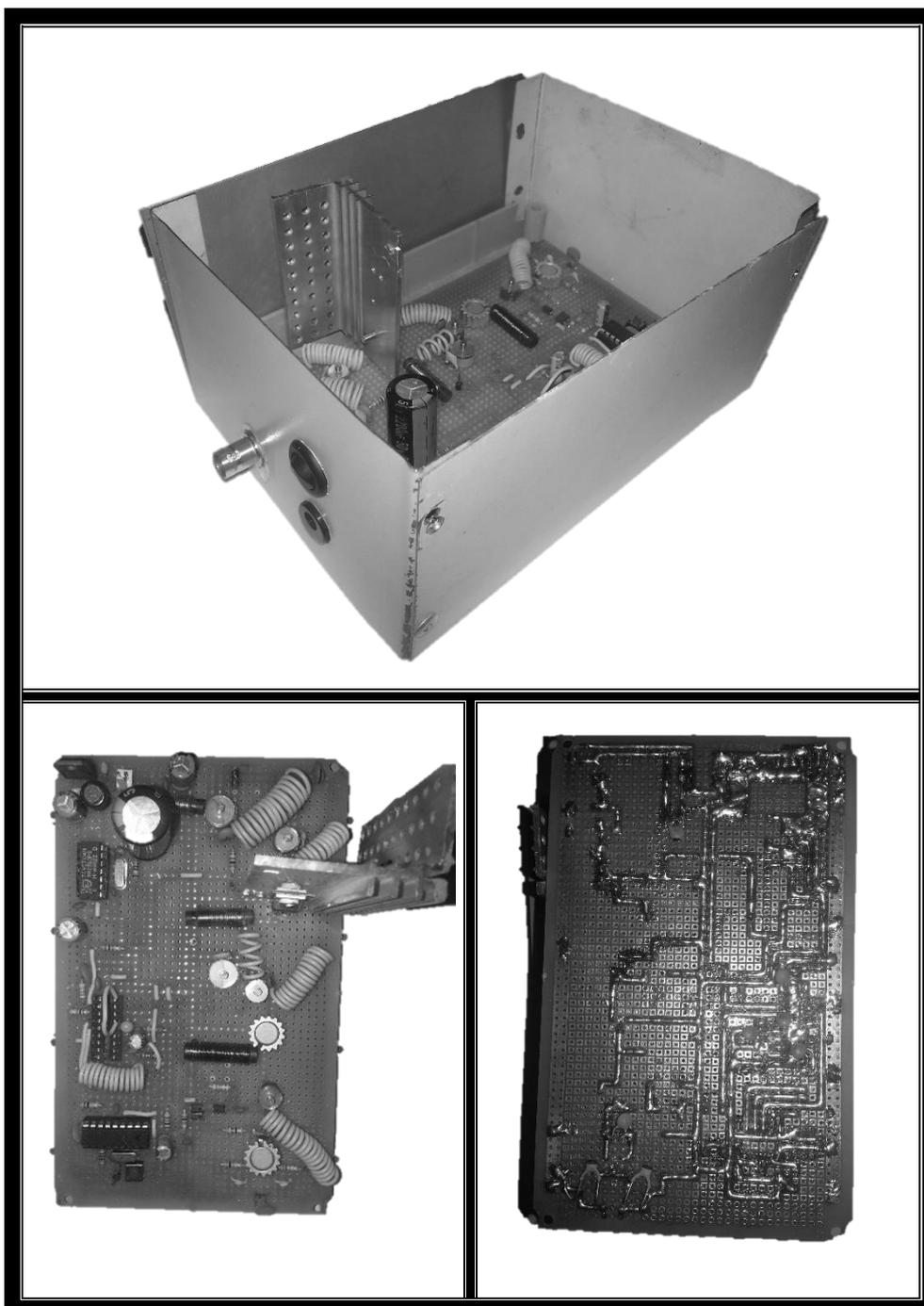


Figura 45: Transmissor construído

O conector *BNC* utilizado na saída do transmissor tem uma impedância característica de 50Ω e a linha de transmissão que vai deste o transmissor à antena é um cabo coaxial (*RG58*) também com impedância característica de 50Ω . Note-se que para o correto funcionamento do sistema as impedâncias características da saída do transmissor, dos conectores *BNC*, da linha de transmissão e da antena têm de ter o valor de 50Ω .

4.2. Recetor

No presente subcapítulo é feita uma análise ao circuito do recetor. Como já foi referido anteriormente, no recetor era fundamental realizar testes a algumas topologias para verificar em quais se obtinham melhores resultados.

Para este projeto foram utilizadas duas topologias de recetores, tendo estas em comum a antena, o filtro LC paralelo e a carga a aplicar. Note-se que o filtro LC paralelo tem como objetivo rejeitar as frequências diferentes dos 27MHz.

A diferença entre as duas topologias escolhidas está essencialmente na forma como é feita a retificação do sinal de corrente alternada para corrente contínua. A primeira versão utiliza um retificador de onda completa e a segunda versão um multiplicador de tensão com diversos estágios. Na Figura 46 é apresentado um diagrama de blocos genérico que serve para as duas topologias.

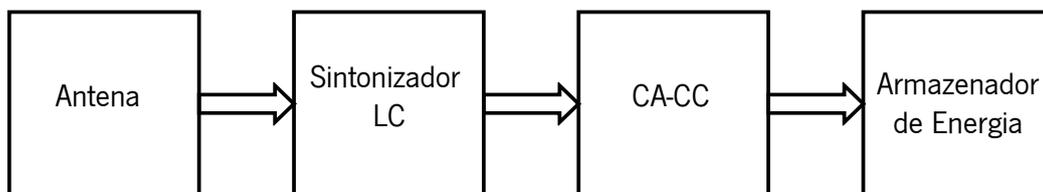


Figura 46: Diagrama de blocos genérico do recetor

4.2.1 Consumos da carga a alimentar

Antes de explicar o funcionamento de cada topologia, importa descrever que tipo de carga é que estes recetores vão alimentar.

A carga a alimentar foi um protótipo desenvolvido especificamente para poder ser alimentado via ondas de rádio, pois tinha como principal objetivo consumir o menos possível, pois a potência que se consegue extrair das ondas de rádio é baixa.

O protótipo que se pretende alimentar é constituído por sensores de temperatura, humidade, luminosidade e dióxido de carbono, pois tem como função recolher dados relativos ao setor da agricultura. Os dados que são lidos por esses sensores, terão de ser enviados via comunicação por ondas de rádio para outro sistema. O período de leitura e envio desses dados é de hora a hora, ou seja, a cada hora são medidos esses três parâmetros e são enviados para outro sistema [19].

Então a carga que os recetores de energia desenvolvidos neste projeto terão de alimentar é composta por um microcontrolador (*STM32L053R8T6*), um módulo com sensor de

temperatura e humidade (*SHT21*), um módulo com um sensor de luminosidade (*MAX44009*) e um módulo *nRF905* para fazer o envio dos dados.

Para se conseguir maior autonomia nesse protótipo, nos momentos em que este não realiza qualquer tarefa é colocado a dormir (*Stop mode*) e só acorda quando é necessário fazer a leitura dos sensores e envio desses dados (*Active mode*). Como já foi dito, as leituras são realizadas uma vez a cada hora, ou seja, o sistema vai estar maioritariamente do tempo a dormir (em *stop mode*). Na Tabela 5 são apresentados os consumos nominais, no modo ativo, de cada módulo do protótipo.

Tabela 5: Consumo nominal da carga em modo ativo [19]

Componentes	Estado	Energia
SHT21	Ativo	300 μ A; 3,3V DC
MAX44009	Ativo	0,65 μ A; 3,3V DC
nRF905	Ativo	30mA; 3,3V DC
STM32L053R8T6	Ativo	\approx 137,5 μ A; 3,3V DC

O consumo nominal total de corrente do protótipo no modo ativo é de 30,438mA. Então a potência que este consome é de aproximadamente 100mW.

Na Tabela 6, são apresentados os consumos nominais em “*stop mode*”.

Tabela 6: Consumo nominal da carga em "stop mode" [19]

Componentes	Estado	Energia
SHT21	“Stop mode”	0; 3,3V DC
MAX44009	“Stop mode”	0; 3,3V DC
nRF905	“Stop mode”	2,5 μ A; 3,3V DC
STM32L053R8T6	“Stop mode”	1,27 μ A; 3,3V DC

O consumo nominal de corrente apresentado pelo protótipo em “*Stop mode*” é de 3,77 μ A. O que indica que em “*Stop mode*” a potência deste é de 12,44 μ W. [19]

Foram realizados os testes para quantificar o tempo que este protótipo estava em modo ativo. Esses testes mostraram que o protótipo precisava de trabalhar no modo ativo durante 27ms, para efetuar as configurações dos módulos, ler os sensores e enviar os pacotes de dados. Como este só necessita de fazer uma leitura a cada hora, o protótipo vai encontrar-se em “*Stop mode*” durante 3599,973s (3600s-0,027s), sendo o consumo médio da carga é dado pelas equações (13.1) e (13.1).

$$P_{med} = \frac{time(active\ mode) * P(active\ mode) + time(stop\ mode) * P(stop\ mode)}{tempo\ total} \quad (13.1)$$

$$P_{med} = \frac{0,027 * 100mW + 3599,973 * 12,44\mu W}{3600} = 13,19\mu W \quad (13.2)$$

Com o valor da potência média calculada (13,19 μ W), vai ser possível descobrir até que distância é possível colocar o recetor do transmissor de ondas de rádio. Se a potência medida a uma determinada distância for igual ou superior à potência média calculada, é possível alimentar a carga da forma deseje, caso essa potência medida seja inferior não é possível fazer leituras a cada hora.

4.2.2 Calculo da capacidade do condensador do barramento CC

Sabendo o consumo da carga, é agora possível calcular a capacidade do condensador a colocar no barramento CC. Não existe nenhuma regra que dite qual a capacidade do condensador a colocar, isso depende sempre do tipo de aplicação. Para os protótipos a seguir apresentados, considerou-se que a tensão do condensador não deve ser inferior a aproximadamente 63% (corresponde a um τ (constante de tempo)) da sua tensão máxima de carregamento em determinado local, quando está em modo ativo.

A carga resistiva equivalente do protótipo a alimentar em modo ativo é dada pelas equações (14.1) e (14.1).

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (14.1)$$

$$R = \frac{3.3^2}{100m} = 108,9 \Omega \quad (14.2)$$

A constante de tempo é a mesma que para um circuito RC, e é dada pela seguinte equação (15.1).

$$\tau = RC \quad (15.1)$$

Então como a carga trabalha no modo ativo 27ms, a capacidade do condensador é dada pela equação (165.2).

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{0,027}{108,9} = 248\mu F \quad (165.2)$$

4.2.3 Recetor com retificador de onda completa

O diagrama de blocos do recetor com retificador de onda completa é apresentado na Figura 47. A antena recolhe o sinal das ondas eletromagnéticas e converte-o em corrente elétrica *CA*. Depois esse sinal passa por um filtro *LC* paralelo sintonizado nos 27MHz e de seguida é convertido em corrente contínua (embora mantenha as oscilações) através da ponte retificadora para carregar o condensador do barramento *CC*.

