



**Leonor Correia Duarte**

Licenciada em Ciências de Engenharia Física

**Fabrico de Antenas de Radiofrequência  
em membranas de Parileno-C para dispo-  
sitivos *wearable***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Física

Orientadoras: Prof. Dra. Joana Dória Vaz Pinto, Professora Auxiliar Convidada, FCT-UNL

Dra. Joana Sofia Pereira Neto, Investigadora Pos-Doc, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Dra. Maria Isabel Catarino

Arguente: Prof. Dr. Pedro Marques de Almeida

Vogal: Prof. Dra. Joana Vaz Pinto



**Fabrico de Antenas de Radiofrequência em membranas de Parileno-C para dispositivos *wearable***

Copyright © Leonor Correia Duarte, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*“O Homem pode, inegavelmente, levar ao extremo os limites das suas possibilidades  
num mundo que hoje se baseia numa tecnologia sem limites.*

*(...)*

*Um mundo que não progrida e que reduza o Homem ao estado de máquina  
é um mundo que dispensa o Homem.”*

Prefácio de Adonis (Paris, 2015)  
em *O apocalipse dos trabalhadores*



# Agradecimentos

Ao fim de tantos anos, o tempo de escola e de faculdade chega ao fim. Um percurso longo com tantos altos e baixos, com alegrias e desilusões, com tantas histórias (boas e más), com tantos amigos e pessoas importantes envolvidas que me marcaram... Termino esta etapa da minha vida de coração cheio e com imensa bagagem para o que der e vier.

Começo por agradecer a esta mui nobre instituição, a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, por me proporcionar tudo o que descrevi antes, ajudando-me a ultrapassar estes cinco anos e, simultaneamente, por me ajudar a preparar-me para o futuro fora do ambiente académico.

Agradeço também à Professora Elvira Fortunato e ao Professor Rodrigo Martins por me permitirem trabalhar e usufruir dos equipamentos presentes no CENIMAT, CEMOP e DCM, possibilitando a minha aprendizagem e, conseqüentemente, a realização deste trabalho.

Um enorme obrigada às minhas duas orientadoras, Joana Pinto e Joana Neto, por me terem acolhido neste ambiente, por me apoiarem e por estarem sempre disponíveis, mesmo quando o trabalho era interminável. Obrigada por me acompanharem desde o início no desbravar de mato que foi desenvolver este projeto. Obrigada pelas sugestões e ideias, pela paciência e pelos muitos “calma Leonor, está tudo bem. Sem stress.”. Contribuíram imenso na minha aprendizagem e para o aumento do meu interesse pela investigação nesta área. Muito obrigada às duas.

Não posso deixar de agradecer à equipa do CENIMAT pela simpatia e disponibilidade, em particular ao Ricardo Ferreira, por me ajudar sempre que precisei. Reconheço também o apoio do Professor Rui Igreja, que me ensinou a trabalhar com o aparelho de espectroscopia de impedância, que foi tão importante neste trabalho, que deu dicas importantes e que esclareceu dúvidas ao longo destes meses.

Obrigada aos outros infiltrados de Física, Catarina e Frederico, por serem as caras conhecidas do CENIMAT (e por estarem no mesmo barco) e por me ajudarem a fugir à frustração, sem fugir ao trabalho. Aos restantes alunos de mestrado, um obrigada pela simpatia que mostraram desde o início, por estarem sempre disponíveis para ajudar e pelos risos e conversas na sala dos computadores.

Aos meus colegas de curso pelos cinco anos cheios de boas recordações, pela união e amizade por que somos reconhecidos e que senti desde o primeiro dia. Um enorme obrigada ao grupo do meu ano Bia, André, Julia, Afonso David, Gonçalo e Pedro, por serem tão importantes, chatos e, acima de

tudo, amigos com quem partilho inúmeras histórias e que levo para a vida. Obrigada à minha madrinha e grande amiga Patrícia, à minha pseudo-madrinha e também grande amiga Ana Onofre por me ensinarem e apoiarem tanto. Obrigada à minha afilhada Ana Raquel que se tornou tão importante na minha vida e por ter sido (talvez sem saber) uma grande ajuda nesta tese.

Um grande obrigada ao Pedro, que apareceu na minha vida na altura certa, por ter sido a grande companhia durante este período de tese e por me ter ajudado a lidar com variadas crises existenciais.

Por fim, agradeço aos mais importantes. Aos meus pais, por me terem permitido seguir a área que eu queria, por me motivarem, por celebrarem as minhas vitórias tanto ou mais que eu, por me ajudarem nos momentos menos bons e por me apoiarem desde sempre e para sempre. Em particular, obrigada mãe, por seres a pessoa que melhor lida com as minhas crises. Obrigada Beatriz, por seres irmã e amiga, não agradeço as discussões, mas agradeço o apoio, os conselhos, a disponibilidade máxima que tens para me ajudar e socorrer e por todas as vezes que me tiraste de casa nestes anos. Obrigada avó, por seres quase a minha fã número um, por me incentivares em todas as chamadas semanais e por seres o exemplo que és.

OBRIGADA a todos os que me permitiram chegar onde cheguei, que contribuem para a minha felicidade todos os dias e que me ajudaram a ultrapassar o desafio que foi terminar esta tese.

# Resumo

---

Nos dias de hoje cresce a procura por dispositivos portáteis que permitam a monitorização precisa dos sinais vitais, que se adaptem à pele do corpo e que, simultaneamente, sejam de reduzidas dimensões, biocompatíveis e apresentem durabilidade e estabilidade. Além disto, cresce em paralelo o interesse por uma comunicação fácil e sem fios, com *smartphones* ou outros dispositivos móveis, que tem levado ao desenvolvimento da tecnologia *wearable*.

Posto isto, o presente trabalho tem como propósito projetar e desenvolver antenas de radiofrequência em membranas ultrafinas de Parileno-C. Recorre-se, então, ao uso destas membranas com o intuito de responder à necessidade de um substrato flexível. Assim, com este polímero, é possível assegurar também conformidade com a pele, transparência, biocompatibilidade e o isolamento perante a eletrónica que nele é produzida. Complementarmente, este trabalho emprega a tecnologia de identificação de radiofrequências (RFID) para garantir a recolha de informação de forma fácil e sem fios. Particularizando, neste estudo é desenvolvida uma antena passiva de radiofrequência que obtém a sua energia quando é aproximado um emissor de radiofrequência, convertendo esse sinal em corrente para alimentar determinado circuito que a ela possa estar ligado.

Neste sentido, apresentam-se a evolução do design e tamanho das antenas e o estudo acerca da sua influência na impedância, no desempenho e na frequência de ressonância da antena. Para além da caracterização elétrica, mostram-se testes associados à conversão do sinal de radiofrequência em tensão (corrente) e do comportamento das antenas quando colocadas sob superfícies conformais, como a pele, e quando sujeitas a condições de humidade. Tendo em vista o correto funcionamento das antenas perante os testes realizados, a próxima etapa para este projeto consistirá na ligação das antenas com um chip para garantir a comunicação e troca de informação com um emissor a uma frequência de 13,56 MHz.

**Palavras-chave:** Parileno-C, Antenas de Radiofrequência, Dispositivos *wearable*, Tecnologia RFID.

---



# Abstract

---

Nowadays, there is a growing demand for portable and conformable devices capable of precise monitorization of vital signs, while being small, biocompatible, durable and stable. In addition, the interest in easy and wireless communication with smartphones or other similar mobile devices has led to the development of wearable technology.

Furthermore, the present work aims to design and develop radio frequency antennas on ultra-thin Parylene-C membranes. The use of these membranes is then to respond to the need for a flexible substrate. Thus, with this polymer, it is also possible to ensure skin compliance, transparency, biocompatibility and isolation from the electronics produced therein. In addition, this work employs radio frequency identification (RFID) technology to ensure easy and wireless information collection. Particularly, in this study a passive radio frequency antenna is developed which obtain its energy when a radio frequency transmitter is approached, converting this signal into current to supply any circuit that may be connected to it.

In this sense, we present the evolution of antenna design and size and the study of its influence on antenna impedance, performance and resonant frequency. In addition to electrical characterization, tests associated with the conversion of radio frequency signal to voltage (current) and antenna behaviour when placed under conformal surfaces, such as the skin, and when subjected to damp conditions are shown. In view of the correct functioning of the antennas towards the tests performed, the next step for this project will be to connect the antennas with a chip to ensure communication and exchange of information with the transmitter at a frequency of 13.56 MHz.

**Keywords:** Parylene-C, Radio Frequency Antennas, Wearable Devices, RFID Technology.

---



# Índice

<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto e Motivação .....	1
1.2. Objetivos .....	2
<b>2. Conceitos Teóricos</b>	<b>3</b>
2.1. Parileno-C .....	3
2.2. Tecnologia de Identificação de Radiofrequências (RFID) .....	4
2.2.1. Etiqueta de RFID .....	5
2.2.2. Antena de RFID .....	6
<b>3. Técnicas de Deposição de Filmes Finos</b>	<b>11</b>
3.1. Deposição de Parileno .....	11
3.2. Evaporação Térmica Resistiva .....	12
3.3. Evaporação Térmica assistida por feixe de elétrons .....	13
3.4. Pulverização Catódica de radiofrequência assistida por magnetron .....	14
<b>4. Espectroscopia de Impedância</b>	<b>17</b>
<b>5. Materiais e Métodos</b>	<b>21</b>
5.1. Preparação do substrato .....	21
5.1.1. Limpeza .....	21
5.1.2. Camada sacrificial .....	21
5.2. Projeto e desenho de máscaras de fotolitografia .....	22
5.3. Produção de filmes finos .....	23
5.3.1. Deposição de filmes finos .....	23
5.3.2. Fotolitografia .....	24

