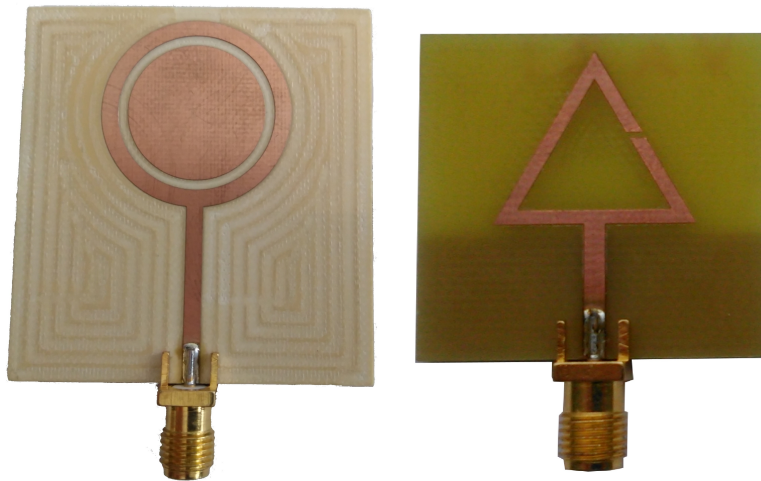




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores



Antenas de dupla banda para Wi-Fi

NUNO FILIPE CAIM CASCALHO

Licenciado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Orientador : Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno António Fraga Juliano Cota

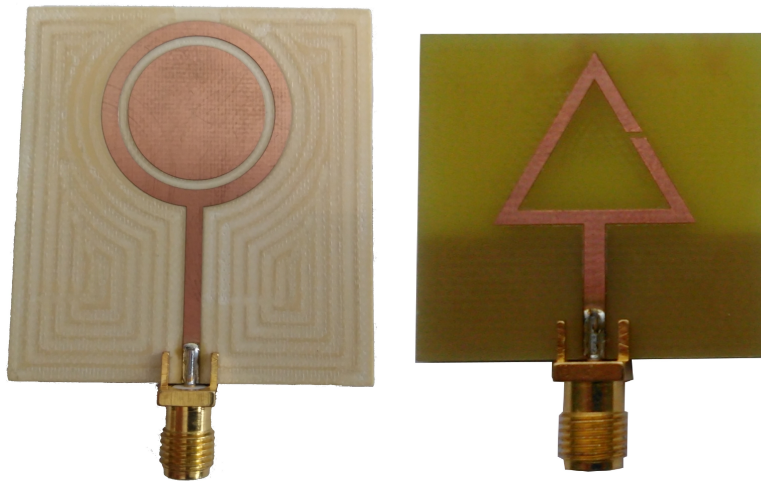
Vogais: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho
Prof. Doutor Nuno Borges de Carvalho

Novembro, 2018



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de
Computadores**



Antenas de dupla banda para Wi-Fi

NUNO FILIPE CAIM CASCALHO

Licenciado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Orientador : Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno António Fraga Juliano Cota

Vogais: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho
Prof. Doutor Nuno Borges de Carvalho

Novembro, 2018

Ao meu colega e amigo João Palma

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, o Prof^o Pedro Pinho, a oportunidade de trabalhar nesta tese final de mestrado e o respetivo apoio dado durante a realização da mesma.

Agradeço ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro pelo suporte à realização desta dissertação, nomeadamente na construção dos protótipos desenvolvidos.

Um agradecimento também para o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, a instituição onde me licenciiei e termino agora o grau de mestre. Nela vivi e alcancei uma fase marcante na minha vida.

A todos aqueles colegas que me acompanharam e vivemos como que em família, um grande abraço de agradecimento pelos momentos bem passados, por tornarem os meus estudos menos aborrecidos e por todos os contributos que deram para a minha formação académica e pessoal. Certamente continuaremos a viver bons momentos juntos!

Por ultimo, quero agradecer à minha família por todo o apoio dado durante esta fase da minha vida, pois sem eles não seria possível alcançar esta meta.

Resumo

O estudo e desenvolvimento de antenas é um tópico muito discutido atualmente. Esse desenvolvimento faz-se, não só mas também, seguindo as tendências do mercado de equipamento eletrónico de consumo, no qual surgem produtos para uso pessoal, como por exemplo os *smartphones*, *smartwatches* e outros *gadgets* que fazem uso de comunicação sem-fios. Nas varias características que definem estes produtos, o seu tamanho reduzido, a elevada eficiência energética e a qualidade de comunicação são determinantes para a sua aquisição. Estas características são muitas vezes definidas pelas tecnologias do canal radio, do qual faz parte a antena.

Este trabalho foca-se no estudo de antenas impressas, mais propriamente no monopolo, sendo estas adequadas para terminais moveis. São desenvolvidas duas antenas múltipla banda para aplicações Wi-Fi (2.5GHz e 5GHz), uma com geometria circular e outra com geometria triangular. Os objetivos da dissertação passam por demonstrar a projeção de uma antena simples com uma única banda, a transformação da antena para múltipla banda e comparação entre geometrias diferentes.

As antenas projetadas com o *software* Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite, são posteriormente construídas e analisadas no Instituto de Telecomunicações de Aveiro.

Palavras-chave: Antena impressa; Monopolo impresso; Múltipla banda

Abstract

The research and development of antennas is a very discussed topic nowadays.

This development is made, not only but also, by following the tendencies of the market of consumer electronic equipment, in which products for personal use, such as smart-phones, smart-watches or any other gadget that makes use of wireless communication. In the many characteristics that define this products, their small footprint, higher energy efficiency and communication quality are determinants for its adoption. These characteristics are often defined by technologies and techniques of the radio channel, on which the antenna is part.

This work is focused on the research of printed antennas, more properly the monopole type, being those suitable for mobile terminals. Two multiband antennas for Wi-Fi (2.5GHz and 5GHz) applications are developed, one with circular geometry and other with triangular geometry. The main objectives of this master thesis pass through demonstrate the projection of a simple antenna with single band, its transformation to a multiband antenna and the comparison of different geometries.

The antennas are projected with the software Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite, are then built and analysed at Telecommunications Institute of Aveiro.

Keywords: Printed antenna; Printed monopole; Multiband

Índice

Índice	xiii
Abreviaturas e símbolos	xv
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do documento	4
1.4 Contribuições originais	4
2 Antenas impressas	5
2.1 Monopolos impressos	6
2.2 Configuração dos monopolos	10
2.3 Multi-banda	17
3 Dimensionamento de monopolos impressos de dupla banda	21
3.1 Monopolo Circular	21
3.1.1 Geometria e configuração	22

3.1.2	Resultados	30
3.2	Monopolo Triangular	32
3.2.1	Geometria e configuração	32
3.2.2	Resultados	38
4	Conclusão	45
	Referências	47

Abreviaturas e símbolos

ϵ_r	Permitividade relativa ou Constante dielétrica
Γ	Coefficiente de reflexão
B_L	Distância entre geometria radiadora e plano de massa
C_L	Comprimento do corte entre ramos
D	Diretividade
D_Y	Posição vertical do corte entre braços do triangulo
D_{max}	Diretividade maxima
e_0	Eficiência total
e_c	Perdas nos condutores
e_d	Perdas do dielétrico
e_r	Perdas por reflexão do sinal
e_{cd}	Eficiência de radiação
F_L	Comprimento da linha de alimentação
F_W	Largura da linha de alimentação
f_c	Frequência central
f_{max}	Frequência máxima
f_{min}	Frequência minima

G	Ganho
G_{abs}	Ganho absoluto
L_m	Comprimento do monopolo
P_{rad}	Potência radiada
R_1	Raio exterior do anel
R_2	Raio interior do anel
R_3	Raio do disco
S_H	Altura do substrato
S_W	Largura do substrato
S_{11}	Coefficiente de reflexão
T_L	Comprimento de lado do triangulo
T_W	Espessura do triangulo
$\tan\delta$	Tangente de perdas
U	Intensidade de radiação
U_{max}	Intensidade de radiação maxima
W_{rad}	Densidade de potência
BW	Largura de banda ou <i>Bandwidth</i>
DGS	Defected Groundplane Structures
GPS	Global Positioning System
GSM	Gobal System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LTE	Long Term Evolution
MADM	Multiple Attribute Decision Making

MICS Medical Device Radiocommunications Service

NFC Near Field Communication

PIFA Planar Inverted-F Antenna

RF Radio-Frequências

RFID Radio Frequency Identification

UMTS Universal Mobile Telecommunication System

VNA Vector Network Analyzer

WBAN Wireless Body Area Network

Wi-Fi Wireless Fidelity

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN Wireless Local Area Network

WPAN Wireless Personal Area Network

Lista de Figuras

1.1	Cenário dos sistemas sem-fios da 5ª geração	3
2.1	Diagrama de radiação omnidirecional	7
2.2	Perdas de uma antena	8
2.3	Estrutura de um dipolo de meia-onda	9
2.4	Estrutura de um monopolo e modelo equivalente com distribuição de corrente	10
2.5	Configuração padrão do monopolo impresso	11
2.6	Antenas impressas com diferentes planos de massa	13
2.7	Estruturas DGS mais comuns para antenas impressas	14
2.8	Monopolos impressos com estruturas DGS	14
2.9	Linha <i>microstrip</i>	15
2.10	Diferentes formas básicas para monopolos impressos	16
2.11	Terminal móvel comercial Sony Ericsson W810 com antena PIFA a cobrir as bandas 850MHz/900MHz e 1800MHz/1900MHz	18
2.12	Geometria de monopolo impresso multi-banda para Bluetooth, WLAN e WiMAX	19
2.13	Geometria de monopolo impresso multi-banda para Bluetooth e WLAN	20
3.1	Configuração em disco para monopolo circular	22
3.2	Monopolo circular impresso - variação S_{11} com o raio do disco	23

3.3	Monopolo circular impresso - impedância de entrada do monopolo em disco	23
3.4	Monopolo circular impresso - distribuição de corrente do monopolo em disco a $2,45GHz$	24
3.5	Monopolo circular impresso - configuração da estrutura radiante com anel e disco	25
3.6	Monopolo circular impresso - estudo paramétrico de R_2 e R_3	26
3.7	Monopolo circular impresso - distribuição de corrente no estudo paramétrico de R_2 e R_3	26
3.8	Monopolo circular impresso - configuração das duas bandas com a espessura do anel	27
3.9	Monopolo circular impresso - configuração das duas bandas com a distância entre anel e disco	28
3.10	Monopolo circular impresso - ajuste das duas bandas com o comprimento da base (B_L)	29
3.11	Monopolo circular impresso - ajuste das duas bandas com a largura do substrato (S_W)	29
3.12	Monopolo circular impresso - distribuição de corrente para $2.45 GHz$ e $5.537 GHz$	30
3.13	Monopolo circular impresso - foto da antena construída	31
3.14	Monopolo circular impresso - resultados S_{11} medidos e simulados .	31
3.15	Monopolo circular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para $2.45 GHz$ no plano XZ	31
3.16	Monopolo circular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para $5.5 GHz$ no plano XY	32
3.17	Formas para modelos de antenas de dois braços	33
3.18	Monopolo triangular impresso - geometria simples	33
3.19	Monopolo triangular impresso - variação do comprimento de lado (T_L)	34
3.20	Monopolo triangular impresso - distribuição de corrente no triângulo simples a $5.537 GHz$	35

3.21	Monopolo triangular impresso - variação da espessura do triângulo (T_W)	35
3.22	Monopolo triangular impresso - configuração da estrutura radiante com dois ramos	36
3.23	Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação do comprimento de lado (T_L)	37
3.24	Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação da espessura (T_W)	37
3.25	Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação do comprimento do corte (C_L)	38
3.26	Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação da posição vertical do corte (D_Y)	39
3.27	Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação do comprimento de base da estrutura radiante (B_L)	39
3.28	Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação da largura do substrato (S_W)	40
3.29	Monopolo triangular impresso - foto da antena construída	41
3.30	Monopolo triangular impresso - distribuição de corrente para 2.45 GHz e 5.537 GHz	41
3.31	Monopolo triangular impresso - resultados S_{11} medidos e simulados	42
3.32	Monopolo triangular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para 2.45 GHz no plano XZ	42
3.33	Monopolo triangular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para 5.5 GHz no plano XY	43

Lista de Tabelas

3.1	Monopolo circular impresso - valores de configuração	30
3.2	Monopolo triangular impresso - valores de configuração	40



Introdução

Hoje em dia os sistemas sem-fios desempenham um grande papel na nossa sociedade, pois assistem na larga distribuição de informação entre utilizadores e/ou organizações. Um sistema deste tipo permite a mobilidade dos utilizadores, reduz a quantidade de *hardware* existente nas ligações, e como consequência torna-se uma solução mais viável para ligar um maior numero de utilizadores à rede.

Além de permitirem comunicação sem-fios, os dispositivos eletrónicos intervenientes nestes sistemas, tendem a assumir tamanhos cada vez mais reduzidos e um baixo consumo energético. Como tal, o sistema sem-fios torna-se objeto de constante estudo e desenvolvimento pois estes requisitos revelam-se como aspetos diferenciadores na aceitação de um produto no mercado.

Torna-se assim um desafio para o mundo tecnológico, ao nível empresarial, académico e governamental, responder ao desenvolvimento e harmonização dos sistemas sem-fios.

O canal de Radio-Frequências (RF), como é designado o conjunto de elementos responsáveis pela comunicação sem-fios, tem sofrido vários melhoramentos que se refletem na qualidade da ligação, normalmente dimensionada através de um processo designado de *link budget*. Deste processo fazem parte parâmetros que se dividem entre os canais RF dos dispositivos recetor e transmissor, e ainda do meio onde o sinal se propaga.

A antena, objeto de estudo desta dissertação, é o elemento que se situa na extremidade do canal RF, sendo responsável por fazer de interface entre o circuito

eletrónico e o meio de propagação (tipicamente o ar), que irá converter a energia de sinal guiado em energia de sinal radiado e vice-versa. No processo de *link budget*, a antena participa com o parâmetro de ganho (G), que deriva da sua eficiência (e) e diretividade (D). Estes e outros parâmetros servem para analisar e avaliar o desempenho da antena.

Uma antena é dimensionada para funcionar a uma ou mais frequências desejadas, assumindo um determinado tamanho e formato. Esta dissertação expõe este processo de dimensionamento ao mesmo tempo que apresenta duas soluções para antenas de dupla banda, para cobrir a banda Wi-Fi em 2.5GHz e 5GHz.

1.1 Motivação

Com o desenvolvimento das comunicações moveis, as antenas impressas alcançaram um novo foco para servir as diferentes tecnologias existentes nos terminais moveis até às antenas das estações-base. A informação em geral obtida nas revistas, simpósios, e artigos de conferencia, revelam que cerca de 50% de toda a comunidade na área das antenas esteja ativa no desenvolvimento das antenas *microstrip* e impressas, nas ultimas duas ou três décadas[1].

As antenas impressas são muito utilizadas atualmente em aplicações de dispositivos moveis pois a sua configuração básica é similar às placas de circuito impresso usadas em circuitos eletrónicos de baixas frequências. Este tipo de estrutura oferece vantagens básicas como o facto de ser discreta, de baixo custo, leve, de fabrico fácil, adequado para se adaptar a superfícies curvas, etc. Tudo isto tornou a tecnologia de antenas impressas atrativa, desde a sua fase inicial de desenvolvimento[1].

A Figura 1.1 mostra o cenário das comunicações sem-fios atual e de futuro, a realidade da 5ª geração. A voz mantém-se como serviço base deste ecossistema, onde continuam a ser suportados sistemas das gerações passadas, como o Global System for Mobile Communications (GSM), o Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) e o Long Term Evolution (LTE). Os novos serviços centram-se muito nas *Wireless Local Area Network* (WLAN) usando sistemas como o Wi-Fi e o Bluetooth, e tendo como principais requisitos o alto debito binário e baixa latência, e no caso das aplicações criticas, a confiabilidade dos sistemas.