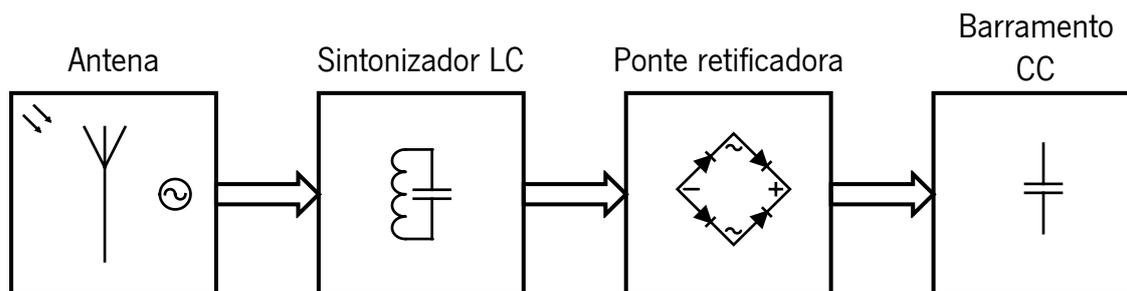


Figura 47: Diagrama de blocos do recetor com ponte retificadora

O sintonizador *LC* é um filtro passa-banda constituído por uma bobina e por um condensador variável. O condensador consegue variar a sua capacidade entre os valores de 10pF e 50pF. Pela fórmula da frequência de ressonância do filtro [Equação (176.1)], pode retirar-se o valor pretendido para a indutância da bobina [Equação (196.5)].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (176.1)$$

$$\sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi * f_0} \quad (186.2)$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi * f_0}\right)^2}{C} \quad (16.3)$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi * 27 * 10^6}\right)^2}{30 * 10^{-12}} \quad (16.4)$$

$$L = 1,158 \mu H \quad (196.5)$$

A ponte retificadora é constituída por quatro díodos de germânio com a referência *1N34*. Escolheram-se este tipo de díodos devido à sua queda de tensão em condução ser menor do que a dos díodos convencionais de silício. Em teoria, enquanto que nos díodos de silício estes só conduzem com tensões iguais ou superiores a 0,7V, os díodos de germânio não necessitam de uma tensão tão elevada, pois conseguem conduzir com tensões de aproximadamente 0,3V. Porém este tipo de díodos têm um preço mais elevado.

Na Figura 48 é mostrado o esquema elétrico do recetor com ponte retificadora.

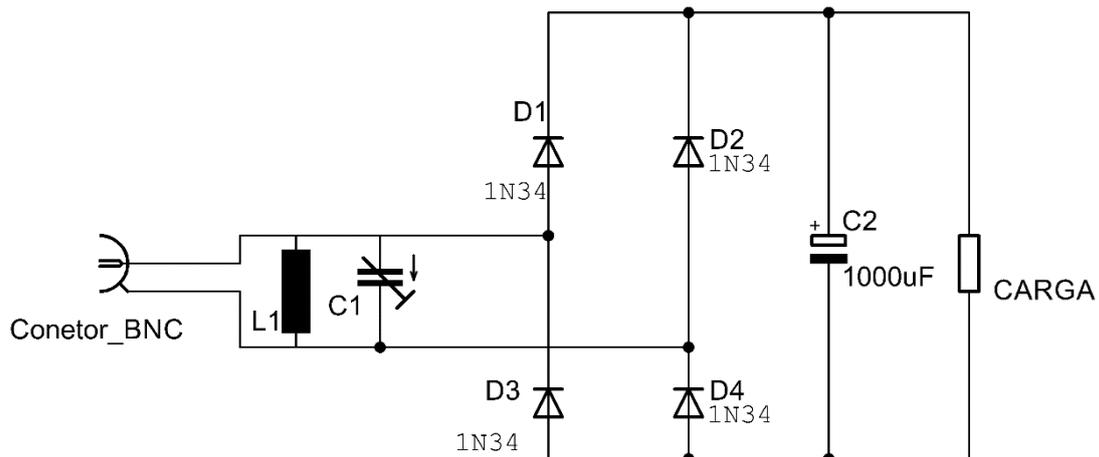


Figura 48: Esquema elétrico do recetor com ponte retificadora

O resultado final do recetor com ponte retificadora é apresentado na Figura 49. O conector *BNC* tem a mesma impedância característica da antena recetora (50Ω), permitindo assim a transferência máxima de energia desta para o circuito do recetor.

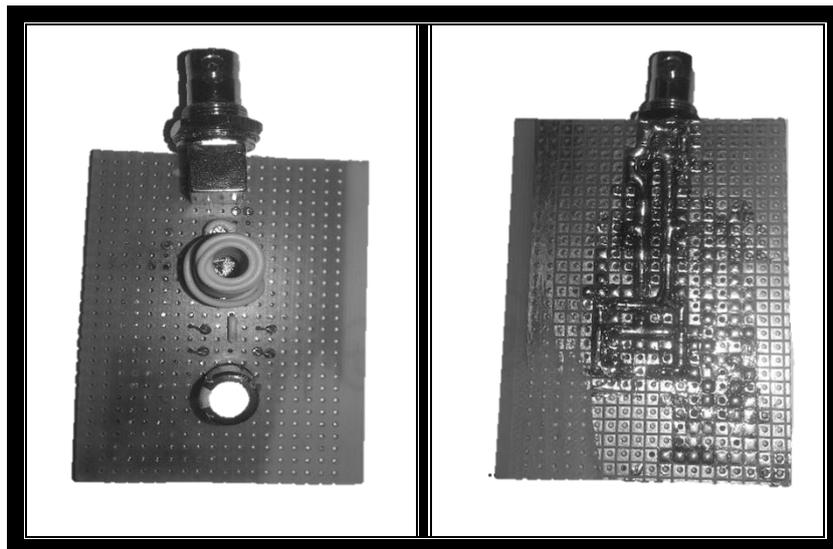


Figura 49: Recetor com ponte retificadora construído

4.2.4 Recetor com multiplicador de tensão

Como já foi referido anteriormente, a única diferença entre este recetor e o recetor apresentado em cima (com ponte retificadora), é a forma como se efetua a conversão de corrente alternada para corrente contínua.

O cálculo efetuado anteriormente para o filtro LC é exatamente igual para esta solução. Na Figura 50, é apresentado o diagrama de blocos do recetor com multiplicador de tensão. Comparando a Figura 50 com o diagrama de blocos da Figura 47 pode-se observar as equivalências e a diferença entre as duas soluções.

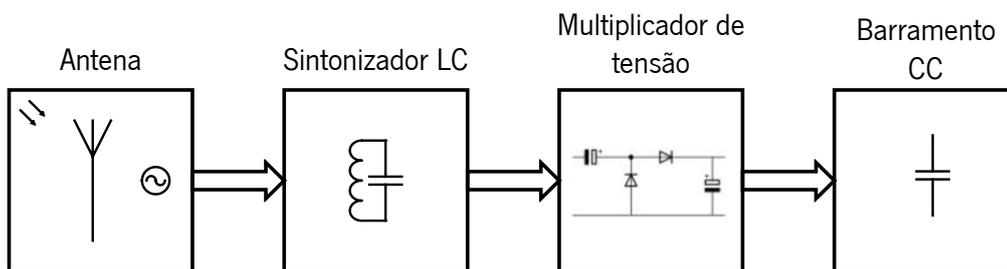


Figura 50: Diagrama de blocos recetor com multiplicador de tensão

O multiplicador utilizado neste trabalho utiliza dois estágios, ou seja, pretende-se que a tensão seja multiplicada 4 vezes. No circuito apresentado na Figura 50, o bloco Multiplicador de tensão apenas tem representado um estágio, mas no circuito com dois estágios são utilizados quatro díodos e quatro condensadores eletrolíticos tal como mostra o circuito implementado [Figura 51]. Os díodos utilizados no circuito com multiplicador de tensão são iguais aos utilizados no circuito com ponte retificadora. Note-se que a carga neste caso é ligada entre o terminal positivo do condensador $C5$ e o terminal negativo do condensador $C6$.

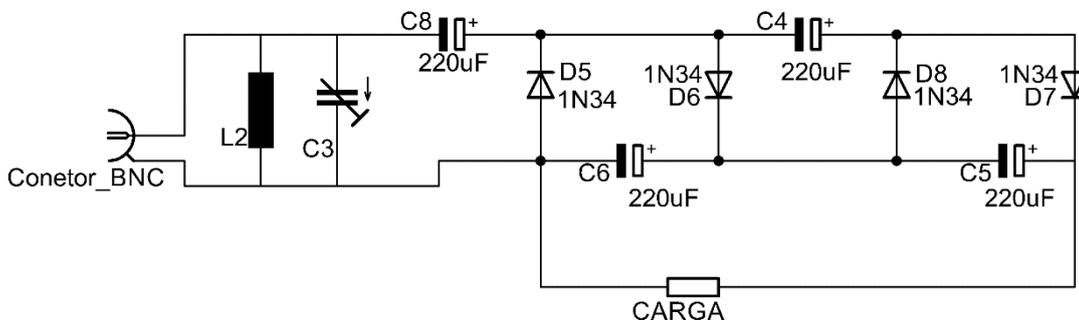


Figura 51: Esquema elétrico do recetor com multiplicador de tensão

O resultado final do recetor com multiplicador de tensão é apresentado na Figura 52.

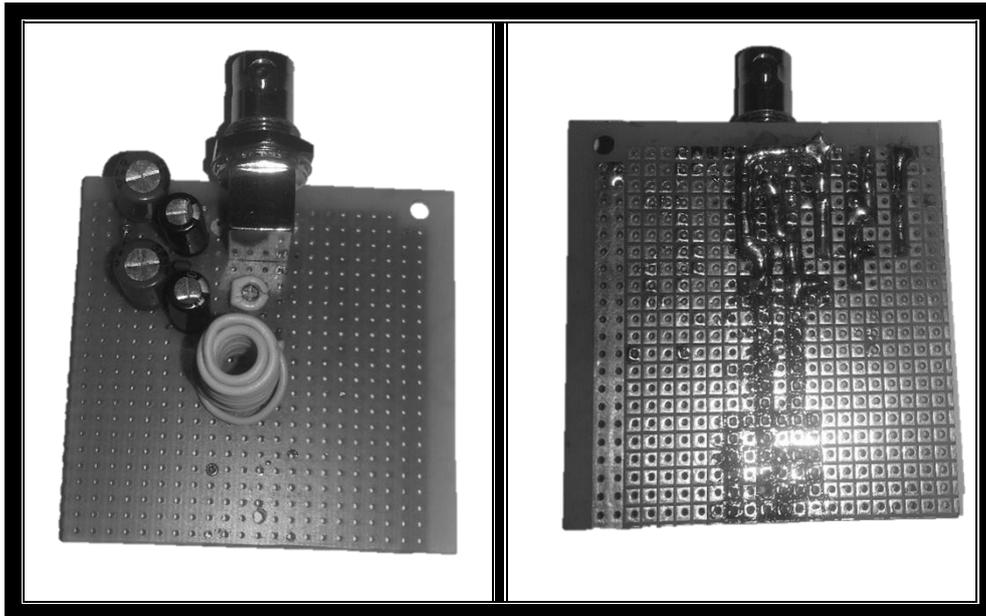


Figura 52: Recetor com multiplicador de tensão construído

4.3. Circuito terminal de 50Ω

Depois da montagem do circuito do transmissor foi necessário construir um circuito em placa de circuito impresso perfurada que simulasse a antena emissora, pois não era prático fazer os testes e ajustes sobre o transmissor com a antena conectada. Como também já foi abordado no capítulo 3, a impedância característica da antena altera conforme o meio que a rodeia. Devido a todos os objetos contidos no laboratório de automação e robótica, local onde estes testes foram realizados a impedância característica da antena emissora era alterada, não sendo garantido que o transmissor visse a carga (antena) com impedância exata de 50Ω .

Para garantir essa impedância, foi construído um circuito com três resistências de carvão de 2W de potência, com o valor de 150Ω ligadas em paralelo. A forma como estas estão conectadas formam uma resistência equivalente de 50Ω e suportam uma potência de 6W.