5.3.3. <i>Peel-off</i> do parileno .....	26
5.4. Caracterização Superficial .....	27
5.5. Caracterização Elétrica .....	27
5.5.1. Curvas corrente-tensão (I-V).....	27
5.5.2. Espectroscopia de impedância .....	28
5.5.3. Medição da amplitude do sinal.....	28
<b>6. Análise e Discussão de Resultados</b>	<b>31</b>
6.1. Escolha do metal.....	31
6.2. Influência da geometria.....	33
6.3. Caracterização de Impedância .....	34
6.4. Amplitude do sinal gerado .....	38
6.5. Testes em superfícies curvas .....	40
6.6. Distância de leitura .....	43
6.7. Corrente gerada .....	43
<b>7. Conclusões e Perspetivas Futuras</b>	<b>47</b>
<b>8. Referências</b>	<b>49</b>
<b>9. Apêndices</b>	<b>53</b>
9.1. Apêndice 1: Primeiras máscaras para litografia .....	53
9.2. Apêndice 2: Máscaras para a produção em parileno .....	55
9.3. Apêndice 3: Máscaras de fotolitografia finais .....	56

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Relação da impedância de um indutor real com a frequência (f).....	18
Tabela 5.1: Relação entre a massa de parileno depositada e a espessura obtida.....	23
Tabela 5.2: Condições de deposição de filmes metálicos por pulverização catódica.....	24
Tabela 5.3: Condições de deposição de vários filmes metálicos por evaporação.....	24
Tabela 6.1: Relação entre as técnicas de deposição, o metal depositado e a resistência do filme, tanto a obtida experimentalmente como a calculada teoricamente, considerando os valores de espessura e largura de pistas experimentais.....	32
Tabela 6.2: Parâmetros de antenas produzidas, com diferentes geometrias, dimensões (altura total x largura total), valor de resistência e de indutância esperados.....	33
Tabela 6.3: Parâmetros da antena retangular, em papel, do cartão de metro utilizado para fazer estudos comparativos com as antenas produzidas.....	37
Tabela 6.4: Parâmetros (R, L) de duas antenas produzidas em parileno e a respectiva corrente, que se espera ser gerada, quando lhe incide um sinal de 13,56 MHz.....	44
Tabela 9.1: Parâmetros das primeiras máscaras desenhadas de fotolitografia para a otimização dos processos de deposição.....	54
Tabela 9.2: Parâmetros das máscaras desenhadas para a produção de antenas em parileno.....	55
Tabela 9.3: Parâmetros da última máscara desenhada para a produção de antenas em parileno..	57



## Lista de Figuras

Figura 2.1: Estrutura química da cadeia base do Parileno (N) e da cadeia do Parileno-C.....	3
Figura 2.2: Diagrama de comunicação entre o leitor e a etiqueta de RFID, que inclui uma antena e possivelmente um chip IC.....	4
Figura 2.3: Esquema das regiões de detecção da antena do leitor, onde $r$ corresponde à distância a que se encontra a fronteira entre campos.....	6
Figura 2.4: Esquema do acoplamento indutivo, onde os enrolamentos representam: a antenas do leitor (a preto) e a antena a ser produzida, a da etiqueta (a azul claro).....	7
Figura 2.5: Circuito equivalente da etiqueta de RFID.....	7
Figura 2.6: Espectros de impedância e indutância do circuito equivalente de uma antena em função da frequência. ....	8
Figura 2.7: Esquema das geometrias retangular e circular que uma antena de RFID normalmente apresenta, com os respetivos parâmetros assinalados. Adaptado de [31].....	10
Figura 3.1: Esquema do sistema de deposição do parileno. Adaptado de [12]. ....	12
Figura 3.2: a) Sistema de deposição de parileno - <i>Specialty Coating System PDS 2010 Labcoter 2</i> . b) Porta-amostras com substratos de silício. ....	12
Figura 3.3: a) Sistema de evaporação térmica resistiva (CENIMAT). b) Esquema do interior da câmara da evaporação. ....	13
Figura 3.4: a) Sistema de evaporação térmica por <i>e-beam</i> (câmara limpa do CEMOP). b) Interior da câmara do sistema. ....	14
Figura 3.5: Sistema de deposição por pulverização catódica (DCM - Departamento de Ciência dos Materiais). ....	15
Figura 4.1: Representação cartesiana da Impedância ( $Z$ ). ....	17
Figura 4.2: Relação da impedância com a reactância.. ....	18

Figura 4.3: Espectros do módulo de impedância (linha preta, eixo à esquerda) e de ângulo de fase (linha a tracejado, eixo à direita).....	19
Figura 5.1: Bolachas de silício ( <i>carriers</i> , 10 cm x 10 cm), depois da deposição do PVA. ....	22
Figura 5.2: Máscaras para fotolitografia impressas em acetato.....	22
Figura 5.3: Exemplos de designs de antenas em <i>Adobe Illustrator</i> . ....	23
Figura 5.4: Esquema do processo de fotolitografia (não está à escala). ....	25
Figura 5.5: Design final otimizado. ....	26
Figura 5.6: a) Sistema de <i>dry-etching</i> (Zona amarela da câmara limpa, CEMOP). b) Esquema do processo de <i>etching</i> e da finalização do protótipo. ....	26
Figura 5.7: Fases sequenciais do processo de <i>peel-off</i> do parileno (antena teste).....	27
Figura 5.8: <i>Probe station</i> do <i>Agilent 4155C</i> . Encontram-se identificadas as pontas de prova em contacto com uma antena. ....	28
Figura 5.9: Analisador de impedância (CEMOP), em funcionamento com a <i>pin probe</i> .....	28
Figura 5.10: Módulo de RFID VMA405 ligado ao <i>Arduino</i> . ....	29
Figura 6.1: Imagens de dois exemplos de antenas produzidas em vidro por <i>lift-off</i> . ....	32
Figura 6.2: a) Exemplo do perfil, criado pelo perfilómetro, de uma pista metálica de aproximadamente 500 µm de largura. b) Curva da corrente, medida pelas pontas do <i>Agilent 4155C</i> , em função da tensão aplicada. Neste caso, pela lei de Ohm, corresponde a um valor de resistência de 40,04 Ω (inverso do declive).....	32
Figura 6.3: Antenas de cobre em fases diferentes de produção.....	34
Figura 6.4: a) Exemplo da aplicação do <i>pin probe</i> no substrato, durante a execução dos testes a uma antena C-1. b) Fotografia durante o processo de <i>peel-off</i> da antena R-3. c) Membrana flexível de parileno com antena R-3, ligado ao <i>agilent</i> através do <i>zif</i> . ....	34
Figura 6.5: Gráfico da variação do módulo de impedância com a frequência de uma antena R-3 com parileno como substrato (curva a preto), da antena em membrana flexível, depois do <i>peel-off</i> (curva a tracejado) e de outra antena R-3 produzida em cima de vidro (curva a azul). ....	35
Figura 6.6: Espectro de fase e de módulo de impedância.. ....	36
Figura 6.7: Espectro de impedância discriminada em resistência (Real(Z)) e reatância (Im(Z)), no intervalo de 10 MHz a 110 MHz. ....	36
Figura 6.8: a) Imagem da antena retangular do cartão de metro comum. b) Espectro do módulo de impedância da antena comercial e da produzida R-3. ....	37
Figura 6.9: Espectro de indutância da antena comercial e da produzida R-3, no intervalo de 0,01 MHz a 110 MHz.....	38

Figura 6.10: a) Posição da antena R-3 (ligada ao osciloscópio), por cima do emissor de RFID, durante a aquisição de dados. b) Sinal medido pelo osciloscópio, gerado na ponta de prova sozinha (antena espia – espira única, sinal a azul) e na antena produzida em parileno R-3 (sinal a vermelho) e induzido pelo módulo de RFID. ....	39
Figura 6.11: Teste de acoplamento entre o módulo de RFID, a antena espia e a antena R-3.....	39
Figura 6.12: Dados do osciloscópio: teste de acoplamento entre o módulo de RFID, a antena espia e a antena R-2. ....	40
Figura 6.13: Dados do osciloscópio: teste de acoplamento entre o módulo de RFID, a antena espia e a antena comercial do cartão de metro. ....	40
Figura 6.14: Testes da antena R-3 em superfícies conformáveis.....	41
Figura 6.15: Espectro do módulo de impedância da membrana flexível (curva verde), da membrana em contacto com a gelatina (curva roxa) e em contacto com pele da mão (curva laranja). ....	41
Figura 6.16: Espectro do módulo de impedância e de fase da membrana flexível em contacto com a gelatina e com um raio de curvatura de 1,6 cm. ....	42
Figura 6.17: Espectro do módulo de impedância e de fase da membrana flexível em contacto com a pele da mão, tendo em vista a aplicação final <i>wearable</i> . ....	42
Figura 6.18: Comparação entre o sinal gerado na antena e medido pelo osciloscópio, quando se encontra isolada, como nos testes anteriores (sinal a preto), quando por cima de gelatina (sinal a azul) e quando por cima da pele da mão (sinal a laranja). ....	42
Figura 6.19: Distância máxima de leitura.. ....	43
Figura 6.20: Circuito elétrico usado para ligar um LED vermelho, alimentado pela corrente gerada na antena quando na presença de um emissor de RFID.....	44
Figura 6.21: Prova de conceito: corrente induzida na antena.....	45
Figura 6.22: Prova de conceito: corrente induzida na antena R-3, num meio húmido. ....	45
Figura 6.23: Prova de conceito: corrente induzida na antena R-3 e distância de leitura. ....	46
Figura 9.1: Máscaras iniciais para fotolitografia. Máscara positiva e respetiva máscara negativa... ..	53
Figura 9.2: Máscaras para fotolitografia das antenas em parileno.....	55
Figura 9.3: Máscaras otimizadas para fotolitografia das antenas em parileno. ....	56
Figura 9.4: Máscara mais otimizada que permitiu produzir as últimas antenas em parileno.....	56



## Lista de Acrónimos

<b>AC</b>	Corrente Alternada
<b>CVD</b>	Deposição Química em fase de Vapor ( <i>Chemical Vapor Deposition</i> )
<b>DC</b>	Corrente Contínua
<b>HF</b>	Alta Frequência ( <i>High Frequency</i> )
<b>IC</b>	Circuito Integrado
<b>LED</b>	Díodo Emissor de Luz ( <i>Light Emitting Diode</i> )
<b>LF</b>	Baixa Frequência ( <i>Low Frequency</i> )
<b>NFC</b>	Comunicação de Campo Próximo ( <i>Near-field Communication</i> )
<b>PVA</b>	Álcool Polivinílico
<b>PVD</b>	Deposição Física em fase de Vapor ( <i>Physical Vapor Deposition</i> )
<b>RF</b>	Radiofrequência
<b>RFID</b>	Identificação de Radiofrequências ( <i>Radio Frequency Identification</i> )
<b>SRF</b>	Frequência de Ressonância Própria ( <i>Self-resonant Frequency</i> )
<b>UHF</b>	Ultra Alta Frequência ( <i>Ultra-high Frequency</i> )