Este cenário demonstra também que alguns dos dispositivos precisam de agregar diferentes tecnologias de comunicação, desde o, Global Positioning System (GPS), cada vez mais o Near Field Communication (NFC) e Radio Frequency

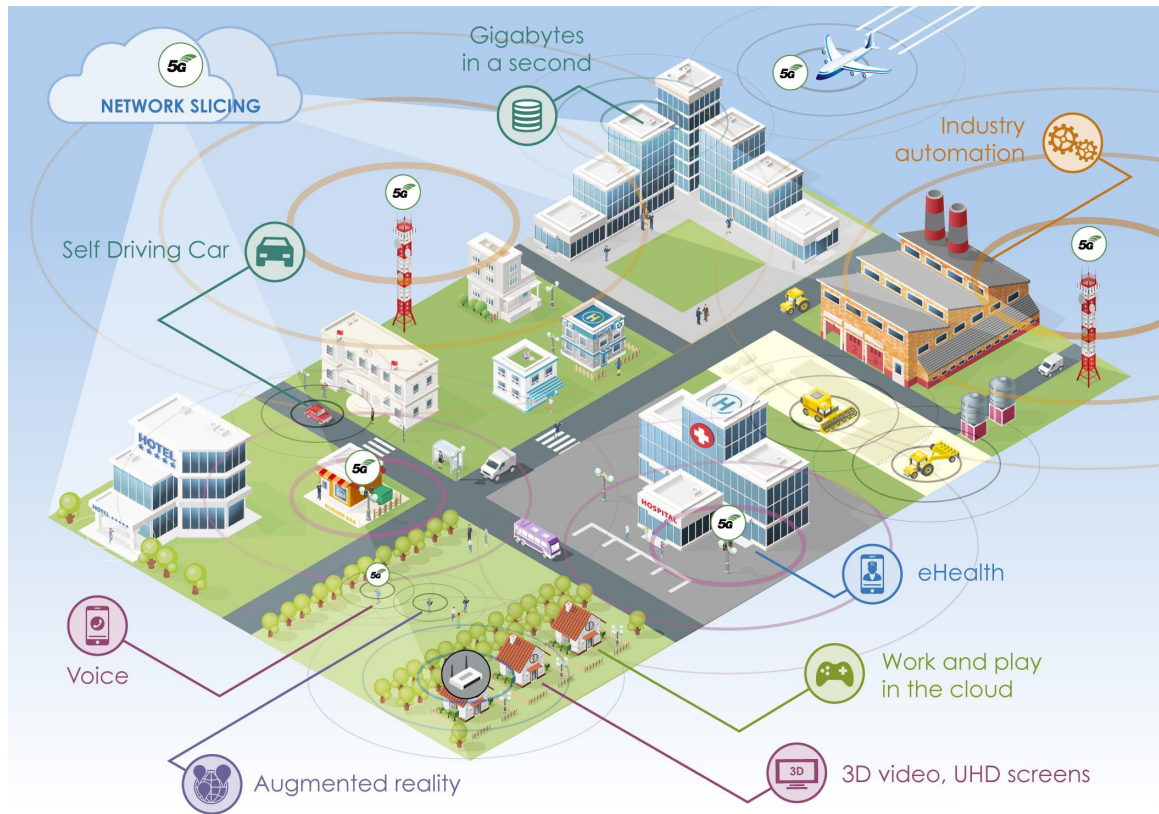


Figura 1.1: Cenário dos sistemas sem-fios da 5ª geração (retirado de www.etsi.org)

Identification (RFID). Com o surgimento de novas áreas tecnológicas e conceitos como o *Internet of Things* (IoT), surgem também as aplicações *Wireless Personal Area Network* (WPAN) ou ainda *Wireless Body Area Network* (WBAN). Estas aplicações cada vez mais emergentes implicam que qualquer dispositivo (sensor ou *wearable*) tenha conectividade à rede, além do seu tamanho reduzido e/ou baixo consumo energético.

É então necessário apostar em soluções *all-in-one*, que ofereçam múltiplas tecnologias e que ao mesmo tempo garantam os requisitos de tamanho e eficiência no seu funcionamento. Neste campo, a antena tem um papel fundamental.

1.2 Objetivos

Para esta dissertação foi proposto desenvolver duas antenas, do tipo monopolo impresso, de geometrias diferentes e ambas com característica de dupla banda,

a operar nas bandas de frequências abrangidas pelas aplicações Wi-Fi, nomeadamente nos $2.5GHz$ (entre $2.4GHz$ e $2.5GHz$) e $5GHz$ (entre $5.15GHz$ e $5.925GHz$).

São objetivos principais desta dissertação, explorar e documentar o dimensionamento do monopolo impresso. Neste processo é realizado um trabalho de pesquisa sobre os tópicos principais e são projetadas as antenas recorrendo ao ambiente de simulação, baseado no *software* CST Studio Suite. São ainda construídos, analisados e medidos os protótipos projetados. As principais conclusões são retiradas.

1.3 Organização do documento

Este documento está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1** - É feita a introdução ao tema abordado na dissertação e são apresentados os objetivos de uma forma geral;
- **Capítulo 2** - Neste capítulo são resumidos os principais parâmetros fundamentais que permitem avaliar uma antena. É apresentada a configuração padrão dos monopolos impressos e como é possível atingir o funcionamento com múltiplas bandas neste tipo de antena;
- **Capítulo 3** - É o capítulo de desenvolvimento e está dividido em dois subcapítulos, onde no primeiro se apresenta o monopolo impresso circular e no segundo, o monopolo impresso triangular. Pretende-se demonstrar o projeto das antenas, numa perspetiva de como podemos alcançar e controlar as duas bandas. São apresentadas simulações e os resultados finais medidos;
- **Capítulo 4** - O último capítulo, onde é feito o resumo dos resultados obtidos, são apresentadas as conclusões e algumas propostas para trabalho futuro.

1.4 Contribuições originais

Com a realização deste trabalho foi publicado o artigo seguinte:

Nuno Cascalho, Pedro Pinho e Vitor Cruz. Dual-band printed circular monopole for Wi-Fi, *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies*, August 30th-31th, 2018, Dublin, Ireland.

2

Antenas impressas

As antenas impressas surgiram na década de 1950, tendo como princípio base a integração da antena nas placas de circuito impresso, tirando proveito das linhas de transmissão *microstrip* já conhecidas à data, e com a vantagem de simplificar a massificação da produção de componentes micro-ondas. Só na década de 70 é que este tipo de antena ganhou mais atenção por parte da comunidade de investigação, passando também a serem designadas de antenas *microstrip*. Até então estas antenas radiavam com mais de 90% de eficiência e com uma largura de banda estreita, o que limitava o número de aplicações possíveis para que provasse ser útil.

Hoje em dia, com maior eficiência e largura de banda, as antenas impressas fazem parte do mundo das comunicações, em que o seu desenvolvimento e literatura surgem de uma forma quase descontrolada. Ganharam também outras formas e conseqüentemente novas designações, como é o caso do monopolo impresso, objeto de estudo desta dissertação.

Neste capítulo é apresentado o monopolo impresso com a sua configuração padrão, sendo também abordado o tema da multi-banda, nomeadamente em como esta pode ser atingida num monopolo impresso.

2.1 Monopolos impressos

Principais parâmetros fundamentais

Os parâmetros fundamentais são transversais a todos os tipos de antenas, sendo que muitos deles estão interligados entre si. Com estes parâmetros é possível descrever o desempenho de uma antena, e como tal, servem como base de comparação entre elas. São descritos de seguida os parâmetros fundamentais principais.

Diagrama de radiação, Intensidade de radiação e Diretividade

A intensidade de radiação (U) numa determinada direção é definida como a potência, por angulo solido (ou esteradiano), radiada por uma antena, sendo dada pela Equação 2.1, onde r é a distancia de onde se observa a antena e W_{rad} é a densidade de potência (em W/m^2).

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.1)$$

Já a diretividade (D) é um parâmetro adimensional e é definido como sendo a relação da intensidade de radiação numa certa direção, com a media da intensidade de radiação de toda a antena. Caso a direção não seja especificada, a direção de referência é normalmente aquela cuja intensidade de radiação é máxima (U_{max}), (D_{max}) assumindo então a formula da Equação 2.2, em que P_{rad} é a potência radiada.

$$D_{max} = \frac{4 \pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

O diagrama de radiação de uma antena é a representação gráfica das propriedades de radiação de uma antena (intensidade de radiação, diretividade, fase ou polarização) em função de coordenadas espaciais, fazendo-se apresentar por gráficos bidimensionais (polares) ou tridimensionais. Esta representação é normalmente normalizada pelo valor máximo medido, de forma a relativizar a distância entre emissor e recetor. É ainda apresentada em escala logarítmica de forma a evidenciar a diretividade da antena (lobos principais e secundários) e os pontos de menor valor (ou pontos nulos).

Como diagramas principais temos: o Isotrópico, que é definido como o diagrama ideal que radia de igual forma em todas as direções; o Diretivo, que atinge maior

radiação em determinadas direções, do que em outras; e o Omnidirecional, que num determinado plano tem um diagrama isotrópico e noutro plano ortogonal tem um diagrama direcional. Este ultimo está ilustrado na Figura 2.1 sendo o diagrama tipico resultante de um monopolo.

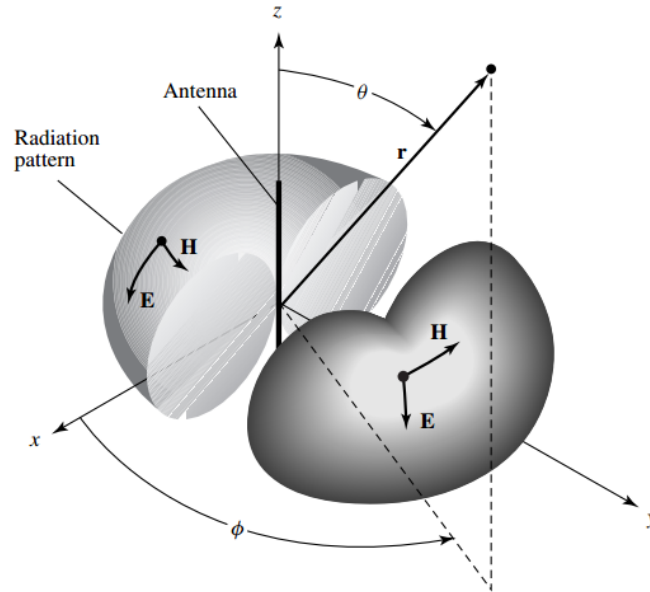


Figura 2.1: Diagrama de radiação omnidirecional [2]

Eficiência e Ganho

A eficiência é adimensional e representa na sua essência, o sinal radiado por uma antena, contabilizando as perdas. Isto é, pela Figura 2.2 podemos observar que irão existir perdas por reflexão do sinal (e_r) na interface da linha de transmissão com a antena, e perdas na estrutura da antena, que contempla as perdas nos condutores (e_c) e perdas do dielétrico (e_d). Como tal, a eficiência total (e_0) pode ser descrita pela Equação 2.3.

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.3)$$

Normalmente as eficiências relacionadas com a estrutura da antena (e_c e e_d) são difíceis de calcular, mas são possíveis de medir experimentalmente. Contudo não é possível discriminar os seus valores individualmente e o seu valor é contabilizado em conjunto, designando-se de eficiência de radiação (e_{cd}).

O ganho é um dos parâmetros mais importantes para descrever o desempenho

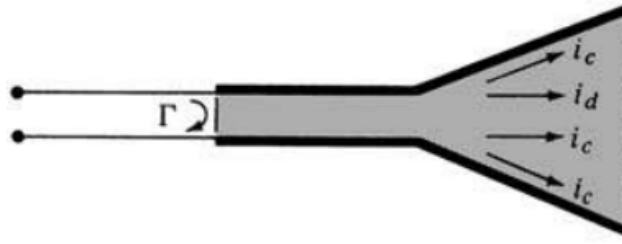


Figura 2.2: Perdas de uma antena (adaptado [2])

da antena, sendo bastante utilizado no cálculo de ligações dos sistemas de comunicações móveis. Podem ser definidos dois ganhos: o ganho G , que contabiliza apenas as perdas da estrutura da antena, e o ganho absoluto G_{abs} , que contabiliza adicionalmente as perdas por reflexão. As eficiências descritas acima relacionam o ganho com a diretividade, e considerando a direção máxima, G e G_{abs} podem ser calculados pela Equação 2.4 e Equação 2.5, respectivamente.

$$G_{max} = e_{cd}D_{max} \quad (2.4)$$

$$G_{abs,max} = e_0D_{max} \quad (2.5)$$

Parâmetro S_{11} e Largura de banda

A largura de banda (BW) de uma antena é definida pelas frequências máxima (f_{max}) e mínima (f_{min}) em torno da frequência central (f_c), normalmente a frequência ressonante. As frequências máxima e mínima são encontradas quando determinadas características da antena se encontram com valores aceitáveis para as normas aplicadas. Dessas características podem fazer parte a impedância de entrada, a largura de feixe ou a sua direção, o ganho, a direção do feixe e/ou a eficiência de radiação. A largura de banda pode ser dada pela Equação 2.6.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \quad (2.6)$$

A largura de banda é também conhecida por largura de banda de impedância, quando esta é determinada a partir da impedância de entrada da antena. No entanto não é medindo diretamente a impedância que se obtém a largura de banda. Na prática é feita a medição do coeficiente de reflexão (Γ), que define a relação entre o sinal entregue pela linha de alimentação à antena e o sinal refletido por

esta, podendo tomar valores entre 0 e 1, para uma má e boa adaptação, respectivamente. A medição desta reflexão é feita através de um *vector network analyzer* (VNA) que irá apresentar graficamente a adaptação da antena em função da frequência, mostrando o parâmetro S_{11} , a versão logarítmica do coeficiente de reflexão. Neste caso será de esperar que a adaptação ocorra quando existe a máxima transferência de potência da linha para a antena. O coeficiente de reflexão é considerado aceitável quando é menor que $-10dB$, sendo então a largura de banda determinada pelo intervalo de frequências abaixo desse valor.

Relação entre Monopolo e Dipolo

O dipolo de meio comprimento de onda, ou $\lambda/2$, é uma das antenas mais populares. Na sua forma mais simples, este pode ser construído através de um fio e ser alimentado a meio, tal como é ilustrado na Figura 2.3. Este modelo garante uma distribuição de corrente sinusoidal ao longo da sua estrutura, com um máximo de amplitude no centro.

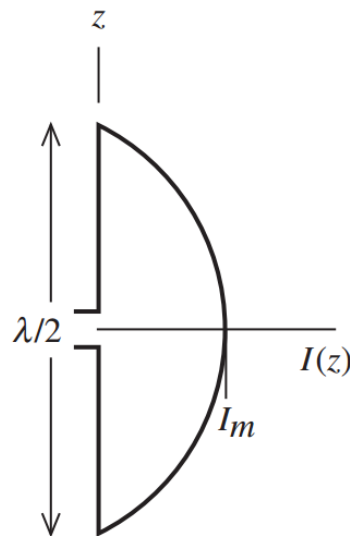


Figura 2.3: Estrutura de um dipolo de meia-onda [3]

Um monopolo é um dipolo dividido ao meio no seu ponto de alimentação, e colocado junto de um plano de massa, tal como é apresentado na Figura 2.4. Quando um monopolo é montado num plano de massa perfeito (planar, de extensão infinita e perfeitamente condutor), as características de impedância e diagrama de radiação podem ser deduzidas das características de um dipolo com duas vezes o seu comprimento posicionado no espaço livre. Isto é, um monopolo alimentado

na sua base, terá a sua impedância de entrada igual a metade da impedância de um dipolo alimentado ao centro.

Quanto ao diagrama de radiação do monopolo, será o mesmo que um dipolo posicionado em espaço livre, uma vez que o campo acima do plano da imagem do monopolo é o mesmo. Como tal, o monopolo que é alimentado contra um plano de massa perfeito, irá radiar metade da potencia total do dipolo equivalente porque a potencia é distribuída da mesma forma mas em metade do espaço. Esta diferença irá resultar numa duplicação de diretividade, ou seja o monopolo terá duas vezes a diretividade do dipolo.

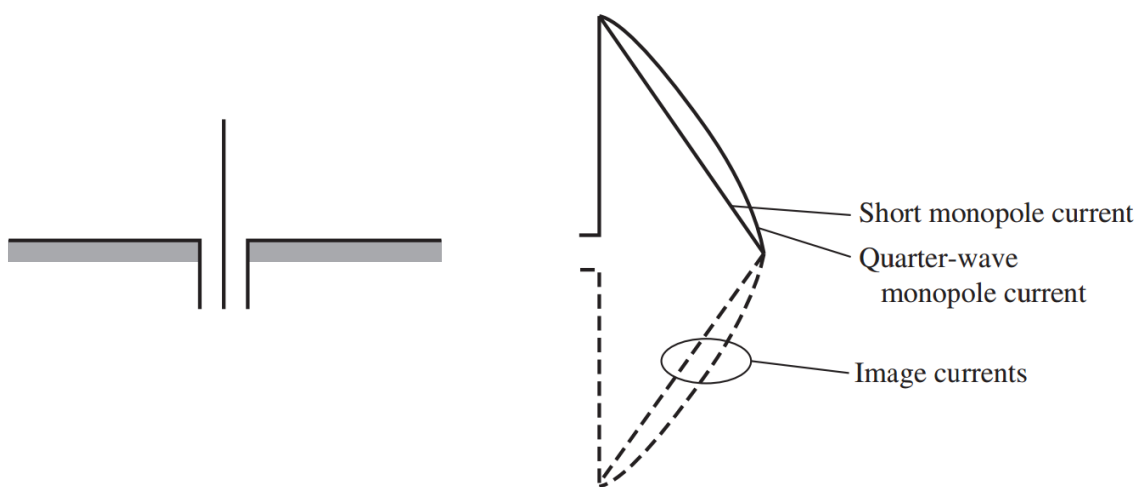


Figura 2.4: Estrutura de um monopolo e modelo equivalente com distribuição de corrente [3]

Na prática, dado que o plano de massa é finito, esta relação não é totalmente aplicável. Esta teoria que é descrita para os monopolos em geral, é também aplicada aos monopolos impressos.