Na Figura 53 apresentasse a placa do circuito terminal de 50Ω .

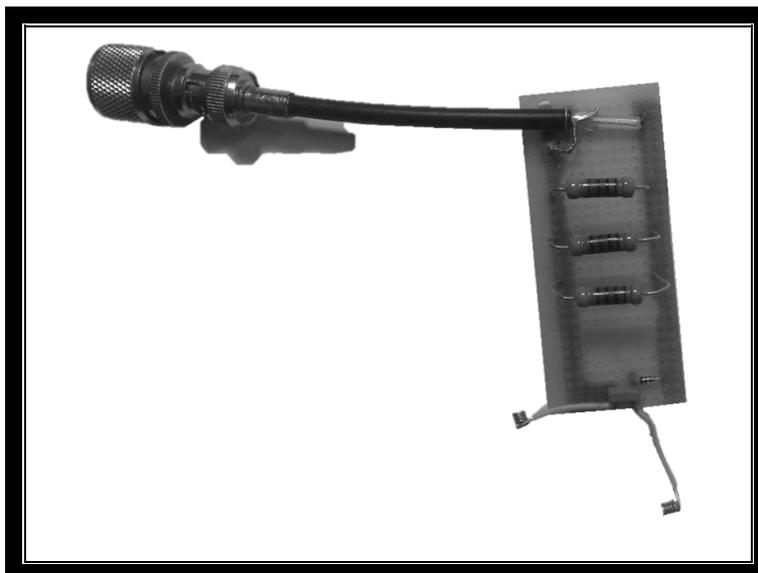


Figura 53: Circuito terminal de 50Ω

4.4. Calibrar o transmissor

Antes de descrever o procedimento de calibração do transmissor, importa realçar alguns pontos importantes. O transmissor deve ser alimentado por uma fonte de alimentação de corrente contínua de 12V, sendo esta preferencialmente uma bateria, pois é uma fonte *CC* pura. O sistema também pode também ser alimentado por um conversor a partir da rede elétrica, sendo que quanto mais filtrado for esse conversor, melhor será o funcionamento do transmissor.

Outro ponto de enorme importância é o facto de que o transmissor nunca deve ser ligado sem ter a antena devidamente conectada (ou outro circuito terminal de igual impedância), pois como foi analisado em 3.2.2 Potência incidente e refletida e ondas estacionárias, isso causa o sobreaquecimento do transistor de potência, colocando o seu bom funcionamento em risco.

Para se poder efetuar o ajuste do transmissor é importante ter alguns aparelhos de medida, nomeadamente, um frequencímetro, um osciloscópio, um multímetro e um medidor de ondas estacionárias.

O medidor de ondas estacionárias deve ser ligado conforme indicado na Figura 54, este é conectado diretamente à saída do transmissor pelo terminal *RTX* e o terminal *ANT* liga à linha de transmissão que segue para a antena ou circuito terminal.

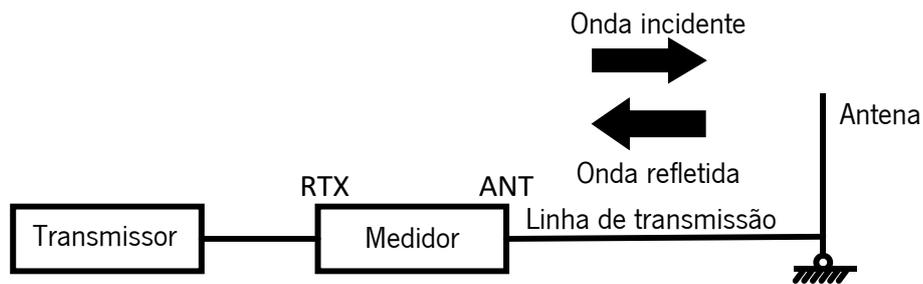


Figura 54: Ligação do medidor de ondas estacionárias

No circuito terminal, devem estar conectados os outros aparelhos de medida.

Depois de todo o *hardware* montado é agora possível realizar os ajustes sobre o transmissor. O primeiro passo para a calibração do transmissor é retirar o circuito integrado *SAAI057 (PLL)* e conectar no suporte deste a saída da *PLL* à tensão fixa de 5V (conectar o pino 6 ao pino 10). Esta situação apenas é necessária uma vez que, porque a *PLL* está constantemente a alterar a tensão para tentar ajustar o *VCO* para os 27MHz e se a tensão estiver sempre a variar no *varicap* não se vai conseguir calibrar o sistema de forma correta.

O motivo de se conectar aos 5V deve-se ao facto de esta tensão ser intermédia entre a tensão mínima (0V) e a tensão máxima (12V). Se se colocasse num destes extremos depois quando ao colocar de novo a *PLL* no seu sitio, esta não conseguiria ajustar a frequência para um dos lados (acima ou abaixo dos 27MHz), pois a tensão ia saturar.

Os ajustes a realizar no transmissor são nomeadamente sobre a frequência de transmissão e ajustes de impedância entre os diversos estágios. Os ajustes de impedância são muito importantes pois, com o casamento perfeito de impedância entre todos os estágios, o rendimento do transmissor é superior e não provoca aquecimento excessivo sobre os estágios amplificadores (transistores).

No circuito do transmissor existem cinco condensadores variáveis. O do estágio do *VCO* é o que mexe na frequência. Os outros quatro condensadores variáveis servem sobretudo para casar impedâncias, mas também para fazer a sintonização dos filtros passa-banda apresentados no pré-amplificador e amplificador de potência.

O transmissor encontra-se devidamente calibrado quando a frequência no circuito terminal está nos 27MHz (confirmada pelo frequencímetro). Por sua vez, quando o medidor de ondas estacionárias apresenta um valor igual ou próximo de 1 e quando no osciloscópio se observar uma onda sinusoidal perfeita (sem harmónicos) e com a maior amplitude possível.

Depois dessa etapa estar concluída, pode então ligar-se a antena para que esta possa irradiar toda a potência. Ao trocar a placa do circuito terminal pela antena, não se deve esquecer

de certificar que o transmissor está desligado. Como já foi referido, mas nunca é demais realçar o transmissor nunca pode estar ligado sem ver na sua saída uma impedância próxima de 50Ω . Note-se que se deixar o circuito em aberto o transistor do estágio de potência pode queimar prontamente.

Depois da antena conectada, liga-se o transmissor e vê-se através do medidor de ondas estacionárias se tudo está em conformidade com o que foi referido anteriormente. Na prática, pela Tabela 3 (apresentada em *3.2.2 Potência incidente e refletida e ondas estacionárias*), considera-se que um resultado no medidor *ROE* inferior a uma relação de 2:1 é satisfatório. Então deve-se procurar a melhor localização para instalar a antena, uma vez que o ambiente que a rodeia influencia a impedância característica da mesma. Não encontrando nenhum ponto onde essa condição seja satisfeita, deve-se ajustar a impedância no estágio de saída do transmissor para concretizar essa condição.

4.5. Antenas

A antena é uma das peças mais importantes de todo o projeto. Esta tem de possuir as características adequadas para a aplicação que se pretende desenvolver. Para este caso concreto optou-se por adquirir uma antena transmissora que correspondesse ao que era pretendido neste trabalho, nomeadamente a frequência central de funcionamento e a sua impedância característica.

A frequência de funcionamento de 27MHz influenciou a seleção da antena como já foi referido. Deste modo, optou-se para o sistema transmissor por adquirir a antena *CB Santiago 1200* [Figura 55]. Note-se que conjuntamente com a antena também se adquiriu uma base [Figura 56], uma vez que esta não tem qualquer suporte.



Figura 55: Antena Santiago 1200



Figura 56: Base Magnética para Santiago 1200

As características dadas pelo fabricante da antena *Santiago 1200* são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Características antena do transmissor

Tipo	$5/8 \lambda$
Frequência central	27MHz
Largura de banda	2MHz
Impedância característica	50Ω
Altura	195 cm
Potência máxima admissível	1200W
Conetor	Ficha tipo PL

Nos recetores seleccionou-se uma das antenas normalmente utilizadas em *walkie talkies*. Foi escolhida esta antena devido à sua dimensão pequena, uma vez que se pretende que os recetores tenham o menor tamanho possível. Na Figura 57 é mostrada a antena empregada nos recetores.



Figura 57: Antena do recetor

As características fornecidas pelo vendedor desta antena podem ser consultadas na Tabela 8.

Tabela 8: Características da antena do recetor

Frequência central	27MHz
Potência máxima	10W
Impedância característica	50Ω
Conetor	BNC
Tamanho	25 cm

Capítulo 5 - Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados visando o funcionamento de todas as componentes implementadas ao longo deste projeto.

Em primeiro lugar serão apresentados os resultados alcançados no sistema transmissor. Nas subsecções seguintes abordar-se-ão os resultados relativos à potência recebida pelos sistemas recetores.

Os testes efetuados foram realizados em três locais distintos, de forma a verificar o comportamento do sistema em condições diferentes.

Os primeiros resultados a serem apresentados foram realizados em campo aberto, uma vez que, nesta situação não existem obstáculos nem paredes onde as ondas eletromagnéticas possam sofrer reflexões ou refrações. De seguida, apresentam-se os resultados relativos aos testes realizados numa das estufas da empresa *Bioin vitro*. Por fim, apresentam-se os resultados dos testes efetuados no laboratório de automação e robótica.

5.1. Testes do transmissor

Os testes realizados ao sistema transmissor, cingem-se ao nível de potência consumida pela fonte de energia *CC* e à potência irradiada pela antena.

A potência consumida pelo transmissor da fonte *CC* foi calculada através da tensão e da intensidade de corrente medidas à entrada do mesmo pelo multímetro.

A fonte de energia *CC* utilizada foi uma bateria de 12V, sendo que esta no momento que este teste foi efetuado apresentava uma tensão de 12,55V. A corrente medida apresentou o valor de 1,2A. A equação que define o valor da potência P é dado pelo produto entre a tensão U e a intensidade de corrente I , ou seja, neste caso a potência consumida pelo transmissor da fonte de energia (bateria) é de 15,06W.

Relativamente à potência de saída (potência irradiada pela antena), ter-se-ia de usar um equipamento específico que permitisse efetuar essa medição exata. Contudo o medidor de ondas estacionárias também permite medir a potência de saída, apesar de o resultado não ser 100% fiável, optou-se por efetuar a medição obtendo-se o valor de 6W. A Figura 58 mostra o medidor *ROE* a efetuar a leitura da potência de saída do transmissor.



Figura 58: Potência medida à saída do transmissor pelo medidor ROE

5.2. Testes nos recetores

Os testes realizados aos recetores foram com o propósito de avaliar a potência máxima instantânea que se consegue recolher nos vários locais, analisar o que acontece quando se troca a polarização da antena recetora (vertical e horizontal) e verificar de que forma os recetores se influenciam mutuamente quando estão próximos.

Nos testes em que se utilizou apenas um recetor foi utilizado o recetor com ponte retificadora, porque este demonstrou maior aquisição de energia relativamente à solução com multiplicador de tensão.

Ao longo do presente capítulo, a sigla Recetor1 é referente ao recetor com ponte retificadora e a Recetor2 refere-se ao recetor com multiplicador de tensão.

A carga considerada nos recetores foi uma resistência de 10kΩ, sendo o valor da potência calculado a partir do valor da tensão medida pelo multímetro e pelo valor conhecido da carga. A fórmula utilizada no cálculo da potência é apresentada na Equação 11.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (11)$$

5.2.1 Testes em campo aberto

Nesta subsecção são apresentados os resultados dos testes efetuados em campo aberto. Os testes em campo aberto são importantes uma vez, que nessa situação específica não existem quaisquer tipos de obstáculos que provoquem reflexão e refração das ondas eletromagnéticas. Desta forma, conclui-se que desde que o recetor esteja sempre à mesma

distância da antena emissora a potência recebida será sempre a mesma. Na Figura 59, é possível observar o local onde foram realizados os testes em campo aberto.