## Lista de Variáveis

$r$	Distância entre a fronteira entre campos e a antena
$\lambda$	Comprimento de onda
$\Phi_B$	Fluxo do campo magnético
$B$	Intensidade do campo magnético
$\varepsilon$	Força eletromotriz
$N$	Número de espiras
$f_{\text{ressonância}}$	Frequência de ressonância
$\omega$	Frequência angular
$L$	Indutância
$R$	Resistência
$X$	Reatância
$C$	Capacitância
$Z$	Impedância
$\theta$	Ângulo de fase
$u(t)$	Tensão variável no tempo
$i(t)$	Corrente variável no tempo
$\hat{u}$	Amplitude da tensão
$\hat{i}$	Amplitude da corrente





# Introdução

## 1.1. Contexto e Motivação

A preocupação pela constante monitorização de sinais vitais levou à crescente procura de dispositivos portáteis que possam ser confortavelmente adaptáveis à pele do corpo e, simultaneamente, eficazes na recolha precisa de dados. Para além disso, o interesse por uma comunicação fácil e sem fios, com smartphones ou outros dispositivos móveis, instigou de forma significativa o desenvolvimento da tecnologia *wearable* [1-2]. Assim, todos os sistemas *wearable* dedicados à monitorização de sinais vitais, devem apresentar algumas características essenciais: reduzidas dimensões, comodidade, flexibilidade, biocompatibilidade, estabilidade e durabilidade [3-4].

Posto isto, e devido à necessidade de encontrar materiais que garantissem as características acima descritas, surgiram estudos que envolviam a aplicabilidade do Parileno-C, como substrato e camada de encapsulamento, sendo este um polímero que oferece flexibilidade, biocompatibilidade, transparência e propriedades de isolamento elétrico [5-6]. Todas estas particularidades permitem a utilização do parileno para encapsular eletrónica a implantar debaixo da pele [7], como substrato para sensores de temperatura, pressão e UV [4], [8] e fabricar outros componentes eletrónicos flexíveis, tais como transístores de efeito de campo [5-6].

Ademais, nos dispositivos *wearable*, é essencial adquirir a informação recolhida pelos mesmos de forma fácil e sem fios (*wireless*). A tecnologia de Identificação de Radiofrequências (RFID), comumente usada, responde a estas necessidades, permitindo a comunicação e identificação sem fios a curtas distâncias de objetos e pessoas, com ou sem bateria [9], bem como oferecendo flexibilidade e reduzidas dimensões. Esta tecnologia disseminou em inúmeras tarefas do dia a dia, com aplicações na área da saúde, na tecnologia das casas inteligentes (*smart home*), na internet das coisas (*Internet of Things, IoT*), em sistemas de pagamento, cartões de transportes públicos, entre outros [9–11].

Com a finalidade de garantir um dispositivo *wearable*, que seja pequeno e se mantenha em contacto direto com a pele, que seja capaz de medir parâmetros fisiológicos e que permita lê-los através

de um dispositivo móvel, procurar-se-á fabricar em parileno um sistema passivo de RFID possível de integrar esse dispositivo.

## 1.2. Objetivos

Na demanda deste projeto tenciona-se projetar e desenvolver antenas de radiofrequência em membranas ultrafinas de parileno, bem como testar a sua resposta com protocolos de comunicação *standart*, adaptando-a para isso numa etiqueta de RFID, cuja frequência de trabalho é 13,56 MHz. Para este efeito, pretende-se testar diferentes geometrias e materiais, bem como, estudar as características elétricas das antenas produzidas e a sua resposta na presença de outros dispositivos.

De forma a fabricar um dispositivo transparente, leve, maleável e que se conforme com a pele, as antenas serão produzidas em Parileno-C. Com este polímero é possível criar finas membranas biocompatíveis (1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  de espessura), que garantem as propriedades desejadas anteriormente referidas e que serão empregues neste trabalho como substrato e camada de encapsulamento.

Por conseguinte, o protótipo final consistirá numa antena de filme fino produzida sob uma membrana de Parileno-C e encapsulada também com uma camada de parileno. Na presença de um emissor de radiofrequências e por indução eletromagnética, esta antena, deverá conseguir gerar corrente que poderá alimentar um sensor e transmitir informação acerca dele de volta ao emissor.

## Conceitos Teóricos

### 2.1. Parileno-C

O Parileno é o nome genérico para uma classe de polímeros designados por Poly-Para-Xylylene. São polímeros semi-cristalinos, que apresentam diversas variantes consoante a constituição do monómero, sendo as mais conhecidas o Parileno-N (monómero base) e o Parileno-C (monómero base onde ocorre a substituição por um átomo de cloro), cujas estruturas químicas se apresentam na figura 2.1. Além do mais, as propriedades físicas variam consoante a sua constituição química [5], [12-13]. O Poly-(chloro-p-xylylene), também conhecido por Parileno-C, é frequentemente usado por ser um polímero termoplástico, transparente, biocompatível e quimicamente inerte [14], sendo que é a variante que apresenta constante dielétrica mais elevada. Acrescenta-se ainda que o Parileno-C se caracteriza pela baixa permeabilidade tanto a espécies gasosas, como a líquidas, sendo, assim, adequado para aplicações biomédicas [15].

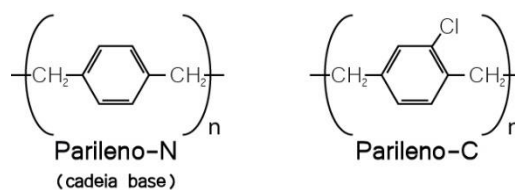


Figura 2.1: Estrutura química da cadeia base do Parileno (N) e da cadeia do Parileno-C.

O parileno polimeriza em vácuo e à temperatura ambiente, por deposição química em fase de vapor (CVD) e, por isso, as membranas criadas adaptam-se a todas as superfícies de uma maneira uniforme [16]. Ademais, é possível depositar este polímero em diferentes substratos, como no vidro, bolachas de silício, em metais, papel ou plásticos [15-16].

As membranas de Parileno-C apresentam propriedades mecânicas e elétricas tais que tornam vantajosa a sua aplicação como camada dielétrica, como substrato e como camada de encapsulamento, como depreendido por T. Marszalek *et al.* [5]. Estas membranas apresentam robustez mecânica, com um módulo de Young próximo de 4 GPa [14] e alguma elasticidade (tensão de rotura de 69 MPa [17]), o que permite obter substratos flexíveis e resistentes, com espessuras reduzidas [16]. Y. H.

Jung et al. [7] demonstrou que membranas ultrafinas de parileno não têm influência na perda de energia proveniente de um sinal de radiofrequência refletido por uma antena (*return loss*). Enfatiza-se, novamente, que o parileno desempenha também um papel enquanto barreira à humidade, gases corrosivos e outras condições ambientais adversas à preservação de metais e ao correto funcionamento dos dispositivos eletrónicos [5], [18]. Desta forma, assegura-se a vantagem de usar este polímero para encapsular componentes eletrónicos.

Todavia, apesar das vantagens da utilização do Parileno-C, note-se que o seu comportamento é prejudicado quando sujeito a altas temperaturas, por exemplo quando recozido a 120 °C (*annealing*), como referenciado em [18]. A temperatura aumenta a cristalinidade do polímero, tornando-o mais rígido e frágil e, por isso, as suas membranas perdem a elasticidade e flexibilidade que as caracteriza [5].

## 2.2. Tecnologia de Identificação de Radiofrequências (RFID)

Nos últimos anos, a tecnologia de Identificação de Radiofrequências tem, progressivamente, vindo a ser cada vez mais explorada e desenvolvida, com aplicações em áreas como rastreabilidade, logística (pagamentos, bilhetes de transportes) e controlo de acessos [9]. Uma vez que se trata de uma tecnologia de comunicação sem fios, que simultaneamente permuta energia (*power*) e informação e que permite a identificação remota de objetos, animais e pessoas, reúne algumas características que a tornam vantajosa também na área da saúde e nos dispositivos usados no corpo (*body-area*) [11], [19]. Além do mais, o sistema de RFID é compatível com dispositivos móveis, como são os smartphones; funciona a curtas distâncias; garante alguma segurança e proteção de dados do utilizador; a sua miniaturização é exequível e, por fim, é um sistema que pode funcionar em modo passivo, sem baterias ou pilhas [19-20]. Posto isto, a tecnologia de identificação de radiofrequências, ao garantir a troca de informação em tempo real, é ideal para garantir a comunicação com eletrónica *wearable*.

O sistema de RFID assenta na comunicação e troca de dados, através de ondas eletromagnéticas retrodispersas (*backscattered*), entre um dispositivo leitor (*reader*) que emite uma onda com uma determinada frequência e amplitude constante, quando em modo emissor, e uma etiqueta (*tag*). A figura 2.2 esquematiza a comunicação feita entre leitor e etiqueta. Este último elemento é composto por uma antena que recebe e transmite o sinal e, normalmente, por um circuito integrado (o chip IC) que guarda e processa a informação contida nesse sinal [9], [11], [19]. O dispositivo de RFID pode ainda conter sensores que permitam a monitorização de ambiente envolvente, nomeadamente sinais vitais quando colocado no corpo [11].

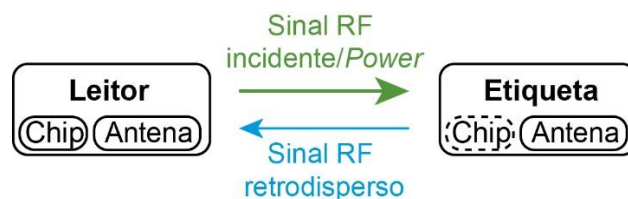


Figura 2.2: Diagrama de comunicação entre o leitor e a etiqueta de RFID, que inclui uma antena e possivelmente um chip IC. Está representado a verde o sinal de RF que alimenta a etiqueta e a azul o sinal refletido que contém a informação para ser lida.