Uma vez que os dispositivos moveis impõem restrições de tamanho, os monopolos são geralmente preferidos aos dipolos por conseguirem ter metade do seu tamanho e oferecerem um diagrama de radiação omnidirecional.

2.2 Configuração dos monopolos

Composição padrão

Atualmente existe uma grande variedade de tipos de monopolos impressos, onde se destaca o material utilizado, a geometria da estrutura radiante e os elementos

parasitas adicionados, que fazem uma antena ser diferente de todas as outras. No entanto, todas elas derivam de uma composição padrão que acabam por manter até ao seu estado final de desenvolvimento. Fazem parte desta composição: o substrato, o plano de massa, a linha de alimentação e a estrutura radiante. Na Figura 2.5 é ilustrada esta composição e a disposição de cada elemento, que tem como exemplo uma estrutura radiante com geometria quadrada.

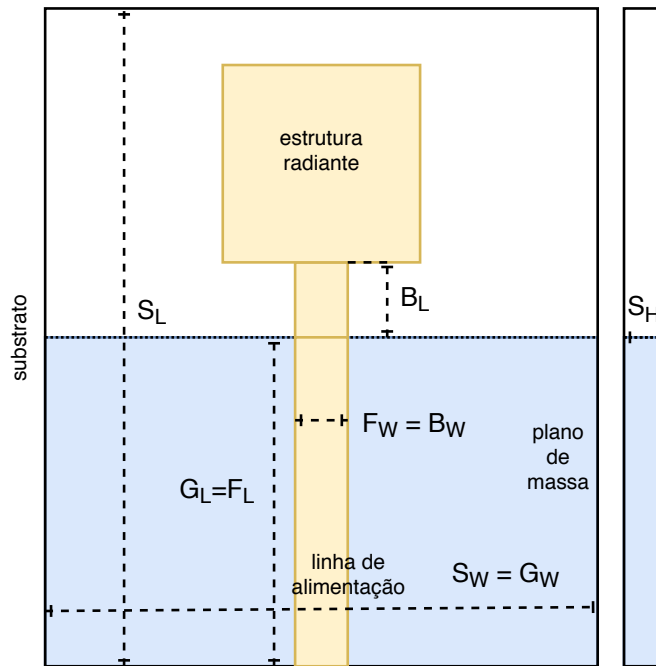


Figura 2.5: Configuração padrão do monopolo impresso

Substrato

O substrato é o elemento dielétrico da antena, encontra-se entre o plano de massa e a linha de alimentação *microstrip* e estrutura radiante, e normalmente é apresentado por dois parâmetros: a sua constante dielétrica ou permitividade relativa (ϵ_r) e a sua altura (S_H ou simplesmente h). Para fazer uma seleção criteriosa podem ser adicionados, o fator de qualidade e o coeficiente de temperatura para a frequência de ressonância.

Quando se dimensionam sistemas de dispositivos moveis, o tamanho é relevante e tendencialmente pretende-se que este seja reduzido. Na tentativa de reduzir a dimensão de uma antena, devem ser escolhidos substratos com uma constante

dielétrica alta. Contudo, essa escolha pode levar a um aumento no custo de produção, aumento nos desvios de frequência devido à tolerância do material e podem ser obtidas larguras de banda mais estreita. Em [4] é apresentado um estudo sobre a metodologia *Multiple Attribute Decision Making* (MADM), utilizando os atributos mencionados anteriormente para obter o substrato mais indicado ao sistema a desenvolver. É ainda apresentado como exemplo os critérios que podem ser aplicados à seleção de um substrato para um *router* WLAN. Neste caso, deve-se optar por um substrato de baixa permitividade para obter maior largura de banda, um fator de qualidade alto que oferece melhor seletividade, uma ressonância forte e maior estabilidade na frequência, e ainda um coeficiente de temperatura baixo para garantir que não existem desvios na frequência com o aquecimento do equipamento.

Em [5] é feito um estudo sobre o efeito da altura do substrato, nos parâmetros fundamentais da antena. O material usado é o Rogers RT/Duroid 6006, com ϵ_r de 6.15, e a variação da altura foi feita para valores comercialmente disponíveis: 0.254mm, 0.635mm, 1.27mm, 1.6mm. Dos resultados obtidos conclui-se que a altura afeta a adaptação da antena, havendo algum desvio na frequência, e afeta a largura de banda em geral. À medida que a altura aumenta, a largura de banda e a frequência diminuem, pelo que ao diminuir o tamanho do monopolo é possível compensar essa desadaptação e voltar a ter a frequência original (superior).

Plano de massa

Ao contrário das antenas *microstrip*, o monopolo impresso tem um plano de massa que cobre uma parte do substrato e delimita a área entre a linha de alimentação e a estrutura radiante. O facto de não ter plano de massa na zona da estrutura radiante, irá permitir que a antena tenha um diagrama de radiação omnidirecional. Ainda que faça parte da linha de alimentação *microstrip*, o seu tamanho tem impacto no desempenho da antena e a modificação da sua geometria tem sido explorada para atingir certos requisitos.

Em [6] é apresentado um estudo sobre métodos para redução dos efeitos associados ao plano de massa que limitam o desempenho da antena, nomeadamente o funcionamento das frequências de ressonância inferiores e a largura de banda possível de atingir quando o plano de massa tem um tamanho reduzido. Este estudo apresenta duas soluções: a primeira passa por introduzir assimetria na alimentação do monopolo, ou seja, a linha de alimentação é deslocada no plano horizontal; na segunda solução é feita uma extensão ao plano de massa, criando

uma janela em torno da estrutura radiadora, na parte inferior do substrato. Com a primeira solução foi demonstrado ser possível aumentar a largura de banda de uma forma significativa quando o plano de massa é mais reduzido. Já com a segunda solução foi possível quebrar o limite imposto pelo tamanho do plano de massa, reduzindo a frequência de ressonância inferior, sem que fosse aumentado o substrato.

O caso acima apresenta um método onde é feita uma extensão ao plano de massa, mas existem também métodos em que são feitas alterações à sua geometria original. Esses métodos são designados de *Defected Groundplane Structures* (DGS) e apesar de serem técnicas recentes, com os primeiros trabalhos propostos em 2005, têm vindo a ser largamente utilizadas. Dentro das suas varias aplicações aparece a redução da polarização cruzada, filtragem rejeita-banda, miniaturização da antena ou aumento da largura de banda[7]. Na Figura 2.6 são apresentados alguns exemplos de monopolos impressos com plano de massa trapezoidal, que segundo [8], melhoraram a adaptação da estrutura radiadora à linha de alimentação, aumentando a energia radiada. Também na Figura 2.7 são apresentados exemplos de estruturas DGS que podem surgir no plano de massa, tal como demonstrado na Figura 2.8.

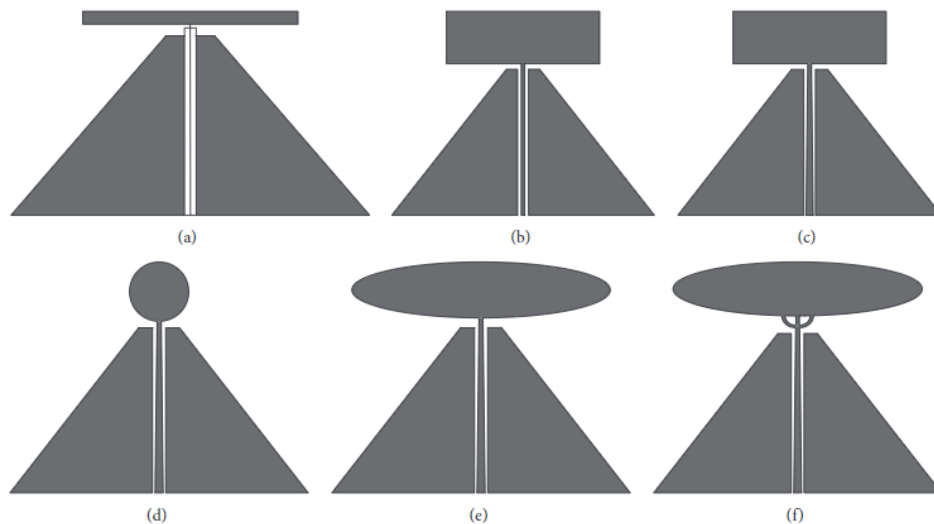


Figura 2.6: Antenas impressas com diferentes planos de massa [8]

Linha de alimentação

A linha de alimentação de um monopolo é tipicamente uma linha *microstrip*, muito utilizada em aplicações radio, principalmente quando envolvem antenas

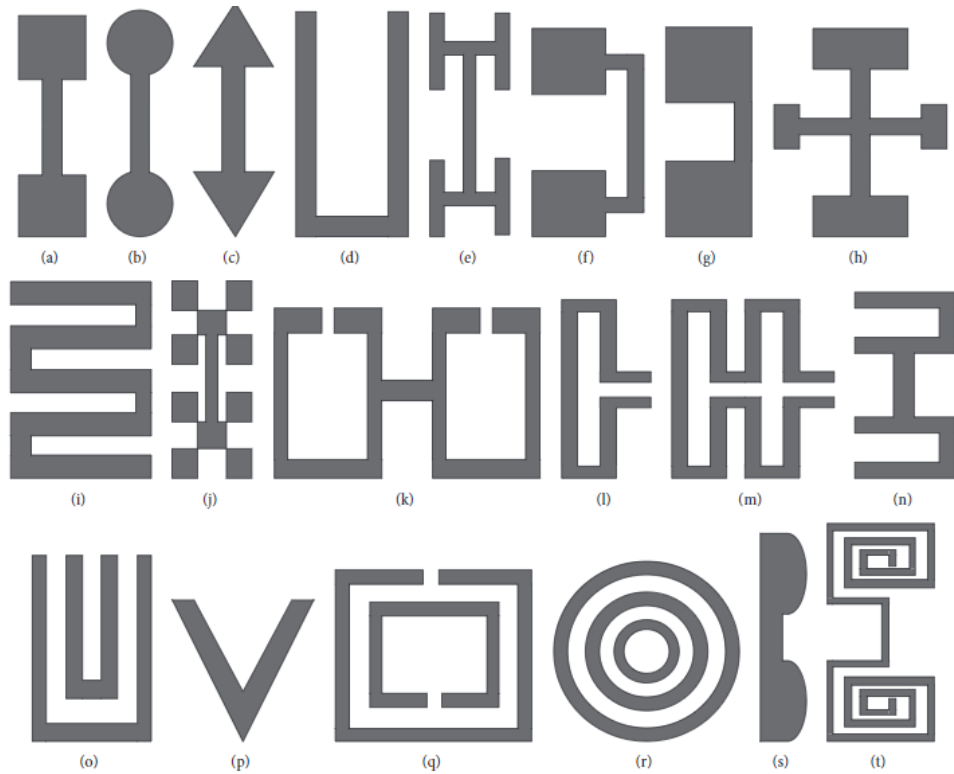


Figura 2.7: Estruturas DGS mais comuns para antenas impressas [8]

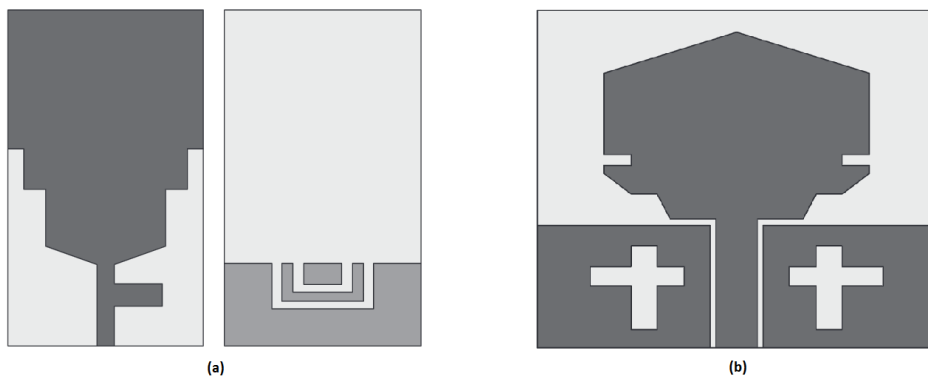


Figura 2.8: Monopolos impressos com estruturas DGS [8]

impressas. Na maioria das vezes serve como guia de onda, mas também é usada para criar filtros, acopladores e outras estruturas em micro-ondas. A operação destas estruturas são opostas à operação das antenas, pois nas linhas de transmissão dá-se o privilégio às ondas guiadas e nas antenas, à fuga das ondas para o meio envolvente. Um exemplo de linha *microstrip* é apresentado na Figura 2.9. A impedância deste tipo de linha é complexa de calcular, e não fazendo parte do âmbito desta dissertação, foi utilizada a ferramenta *online* disponível em emtalk.com/mscalc.php. Nesta ferramenta entram como parâmetros de entrada, a constante

dielétrica (ϵ_r), a altura do substrato (S_H), a frequência para a qual a linha estará adaptada, a impedância característica e o comprimento elétrico da linha. Como resultado são obtidos os valores da largura da linha (F_W) e comprimento da linha (F_L).

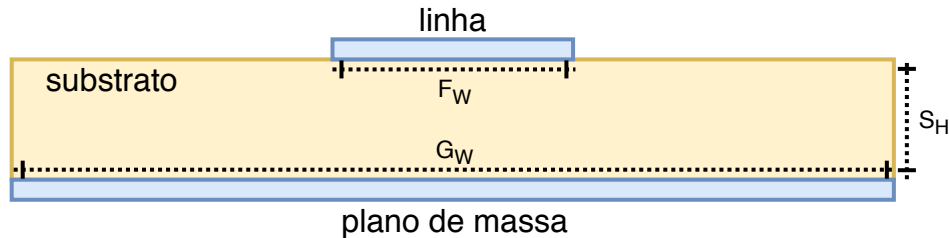


Figura 2.9: Linha *microstrip*

Algumas geometrias da Figura 2.7 podem surgir junto à linha de alimentação, ou mesmo por baixo, sendo usadas como condensador e/ou indutância para compensar a impedância de entrada e assim aumentar a largura de banda.

Geometrias

Na Figura 2.10 são apresentadas algumas formas básicas que podem ser encontradas em muitos trabalhos. Outros, partem destas formas, introduzindo algumas alterações até atingirem os requisitos das suas aplicações. O estudo feito em [9] divide estas formas nas categorias: quadrada, retangular, triangular, hexagonal, circular e elipsoidal. O estudo pretende explicar como é que a largura de banda pode aumentar com o aumento da dimensão lateral da forma, como por exemplo, a elipse. É defendido também que a distância entre a parte inferior da geometria e o plano de massa (parâmetro B_L na Figura 2.5), é um parâmetro importante que define a adaptação da antena à linha, e que para diferentes formas este irá ter diferentes desempenhos. É ainda concluído que as formas circulares e elípticas oferecem boa largura de banda.