Figura 59: Testes em campo aberto

Os primeiros resultados apresentados são relativos à potência máxima instantânea recebida pelo recetor a várias alturas e distâncias da antena emissora. Foi utilizado um suporte de altura regulável para segurar o recetor enquanto se efetuavam as medições.

Os resultados apresentados na Tabela 9 estão divididos pela altura do recetor em relação ao solo e pela distância do recetor ao emissor. Na tabela os valores de potência estão apresentados em μW .

Tabela 9: Potência (μW) no recetor a várias distâncias e alturas em campo aberto

		ALTURA (CM)					
		67	96	138	183	227	268
DISTÂNCIA (M)	8	0,804	1,513	10,498	54,317	253,446	414,937
	7	1,246	5,190	36,724	79,032	333,063	436,810
	6	4,120	11,750	48,303	203,633	356,832	471,758
	5	10,287	41,942	71,910	350,438	553,661	711,822
	4	47,630	96,470	210,354	495,508	739,296	1001,090
	3	124,513	206,941	652,146	1151,924	1735,556	2299,203
	2	421,892	525,785	1360,134	2874,032	3727,103	4341,492
	1	3696,640	4542,760	4678,560	3283,290	2830,240	2672,890

Analisando os valores de potência, distância e altura apresentados na tabela, conclui-se que à medida que o recetor se vai afastando da antena emissora, a potência recebida é cada vez menor e quanto maior for a altura que se coloca o recetor, mais energia se consegue adquirir. Na tabela os valores das células realçadas a mais claro não são suficientes para alimentar o protótipo de telemetria, pois tem valor inferior aos $13,19\mu\text{W}$. Porém na maior parte das situações esse valor é conseguido obtendo-se desta forma satisfação nos resultados obtidos. A evolução gráfica desses valores é apresentada na Figura 60.

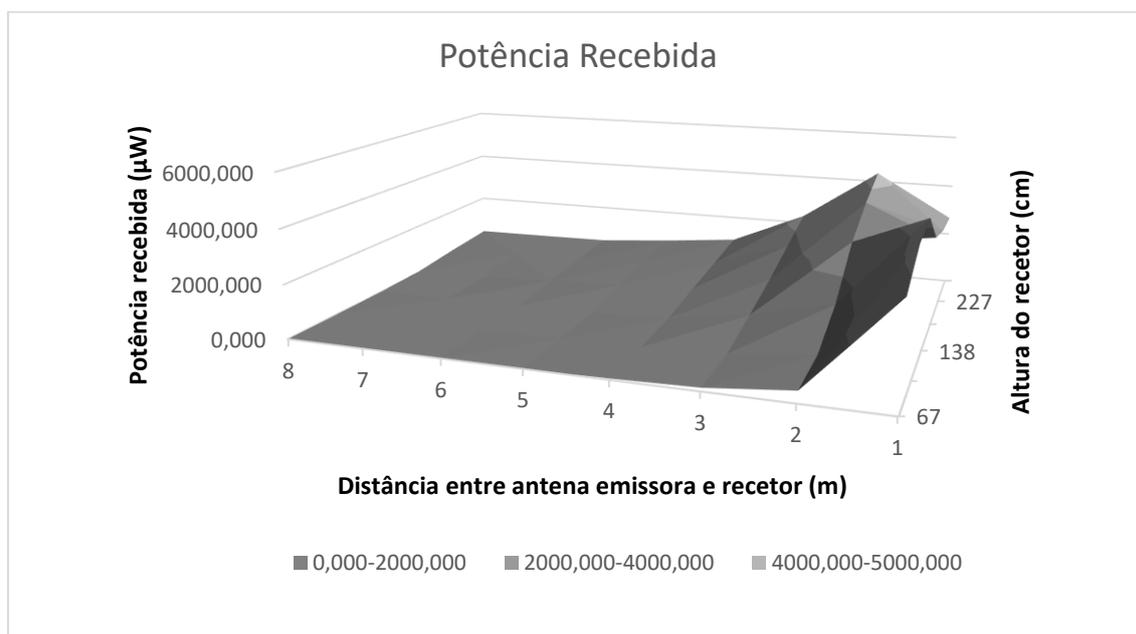


Figura 60: Potência recebida (μW) a várias distâncias e alturas em campo aberto

Pelo gráfico da figura anterior verifica-se que em campo aberto a potência recebida diminui de forma gradual à medida que o recetor se afasta da antena emissora. Este resultado é o esperado uma vez que em campo aberto não existem obstáculos ou paredes onde as ondas eletromagnéticas possam sofrer reflexões ou refrações, ou seja, todas as medições efetuadas à volta da antena emissora têm o mesmo resultado, uma vez que a antena emissora é omnidirecional.

No mesmo gráfico também se verifica que com o recetor colocado a um metro de distância e com altura superior à altura da antena emissora (195cm), a potência recebida começa a diminuir. Isto é justificado pelo facto de a antena irradiar energia pelas suas laterais, tal como foi visto no capítulo 3, caso a antena do recetor fosse colocada por cima da antena do emissor em campo aberto esta não captaria energia. Infere-se então que quando o recetor é

colocado próximo da antena emissora, quanto maior for a altura relativamente à altura da antena emissora menor será a potência recebida, pois esta sairá do raio de radiação da antena emissora [Figura 61].

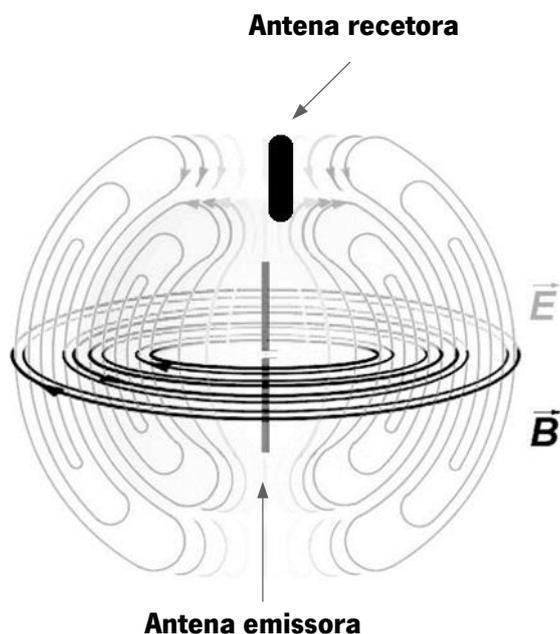


Figura 61: Influência na recepção na proximidade da antena emissora

Outro teste realizado foi verificar qual a diferença nos resultados caso a polarização da antena recetora ser oposta à da antena emissora, ou seja, colocando esta na horizontal. Foram recolhidos os valores da potência recebida nessa situação específica sendo estes resultados apresentados em μW na Tabela 10.

Tabela 10: Potência recebida a várias distâncias e alturas com polarização horizontal

		Altura (cm)			
		67	96	138	183
Comprimento (m)	4	0,000001	0,000016	0,000025	0,00004225
	3	0,000121	0,000361	0,000529	0,000676
	2	0,002304	0,006889	0,009409	0,011881
	1	0,0441	0,1156	0,1521	0,2025

Pelos valores da tabela é possível verificar que ao colocar a antena na horizontal em campo aberto os valores da potência recebida são bastantes baixos quando comparados com os resultados apresentados anteriormente. Em teoria este resultado deveria ser nulo, ou seja, com a antena recetora colocada na horizontal, a potência recebida deveria ser zero, porém é induzida uma tensão nas próprias pistas do circuito do recetor e nos fios utilizados para conectar às

pontas de prova do multímetro com polarização igual à antena emissora. Este valor de potência obtido não é suficiente para alimentar o protótipo desejado de consumo de $13,19\mu\text{W}$.

Na Figura 62 é apresentado o gráfico com estes resultados. Note-se que apesar de a potência apresentar um valor bastante baixo, verifica-se que os valores mais altos são obtidos quando os recetores estão mais próximos da antena emissora. Este valor vai-se reduzindo à medida que o recetor se afasta da antena emissora como seria de esperar através do senso comum.

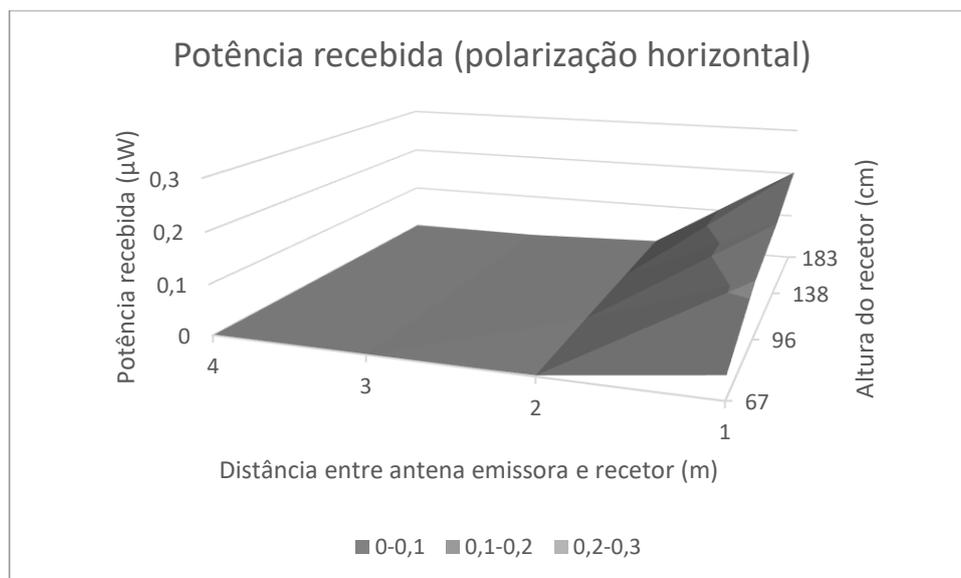


Figura 62: Potência recebida a várias distâncias e alturas (polarização horizontal)

Outro dos testes realizado foi para verificar qual a influência de colocar um recetor próximo de outro. Em primeiro lugar colocaram-se ambos os recetores lado a lado com as antenas na vertical e depois foram-se afastando os recetores cada vez mais. Os recetores estavam a 138cm de altura e a 3m de distância da antena emissora. Na Figura 63 ilustra a forma como foram colocados os recetores e como estes foram deslocados.

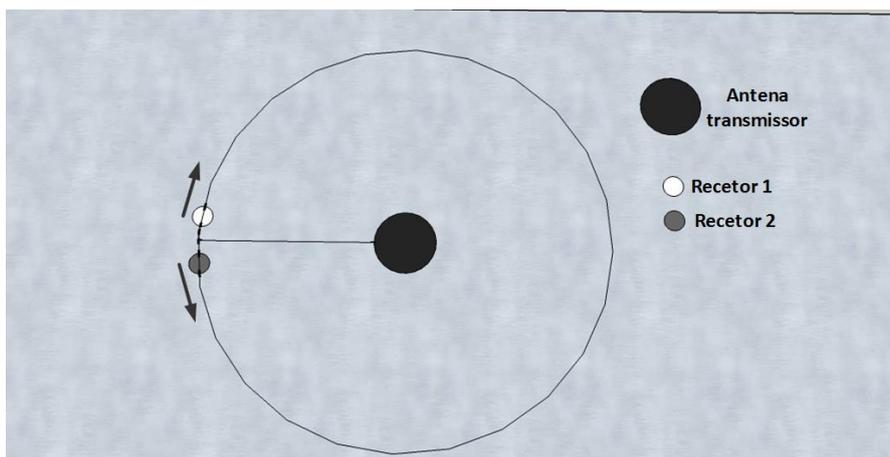


Figura 63: Influência dos receptores colocados lado a lado

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados obtidos nesse teste.