Tendo em vista a aplicação desta tecnologia na pele do corpo humano, é necessário ponderar acerca das suas dimensões e design, da gama de frequências de trabalho e os possíveis efeitos dos respetivos campos eletromagnéticos no utilizador. Neste sentido, consoante a aplicação final, existem três principais gamas, a de baixas frequências (LF – 125 kHz a 134 kHz), a de altas frequências (HF – 1 MHz a 20 MHz) e a de ultra-altas frequências (UHF – 860 MHz a 2,48 GHz) [19], [21]. No caso das baixas frequências, as ondas eletromagnéticas são fortemente atenuadas com a distância, tendo uma curta distância de leitura de poucos centímetros [22], para além de que a largura de banda de funcionamento de um chip de RFID para esta gama de frequências é pequena. Para as altas frequências, como não são tão facilmente atenuadas, a distância de leitura é maior (até 1 m [22]). Por outro lado, os dispositivos que operam na gama das ultra-altas frequências, oferecem maior taxa de transmissão de informação e permitem também um maior nível de miniaturização, não obstante, estas ondas sofrem múltiplas reflexões entre o leitor e a etiqueta, causadas pelos objetos do meio envolvente [19].

### 2.2.1. Etiqueta de RFID

A etiqueta é a componente com mais relevância na tecnologia de RFID, sendo que as suas propriedades definem o funcionamento da mesma. Este elemento pode, então, ser classificado como ativo, semi-ativo ou passivo, consoante o seu sistema de alimentação. Quanto ao ativo e ao semi-ativo, com fontes de alimentação próprias, que alimentam os chips integrados, o custo da produção acresce [21]. Todavia, no caso do semi-ativo, a bateria só é necessária para ligar o chip, já que a comunicação é feita passivamente, recorrendo apenas às ondas eletromagnéticas retrodispersas [21]. Por outro lado, e apesar de oferecer uma distância de leitura mais curta, uma etiqueta passiva, que apenas funciona na presença de ondas RF, viabiliza um custo menor e dimensões mais reduzidas, uma vez que não possui qualquer tipo de fonte de alimentação própria, como uma bateria [9].

Este trabalho incide num sistema passivo que se encaixa na categoria de comunicação de campo próximo (*near-field communication* - NFC). Este facto relaciona-se com a distância de comunicação, ou seja, a distância máxima entre o leitor e a etiqueta que permite a comunicação entre os dois elementos. De um modo geral, para as antenas usadas em RFID de altas frequências (1 MHz a 20 MHz), a fronteira entre campo próximo (*near field*) e campo distante (*far field*), corresponde a uma distância da antena, em metros, dada pela expressão [23]:

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.1)$$

onde  $r$  diz respeito à distância à antena e  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda da frequência do sinal emitido.

O curto intervalo de leitura, característico destes sistemas e que é da ordem dos centímetros [9], [19], providencia segurança ao utilizador, já que a sua informação só pode ser identificada muito próximo dele. Na figura 2.3, apresenta-se o esquema onde são evidenciadas as diferentes regiões de deteção da antena do leitor de radiofrequências.

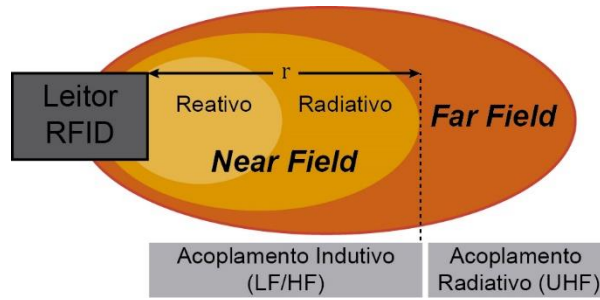


Figura 2.3: Esquema das regiões de detecção da antena do leitor, onde  $r$  corresponde à distância a que se encontra a fronteira entre campos. Observa-se também a relação entre a frequência, distância ao leitor e o tipo de acoplamento que se verifica na região de campo. Adaptado de [23].

No que diz respeito à fonte de alimentação deste sistema, é necessário considerar o acoplamento indutivo entre o leitor e a etiqueta. Este acoplamento consiste na transferência de energia entre dois circuitos elétricos por ação dos seus campos magnéticos, isto é, por indução eletromagnética [22]. Neste sentido, consoante as características da antena da etiqueta (números de espiras, secção transversal, área total) é possível dimensionar a corrente induzida nela e, assim, aumentar ou diminuir a energia e o alcance do sinal transmitido de volta ao leitor [22-23]. Ademais, neste sistema de RFID, a projeção da antena deve respeitar a condição de correspondência entre as impedâncias de entrada do chip e da antena, geralmente referido como *input impedance matching* da antena [24].

## 2.2.2. Antena de RFID

### Funcionamento

Como visto anteriormente, a etiqueta de RFID extrai a sua energia do campo eletromagnético proveniente do leitor, uma vez que as suas antenas estão acopladas indutivamente. Por outras palavras, ao receber um sinal, a antena da etiqueta converte o respetivo campo magnético em diferença de potencial [25]. Reforça-se ainda que este tipo de antenas são enrolamentos (antenas em *loop*) e, por isso, são sensíveis apenas ao campo magnético [25]. Além do mais, a eficiência dessa transferência de energia depende justamente da sintonização da antena com a frequência do sinal emitido [26]. Posto isto, e tendo em conta a sua relevância, é imperativo compreender o comportamento da antena para que seja bem projetada.

O funcionamento da antena baseia-se em princípios de eletromagnetismo, nomeadamente a Lei da Indução de Faraday (equação 2.3) e a Lei de Lenz:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{dA} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = -N \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (2.3)$$

onde  $\Phi_B$  corresponde ao fluxo do campo magnético,  $B$  a intensidade do campo magnético,  $A$  a área da superfície,  $\varepsilon$  a força eletromotriz,  $t$  ao tempo e, por fim,  $N$  corresponde ao número de espiras de um indutor.

No leitor de RFID é gerada uma corrente alterna que passa pela antena e, por isso, gera um campo eletromagnético que varia com o tempo. A variação do fluxo do campo magnético, nas proximidades da etiqueta, induz uma corrente na antena que, por sua vez, induz outro campo magnético com sentido oposto ao campo que lhe deu origem, como representado na figura 2.4. Portanto, quanto maior o número de espiras e a secção transversal das espiras da antena, maior o módulo da força eletromotriz gerada nas espiras da antena e, por isso, melhor o seu desempenho.

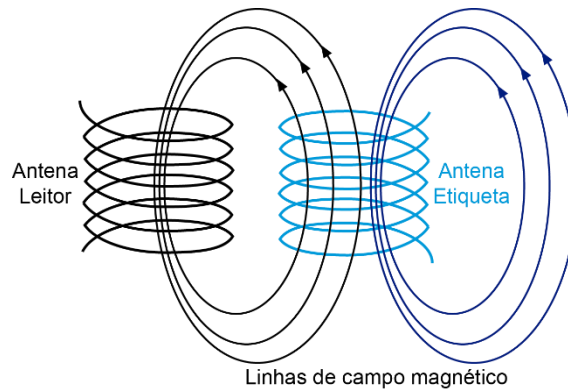


Figura 2.4: Esquema do acoplamento indutivo, onde os enrolamentos representam: a antenas do leitor (a preto) e a antena a ser produzida, a da etiqueta (a azul claro). Apresentam-se também as linhas de campo magnético: à esquerda, o campo gerado no leitor que induz corrente na antena da etiqueta e à direita o campo induzido por essa corrente, cujo sentido é oposto ao inicial.

### Circuito equivalente

A antena de RFID caracteriza-se como um indutor, no entanto não se comporta como um indutor ideal. Portanto, o circuito elétrico equivalente a esta antena (figura 2.5) consiste numa resistência em série, associada a perdas resistivas do enrolamento aquando da passagem de corrente. Inclui-se também um condensador, em paralelo, relacionado com capacidades parasitas que são consequência da proximidade entre as pistas metálicas [26].

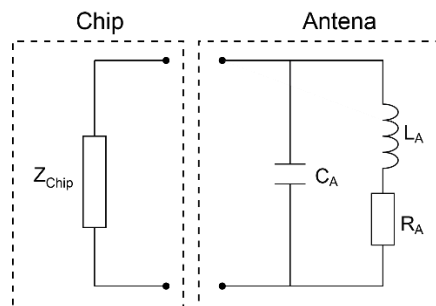


Figura 2.5: Circuito equivalente da etiqueta de RFID. À esquerda está representado a impedância equivalente do chip e à direita o circuito da antena, onde a sua impedância resulta em  $Z_A = C_A // (R_A + L_A)$ . Na etiqueta de RFID o valor de  $Z_A$  coincide com o de  $Z_{Chip}$ . Adaptado de [26].

Atendendo às características resistivas e capacitivas do chip e da condição de correspondência entre a impedância do chip e a da antena a produzir, a frequência de ressonância da etiqueta é dada por:

$$f_{\text{ressonância}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_A \times C_{\text{Chip}}}} \quad (2.4)$$

onde  $L_A$  corresponde ao valor de indutância da antena,  $C_{\text{chip}}$  diz respeito à capacidade interna do chip, cujos valores típicos são na ordem dos pF [1], [26] e, por fim,  $f_{\text{ressonância}}$  é a frequência de ressonância da etiqueta, que maximiza a corrente gerada na antena.

Se a frequência de ressonância do circuito for próxima da frequência do emissor (13,56 MHz), tanto a transferência de energia como a distância de comunicação entre a etiqueta e leitor, referidos anteriormente, são maximizados [26].

A influência da frequência no valor da impedância da antena é significativa, uma vez que os circuitos reais nunca são puramente resistivos, nem reativos [27], devido à presença de componentes “parasitas”, como se pode verificar pela figura 2.6a. A impedância da antena ( $Z_A$ ) toma um valor máximo quando a frequência do sinal, que nela incide, coincide com a de ressonância da própria antena (*Self-resonant frequency*, SRF); neste caso, a componente imaginária da impedância é nula e a antena é puramente resistiva. Para valores de frequência inferiores à de ressonância da antena, a componente imaginária é positiva e a antena comporta-se com indutor [26]. De forma oposta, para altas-frequência, ou seja, valores superiores ao de ressonância da antena, domina o comportamento capacitivo, como representado na figura 2.6b.