Além de se escolher uma geometria para a antena, é também necessário fazer algum dimensionamento prévio. Segundo [2], é possível obter a impedância de entrada de um monopolo através das seguintes expressões simples e aproximadas. Definindo G pela Equação 2.7

$$G = kl \quad (2.7)$$

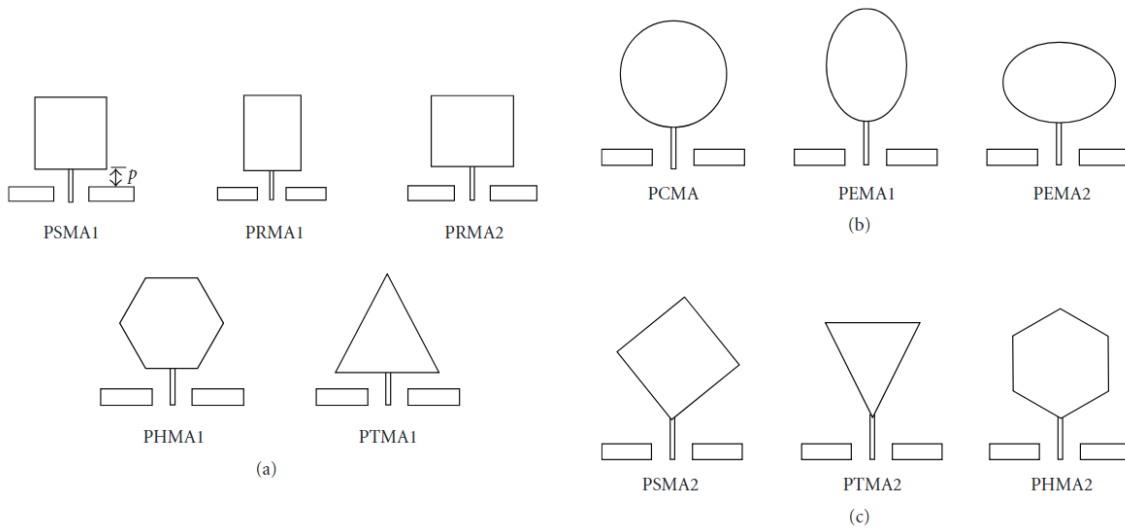


Figura 2.10: Diferentes formas básicas para monopolos impressos [9]

onde l é o comprimento total do elemento e $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, então é possível calcular a impedância de entrada usando a Equação 2.8

$$\begin{aligned} R_{in} &= 10G^2, & 0 < l < \lambda/8 \\ R_{in} &= 12.35G^{2.5}, & \lambda/8 \leq l < \lambda/4 \\ R_{in} &= 5.57G^{4.17}, & \lambda/4 \leq l < 0.3183\lambda \end{aligned} \quad (2.8)$$

em que resultará respectivamente para cada um dos casos, uma resistência com o valor máximo de 6.17Ω , 38.19Ω e 100.25Ω . Estas expressões simplificadas podem ser úteis no dimensionamento de um monopolo, usando a impedância como parâmetro de entrada para determinar o comprimento do monopolo, resultando na Equação 2.9.

$$\begin{aligned} l &= \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt[2]{\frac{R}{10}}, & 0 < l < \lambda/8 \\ l &= \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt[2.5]{\frac{R}{12.35}}, & \lambda/8 \leq l < \lambda/4 \\ l &= \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt[4.17]{\frac{R}{5.57}}, & \lambda/4 \leq l < 0.3183\lambda \end{aligned} \quad (2.9)$$

Além das geometrias básicas existem outras mais complexas, como por exemplo as da Figura 2.7. Qualquer uma destas, alimentada em uma das extremidades, poderia assumir o papel de um monopolo, contudo aumentaria a complexidade no controlo das bandas de interesse e poderiam não ser atingidos os requisitos da aplicação. A linha de meandro e a espiral, (i) e (t), respetivamente, são dois

exemplos de geometrias bastante utilizadas, principalmente quando se pretendem atingir frequências baixas relativamente ao tamanho do monopolo. Isto é, uma vez que o comprimento do monopolo dado pela Equação 2.9 aumenta com a diminuição da frequência de ressonância, ao usar uma das geometrias mencionadas acima será possível manter um tamanho reduzido no total da antena. Por tamanho total da antena, entende-se o tamanho do substrato com todos os componentes da configuração padrão incluídos.

2.3 Multi-banda

Com o uso generalizado do sistema GSM, que emprega as duas bandas 900MHz e 1800MHz , a operação de telemóveis com multi-banda está a avançar rapidamente. Nos dias de hoje a aplicação de sistemas multi-banda com uma variedade de combinações de bandas de frequência está a acelerar, enquanto o *roaming* internacional está a progredir globalmente, a capacidade nas comunicações está a aumentar e novas funcionalidades vão sendo adicionadas, incluindo o GPS (1.57GHz) e o Bluetooth (2.4GHz). Espera-se, portanto, que todos os dispositivos se tornem compatíveis com sistemas multi-banda num futuro próximo. Em tais sistemas, a antena multi-banda é definitivamente um dos elementos chave, uma vez que é compatível com todas as bandas de frequência sem recorrer a múltiplas antenas [10].

O telemóvel comum, como anteriormente referido, trabalha nas bandas 800MHz ou 900MHz , e 1800MHz ou 1900MHz , requer que a antena opere a frequências com cerca de uma oitava de diferença entre si, e que tenham largura de banda com cerca de 15% e 24%, respetivamente. As antenas usadas atualmente em dispositivos moveis, não estão salientes, são completamente internas e usam apenas um ponto de alimentação. Uma possível antena pode ser uma hélice com duas secções de diferentes ângulos de inclinação e diferentes diâmetros. Outra solução pode ser uma antena com linha em meandro com duas secções. No entanto a mais popular para antena interna, designa-se de Planar Inverted-F Antenna (PIFA) e pode ganhar vários formatos consoante a disposição e tamanho do equipamento móvel. Uma implementação comum é esta ter duas secções (ou ramos) que derivam de um ponto comum, a secção maior para a banda inferior e a secção menor para a banda superior, sendo que cada uma das secções é comprida em cerca de um quarto do comprimento de onda de cada banda. Frequentemente uma das secções encontra-se dobrada à volta do plástico que suporta a antena ou é

impressa num substrato flexível que é encaixado no dispositivo. Por vezes são também adicionadas aberturas nas secções para aumentar a largura de banda da antena. A Figura 2.11 mostra um exemplar deste tipo de antenas num terminal móvel comercial.

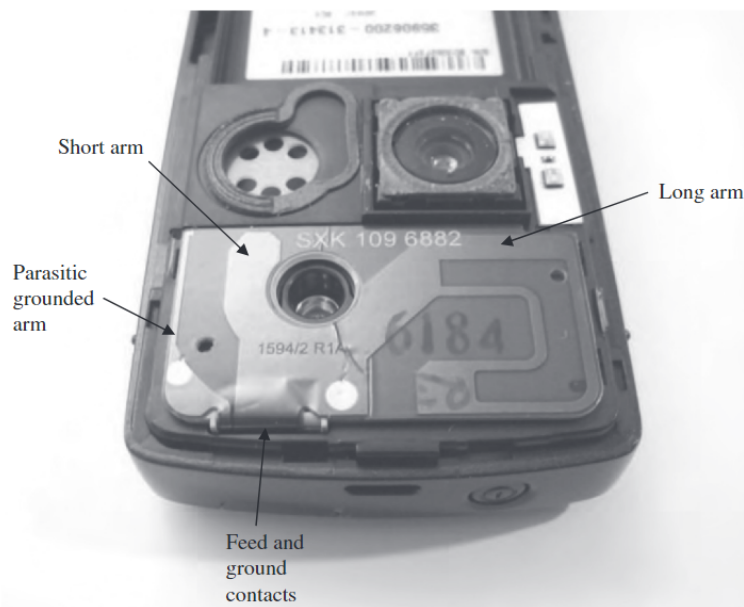


Figura 2.11: Terminal móvel comercial Sony Ericsson W810 com antena PIFA a cobrir as bandas $850\text{MHz}/900\text{MHz}$ e $1800\text{MHz}/1900\text{MHz}$ [3]

Em [11] é apresentado um monopolo impresso de dupla banda, que cobre as bandas MICS ($402 - 405\text{MHz}$) e ISM ($2.4 - 2.48\text{GHz}$). Este monopolo tem o formato de um Ω invertido, desenhado por duas linhas (ramos) circulares de diferentes comprimentos, cada um para cobrir a sua banda. Para melhorar a largura de banda e adaptação da antena, são adicionados dois *stubs* ao plano de massa, criando parcialmente uma janela em volta da estrutura radiante, mas na parte inferior do substrato. A antena final tem dimensões de $47 \times 40\text{mm}^2$, cobrindo 39.8% e 14.1% de largura de banda para a banda MICS e ISM, respetivamente. Este tipo de modificações feitas ao plano de massa, particularmente quando se trata de extensões, coloca a antena na categoria *Sleeve*. As antenas *Sleeve* datam de 1947 e ao longo dos anos têm sido alvo de vários estudos acerca da distribuição de corrente que percorre a sua superfície. Têm sido bastante usadas em sistemas que requerem múltiplas ressonâncias, estruturas reduzidas e largura de banda elevada. Quando as extensões são adicionadas ao plano de massa, atuam como elementos parasitas sobre a estrutura principal e podem criar duas situações: ou criam novos modos ressonantes, ou aumentam a largura de banda do modo ressonante criado pela estrutura principal.[12]

Também em [13] e [14] são apresentados monopolos impressos de dupla banda, desta vez explorando as geometrias retangulares, para cobrir aplicações Bluetooth, WLAN e WiMAX. No primeiro caso (Figura 2.12) o dimensionamento inicia-se com um quadrado, este é dividido em três secções iguais com dois cortes verticais, e termina retirando o conteúdo condutor das secções laterais. Esta antena apresenta uma banda superior com uma largura de banda inferior de 8.76% centrada em $2.5GHz$, e uma largura de banda superior de 75.3% centrada em $4.25GHz$.

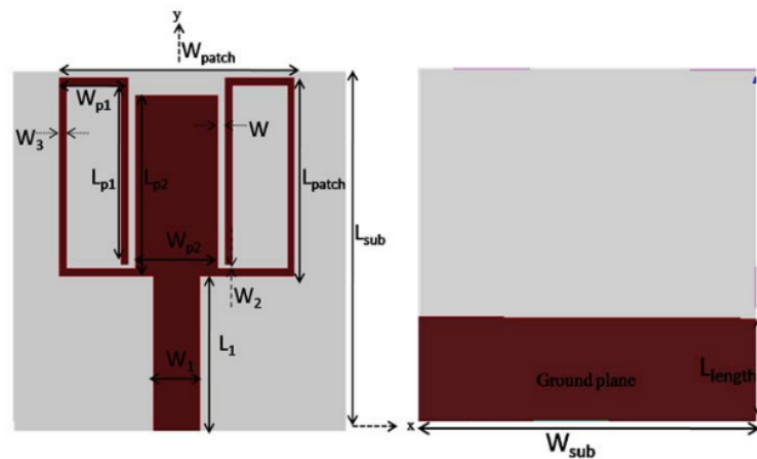


Figura 2.12: Geometria de monopolo impresso multi-banda para Bluetooth, WLAN e WiMAX[13]

No segundo caso (Figura 2.13) o monopolo é construído segundo duas linhas verticais, com diferentes tamanhos, em comprimento e largura. Com esta geometria foi possível obter 46.25% de largura de banda centrada em $2.5GHz$ e 31.3% de banda centrada em $4.92GHz$.

Conclui-se então que para criar monopolos múltipla banda será necessário distribuir a corrente por múltiplos caminhos na estrutura principal radiante, e eventualmente usar elementos parasitas para melhorar as condições de largura de banda e adaptação.

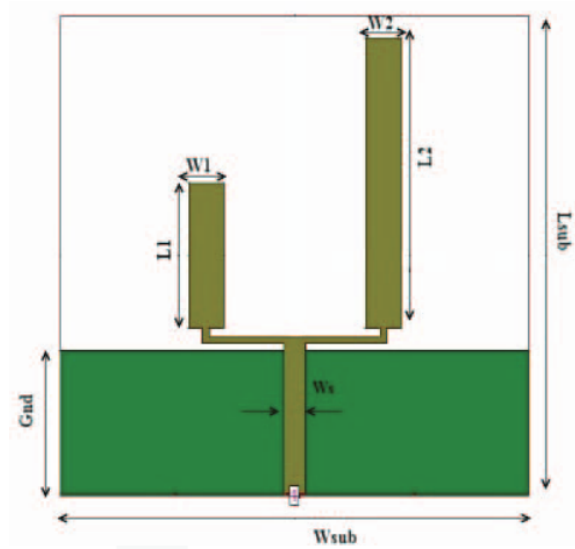


Figura 2.13: Geometria de monopolo impresso multi-banda para Bluetooth e WLAN[14]

3

Dimensionamento de monopolos impressos de dupla banda

Neste capítulo são apresentadas duas soluções para monopolos impressos de dupla banda, com geometrias circular e triangular, pensadas para serem de configuração simples em relação às frequências de ressonância. As frequências de ressonância encontram-se nas bandas Wi-Fi, mais propriamente entre 2.4 GHz e 2.5 GHz , para a banda inferior, e de 5.15 GHz até 5.925 GHz , para a banda superior. Em cada uma das soluções são apresentadas as geometrias e os parâmetros de configuração, tal como as simulações realizadas sobre os principais parâmetros, para atingir os resultados pretendidos.

Na construção dos monopolos foi utilizado o substrato do tipo Isola Astra MT3.0 com permitividade relativa (ϵ_r) de 3, tangente de perdas ($\tan\delta$) de 0.0027 e com 0.76 mm de altura. Na fase de simulação das antenas foi utilizado o *software* CST Studio Suite.

3.1 Monopolo Circular

A geometria circular foi apresentada anteriormente como sendo uma boa opção para aplicações que requerem grande largura de banda e como tal foi escolhida para dar resposta à necessidade de cobrir a banda superior, com cerca de 1 GHz de largura de banda.

3.1.1 Geometria e configuração

Para iniciar o desenvolvimento desta antena começou-se por desenhar um monopolo com a geometria de um disco (Figura 3.1) e observar a sua resposta.

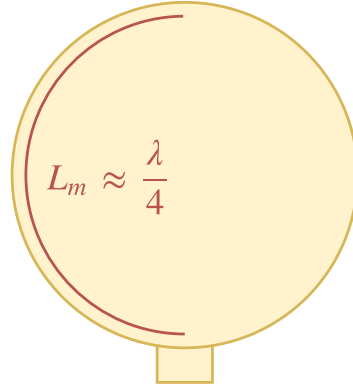


Figura 3.1: Configuração em disco para monopolo circular

Nesta geometria a frequência de ressonância é variável dependendo do raio que irá definir o perímetro do disco (Equação 3.1). A corrente que entra com amplitude máxima no disco, circula pela borda deste com maior distribuição e atinge o mínimo de amplitude no extremo superior, é respetiva ao comprimento de onda da frequência de ressonância. Considerando o perímetro do disco e que a sua metade corresponde ao comprimento do monopolo, L_m , obtém-se através da Equação 2.9, para uma linha de 50Ω (R), o raio do disco em função da frequência de ressonância (Equação 3.2).

$$P_{circulo} = 2 \pi r \quad (3.1)$$

$$\frac{P_{circulo}}{2} = L_m \Leftrightarrow \frac{2 \pi r}{2} = \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \frac{2 \pi r}{2} = 0.27 \lambda \Leftrightarrow r = \frac{0.27 \lambda}{\pi} \quad (3.2)$$

Para a banda inferior, centrada em 2.45 GHz , temos um raio teórico de 10.52 mm . De forma a obter o resultado pretendido, é feito um estudo paramétrico sobre o raio. Inicialmente o estudo é feito na entrada da estrutura radiante, considerando uma fonte de sinal com impedância de 50Ω para simular a linha de alimentação. No gráfico da Figura 3.2 é observado que com o aumento do raio, a frequência de ressonância vai diminuindo, correspondendo ao comportamento esperado.

O gráfico da Figura 3.3 mostra a impedância de entrada, nas suas componentes real e imaginária, com adaptação feita para $2,45 \text{ GHz}$, onde se obtém uma impedância real perto de 50Ω e uma componente imaginária de 14Ω , querendo isto

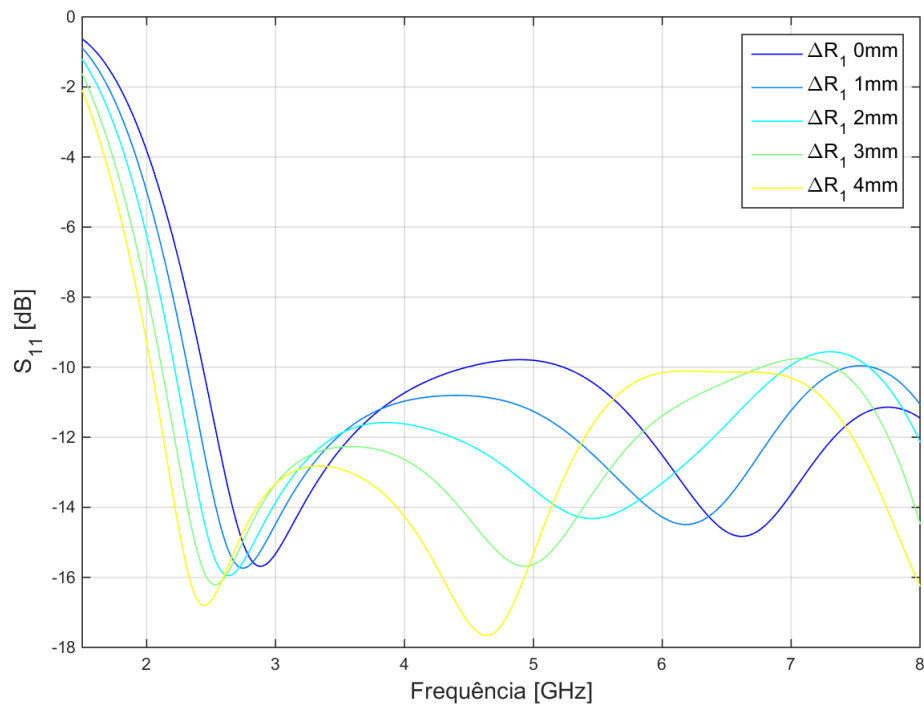


Figura 3.2: Monopolo circular impresso - variação S_{11} com o raio do disco

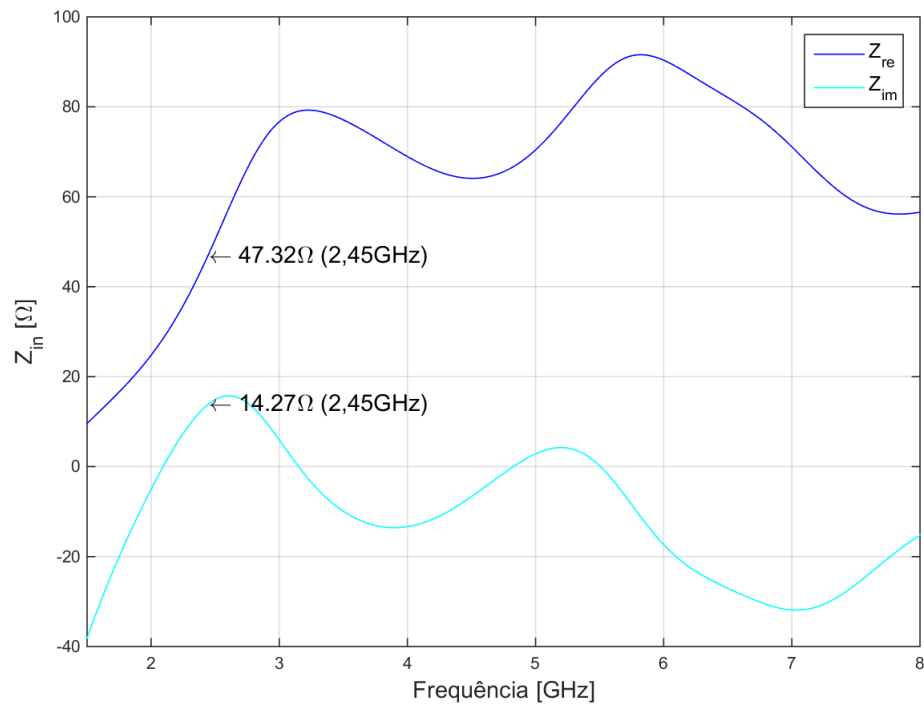


Figura 3.3: Monopolo circular impresso - impedância de entrada do monopolo em disco

dizer que neste ponto irá haver máxima transferência de potencia de sinal da linha para a antena, ainda que com algumas perdas.