Tabela 11: Influência causada por proximidade de receptores

Recetor1 Potência (μW)	Distância entre receptores (cm)	Recetor2 Potência (μW)
372,49	10	324
441	25	372,49
529	45	445,21
576	65	466,56
645,16	85	576
655,36	95	585,64

Por análise dos valores da tabela conclui-se que o valor da potência estabiliza quando os receptores estão afastados de aproximadamente 85cm entre si. Estes resultados também podem ser visualizados pelo gráfico da Figura 64.

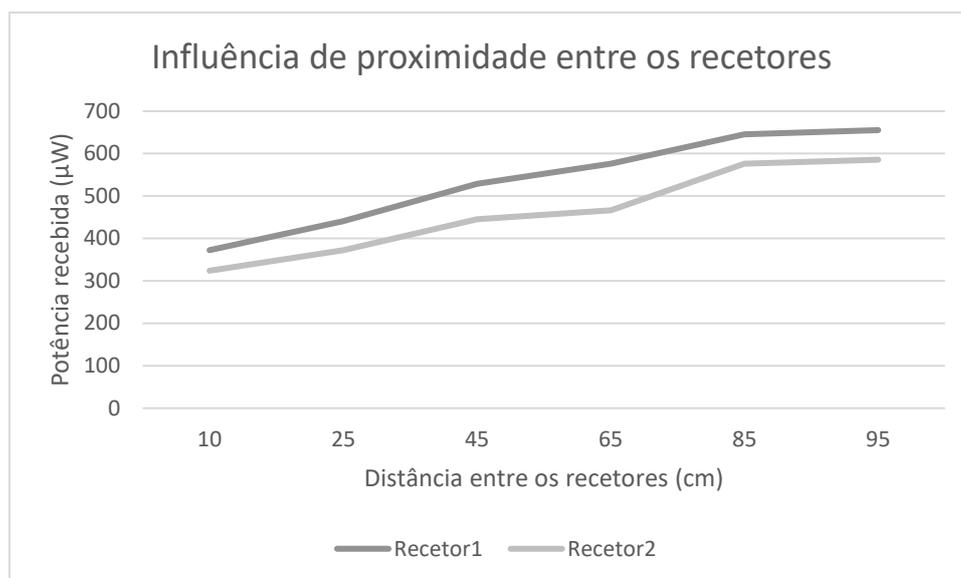


Figura 64: Influência causada por proximidade de recetores

Como se pode inferir através do gráfico à medida que os recetores se vão afastando a potência recebida aumenta. Tal como foi realçado pelos valores da tabela, no gráfico também se verifica que apenas com aproximadamente 85cm de distância entre os recetores é que o valor da potência estabiliza.

Também foi realizado um teste para verificar se existia influência quando se coloca um recetor à frente um do outro na linha da antena emissora. Colocou-se o recetor1 a uma distância fixa de dois metros e o recetor 2 imediatamente à frente deste. A forma como foram colocados ambos os recetores pode ser observada na Figura 65.

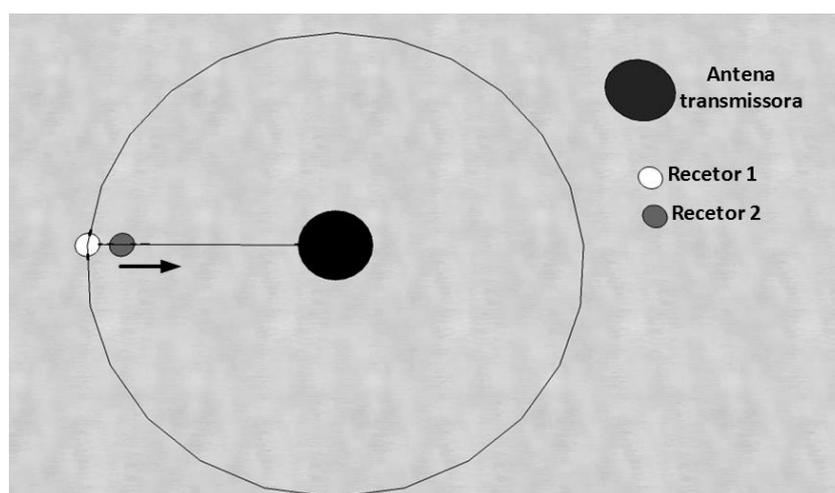


Figura 65: Influência causada pelo recetor 2 à frente

Os resultados do teste realizado são apresentados na

Tabela 12.

Tabela 12: Influência causada por proximidade de recetores

Potência (μW) Recetor1	Distância entre eles (cm)	Potência (μW) Recetor2
302,76	10	243,36
331,24	30	256
306,25	45	342,25
324	60	400
295,84	90	1369
529	120	1482,25
625	140	1600

Analisando os dados da tabela verifica-se que à medida que o recetor 2 se aproxima da antena emissora, a potência recebida aumenta deixando naturalmente de ter tanta influencia na quantidade de energia que o recetor1 pode receber.

Note-se que o recetor1 apenas recebe quase a totalidade de potência naquele local (relativa aos testes anteriores) quando o recetor 2 está a 1,40m de distância do recetor 1 (0,60m da antena emissora). Na Figura 66 é apresentado o gráfico os resultados da influência da proximidade entre recetores.

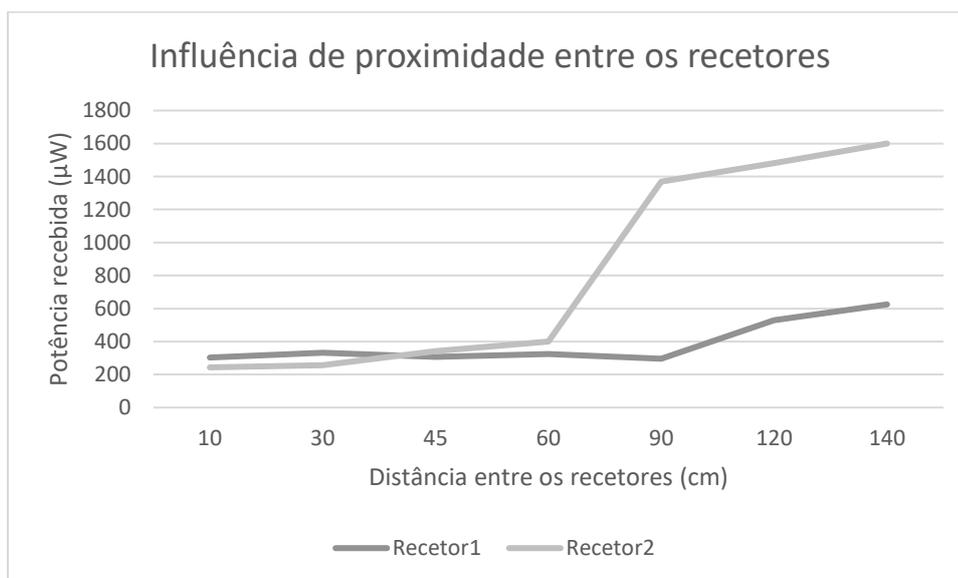


Figura 66: Influência causada por proximidade de recetores

Como se pode confirmar pelo gráfico até sensivelmente 90cm de distância a potência recebida no recetor 1 mantém-se praticamente inalterada. A partir dessa distância é que a potência recebida no recetor começa a aumentar.

5.2.2 Resultados na estufa

Como já foi referido anteriormente, o projeto desenvolvido irá ser integrado em estufas da empresa *Bioinvitro*, ou seja, torna-se pertinente a realização de testes em condições reais de funcionamento. Os testes realizados no interior das estufas foram semelhantes aos relatados anteriormente.

A primeira fase foi avaliar o espaço para verificar qual a melhor localização para a antena emissora. A estufa tem forma de um paralelepípedo com as dimensões apresentadas na Figura 67.

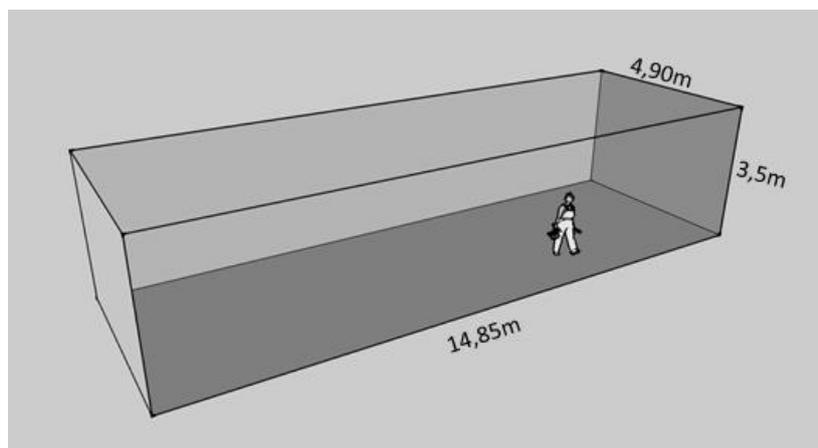


Figura 67: Dimensões da estufa

A antena emissora foi colocada no centro da estufa porque este foi o local onde o medidor de ondas estacionárias apresentou menor valor de *ROE* (1:2). Na Figura 68 é apresentada uma imagem real da estufa com a antena emissora colocada no centro desta.



Figura 68: Posicionamento antena emissora na estufa

Para efetuar a medição da potência recebida pelos recetores foram utilizados suportes com altura ajustável. Na Figura 69 pode-se observar o método utilizado para efetuar essas medições.

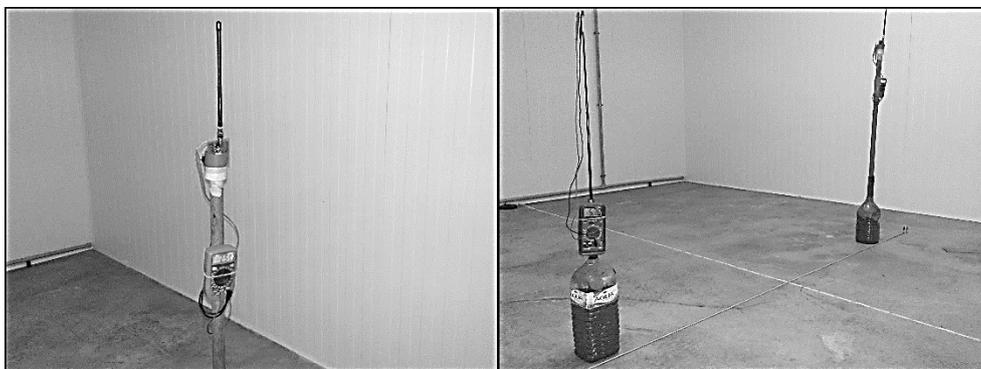


Figura 69: Medição da tensão nos recetores

No primeiro teste foi medida tensão na carga do recetor, para se obter a potência recebida pelo recetor a várias distâncias e alturas, de modo a verificar quais seriam os melhores locais para a instalação da antena recetora.

Neste teste foi utilizado apenas um recetor, sendo escolhido o que utiliza a ponte retificadora, pois este como já foi referido anteriormente apresentou melhores resultados em relação à solução com multiplicador de tensão.

Os dados recolhidos estão organizados na Tabela 13, sendo cada linha apresentada a distância entre o emissor e o recetor em metros e as colunas a altura em centímetros em relação ao solo. O valor da potência é apresentado em mW.