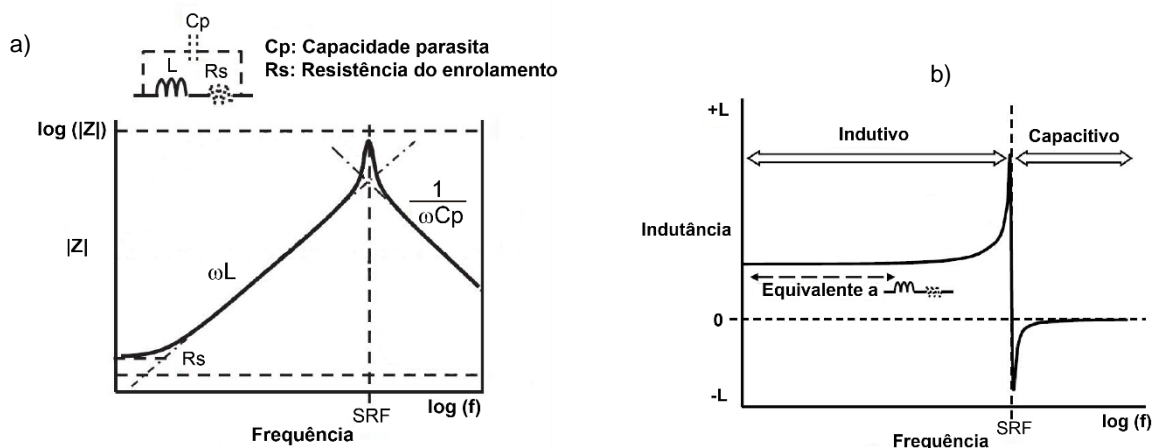


Figura 2.6: Espectros de impedância e indutância do circuito equivalente de uma antena em função da frequência. a) Resposta do módulo de impedância de um indutor à variação da frequência: valores crescentes até SRF e decrescentes para frequências superiores a SRF. b) Resposta da indutância à variação da frequência: valores positivos para frequências abaixo de SRF e valores negativos a partir de SRF. Adaptado de [27].

### Corrente gerada

Num circuito, como o da antena representado anteriormente, é necessário ter em conta a energia dissipada na resistência e a energia armazenada periodicamente na reatância, ou seja, no indutor e condensador [28]. Estes três elementos oferecem resistência à passagem da corrente, são eles que definem a impedância do circuito e, por isso, é necessário ter em conta estes parâmetros para calcular a corrente gerada na antena.

Quando se aproxima a antena de um emissor, ou seja, quando na presença de um campo eletromagnético, considera-se que nela é aplicada uma tensão variável no tempo dada pela expressão (2.5) e que gera uma corrente também variável no tempo, expressa por (2.6).

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.5)$$

$$i(t) = \hat{i} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.6)$$

Nestas expressões,  $\hat{u}$  e  $\hat{i}$  correspondem às amplitudes da tensão e corrente, respetivamente;  $\omega = 2\pi f$  corresponde à frequência angular, onde  $f$  diz respeito à frequência do sinal emitido e  $\varphi$  a fase entre a tensão  $u(t)$  e a corrente  $i(t)$  [29]. Considerando a fórmula de Euler,  $e^{jx} = \cos(x) + j\sin(x)$ , com  $j^2 = -1$ , é possível reescrever as expressões de cima na sua forma polar:

$$u^*(t) = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.7)$$

$$i^*(t) = \hat{i} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (2.8)$$

Tendo em vista a frequência que é relevante neste trabalho (13,56 MHz), a antena possui um comportamento indutivo que predomina perante o capacitivo e, por isso, nos presentes cálculos, consideram-se apenas a resistência e indutância do circuito equivalente. Desta forma, as tensões instantâneas nos respetivos elementos são dadas por:

$$u^*_R(t) = R_A \cdot i^*(t) \quad (2.9)$$

$$u^*_L(t) = L_A \frac{di^*(t)}{dt} = j\omega L_A \cdot i^*(t) \quad (2.10)$$

Num circuito indutor (circuito RL), como o indutor se opõe à corrente e armazena energia, a tensão instantânea apresenta um atraso de 90° em relação à corrente [30] ( $e^{j\varphi} = 1$ ), por isso, e considerando a impedância complexa do circuito equivalente da antena, vem que:

$$u^*(t) = \bar{Z} \cdot i^*(t) = (R_A + j\omega L_A) \cdot i^*(t) = (R_A + j\omega L_A) \cdot \hat{i} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.11)$$

Finalmente, temos que a amplitude complexa da corrente induzida na antena a uma frequência de 13,56 MHz pode ser expressa por:

$$\hat{i}^* = \frac{\hat{u}}{R_A + j\omega L_A} \quad (2.12)$$

## Design

Mais uma vez, reforça-se a importância dos parâmetros da antena, dado que este elemento estabelece as dimensões da etiqueta de RFID e a sua geometria determina o valor da indutância. Tendo em conta as geometrias mais comuns, retangular e circular, o cálculo da indutância de antenas planas é feito pelas expressões 2.13 e 2.15, respetivamente, que provêm da fórmula de Wheeler (1928) [31]. Assim, para o caso das antenas retangulares, o cálculo de indutância,  $L$ , é expresso por:

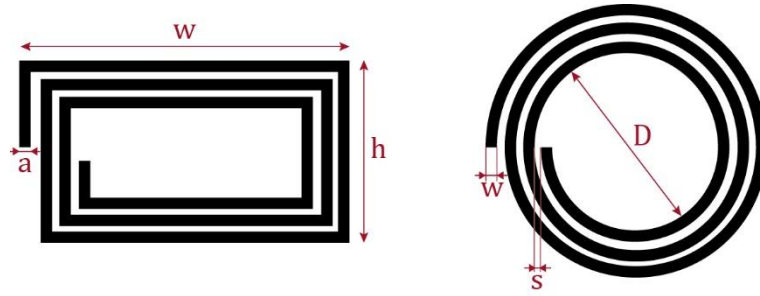


Figura 2.7: Esquema das geometrias retangular e circular que uma antena de RFID normalmente apresenta, com os respectivos parâmetros assinalados. Adaptado de [31].

$$L = \frac{N^2 \mu_0}{\pi} \left[ -2(w + h) + 2\sqrt{h^2 + w^2} - h \times \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{w}\right) - w \times \ln\left(\frac{w + \sqrt{h^2 + w^2}}{h}\right) + h \times \ln\left(\frac{2h}{a}\right) + w \times \ln\left(\frac{2w}{a}\right) \right] \quad (2.13)$$

onde  $L$  corresponde ao valor da indutância em H,  $N$  ao número de espiras,  $\mu_0$  à permeabilidade no vácuo,  $w$  à largura total da antena em m,  $h$  o comprimento total da antena em m e  $a$  corresponde à largura das pistas em m.

No caso de antenas cuja geometria é circular, determina-se primeiro a variável  $A$  (expressão 2.14) para determinar o valor de indutância (expressão 2.15):

$$A = \frac{D + N(w + s)}{2} \quad (2.14)$$

$$L = \frac{A^2 N^2}{30A - 11D} \quad (2.15)$$

onde  $D$  corresponde ao valor do diâmetro interno,  $w$  à largura das espiras e  $s$  ao espaçamento entre pistas, todos expressos em polegadas,  $N$  ao número total de espiras e  $L$  corresponde ao valor da indutância em  $\mu\text{H}$ .

## Técnicas de Deposição de Filmes Finos

### 3.1. Deposição de Parileno

As finas membranas de parileno são produzidas num sistema de deposição química em fase de vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*). A primeira etapa desse processo é a sublimação do parileno, seguida da reação de pirólise, em que passa de dímero a monómero e depois a deposição sob a forma de vapor à temperatura ambiente, formando um filme fino no substrato. Consoante o processo que ocorre em cada câmara do sistema, que estão ligadas entre si através de tubos que permitem a passagem de gás até à bomba de vácuo, este pode ser dividido em três fases como esquematizado na Figura 3.1. Complementa-se o processo com a existência de um dedo frio a  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  (*cold trap*), entre a câmara e a bomba de vácuo, para evitar a deposição de parileno na mesma e o seu incorreto funcionamento, uma vez que o parileno que não é depositado na câmara, condensa nesta armadilha fria [12].

Na primeira etapa, carrega-se o vaporizador com a quantidade desejada de parileno no estado sólido (dímero), que depende da espessura de filme que se pretende obter e é necessário esperar que se atinja uma pressão base de  $13,33\text{ Pa}$ . De seguida, a temperatura do vaporizador aumenta até  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a pressão da câmara de deposição aumenta e dá-se a sublimação do dímero. Logo depois, devido ao contínuo bombeamento pela bomba de vácuo, o parileno no estado gasoso flui para o forno de pirólise, que se encontra a uma temperatura de  $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ , onde se decompõe em monómero. Finalmente, o fluxo de gás continua até à câmara onde se condensa e começa a polimerizar, a uma temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , revestindo todas as superfícies presentes, incluindo o substrato [12].

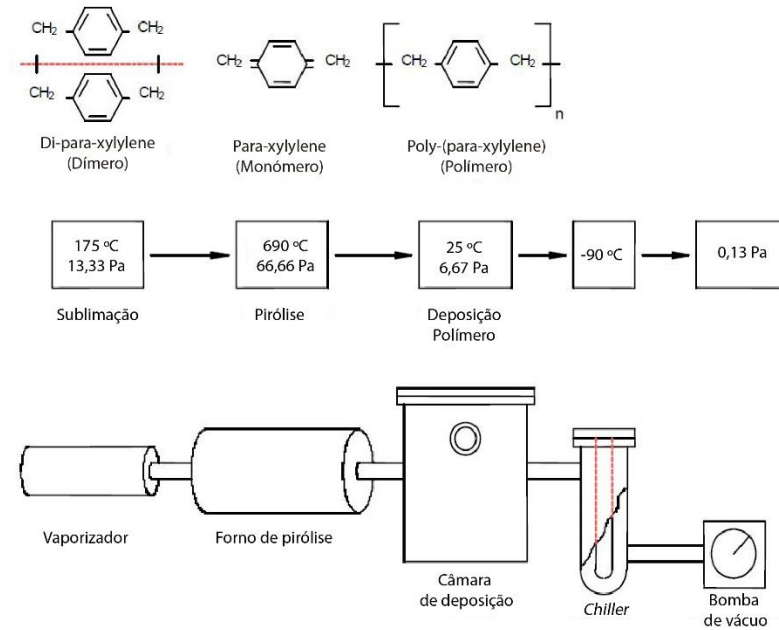


Figura 3.1: Esquema do sistema de deposição do parileno. Adaptado de [12].