O raio do disco atingiu um valor final de $14,5 \text{ mm}$ até ser atingido o resultado pretendido, e a distribuição de corrente da Figura 3.4 mostra o comportamento já descrito anteriormente.

Verifica-se ainda na Figura 3.2 que a antena tem uma boa adaptação para frequências superiores, que devidamente controladas, podem ocupar uma banda superior pretendida.

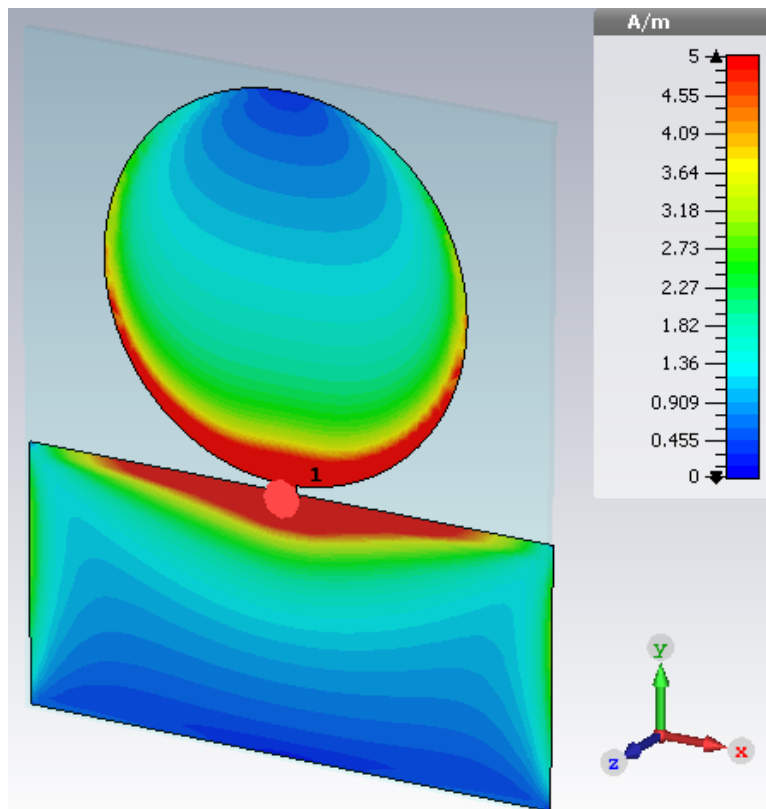


Figura 3.4: Monopolo circular impresso - distribuição de corrente do monopolo em disco a $2,45 \text{ GHz}$

Para que o monopolo funcione numa segunda banda de interesse, deve ser adicionado outro controle à semelhança da borda do disco, de modo a que no limite a primeira banda seja minimamente afetada. Tal pode ser alcançado criando outro caminho a ser percorrido pela corrente de entrada, que para uma banda superior, deverá ser um caminho mais curto.

Neste sentido, foi adicionada uma abertura circular na estrutura radiante, criando um disco mais pequeno no interior e um anel exterior. Esta geometria é apresentada na Figura 3.5 e tem como principais parâmetros de configuração, R_1 que define o raio exterior do anel, R_2 para definir o raio interior do anel, e R_3 para definir o raio do disco. Esta divisão degrada a banda inferior devido ao acoplamento das duas secções, mas a configuração irá permitir o seu reajuste e também

o controlo sobre a banda superior.

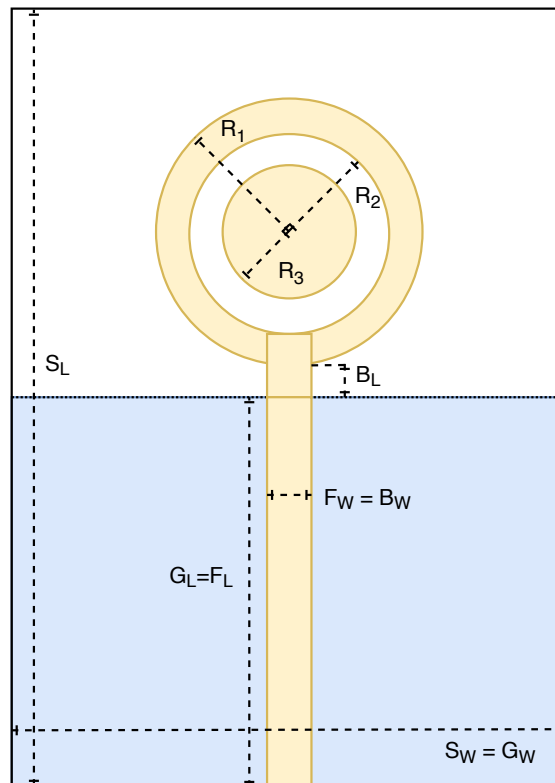


Figura 3.5: Monopolo circular impresso - configuração da estrutura radiante com anel e disco

Para a banda superior, centrada em 5.537 GHz obtêm-se um raio R_3 de 4.6 mm , pela Equação 3.2. Já para R_2 considera-se inicialmente 5.6 mm , deixando assim 1 mm entre o anel e o disco.

O gráfico da Figura 3.6 mostra o resultado obtido para esta nova configuração (quando ΔR_2 e ΔR_3 têm 0 mm). O valor teórico de R_3 pouco alterou o parâmetro S_{11} de modo a obter-se uma melhor adaptação da banda dos 5 GHz , pelo que se procedeu a um estudo paramétrico dos raios R_2 e R_3 . Nesta situação seria de esperar que ao diminuir os dois raios, a banda superior centrada entre os 4 GHz e os 5 GHz subisse, o que não se verificou, tal como mostram os resultados ainda na Figura 3.6.

As distribuições de corrente presentes na Figura 3.7, são relativas ao estudo paramétrico no ponto inicial (a) e no ponto em que ambos os raios são mais reduzidos (b). Pode-se observar que quando os raios são mais reduzidos a densidade de corrente na zona do disco interior é quase inexistente, pelo que os raios deixam de ter influencia no ajuste da banda superior.

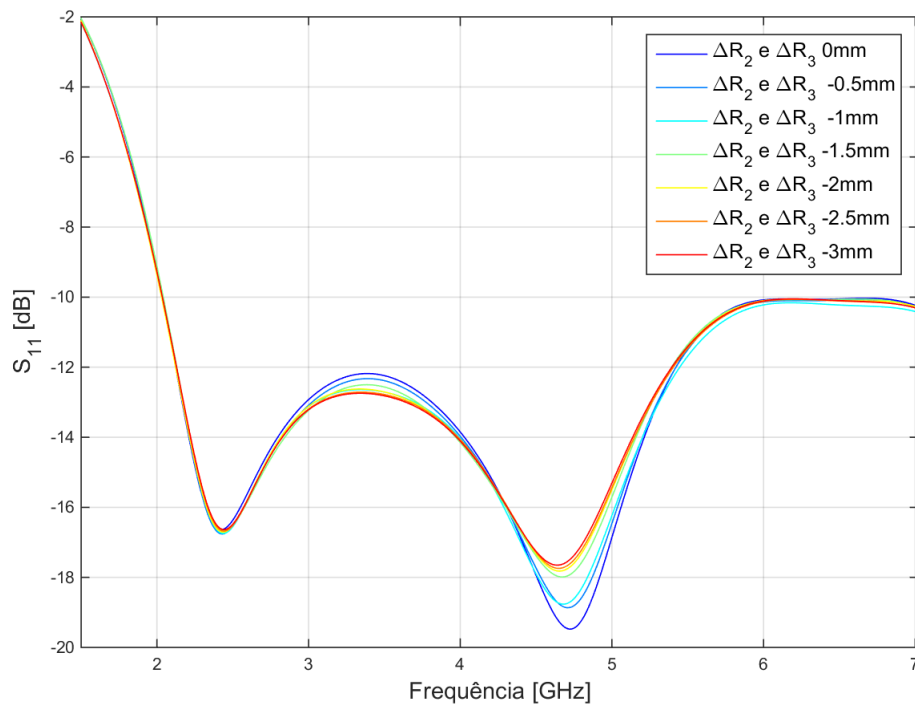


Figura 3.6: Monopolo circular impresso - estudo paramétrico de R_2 e R_3

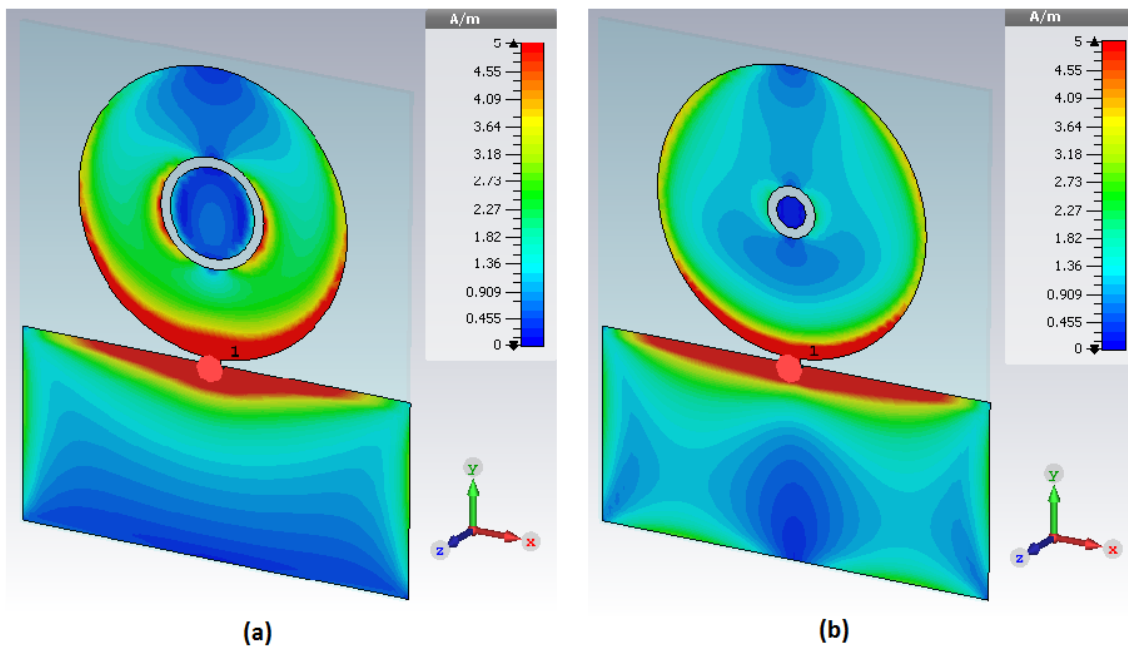


Figura 3.7: Monopolo circular impresso - distribuição de corrente no estudo paramétrico de R_2 e R_3

Para configurar o monopolo de forma a obter as duas bandas pretendidas é necessário fazer um estudo paramétrico sobre os três raios, até obter a combinação

mais próxima do resultado esperado. O objetivo será diminuir o raio exterior (R_1) para concentrar mais corrente no interior junto a R_2 e R_3 , e compensar a consequente degradação da banda inferior com o acoplamento entre o disco e o anel.

Nesta fase, R_1 foi sendo reduzido a cada estudo sobre R_2 e R_3 (em simultâneo) ou sobre R_3 (com R_2 fixo), como se explica de seguida. A Figura 3.8 mostra como a variação da espessura do anel, alterando R_2 e R_3 , pode influenciar no ajuste do parâmetro S_{11} , em que a banda superior é fortemente afetada com esta variação e a banda inferior quase se mantém na mesma frequência. Esta parametrização pode funcionar como sintonização em larga escala.

Outra possibilidade além da espessura do anel, é a distância entre anel e disco, fazendo variar apenas R_3 . Como se pode observar no gráfico da Figura 3.9, a banda superior é novamente afetada em larga escala, contudo a banda inferior mantém-se praticamente inalterável. Esta variação de R_3 pode ser usada para definir a distância entre as duas bandas de interesse.

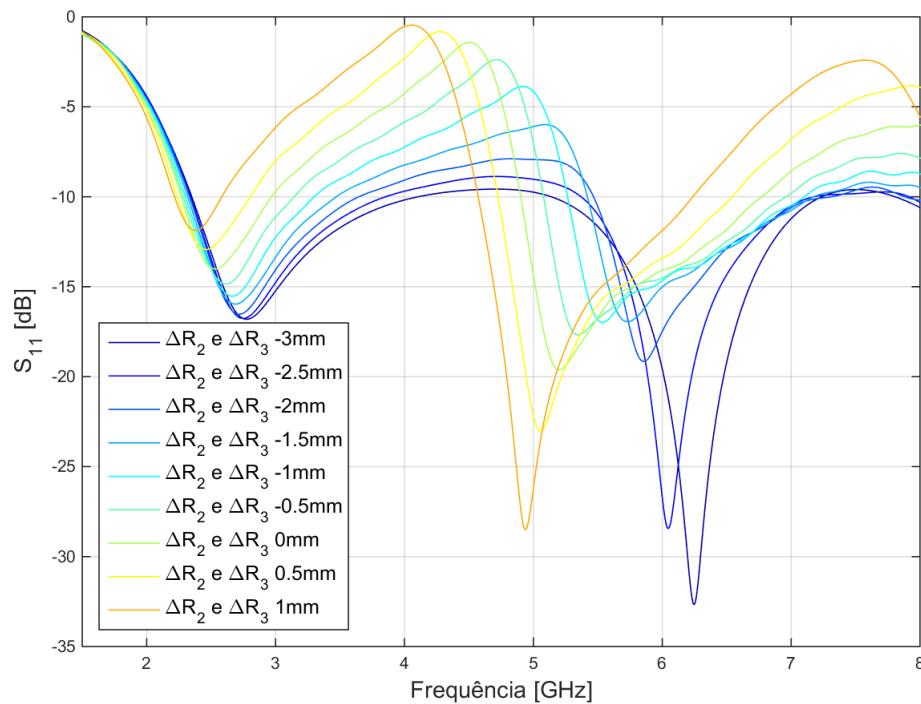


Figura 3.8: Monopolo circular impresso - configuração das duas bandas com a espessura do anel

Para finalizar a configuração do monopolo, são ajustados também os valores de comprimento da base da estrutura radiante (B_L) e largura do substrato (S_W),

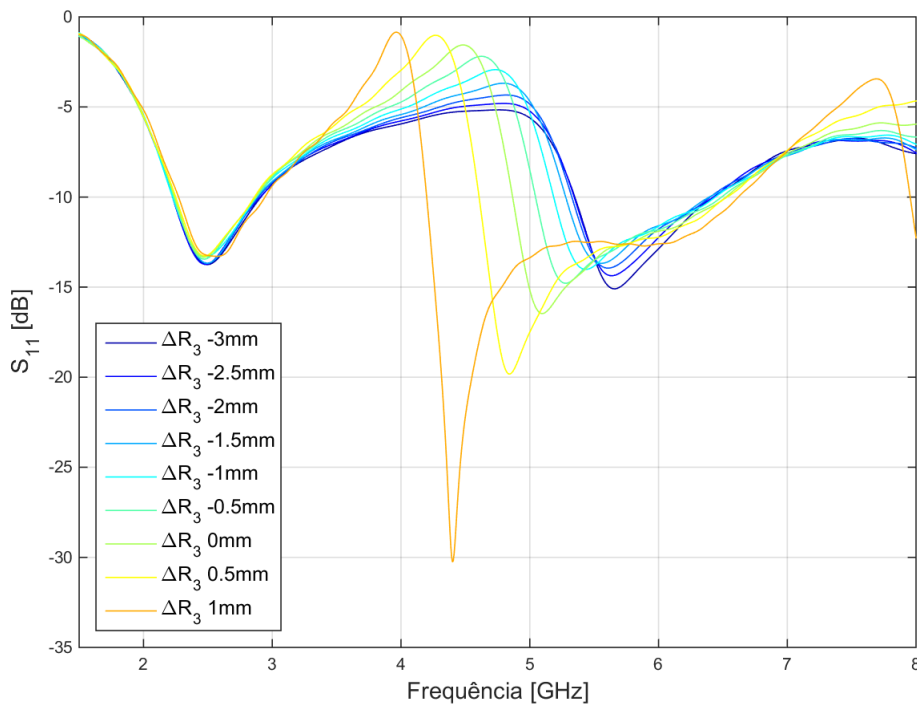


Figura 3.9: Monopolo circular impresso - configuração das duas bandas com a distância entre anel e disco

cujo os respectivos resultados são apresentados nos gráficos da Figura 3.10 e Figura 3.11, respectivamente. No caso da largura do substrato, esta terá maior influência na banda superior, sendo que em geral melhora a adaptação das duas bandas. Em relação ao comprimento da base (B_L), irá ter quase o mesmo comportamento anterior, mas não deformará tanto a banda superior.