Tabela 13: Potência (mW) no recetor a várias distâncias e alturas na estufa

		ALTURA (CM)				
		67	96	138	183	227
COMPRIMENTO (M)	7	0,049	0,052	0,110	0,196	0,193
	6	0,262	0,400	0,702	1,384	1,632
	5	0,740	1,024	1,849	3,576	3,819
	4	2,237	2,884	5,127	8,010	9,801
	3	3,660	5,285	9,370	11,664	12,996
	2	6,068	8,968	13,689	23,562	26,994
	1	6,889	10,201	21,025	24,398	19,937

Na Figura 70 pode-se observar os dados da tabela anterior na forma de um gráfico, desta forma têm-se melhor percepção do comportamento do sistema dentro da estufa.

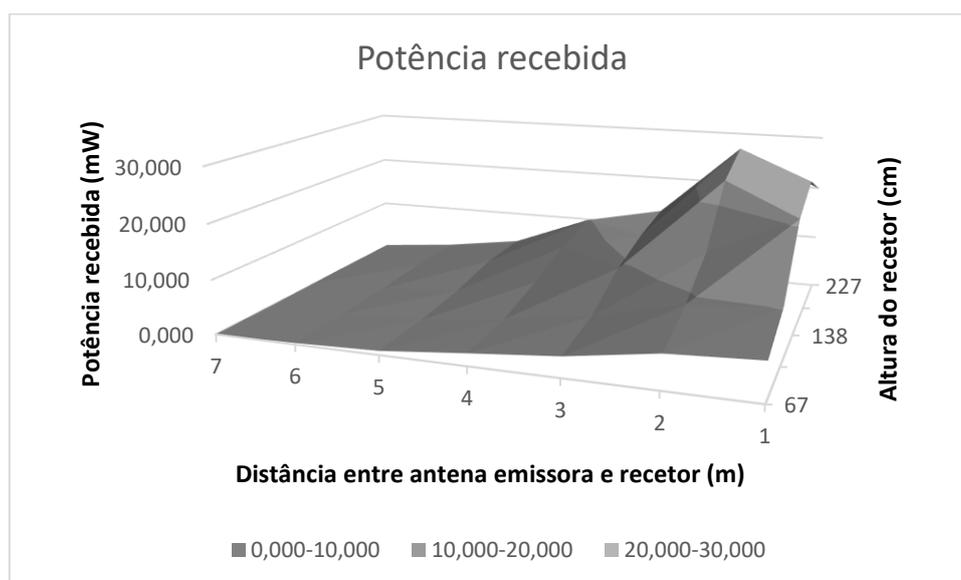


Figura 70: Potência recebida pelo recetor a várias distâncias e alturas na estufa

Com base no gráfico da Figura 70, conclui-se que no interior da estufa a potência aumenta com a proximidade do recetor à antena emissora e com o aumento da altitude do recetor. Pode-se também observar que o pior dos casos é quando o recetor está colocado a sete metros de distância e com uma altura de 67cm. Nesta localização a potência recolhida é de $49\mu\text{W}$, a cima dos $13,19\mu\text{W}$ que são necessários para alimentar o dispositivo de telemetria.

O local onde se obteve o maior valor de potência recebida foi quando o recetor estava colocado a dois metros de distância da antena emissora e a 2,27m de altura. Para essa localização obteve-se um valor de potência de aproximadamente 27mW.

O próximo teste realizado passou por analisar a influência causada entre os recetores por estes estarem demasiado próximos. Para isso, colocaram-se ambos os recetores à distância de 5m da antena emissora e com altura de 138cm. Primeiramente colocaram-se os recetores à distância de 20cm entre si e depois foram afastados para verificar se o facto destes estarem próximo teria influência nos resultados. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 14.

O valor da potência é apresentado em μW . O recetor1 corresponde ao recetor com ponte retificadora e o recetor2 é o recetor com o multiplicador de tensão.

Tabela 14: Influência causada por proximidade de recetores

Potência Recetor1 (μW)	Distância entre recetores (cm)	Potência Recetor2 (μW)
415	20	350
502	40	336
610	60	358
601	80	346
560	100	277
481	120	269
460	140	261
439	180	245
381	220	216
270	300	150

A partir dos valores apresentados na tabela, é possível observar que o recetor 1 teve melhores resultados relativamente ao recetor 2. Na Figura 71 os resultados são apresentados de forma gráfica.

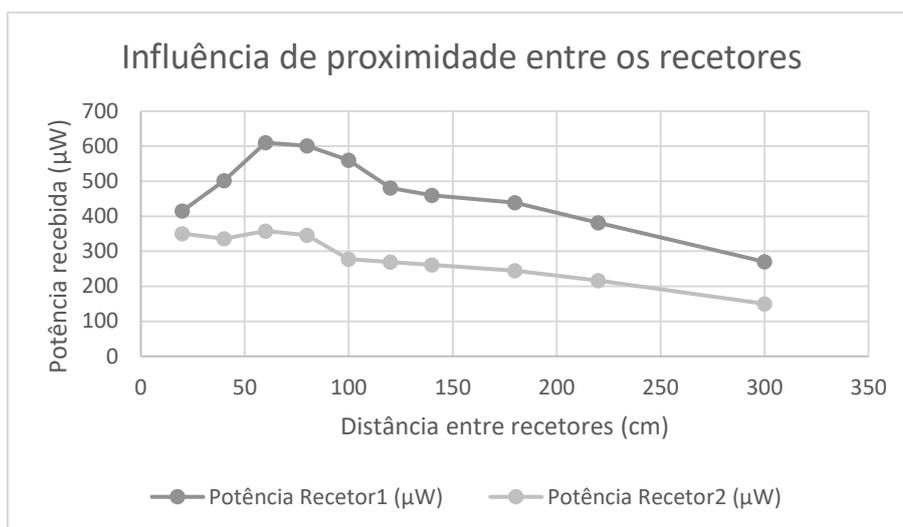


Figura 71: Influência causada por proximidade de recetores

Com base nos resultados obtidos conclui-se que quando os recetores estão afastados 60cm de distância entre si, é quando se obtém mais energia. Depois à medida que os recetores se vão afastando, o valor da potência começa a baixar. Este resultado não era esperado, mas percebeu-se que se devia ao facto das paredes serem metálicas. À medida que os recetores se iam aproximando das paredes, a quantidade energia recolhida é cada vez menor. Para se provar isso, analisou-se a potência que é recolhida pelo recetor 1 na proximidade de uma parede. Neste teste também foi colocado o recetor à distância de 5m da antena emissora com altura de 1,38m. Primeiramente o recetor foi colocado a 1m da parede lateral e foi-se aproximando de 10cm em 10cm até ficar o mais próximo possível desta. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Influência causada pela proximidade do recetor com parede metálica

Distância da parede (cm)	Potência Recetor1 (µW)
100	784
90	756,25
80	556,96
70	424,36
60	278,89
50	196
40	92,16
30	42,25
20	10,24
10	2,25

Pelos valores apresentados na Tabela 15, é possível concluir que colocando o recetor a 20cm da parede, este já não consegue recolher energia suficiente para alimentar o protótipo que se pretende (com consumo médio de $13,19\mu\text{W}$). O gráfico destes resultados é apresentado na Figura 72. Pela curva apresentada no gráfico, observa-se que à medida que o recetor se aproxima da parede, a energia recolhida cada vez menor.

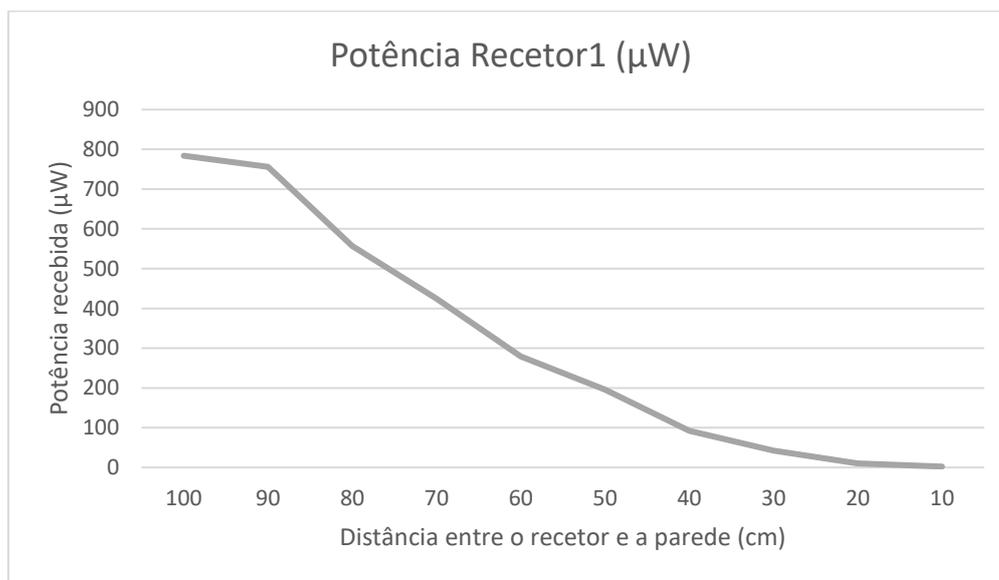


Figura 72: Influência causada pela proximidade do recetor com parede metálica

Este resultado acontece essencialmente porque ao aproximar a antena recetora da parede metálica altera de forma significativa a sua impedância, assim não existe casamento de impedância entre a antena e o circuito logo não há transferência máxima de energia.

Mesmo com esta contrariedade, o sistema geral cumpre o objetivo de alimentar o protótipo (dispositivo de telemetria) em quase todos os locais da estufa, só não cumpre caso o dispositivo seja colocado demasiadamente próximo de uma das paredes.

Em suma, os resultados em campo aberto são satisfatórios, porque apresentam uma norma, à medida que o recetor se afasta da antena emissora a potência recebida diminui gradualmente.

Nos testes efetuados também se verificou que quanto mais alto estivesse o recetor maior seria a potência recebida por este. A distância mais elevada em que foram realizados testes foi de 8 metros, mas mesmo a essa distância colocando o recetor com altura superior a 183cm era possível alimentar o protótipo (dispositivo de telemetria), pois a potência disponibilizada à carga nesse local era superior à potência média utilizada pelo dispositivo a alimentar ($13,19\mu\text{W}$).

5.2.3 Testes no interior do Laboratório

No interior do laboratório de automação e robótica existem inúmeros objetos espalhados de forma aleatória, entre eles, robôs de futebol robótico, mesas, cadeiras, estantes, armários, bancadas, ferramentas de trabalho, caixas, entre outros. No teto do laboratório existem calhas metálicas onde passam fios de eletricidade, cabos de rede e suportes para as lâmpadas do laboratório. As medidas do laboratório são de aproximadamente 14m de comprimento por 7 metros de largura. Na Figura 73 e na Figura 74 pode-se observar o local onde foram realizados os testes referidos.



Figura 73: Laboratório de automação e robótica



Figura 74: Laboratório de automação e robótica

A antena transmissora foi colocada sensivelmente a meio do Laboratório. Por sua vez, o recetor foi colocado em diversos locais do laboratório, desta forma conseguiu-se obter a tensão máxima na carga e conseqüentemente a potência máxima instantânea dentro do laboratório.

O primeiro teste efetuado foi verificar qual a potência que se consegue recolher a várias distâncias e alturas. Os resultados desses testes são apresentados na Tabela 16: Potência recebida (mW) a várias distâncias e alturas no laboratório, em que, as linhas são a distância em metros entre o recetor e a antena transmissora e as colunas a altura do recetor em relação ao chão em centímetros. O valor da potência é apresentado em mW.