Na figura 3.2 apresenta-se o sistema de deposição de parileno utilizado neste trabalho, esquematizado anteriormente, assim como o suporte onde são colocadas as amostras.

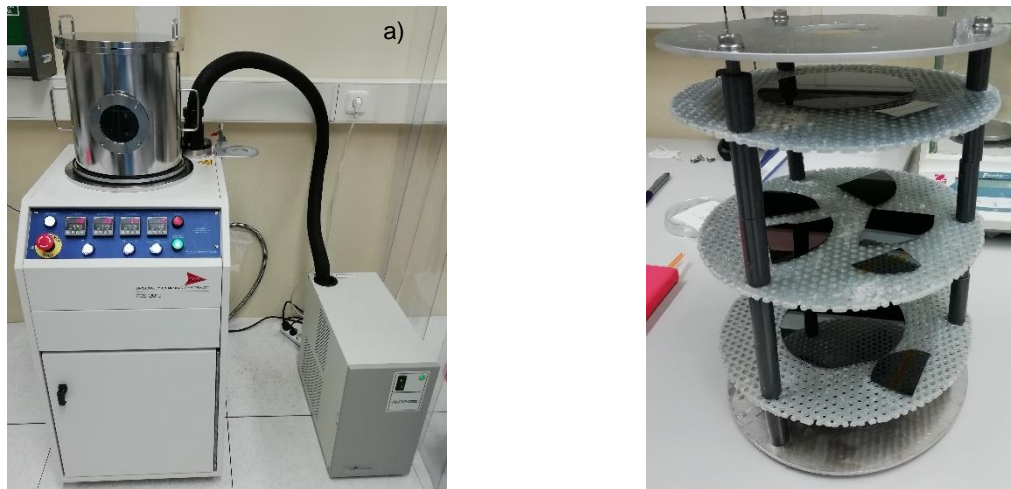


Figura 3.2: a) Sistema de deposição de parileno - Specialty Coating System PDS 2010 Labcoter 2. b) Porta-amostras com substratos de silício.

Uma vez que o suporte do sistema, que se observa na figura 3.2b, possui três prateleiras e cerca de 200 cm<sup>2</sup> de área útil, é possível a deposição de parileno num grande número de amostras de uma só vez.

### 3.2. Evaporação Térmica Resistiva

O processo de evaporação térmica, que se trata de uma deposição física em fase de vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*), baseia-se na evaporação de um material aquecido que se irá depositar num substrato. Neste procedimento é aplicada uma corrente elevada (60 mA) num cadinho de tungsténio, que contém o material a depositar, aquecendo-o de forma a fundir e evaporar. Na câmara, que

se encontra em alto vácuo, o material evaporado condensa no substrato, que tem uma temperatura inferior, originando então um filme fino.

A taxa de evaporação e, conseqüentemente, a espessura do filme são medidas através de um cristal de quartzo junto ao porta-amostras na câmara e estas dependem da corrente aplicada, que influencia a temperatura de evaporação e a pressão de vapor do material [32].

No processo de deposição é garantido alto vácuo ( $4,9 \times 10^{-5}$  Pa), através de uma bomba rotatória para atingir vácuo primário e de uma turbomolecular para garantir uma pressão inferior a  $3 \times 10^{-6}$  mbar ( $2,9 \times 10^{-4}$  Pa) na câmara. O nível de alto vácuo é controlado através de um sensor *penning* e é um parâmetro necessário para evitar oxidação quando são depositados metais [32]. Na figura 3.3, pode observar-se o sistema de deposição, bem como a ilustração do interior da câmara de vácuo.



Figura 3.3: a) Sistema de evaporação térmica resistiva (CENIMAT). b) Esquema do interior da câmara da evaporação.

### 3.3. Evaporação Térmica assistida por feixe de eletrões

A evaporação térmica por feixe de eletrões é uma técnica de PVD onde o alvo do material a depositar é bombardeado com um feixe de eletrões (*e-beam*), emitido de um filamento incandescente. O material é, então, fundido e evapora na câmara até condensar na forma de filme fino no substrato.

Nesta técnica, uma vez que o feixe de eletrões incide apenas e diretamente no alvo de material, a energia que lhe é transferida é maior e a eficiência é aumentada, relativamente à evaporação resistiva. Desta forma, há uma redução de gasto de material, bem como um aumento da taxa de deposição. A evaporação por *e-beam* tem ainda a vantagem, sob a evaporação térmica, de produzir filmes com reduzido grau de impurezas [33]. Tal como noutras técnicas de deposição de filmes finos, o controlo do nível de alto vácuo na câmara é importante para que o livre percurso médio das partículas seja elevado e estas não colidam com as do gás residual, evitando assim a formação de óxidos de alta resistividade [34].

Na figura 3.4, à esquerda observa-se o sistema de evaporação utilizado nas deposições deste trabalho e à direita a câmara de vácuo onde se identifica o cadinho, o porta-amostras, entre outros elementos.

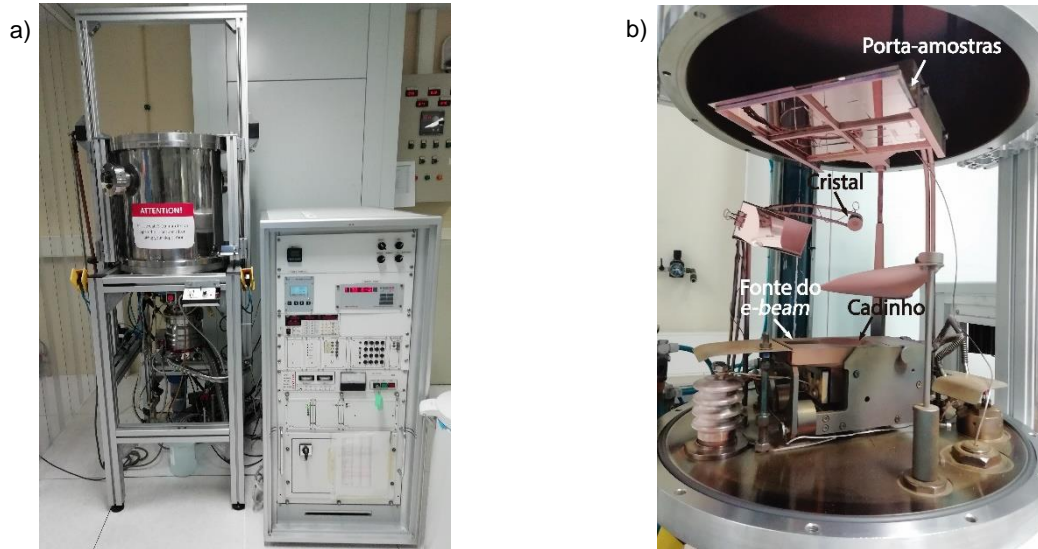


Figura 3.4: a) Sistema de evaporação térmica por *e-beam* (câmara limpa do CEMOP). b) Interior da câmara do sistema.

### 3.4. Pulverização Catódica de radiofrequência assistida por magnetrão

O princípio de funcionamento da pulverização catódica (*Sputtering*) consiste no bombardeamento por partículas energéticas (iões), provenientes de um gás inerte, no alvo sólido, fazendo com que os seus átomos sejam arrancados e, posteriormente, depositados no substrato [35].

Neste sistema é aplicada uma diferença de potencial entre o alvo (cátodo) e o substrato (ânodo) e são gerados eletrões livres que, quando acelerados pelo campo elétrico, colidem com os átomos do gás (árgon), ionizando-o. Quando neste processo se dá um equilíbrio entre a produção de iões e aniquilação de eletrões livres, proporciona-se uma descarga elétrica estável (criação de um plasma). Posteriormente, quando os iões são acelerados em direção ao cátodo, os átomos da sua superfície são ejetados, sendo que uma parte deles viaja pela câmara e outra parte é projetada para o substrato, condensando e formando assim um filme fino.

Com o intuito de aumentar a ionização por impacto, recorre-se ao uso de um magnetrão, que cria um campo magnético sobre o alvo. Desta forma, e uma vez que os eletrões são obrigados a descrever trajetórias segundo as linhas de campo, o plasma fica confinado. Há uma maior probabilidade de ionização, maior número de colisões diretas com o alvo e conseqüentemente maior taxa de pulverização [35-36].

Na figura abaixo, apresenta-se o sistema de *sputtering* utilizado, onde os elementos fundamentais ao seu funcionamento estão identificados.

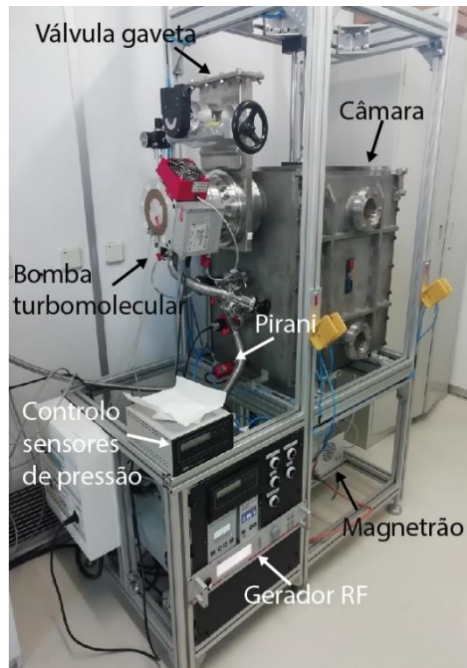


Figura 3.5: Sistema de deposição por pulverização catódica (DCM - Departamento de Ciência dos Materiais).