Como passo final, é adicionada a linha de alimentação, uma linha de transmissão *microstrip* com comprimento F_L de 19.7 mm e uma largura F_W de 1.91 mm , configurada para uma impedância de linha de 50Ω , à frequência de 2.45 GHz . A linha é adicionada desde a entrada da estrutura radiante até à extremidade inferior do substrato. Ao colocar a linha verificam-se alguns desvios na adaptação, mas não o suficiente para fazer ajustes adicionais. O plano de massa tem comprimento suficiente para eliminar o limite imposto pelo problema do plano de massa finito, abordado na Seção 2.2.

As configurações finais deste monopolo estão presentes na Tabela 3.1.

A Figura 3.12 mostra a distribuição de corrente da antena nas duas bandas, onde para 2.45 GHz se pode observar que a corrente circula com maior intensidade sobre o anel, e para 5.537 GHz , apesar de não ser tão evidente, vai existir mais corrente na extremidade do disco.

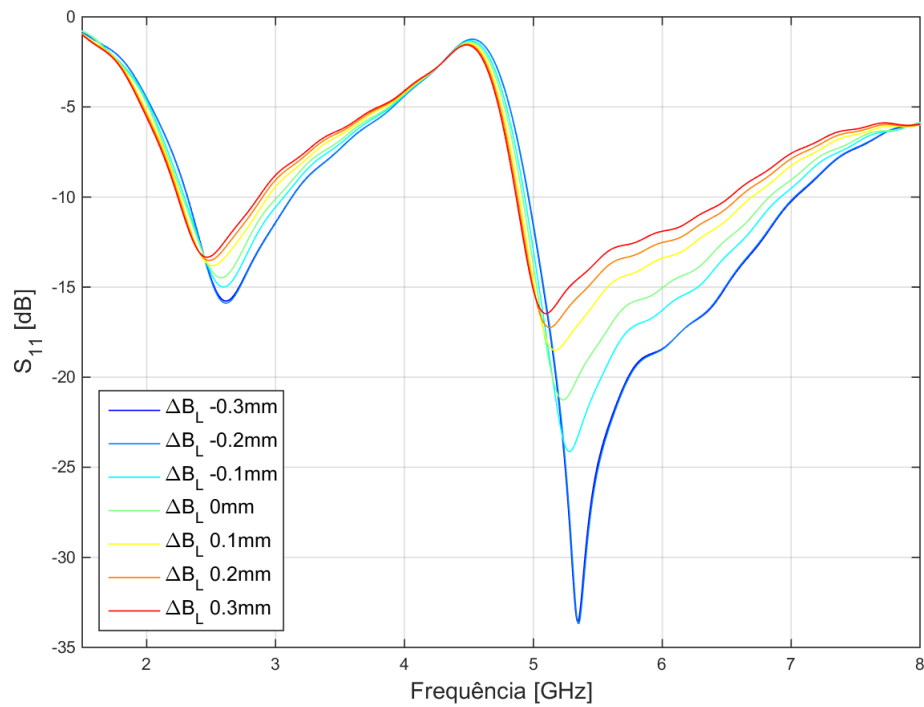


Figura 3.10: Monopolo circular impresso - ajuste das duas bandas com o comprimento da base (B_L)

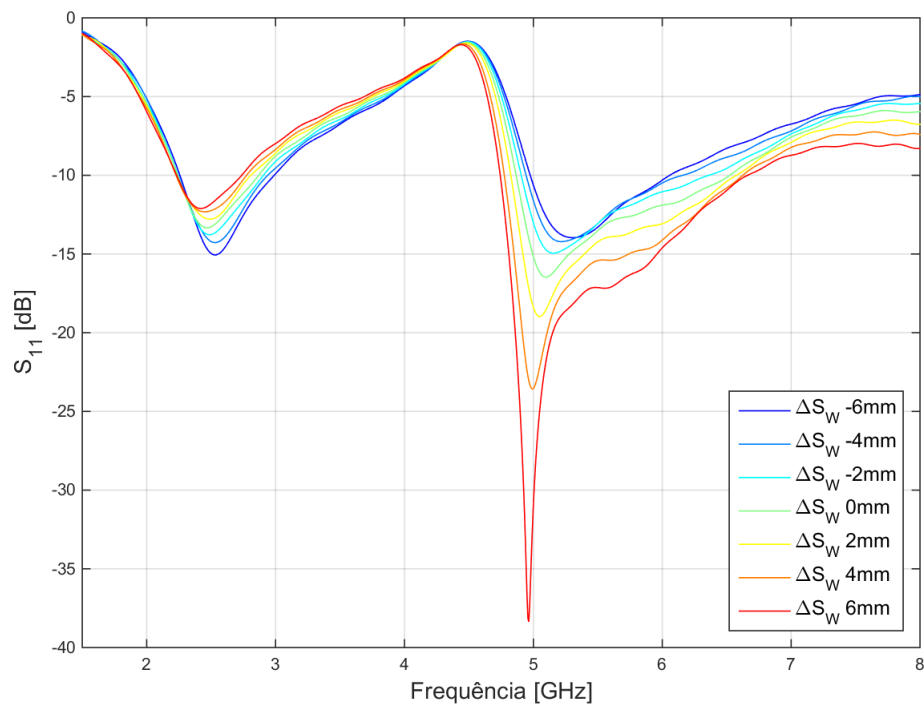


Figura 3.11: Monopolo circular impresso - ajuste das duas bandas com a largura do substrato (S_W)

Tabela 3.1: Monopolo circular impresso - valores de configuração

Parâmetro	Valor (mm)
S_L	44.8
S_W, G_W	42
G_L, F_L	19.7
F_W, B_W	1.91
B_L	0.7
R_1	11.4
R_2	9.4
R_3	8.2

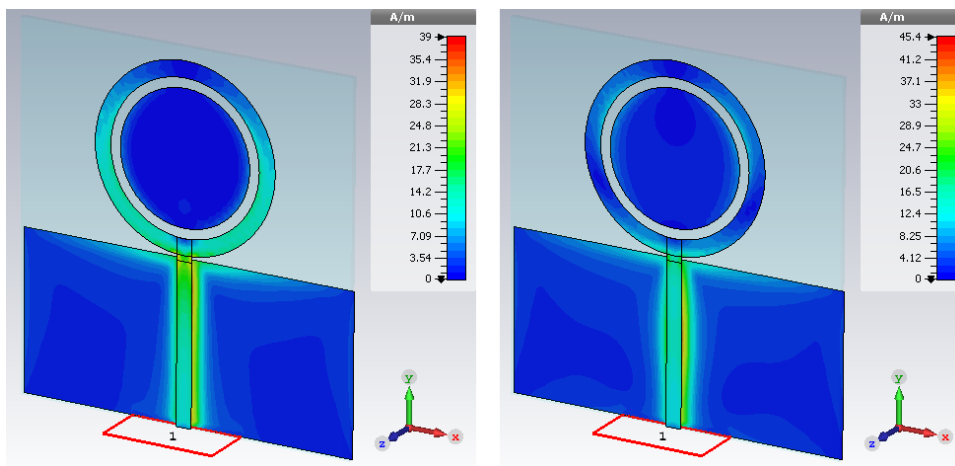


Figura 3.12: Monopolo circular impresso - distribuição de corrente para 2.45 GHz e 5.537 GHz, à esquerda e direita, respetivamente.

3.1.2 Resultados

Finalizada a configuração do monopolo, procedeu-se à sua construção, resultando na antena da Figura 3.13.

No gráfico da Figura 3.14 observam-se os resultados do S_{11} , simulado e medido, que apresentam similaridade, apesar do desvio na banda inferior e uma adaptação mais uniforme ao longo da banda superior. Para ambas as bandas foi obtido cerca de 30% de largura de banda (segundo a Equação 2.6). Os gráficos da Figura 3.15 e Figura 3.16 apresentam os diagramas de radiação, simulado e medido, para as duas bandas nos planos de interesse. Para a banda inferior obtém-se ainda um ganho de 2.46 dBi e para a banda superior, um ganho de 3.56 dBi.



Figura 3.13: Monopolo circular impresso - foto da antena construída

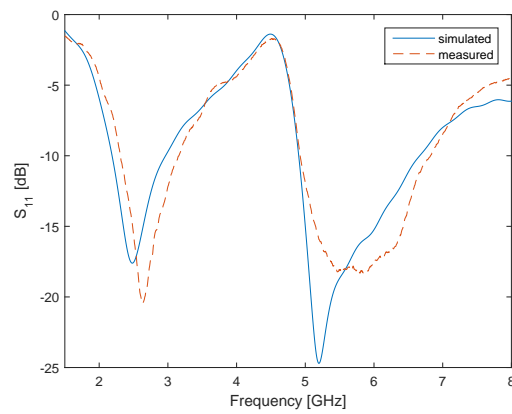
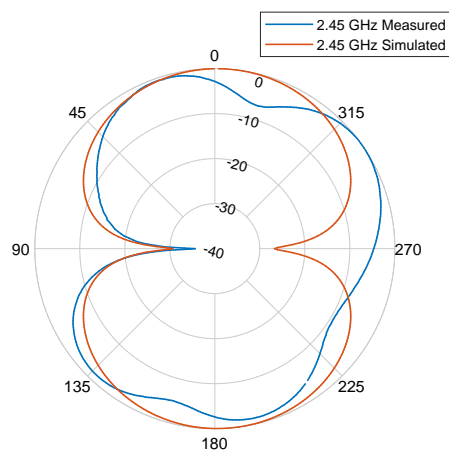
Figura 3.14: Monopolo circular impresso - resultados S_{11} medidos e simulados

Figura 3.15: Monopolo circular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para 2.45 GHz no plano XZ

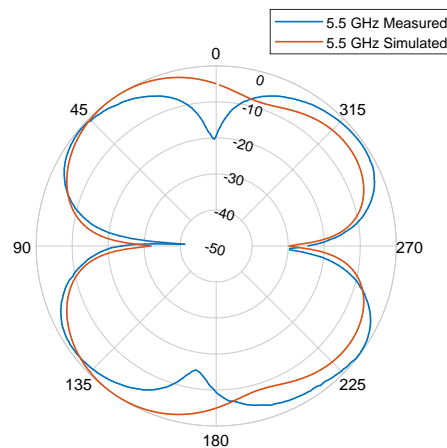


Figura 3.16: Monopolo circular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para 5.5 GHz no plano XY

3.2 Monopolo Triangular

Contrariamente à geometria circular, as geometrias retangulares nem sempre oferecem a maior largura de banda, o que pode apresentar um desafio maior para cobrir uma banda com aproximadamente 1 GHz de largura, ou impossibilitando mesmo até o seu uso. Nesta dissertação foi estudada uma configuração triangular com recurso a segmentos retangulares de diferentes comprimentos, de forma a poder regular as duas bandas.

3.2.1 Geometria e configuração

A solução apresentada em seguida é baseada na geometria (a) da Figura 3.17, com uma forma triangular alterada, e com dois braços de diferentes tamanhos que acoplam entre si, tal como as restantes formas sugeridas. No caso da geometria estudada, é definido um triângulo que é posteriormente cortado em um dos lados, criando uma falha que dá origem aos dois braços e permite configurar as duas bandas de interesse.

Como primeira abordagem, define-se um triângulo aberto no interior (Figura 3.18) e com espessura (T_w) de 1.91 mm, que será a espessura da linha de 50Ω para uma frequência de 5.537 GHz. Como comprimento de lado (T_L) seguiu-se a mesma estratégia do monopolo circular, de obter o comprimento do monopolo através da Equação 2.9, e considerando agora que esse valor é respetivo à soma da metade da base do triângulo com o comprimento total de um dos lados (Equação 3.3),

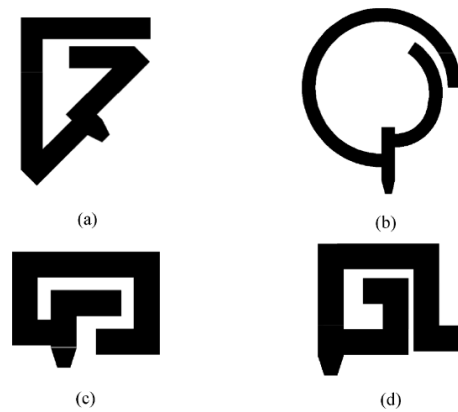


Figura 3.17: Formas para modelos de antenas de dois braços[15]

fluindo a corrente de igual forma nos dois lados do triângulo (como demonstrado na Figura 3.18). Na Equação 3.4 temos o lado do triângulo em função do comprimento de onda da banda pretendida, para uma impedância de entrada de 50Ω .

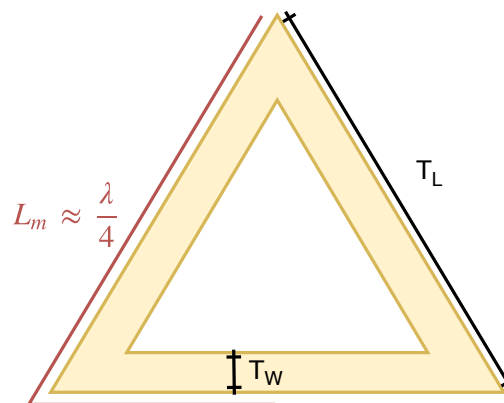


Figura 3.18: Monopolo triangular impresso - geometria simples

$$T_L = \frac{2}{3} L_m \quad (3.3)$$

$$T_L = \frac{2}{3} L_m \Leftrightarrow T_L = \frac{2}{3} \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt[4]{\frac{R}{5.57}} \Leftrightarrow T_L = 0.18 \lambda \quad (3.4)$$

Para T_L obtém-se um valor teórico de 9.7 mm . Com este valor não foi possível atingir a cobertura da banda dos 5 GHz , pelo que se procedeu a um estudo paramétrico sobre T_L , aumentando o seu valor para reduzir as frequências adaptadas, tal como mostra a Figura 3.19. Como valor prático de T_L obteve-se 17.7 mm ,

concluindo-se então que para este tipo de estrutura a Equação 2.9 não é a mais adequada. Conclui-se ainda que com T_L é possível selecionar uma banda em larga escala.

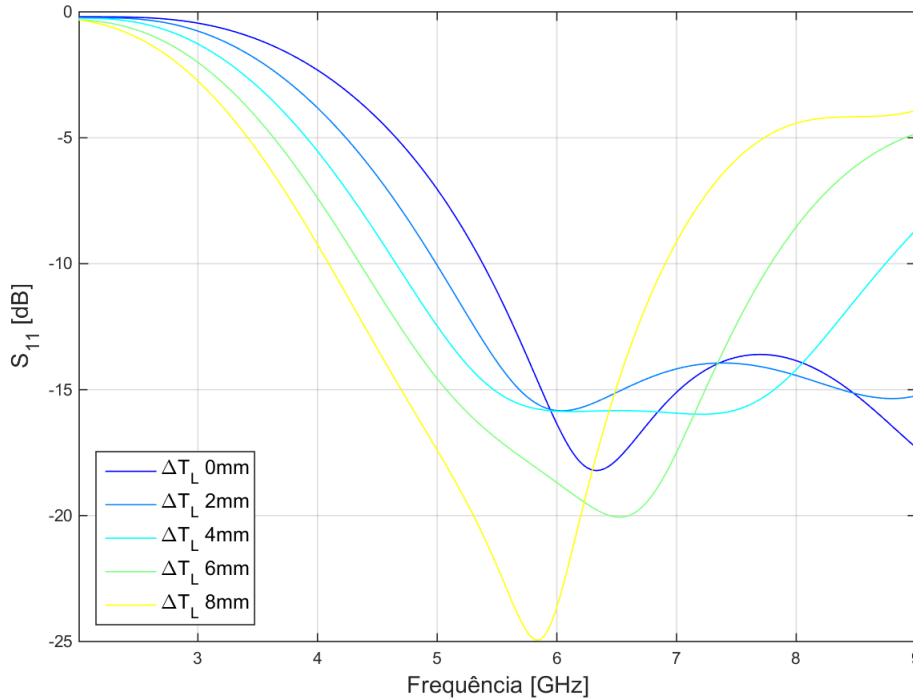


Figura 3.19: Monopolo triangular impresso - variação do comprimento de lado (T_L)

A Figura 3.20 mostra a distribuição de corrente com o triângulo adaptado para 5.537 GHz , o que corresponde ao resultado esperado, com a corrente a fluir pelos dois lados.