Tabela 16: Potência recebida (mW) a várias distâncias e alturas no laboratório

		Altura (cm)				
		67	96	138	183	227
Comprimento (m)	6	0,076	0,702	2,642	5,213	4,134
	5	2,144	0,930	1,697	2,852	3,564
	4	2,061	2,490	2,642	1,739	6,384
	3	3,576	5,098	6,659	3,745	10,302
	2	5,761	8,372	11,816	8,686	21,316
	1	6,659	10,020	19,293	15,500	15,178

Pelos valores apresentados na Tabela 16 infere-se que em todos os locais é possível obter um valor de potência superior à potência mínima desejada (13,49 μ W). Para se observar a evolução dos valores apresentados na tabela de forma gráfica, é apresentado na Figura 75 um gráfico a três dimensões com esses mesmos resultados.

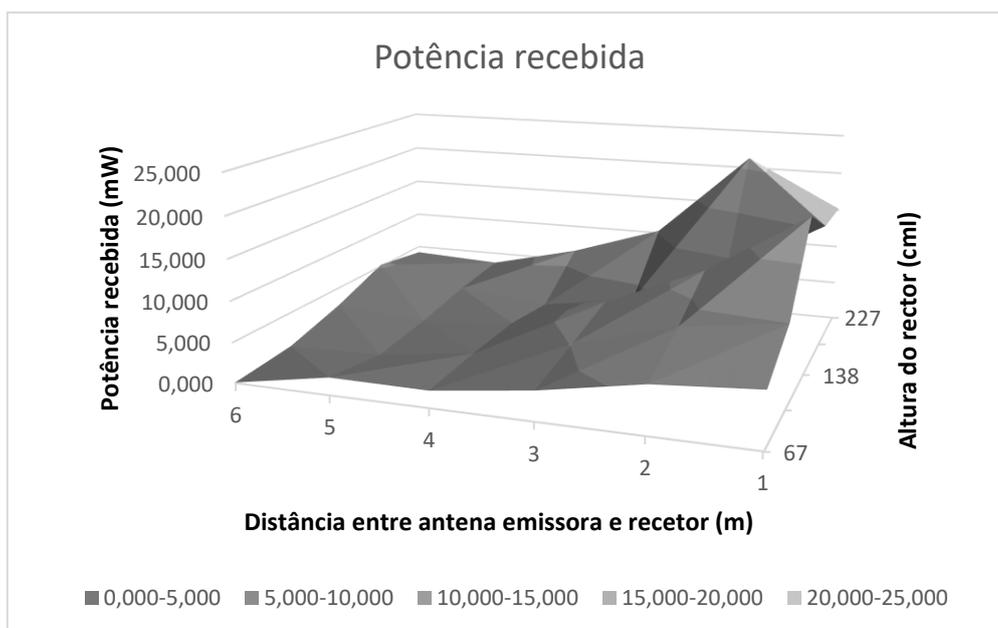


Figura 75: Potência recebida pelo recetor a várias distâncias e alturas no Laboratório

Pelo gráfico conclui-se que a potência recebida é superior quando o recetor está mais próximo da antena emissora. No entanto, existem casos em que a distância é superior e mesmo assim recebe mais energia do que quando o recetor está mais próximo da antena emissora. Este tipo de situações acontece porque as ondas eletromagnéticas sofrem reflexões e refrações nos objetos que estão no interior do laboratório e nas paredes. Essa situação leva a que num determinado local se possa obter mais potência do que o esperado, ou pelo contrário exista uma diminuição na potência recolhida, pois o valor da potência adquirida depende do número de ondas incidentes sobre a antena do recetor.

Foi realizado o mesmo teste mas colocando o recetor em direção à parede lateral do laboratório, de modo a tentar perceber se o facto desta estar mais próxima influenciava os resultados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17. Os valores de potência estão apresentados em mW.

Tabela 17: Potência recebida (mW) a várias distâncias e alturas (direção à parede lateral)

		Altura (cm)			
		67	96	138	183
Comprimento (m)	3	1,50	2,62	9,22	11,99
	2	5,60	7,99	11,82	14,74
	1	6,77	11,58	15,78	16,98

Na Figura 76 é apresentado o gráfico com os resultados da tabela anterior. Pelos valores apresentados na Tabela 17, é possível concluir que em todos os pontos medidos se obteve um valor de potência muito superior aos $13,19\mu\text{W}$.

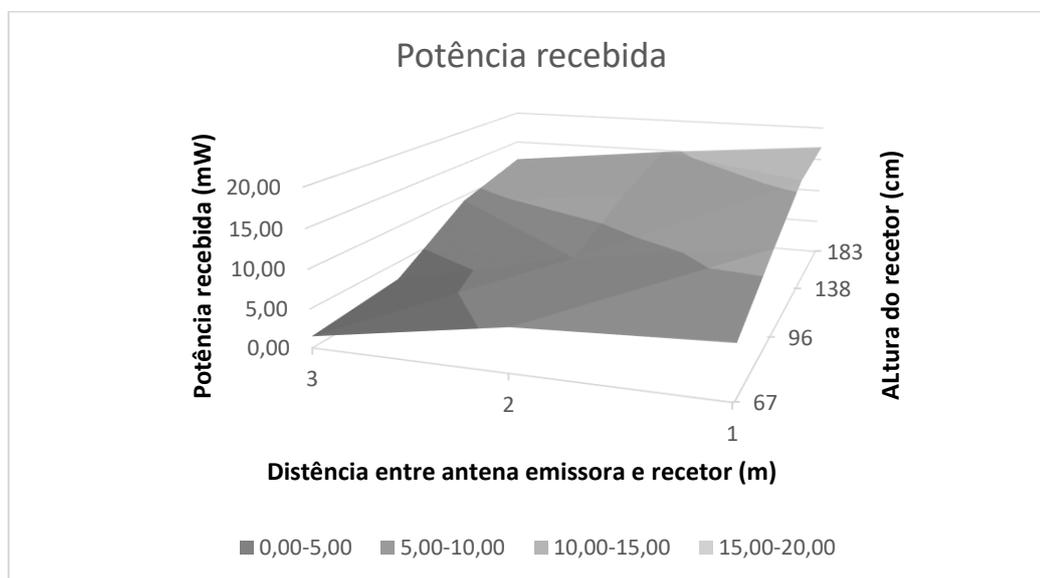


Figura 76: Potência recebida a várias distâncias e alturas (direção à parede lateral)

Através do gráfico anterior infere-se que a potência recolhida é cada vez menor à medida que o recetor se afasta da antena do transmissor, contudo, fazendo uma comparação com os resultados apresentados anteriormente, percebe-se que a potência não é igual a distâncias e alturas similares. Por exemplo, estando o recetor colocado a 3m de distância da antena emissora e com altura de 138cm, no primeiro teste (Tabela 16) este recebe uma potência de 6,659mW e no segundo teste (Tabela 17) recebe 2,62mW.

A antena emissora como é omnidirecional irradia a sua energia de igual forma em todas as direções, mas os obstáculos contidos no interior do laboratório e as paredes do mesmo provocam reflexões e refrações nas ondas eletromagnéticas para direções desconhecidas. Desta forma, quando se coloca dois recetores exatamente iguais à mesma distância e altura da antena emissora, mas num local diferente (por exemplo, um em cada ponta do laboratório) os resultados obtidos poderão ser muito distintos.

O teste realizado para verificar as alterações provocadas da colocação da antena do recetor na horizontal (com polarização invertida relativamente à antena emissora) é apresentado de seguida.

Neste teste colocou-se o recetor às mesmas distâncias da antena emissora e alturas usadas no teste anterior. Os resultados da potência recebida nessa situação são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Potência (mW) a várias distâncias e alturas (polarização horizontal)

		Altura (cm)			
		67	96	138	183
Comprimento (m)	3	2,40	0,97	2,21	4,10
	2	2,60	6,18	5,52	7,66
	1	6,64	8,32	9,78	10,28

Como se pode observar, dentro do laboratório o facto de colocar a antena com polarização diferente da antena emissora, não é sempre desvantajoso. Há situações em que o valor da potência recebida no mesmo local é maior com a antena recetora colocada na horizontal que na vertical. Isso deve-se ao facto de as reflexões e refrações das ondas eletromagnéticas em objetos causam rotações da polarização das ondas. Na Figura 77 está representado de forma gráfica estes resultados.

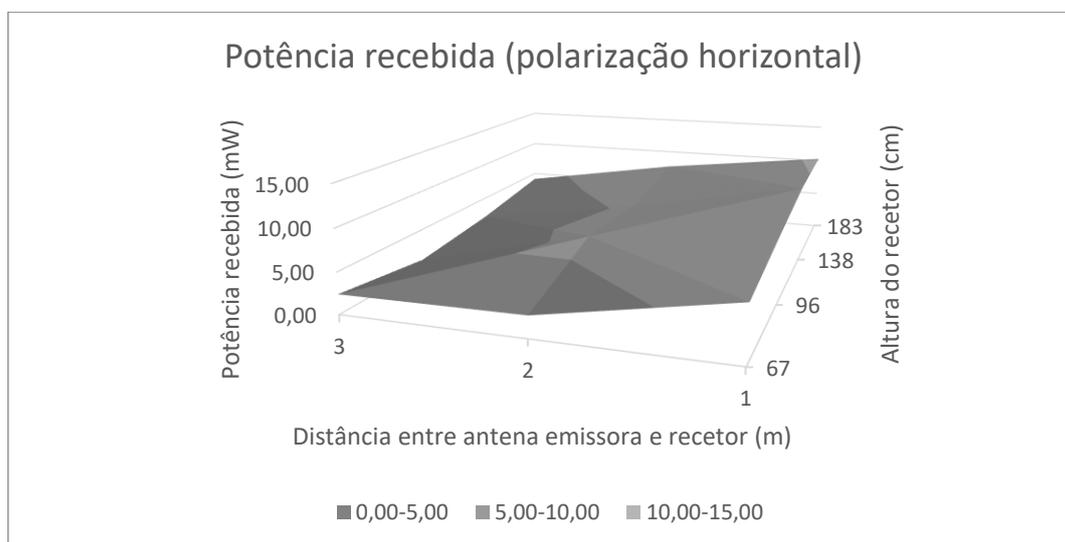


Figura 77: Potência recebida a várias distâncias e alturas (polarização horizontal)

Com este teste percebe-se uma vez mais, que no interior de um compartimento repleto de objetos não existe uma norma, ao contrário do que acontece em campo aberto.

Outro teste realizado foi a análise da influência nos resultados que teria em colocar outro recetor muito próximo deste. Foi então usada a baliza de futebol robótico como suporte para os recetores. Esta tem 1,20m de altura e 2,25m de comprimento e estava colocada a 3m de distância da antena transmissora. Na primeira fase colocaram-se os recetores muito próximos um do outro e registou-se que a potência recebida em cada um deles. De seguida afastaram-se os recetores até ficar um em cada ponta da baliza. A ideia foi verificar até que distância entre eles, deixa de influenciar o facto de estes estarem muito próximos. Os resultados obtidos neste teste são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Influência de proximidade dos recetores

Recetor1 Potência (mW)	Distância entre os recetores (cm)	Recetor2 Potência (mW)
2,60	5	1,97
4,25	10	2,93
6,37	20	5,18
7,31	30	5,98
8,34	40	6,76
8,99	50	7,40
9,14	60	7,46
9,76	70	7,69
10,40	80	7,83
10,32	90	7,57
10,65	100	7,40
10,24	220	7,67

Pelos valores apresentados na tabela percebe-se que até sensivelmente 80cm de distância entre os recetores, a potência recebida aumenta com o seu afastamento, o que indica que à distância de 80cm, o facto de os recetores estarem próximos influencia a potência que estes conseguem receber. Na Figura 78 é possível observar os resultados obtidos de forma gráfica.