# 4

## Espectroscopia de Impedância

A espectroscopia de impedância é uma técnica frequentemente usada para caracterizar o comportamento elétrico de dispositivos eletrônicos, incluindo medir a impedância no domínio da frequência. Nesta técnica, é aplicada uma tensão alternada de pequena amplitude, cuja frequência varia num intervalo definido, e é medida a resposta da impedância, obtendo assim um espectro de frequência da impedância do dispositivo [37].

A impedância é um dos parâmetros fundamentais na caracterização de componentes elétricos e define-se como a oposição que o circuito oferece à passagem de uma corrente variável no tempo. Este parâmetro pode ser caracterizado como o efeito da resistência, capacidade e indutância do circuito num sinal AC de determinada frequência [38].

A impedância ( $Z$ ) é expressa como um valor complexo e a sua representação vetorial consiste numa parte real e numa parte imaginária, que correspondem à componente resistiva, a resistência ( $R$ ) e à reatância ( $X$ ), respetivamente, podendo ser expressa pelas suas coordenadas cartesianas ou polares como indicado na expressão (4.1) e esquematizado na figura 4.1.

$$Z = R + iX = |Z|. e^{i\theta} \quad (4.1)$$

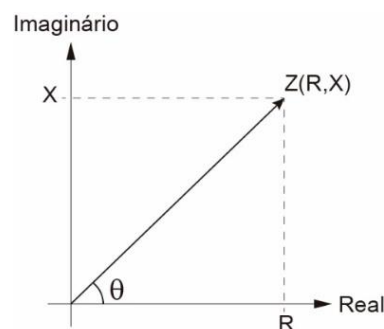


Figura 4.1: Representação cartesiana da Impedância ( $Z$ ).

As componentes da impedância representam o comportamento resistivo, capacitivo e indutivo de um dado circuito e a sua análise é feita considerando a impedância de cada um destes elementos.

Assim, consoante o facto de o circuito possuir uma componente indutiva ou capacitiva, a reatância comporta-se de forma diferente, tendo expressões diferentes e influência na impedância do circuito em cada caso, como se observa pela figura 4.2.

$$X_L = 2\pi fL = \omega L \quad (4.2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C} \quad (4.3)$$

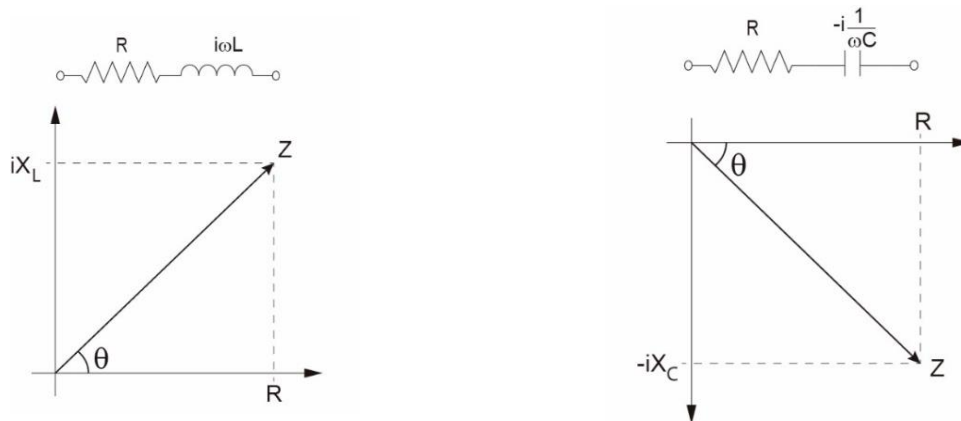


Figura 4.2: Relação da impedância com a reactância. a) Reatância indutiva. b) Reatância capacitiva.

Considerando a impedância de um indutor real (circuito presente na figura 2.6), ou seja, um indutor que tem também componentes resistas e capacitivas, é possível dividir o seu comportamento em três intervalos de frequência, como resumido na tabela 4.1. Primeiramente, sabe-se que numa determinada frequência, denominada de ressonância própria (SRF), o valor de impedância é máximo e ângulo de fase é  $0^\circ$ , tendo, por isso, um comportamento apenas resistivo [27].

Tabela 4.1: Relação da impedância de um indutor real com a frequência ( $f$ ). Identifica-se a forma da respetiva reatância, tendo como ponto de referência a frequência de ressonância própria da antena ( $f_{SRF}$ ).

$f = f_{SRF}$	$Img(Z) = 0$	$X = 0$	$Z = R$
$f < f_{SRF}$	$Img(Z) > 0$	$X > 0$	$Z = R + i\omega L$
$f > f_{SRF}$	$Img(Z) < 0$	$X < 0$	$Z = R - i\frac{1}{\omega C}$

Para valores de frequência muito abaixo de SRF, o circuito é equivalente a uma resistência ( $\theta = 0^\circ$ ), no entanto, à medida que a frequência aumenta, a impedância é crescente, a fase toma valores crescentes e positivos e, por isso, a reatância indutiva prevalece (figura 4.3a). Para valores acima do SRF, ou seja, para altas frequências, domina a resposta da capacidade parasita do enrolamento, apresentando um ângulo de fase negativo, como se verifica pela figura 4.3b.

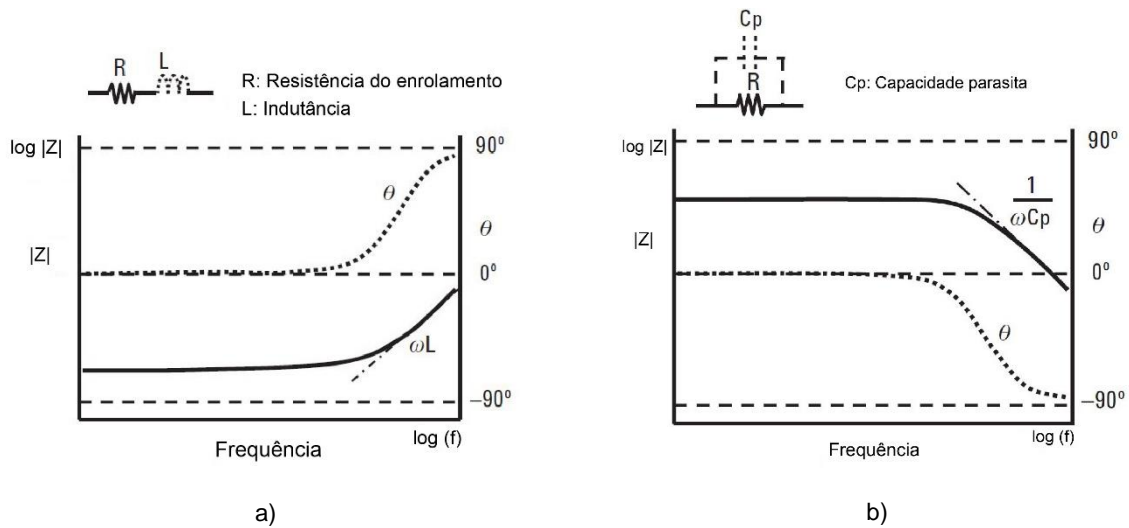


Figura 4.3: Espectros do módulo de impedância (linha preta, eixo à esquerda) e de ângulo de fase (linha a tracejado, eixo à direita). a) Resposta da impedância de um circuito RL à variação da frequência. b) Resposta da impedância de um circuito com capacidade parasita. Adaptado de [27].

Por conseguinte, a frequência de ressonância própria de um indutor, ou de uma antena, determina a frequência de funcionamento máxima em que o componente ostenta um comportamento desejado [27].





## Materiais e Métodos

### 5.1. Preparação do substrato

No presente trabalho, com o objetivo de servirem de substrato de suporte (*carriers*), utilizaram-se dois materiais: vidro e bolachas de silício. O primeiro é vidro de janela comum que serviu para testar e otimizar os processos de deposição e de padronização. O segundo material consiste em bolachas de silício monocristalino do tipo-p, onde se produziram as antenas finais sobre membranas de parileno.

#### 5.1.1. Limpeza

É da maior relevância a limpeza das superfícies dos substratos no momento anterior às deposições de filmes finos, uma vez que esta ação permite eliminar partículas residuais que lá possam existir. Com a limpeza prévia garante-se uma maior uniformidade e qualidade dos filmes, diminuindo-se também a probabilidade de estes apresentarem defeitos não relacionados com as deposições.

Ambos os substratos utilizados foram submetidos ao mesmo processo de limpeza, que consiste em três banhos: o primeiro de acetona, seguido de álcool isopropílico, depois o de água destilada. Por fim, os substratos foram secos com um jato de azoto ( $N_2$ ).

#### 5.1.2. Camada sacrificial

Num estudo feito anteriormente [8] concluiu-se que, ao acrescentar uma camada sacrificial de álcool polivinílico (PVA), torna-se mais fácil obter as membranas flexíveis de parileno. O PVA é um polímero solúvel em água [39] e, uma vez que se deposita entre o parileno e o substrato, quando mergulhado em água dissolve-se e deixa a membrana de parileno solta.

A solução de PVA foi preparada, com o auxílio de um agitador magnético, numa placa de aquecimento a 90 °C e 600 rpm, com uma concentração de 5% de PVA em peso em água destilada, cujo tamanho da cadeia é 20000 – 30000. O processo de dissolução do PVA em água foi demorado, cerca de três horas, visto que o polímero foi adicionado aos poucos.

A deposição de PVA foi feita por *spin-coating*, ou seja, colocou-se o substrato no *spinner* e com o auxílio de uma pipeta cobriu-se parcialmente a superfície com a solução. De seguida ligou-se o

*spinner* a 1000 rpm durante 60 s. Ao ter o PVA espalhado colocou-se, finalmente, o substrato numa placa de aquecimento a uma temperatura de 95 °C durante 5 min para que o filme fino formado secasse (*annealing*).



Figura 5.1: Bolachas de silício (*carriers*, 10 cm x 10 cm), depois da deposição do PVA.

Na figura 5.1 está apresentada uma fotografia de duas bolachas de silício cobertas de PVA e preparadas para a deposição de parileno.