No gráfico da Figura 3.21 faz-se uma análise prévia do impacto da espessura do triângulo. É de concluir que este é um parâmetro importante na adaptação da estrutura radiante à linha de alimentação, pois como se observa nos resultados, é possível melhorar a adaptação como perdê-la por completo.

Para obter a segunda ressonância é necessário adicionar o segundo controlo, que neste caso passa pela criação de dois ramos através de um corte em um dos lados do triângulo, que permitirá controlar as duas bandas de interesse. Ao fazer o corte em um dos lados, garante-se que um dos ramos será maior e corresponderá à banda inferior, e o mais curto, à banda superior. Esta geometria está representada na Figura 3.22 onde se destacam os seguintes parâmetros de configuração: T_L e T_W , comprimento de lado e espessura dos ramos, respetivamente; C_L , o comprimento do corte entre ramos; e D_Y , a posição vertical do corte que define o

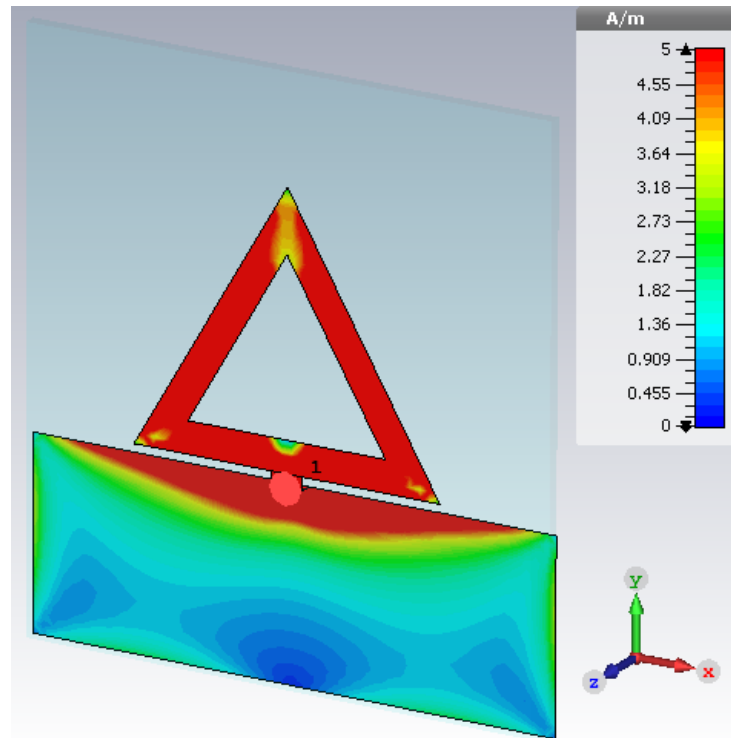


Figura 3.20: Monopolo triangular impresso - distribuição de corrente no triângulo simples a 5.537 GHz

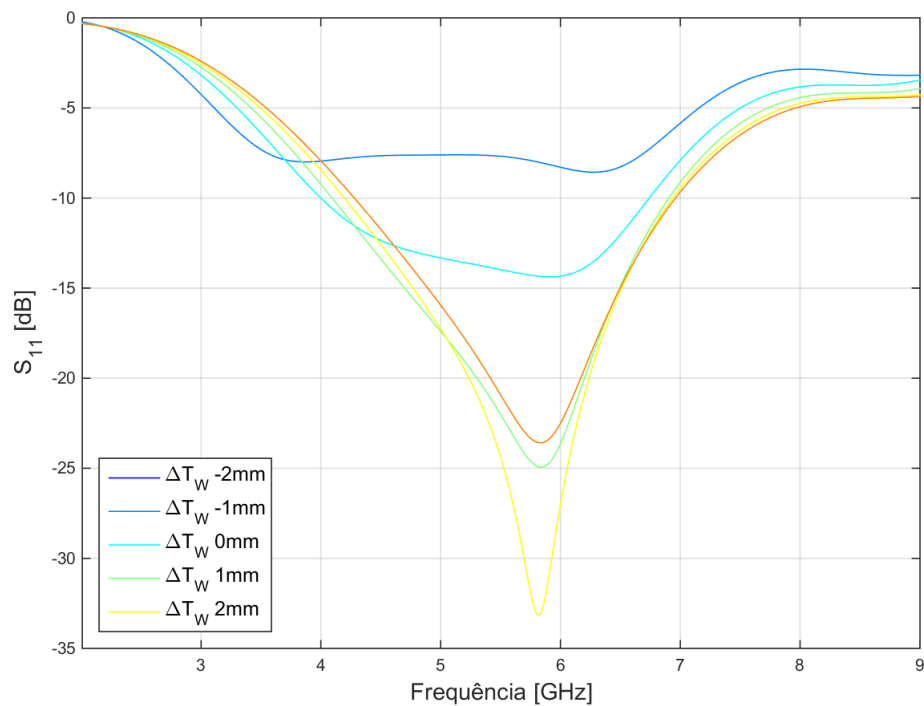


Figura 3.21: Monopolo triangular impresso - variação da espessura do triângulo (T_w)

comprimento dos dois ramos.

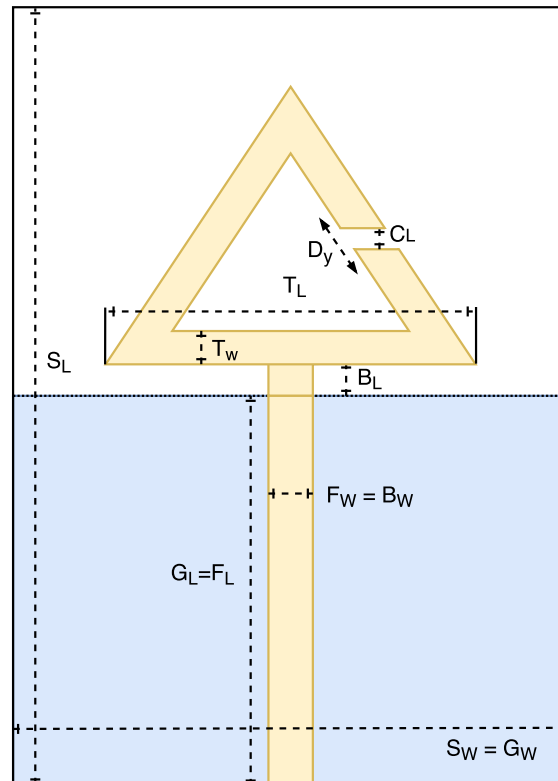


Figura 3.22: Monopolo triangular impresso - configuração da estrutura radiante com dois ramos

Para esta nova geometria considera-se inicialmente o corte a meio de um dos lados, com um espaçamento (C_L) de 1 mm entre ramos. O resultado desta nova configuração está presente no gráfico da Figura 3.23, onde se demonstra o comportamento do S_{11} com a variação do comprimento de lado, em que continua a ser possível fazer uma seleção da frequência em larga escala. No caso da espessura, na Figura 3.24, mostra-se que é possível melhorar a adaptação da banda inferior, mas esta alteração traz consequências negativas para a banda superior, que irá perder adaptação.

No caso do corte, foram também estudados os seus dois parâmetros, (C_L) e (D_Y). Como observado no gráfico da Figura 3.25, ao variar o comprimento de corte (C_L) irá haver maior seleção na banda inferior, enquanto que a banda superior irá apenas aumentar a sua largura de banda. Este parâmetro mostra ser útil na definição do espaçamento entre as duas bandas, pois a banda superior mantém a mesma posição, enquanto que a banda inferior varia. No caso da posição vertical do corte (D_Y), como se observa na Figura 3.26, este é um parâmetro que tem um grande impacto na adaptação de ambas as bandas, pelo que pode ser útil na fase

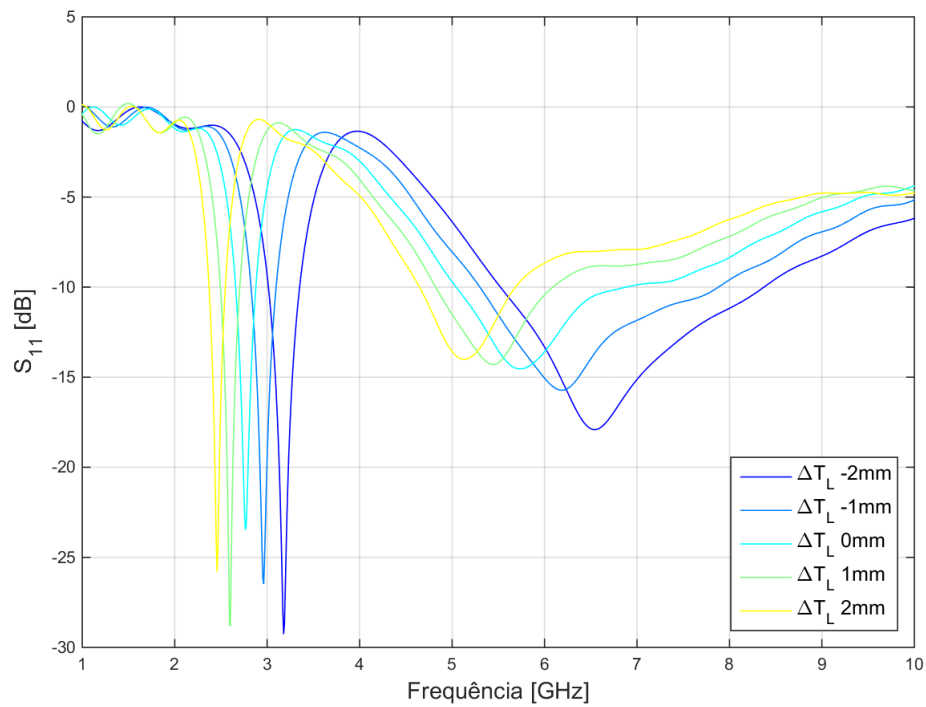


Figura 3.23: Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação do comprimento de lado (T_L)

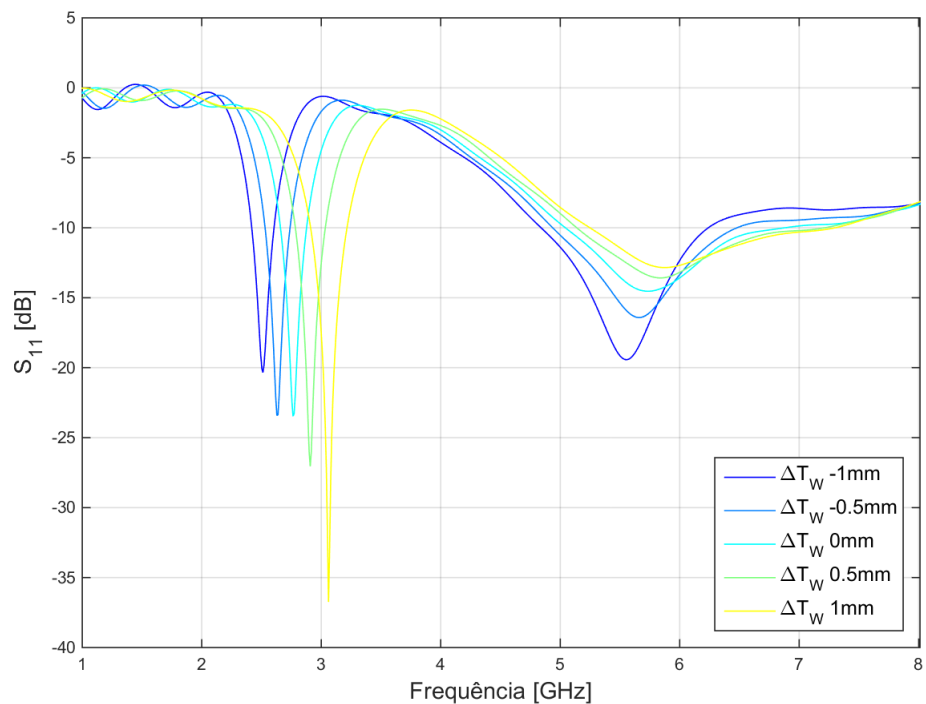


Figura 3.24: Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação da espessura (T_W)

final da configuração, para fazer um ajuste fino das bandas.

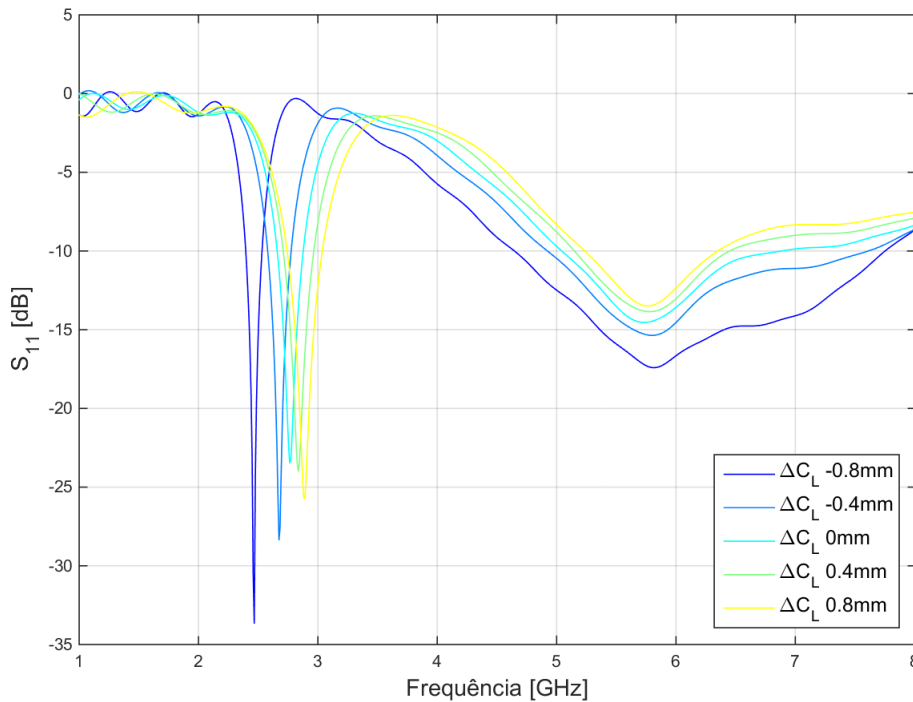


Figura 3.25: Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação do comprimento do corte (C_L)

Tal como no monopolo circular impresso, é também aqui demonstrado o impacto do comprimento da base da secção radiante (B_L) e da largura do substrato (S_w), como mostram os gráficos da Figura 3.27 e Figura 3.28, respetivamente. Ambos os parâmetros causam fortes alterações na banda superior, deixando a banda inferior praticamente inalterada na sua posição. Em particular, o comprimento da base quando assume um valor que deixa a estrutura radiante praticamente junta ao plano de massa ou demasiado afastada deste, irá causar desadaptação total da banda superior, pelo que será necessário fazer sempre um ajuste neste parâmetro para encontrar a posição que menos prejudicará o resultado final.

Até atingir o resultado final, que passa por cobrir as bandas desejadas e otimizar o tamanho total da antena, são feitas várias iterações sobre os parâmetros anteriormente descritos. Os valores finais obtidos estão presentes na Tabela 3.2.