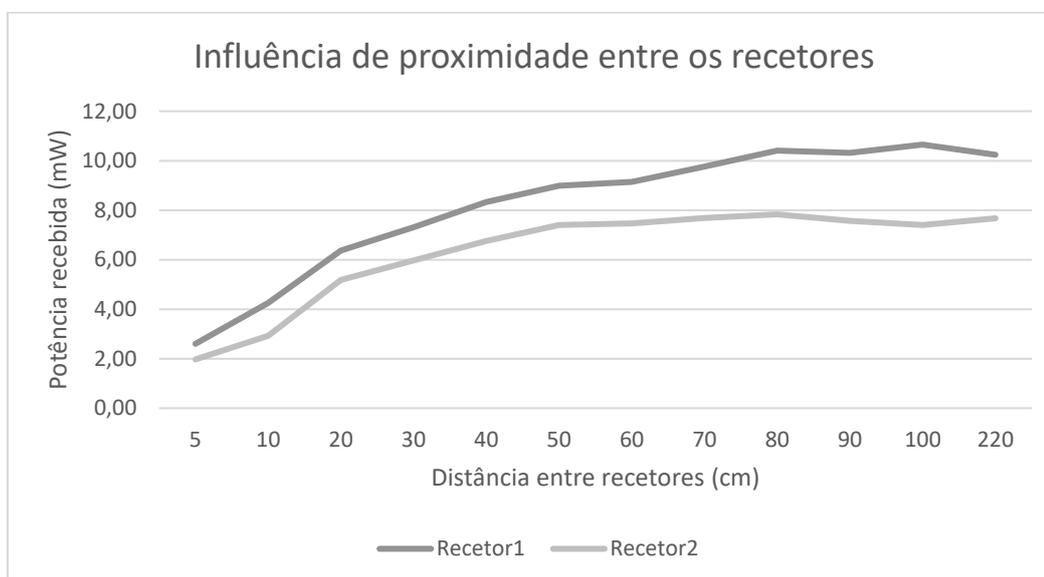


Figura 78: Influência causada por proximidade de recetores

Analisando o gráfico, também se percebe que à medida que se vão afastando os recetores um do outro a potência recebida por estes aumenta. Como se pode observar, a partir

da distância de 80cm entre os recetores esse facto deixa de ser notório, sendo essa a distância de afastamento entre eles que se deixam influenciar mutuamente.

Fazendo uma análise geral dos testes realizados no interior do laboratório, conclui-se que a alimentação para o protótipo (dispositivo de telemetria) seria garantida em todos os sítios no interior deste, pois em todos os testes efetuados é adquirida uma potência superior à potência média consumida pelo protótipo. Desta forma, mostra-se que seria viável alimentar este tipo de dispositivos dentro do laboratório através de energia por radiofrequência é viável.

5.2.4 Comparação entre recetores

O último teste apresentado foi a comparação direta entre o recetor com multiplicador de tensão e o recetor com ponte retificadora. Para isso colocou-se um recetor de cada vez exatamente no mesmo local e mediu-se a tensão aos terminais do condensador do barramento CC.

Primeiramente, manteve-se a carga (resistência) nos recetores e analisou-se qual a tensão máxima no condensador que estes conseguiam atingir. No teste seguinte, o procedimento foi o mesmo, mas desta vez a carga (resistência) foi-lhe retirada.

Os resultados obtidos destes testes são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Tensão aos terminais do condensador (com e sem carga)

	Recetor 1	Recetor 2
Com carga	4.05V	3.09V
Sem carga	4.10V	10.40V

Como se pode observar pelos valores, o recetor 1 com a carga conectada tem um valor tensão superior aos seus terminais relativamente ao recetor 2 com carga. Isto deve-se ao facto de o recetor 1 e recetor 2 não serem exatamente iguais, a bobina do filtro LC foram feitas manualmente e não têm exatamente as mesmas características.

O recetor 2 utiliza um circuito multiplicador de tensão com dois estágios, ou seja, multiplica a tensão 4 vezes. Porém, o valor máximo de potência instantânea que pode ser recebida e a carga têm valor fixo. Desta forma, caso se aumentasse o valor da tensão também se aumentaria o valor de potência recebida, mas isso não é possível. Então apesar de usar um recetor com multiplicador de tensão, o valor de tensão aos terminais da carga não é aumentado.

Já sem a carga conectada, a energia armazenada no condensador não tem como ser dissipada, então a tensão no condensador aumenta. Como se pode ver no recetor 1 o valor da tensão sem a carga não aumentou significativamente, porém no recetor 2 o valor da tensão sem carga aos terminais do condensador multiplicou-se por aproximadamente 3,36. Teoricamente deveria multiplicar por 4, mas na prática devido às perdas o valor obtido é mais baixo.

Com este resultado, conclui-se que o recetor 2 é menos eficiente do que o recetor 1 com a ponte retificadora.

Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros

Neste último ponto do trabalho, procura-se concluir esta dissertação, salientando aquelas que parecem ser as características mais vantajosas do sistema desenvolvido e revelar algumas das propostas futuras.

6.1. Conclusões

De um modo geral, existe plena satisfação no protótipo desenvolvido, porque conseguiu-se cumprir com o estipulado provando que é possível a alimentação do protótipo através de ondas de rádio.

Na maior parte das situações, o objetivo de alimentar o protótipo de telemetria com consumo médio de $13,19\mu\text{W}$ foi conseguido, sendo que no interior das estufas foi onde se conseguiu obter os melhores resultados, pois foi onde se obteve o valor máximo de potência.

A alimentação por ondas de rádio ou radiofrequência, como já foi referido ao longo da monografia assume atualmente um papel tecnológico de relevo, pois torna-se cada vez mais interessante a alimentação de sistemas sem recurso a uma ligação física como por exemplo pilhas ou baterias. Este tipo de soluções permitem a colocação de sistemas de muito baixo consumo em locais isolados e de difícil acesso devido ao facto de não necessitarem de qualquer tipo de infraestrutura para a alimentação ou de recarregamento de baterias.

Os maiores problemas que este tipo de soluções apresentam cingem-se ao facto de as antenas não poderem ser colocadas de qualquer forma e em qualquer lugar, porque estas devem ser instaladas corretamente para que o rendimento do sistema seja satisfatório.

Em suma, o sistema desenvolvido superou as expectativas iniciais mostrando viabilidade e eficiência para este tipo de sistemas de alimentação de muito baixo consumo.

6.2. Trabalhos futuros

O projeto de dissertação desenvolvido encontra-se atualmente numa fase de protótipo, existindo ainda muito trabalho até à obtenção do produto final industrial. Numa primeira fase, será necessária a adoção de um sistema que adapte o nível da tensão de saída para 3,3V, pois no sistema apenas foi testada a quantidade potência recebida sem controlar a tensão fornecida à carga.

O ajuste e calibração do sistema transmissor para o nível de potência de emissão que garanta o funcionamento dos protótipos, porque por vezes não é necessário que o sistema transmissor esteja no seu nível máximo de potência de transmissão. Desta forma garante-se

maior rendimento do sistema, pois existe maior aproveitamento entre a potência transmitida e a que é recolhida.

Outro aspeto importante, é a comercialização do sistema, pois para que este possa ser comercializado é necessário reajustar a potência máxima de transmissão, porque atualmente esta ultrapassa o limite legal.

Uma das desvantagens atuais do sistema é o tamanho da antena do sistema transmissão, porque futuramente seria interessante para a mesma frequência de 27MHz, tentar compactar o sistema.

Outra das alterações ou melhorias de trabalho futuro é o aumento da frequência de funcionamento atualmente nos 27MHz, porque desta forma, tanto a antena do transmissor como as dos recetores podem ser mais pequenas.

Em termos aplicativos, esta área pode ser explorada para além da transferência de energia por *RF*, mas também como sensores de movimento ou até na deteção de movimentos no interior de uma sala.

Capítulo 7 - Referências

- [1] “Empresa Bioinvitro - Biotecnologia Lda,” [Online]. Available: <http://www.bioinvitro.com/>. [Acedido em 16 Dezembro 2015].
- [2] M. A. L. A. a. N. Q. Soudeh Heydari Nasab, “Investigation of RF Signal Energy Harvesting,” 2010.
- [3] “Wireless Technology Services - Powercast Co.,” [Online]. Available: <http://www.powercastco.com/>.
- [4] “POWERCASTER TRANSMITTERS,” [Online]. Available: <http://www.powercastco.com/wp-content/uploads/2016/11/User-Manual-TX-915-01-Rev-A-4.pdf>.
- [5] “arrow.com,” [Online]. Available: <https://www.arrow.com/en/products/tx91501-1w-id/powercast-corporation>.
- [6] “POWERHARVESTER RECEIVERS - P2110B,” [Online]. Available: <http://www.powercastco.com/wp-content/uploads/2016/12/P2110B-Datasheet-Rev-3.pdf>.
- [7] [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/the-long-road-to-maxwells-equations>. [Acedido em 2016 11 3].
- [8] [Online]. Available: <http://www.guia.heu.nom.br/ondas.htm>. [Acedido em 3 de Novembro 2016].
- [9] J. C. d. O. Medeiros, “Linhas de Transmissão,” em *Princípios de Telecomunicações Teoria e Prática*, Editora Érica Ltda., 2009, pp. 167-180.
- [10] P. Azevedo, “Manual de Antenas, Propagação e Linhas de Transmissão,” [Online]. Available: opac.iefp.pt:8080/images/winlibimg.aspx?skey=&doc=73187&img=1182.
- [11] [Online]. Available: http://www.firestik.com/Tech_Docs/SWRLOSS.htm. [Acedido em 2016 12 22].
- [12] F. R. Vassallo, “Antenas e Linhas de Transmissão,” em *Curso de Eletrónica e micro-eletronica 15-16*, CEAC.
- [13] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/LC_circuit. [Acedido em 03 11 2016].
- [14] T. 1.-6. D. o. t. Army, “Basic theory,” em *Antennas and Radio Propagation*, Washington, 1953, pp. 36-43.
- [15] C. Couto, “RFID - Identificação por rádio frequência,” [Online]. Available: http://www.dei.isep.ipp.pt/~qtdei/RFID_300403.pdf. [Acedido em 2016 Dezembro 3].
- [16] “Datasheet 2N3553,” [Online]. Available:

-
- <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/philips/2N3553.pdf>. [Acedido em 3 Março 2016].
- [17] "DatasheetCatalog.com," [Online]. Available: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/MitsubishiElectricCorporation/mXrqzw.pdf>. [Acedido em 4 Abril 2016].
- [18] "pira.cz," [Online]. Available: <http://www.pira.cz/pdf/SAA1057.pdf>. [Acedido em 2016 Março 14].
- [19] V. Pacheco, "Telemetria para aplicação de sensores remotos na agricultura", 2016.
- [20] L. J. Gabrillo, M. G. Galesand e J. A. Hora, "Enhanced RF to DC converter with LC resonant circuit," 06 2015. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/79/1/012011/pdf>. [Acedido em 16 12 2015].
- [21] "THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE)," 05 2015. [Online]. Available: <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/ERCRep025.pdf>. [Acedido em 27 10 2015].
- [22] H. F. A. d. Castro, Tese de Doutoramento: Desenvolvimento de etiquetas RFID passivas e chipless para aplicação em produtos têxteis lar, Universidade do Minho, 2014.
- [23] C. M. C. O. Valle, "COMUNICAÇÃO POR RADIO FREQUÊNCIA PARA CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS (CLP)," Rio de Janeiro, 2013.