3.2.2 Resultados

A configuração obtida e anteriormente mencionada resultou na antena da Figura 3.29. Destaque para o plano de massa que é mais reduzido, comparando

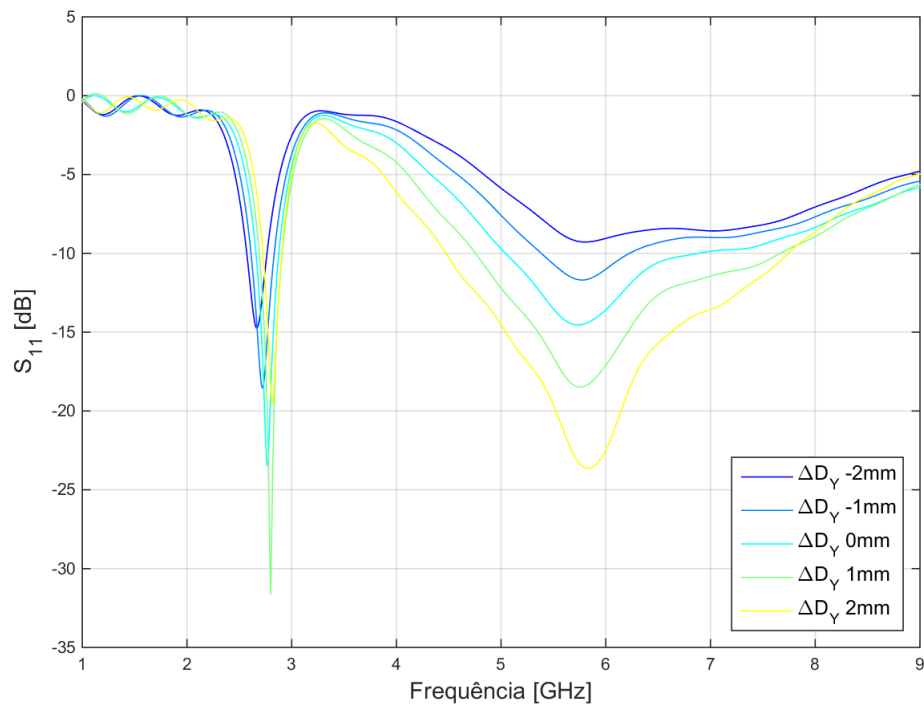


Figura 3.26: Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação da posição vertical do corte (D_Y)

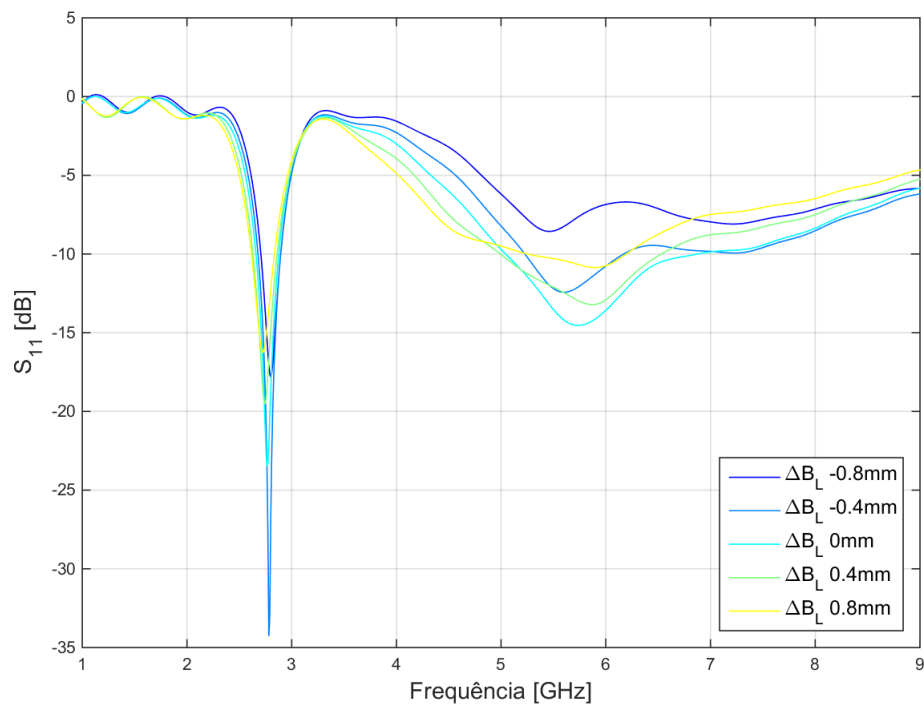


Figura 3.27: Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação do comprimento de base da estrutura radiante (B_L)

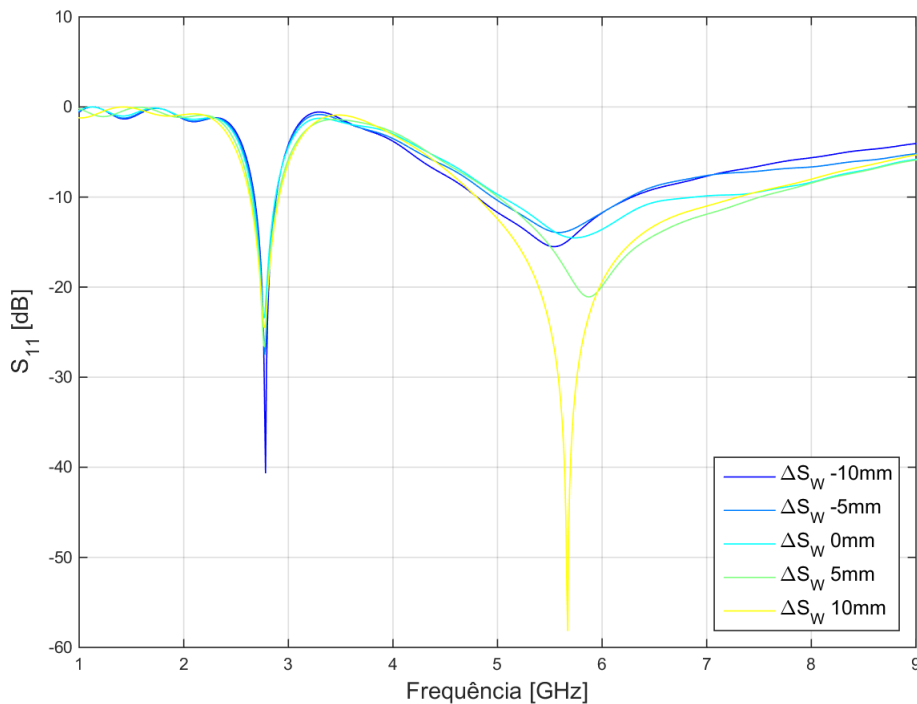


Figura 3.28: Monopolo triangular impresso - configuração de dupla banda com variação da largura do substrato (S_w)

Tabela 3.2: Monopolo triangular impresso - valores de configuração

Parâmetro	Valor (mm)
S_L	30
S_w, G_w	32
G_L, F_L	11.5
F_w, B_w	1.91
B_L	0.8
T_w	1.26
T_L	18.5
C_L	0.5
D_y	0.2

com o monopolo circular, devido ao facto de não se verificar um limite na banda inferior, que tem como consequência o seu aumento.

Em relação à distribuição de corrente, pode-se observar na Figura 3.30 que esta irá fluir de acordo com o esperado. O ramo mais longo da geometria irá ter mais densidade de corrente em 2.45 GHz e no ramo mais curto, esta irá ser mais densa na banda superior (5.537 GHz).

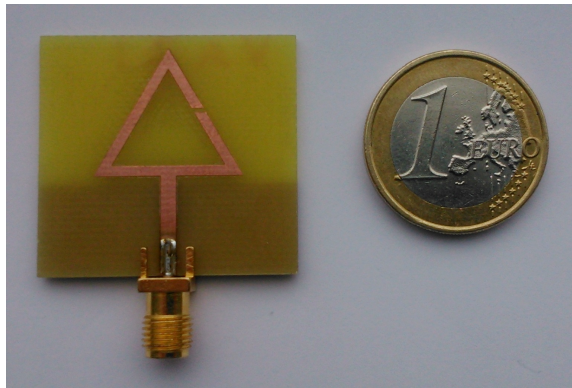


Figura 3.29: Monopolo triangular impresso - foto da antena construída

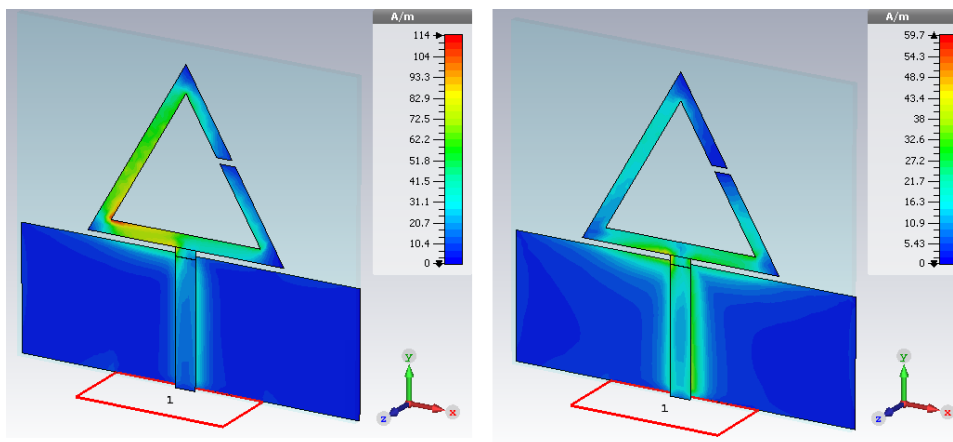


Figura 3.30: Monopolo triangular impresso - distribuição de corrente para 2.45 GHz e 5.537 GHz, à esquerda e direita, respectivamente.

Comparando os resultados do S_{11} no gráfico da Figura 3.31, os objetivos foram parcialmente atingidos. Foram atingidos bons valores de adaptação, onde a banda superior foi totalmente coberta, atingindo cerca de 40% de largura de banda, apesar de um ligeiro desvio. Já a banda inferior, atingiu 4% de largura de banda embora tenha havido um desvio, que foi suficiente para impedir que a antena funcionasse à frequência desejada.

O desvio para uma banda inferior pode ter sido causado por alguma imprecisão na construção da antena, nomeadamente, e avaliando pelas análises feitas aos parâmetros, a espessura da linha da geometria quando tende para valores menores, coloca a banda inferior em frequências menores. Considerando esta hipótese, a solução passaria por aumentar o valor de T_w .

Ainda assim, esta geometria tem a desvantagem de a banda inferior ser mais reduzida, comparativamente ao monopolo circular, pelo que está mais suscetível a falhas devido a eventuais imprecisões na sua construção. Seria necessário

também encontrar uma solução que permitisse aumentar a largura de banda da banda inferior.

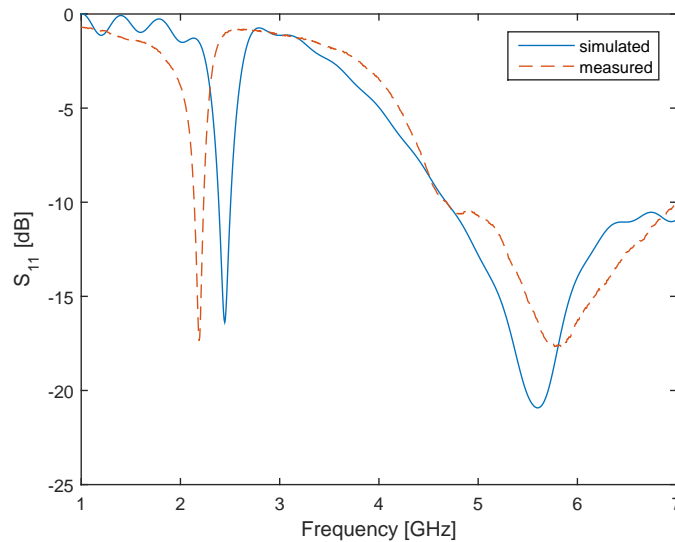


Figura 3.31: Monopolo triangular impresso - resultados S_{11} medidos e simulados

Ainda na Figura 3.32 e Figura 3.33 estão presentes os diagramas de radiação para as bandas de interesse. Em relação aos ganhos simulados, foi registrado 1.27 dBi para os 2.45 GHz e 2.28 dBi para os 5.537 GHz .

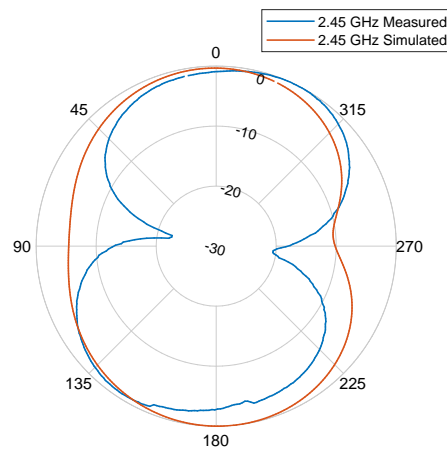


Figura 3.32: Monopolo triangular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para 2.45 GHz no plano XZ

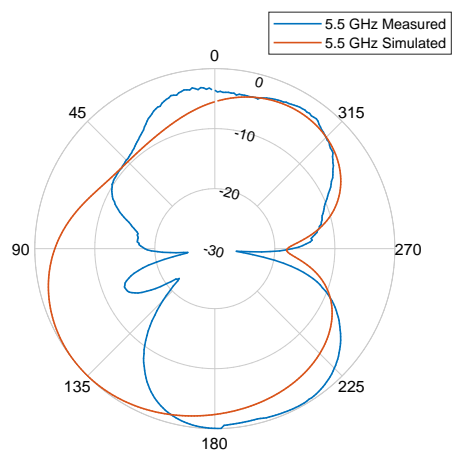


Figura 3.33: Monopolo triangular impresso - diagramas de radiação, medido e simulado, para 5.5 GHz no plano XY

4

Conclusão

O objetivo desta dissertação foi estudar e desenvolver monopolos impressos de dupla banda, de configuração simples.

Inicialmente foi estudado o tópico das antenas impressas, nomeadamente os monopolos impressos, quais as suas configurações comuns e como é possível atingir múltiplas bandas.

Na fase de desenvolvimento foram apresentadas duas soluções, um monopolo com geometria circular e outro com geometria triangular. Em ambos os casos foi demonstrado como se pode atingir a segunda banda, partindo de uma estrutura simples e adicionando posteriormente parâmetros de controlo para configurar as bandas de interesse.

Nas simulações apresentadas é possível concluir que a configuração de multi-banda não é assim tão linear quanto o pensamento lógico que nos leva à sua solução, pelo menos nas estruturas apresentadas. Isto é, para que uma antena funcione numa determinada banda, cria-se uma estrutura que estabelece a distribuição de corrente necessária para o efeito. Para adicionar uma nova banda, basta criar um novo caminho a ser percorrido pela corrente. Em ambas as soluções apresentadas observou-se que as múltiplas bandas são configuradas de forma conjunta e que o acoplamento entre secções pode ser utilizado no processo de configuração para atingir as bandas de interesse.

Por ultimo, fazem-se ainda algumas sugestões como trabalho futuro:

- Correção no monopolo triangular - face ao resultado obtido na banda inferior, e tal como já mencionado, as melhorias passariam por corrigir a banda inferior aumentando a espessura do ramo da respetiva frequência e aumentar a sua largura de banda.
- 3ª banda - estudar a adição de um novo controlo que permite configurar as antenas apresentadas com uma terceira banda. No caso da geometria circular pode ser adicionado um novo anel, enquanto que no triangular pode ser adicionado outro corte, no mesmo ramo ou no ramo oposto. Em ambos os casos pode ser interessante verificar quais os problemas acrescidos na configuração de uma terceira banda, conseguindo manter o controlo das bandas já existentes, além de observar as possíveis alterações nos parâmetros fundamentais.
- Miniaturização - partindo destas soluções, usar técnicas de miniaturização de antenas para reduzir o seu tamanho global.

Referências

- [1] Debatosh Guha and Yahia M.M. Antar. *Microstrip and Printed Antennas: new trends, techniques and applications*. John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [2] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory - Analysis and Design*. John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [3] W. L. Stutzman and G. A. Thiele. *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons Inc; 3rd edition, 2013.
- [4] N. Gupta and R. Raman. Selection of microstrip patch antenna substrate for wlan application using multiple attribute decision making approach. *International Journal of Microwave Science and Technology*, 2014.
- [5] J. T. Rayno and S. K. Sharma. Effect of substrate thickness on the performance of a printed planar monopole antenna (pma). *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2012.
- [6] M. John, J. A. Evans, M. J. Ammann, J. C. Modro, and Z. N. Chen. Reduction of ground-plane-dependent effects on microstrip-fed printed rectangular monopoles. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2(1), 2008.
- [7] Debatosh Guha. Challenges and innovations in modern antenna technology. *International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, 2015.
- [8] Renato Cicchetti, Emanuela Miozzi, and Orlandino Testa. Wideband and uwb antennas for wireless applications: A comprehensive review. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017.
- [9] K. P. Ray. Design aspects of printed monopole antennas for ultra-wide band applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2008.

- [10] H. Tamaoka, H. Hamada, and T. Ueno. A multiband antenna for mobile phones. *Furukawa Review*, 2004.
- [11] A. Kumar and R. K. Badhai. A dual-band on-body printed monopole antenna for body area network. *International Conference on Inventive Systems and Control*, January 2017.
- [12] S. N. Khan and M. A. Ahmed. Printed sleeve monopole antenna. In *Ultra Wideband Communications: Novel Trends - Antennas and Propagation*. www.intechopen.com, August 2011.
- [13] S. Kumar, R. K. Vishwakarma, R. Kumar, and D. Sharma. A compact printed monopole antenna with symmetrical I and rectangular shaped slots for Bluetooth/WLAN/WiMAX applications. *International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control*, August 2017.
- [14] P. R. Naik, B. A. Singh, and S. Thakur. Dual band compact printed monopole antenna for Bluetooth (2.54GHz) and WLAN (5.2GHz) applications. *International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication*, December 2016.
- [15] Rod Waterhouse. *Printed Antennas for Wireless Communications*. John Wiley & Sons Ltd, 2007.