## 5.2. Projeto e desenho de máscaras de fotolitografia

No processo de fabricação de microeletrónica é fundamental o uso de máscaras para que se possa transferir um padrão/desenho para o substrato. Para este efeito, utilizou-se o *software Adobe Illustrator CC 2015* para desenhar as antenas, com a geometria e características pretendidas. Numa primeira tentativa, estas máscaras foram impressas em acetato numa impressora comercial (*Canon PIXMA MG5250*). No entanto, para garantir a opacidade suficiente do desenho, foi necessário utilizar duas folhas sobrepostas, como se mostra na figura 5.2, o que originou um desalinhamento no padrão.



Figura 5.2: Máscaras para fotolitografia impressas em acetato. a) Máscara com duas folhas de acetato em contraluz. b) Suporte, em acrílico cortado a laser, para alinhar as folhas de acetato.

Com o objetivo de facilitar o processo e corrigir eventuais desalinhamentos, os mesmos desenhos foram impressos em fotolito, um filme de acetato fotossensível, para serem usados aquando da fotolitografia.

Ao longo do trabalho experimental, diferentes padrões foram produzidos e otimizados, consoante os resultados obtidos na padronização e na caracterização. Parte da evolução dos desenhos pode ser observada na figura 5.3 e as máscaras utilizadas formalmente podem ser analisadas nos Anexos. Inicialmente, os terminais das antenas encontravam-se em lados opostos e foram testadas diversas geometrias (figura 5.3a). Posteriormente, deu-se primazia a duas delas e desenharam-se algumas com características diferentes, tais como, número de espiras e largura das pistas, (figura 5.3b). Por fim,

reformularam-se os terminais das antenas e as suas dimensões de modo a que, depois de algumas etapas da fabricação, estes se encontrassem do mesmo lado (figura 5.3c).

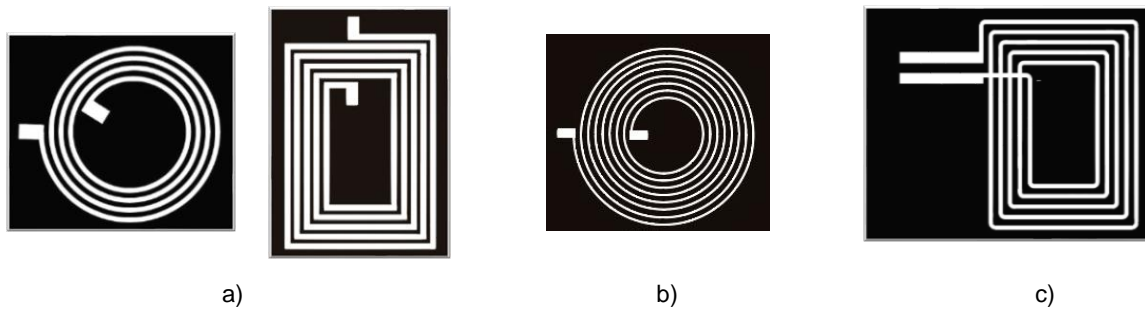


Figura 5.3: Exemplos de designs de antenas em *Adobe Illustrator*. a) Primeiros desenhos, cujos terminais das antenas se encontravam em lados opostos das espiras (Circular: 18,24 mm x 18 mm, Retangular: 18,90 mm x 13,30 mm; pistas de 500  $\mu\text{m}$ ). b) Variação do desenho da primeira antena circular, com o dobro das espiras (20,16 mm x 19,79 mm, pistas de 250  $\mu\text{m}$ ). c) Desenho otimizado, que originou a última máscara a ser impressa (25,39 mm x 18,18 mm, pistas de 500  $\mu\text{m}$ ).

## 5.3. Produção de filmes finos

### 5.3.1. Deposição de filmes finos

Na produção de microeletrónica, uma das etapas fundamentais é a deposição de filmes finos, com o intuito de se obterem os substratos e as camadas desejadas. Numa série de sucessivas deposições, a primeira fase consistiu na formação do substrato de parileno por CVD onde a sua espessura pode ser relacionada com a massa do polímero que é inserida no sistema [8], [40]. Uma vez que se pretendia obter um substrato que suportasse a sua manipulação durante os testes, testaram-se duas espessuras, 3  $\mu\text{m}$  e 5  $\mu\text{m}$ , cuja respetiva massa de parileno se encontra na tabela 5.1. Apesar de ambas terem mostrado resultados satisfatórios, optou-se pela mais espessa, como forma de garantir a durabilidade do dispositivo. Para além do substrato, depositou-se uma camada de encapsulamento com 1  $\mu\text{m}$  de espessura com o intuito de prevenir a oxidação do filme metálico e permitir isolar as pistas do terminal, que se sobrepõe às pistas, como se observou na figura 5.3c.

Tabela 5.1: Relação entre a massa de parileno depositada e a espessura obtida.

	Substrato		Encapsulamento
<b>Massa de parileno (g)</b>	5	10	3
<b>Espessura do filme (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	3	5	1

Após ter garantido o substrato, a deposição seguinte é a de filme fino de um metal. Aqui a técnica e o metal usados são escolhidos consoante a aplicação. Neste trabalho, testaram-se cinco metais depositados por três técnicas, tendo como resultado filmes com características distintas. Assim sendo, recorreu-se à pulverização catódica, disponível no Departamento de Ciência dos Materiais, para depositar cobre e crómio, segundo as condições apresentados na tabela 5.2. No entanto, o sistema apresentava uma fuga, que não pôde ser resolvida durante o decorrer dos trabalhos e os filmes obtidos apresentaram-se muito resistivos.

Tabela 5.2: Condições de deposição de filmes metálicos por pulverização catódica.

<b>Condições de Sputtering</b>	
<b>Material</b>	Cobre (Cu)
<b>Pressão base (mbar)</b>	$1,7 \times 10^{-5}$
<b>Pré-sputtering (min)</b>	10
<b>Potência gerador (W)</b>	150
<b>Fluxo de Árgon (sccm)</b>	20 (20%)
<b>Pressão câmara (mbar)</b>	$3 \times 10^{-3}$
<b>Tempo de deposição (min)</b>	60
<b>Espessura esperada (nm)</b>	300

Por este motivo, optou-se por se depositar metais pelo processo de evaporação térmica assistida por feixe de eletrões, existente na câmara limpa do CEMOP (Centro de Excelência de Microeletrónica e Optoeletrónica de Processos), onde se testaram filmes de ouro e titânio e de cobre e cujos parâmetros se mostram na tabela 5.3. É de notar que, utilizando os primeiros, existia uma limitação em termos de espessura máxima, por questões económicas, enquanto que com o alvo de cobre foi possível atingir valores mais elevados. Finalmente, experimentou-se também depositar alumínio num sistema de evaporação térmica resistiva (no CENIMAT - Centro de Investigação de Materiais) que apresentava um limite máximo de espessura a depositar de 100 nm.

Tabela 5.3: Condições de deposição de vários filmes metálicos por evaporação.

<b>Material</b>	<b>Evaporação Térmica por e-beam</b>		<b>Evaporação Térmica</b>
	Cobre (Cu)	Ouro/Titânio (Au,Ti)	Alumínio (Al)
<b>Densidade (g.cm<sup>-3</sup>)</b>	8,9	19,3	2,7
<b>Impedância acústica (x10<sup>5</sup> g.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	20,2	23,2	8,3
<b>Pressão na câmara (mbar)</b>	$7 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$
<b>Corrente aplicada (mA)</b>	90	50	58
<b>Taxa de deposição (nm/s)</b>	0,8	0,4	0,2
<b>Espessura esperada (nm)</b>	500	60	100

### 5.3.2. Fotolitografia

A fotolitografia é uma tecnologia fundamental para a microfabricação. Nesta, o utilizador consegue projetar e transferir um padrão para um substrato, recorrendo a uma fonte de luz, uma máscara e ao *photoresist*. Este último elemento consiste num polímero fotossensível que, depois de ser exposto à luz UV e passar pelo processo de revelação, cria um padrão sobre o substrato [41].

Após se proceder à limpeza do substrato, realizou-se a sequência de etapas de fotolitografia representada no esquema abaixo, onde a figura 5.4a apresenta o processo por erosão e a figura 5.4b por *lift-off*. O primeiro iniciou-se com o *spin-coating* do *photoresist* (*positive* AZ 6632), a 1500 rpm e 3000 rpm durante 10 s e 20 s, respetivamente, que se espalhou por toda a superfície por ser líquido.

De seguida, colocou-se a amostra numa placa de aquecimento a 115 ° C durante 1 min e 15 s (*soft-bake*) para que o solvente do *photoresist* evaporasse [42] e este aderisse ao substrato. A etapa seguinte, a mais importante para a padronização, é o alinhamento da máscara com o substrato, ao utilizar um alinhador, cuja fonte de luz é uma lâmpada de mercúrio. Depois da exposição, o *photoresist* que estava tapado com a máscara (zona a branco nas máscaras da figura 5.3) é removido quando mergulhado no revelador (AZ 726MIF), criando assim o padrão desejado. Por fim, o substrato é submerso numa solução de erosão, apropriada para o filme depositado, fazendo com que zonas protegidas pelo *photoresist* resistam a esse processo (*wet-etching*). Este procedimento foi utilizado com os filmes de alumínio e de cobre, com as respetivas soluções, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O (65%:6%:29%) e percloro de ferro (FeCl<sub>3</sub>), aquecidas previamente a 40 °C numa placa. A duração do processo de erosão depende da espessura do filme e da resolução da máscara usada, que no caso do alumínio ronda 1 min e 45 s e no do cobre os 20 s. É de notar que, assim que o padrão fica visível, deve mergulhar-se imediatamente em água para que as reações cessem, depois em acetona para retirar o *photoresist* e, por fim, em álcool isopropílico e água destilada para garantir a limpeza do substrato.

Contudo, o processo de fotolitografia pode também seguir o esquema da figura 5.4b), onde o filme metálico é depositado por cima do *photoresist* e a máscara utilizada é o negativo das representadas na figura 5.3. Neste contexto, após a revelação, mergulha-se o substrato em acetona de forma a que o filme seja removido quando o *photoresist* também o for (*lift-off*).

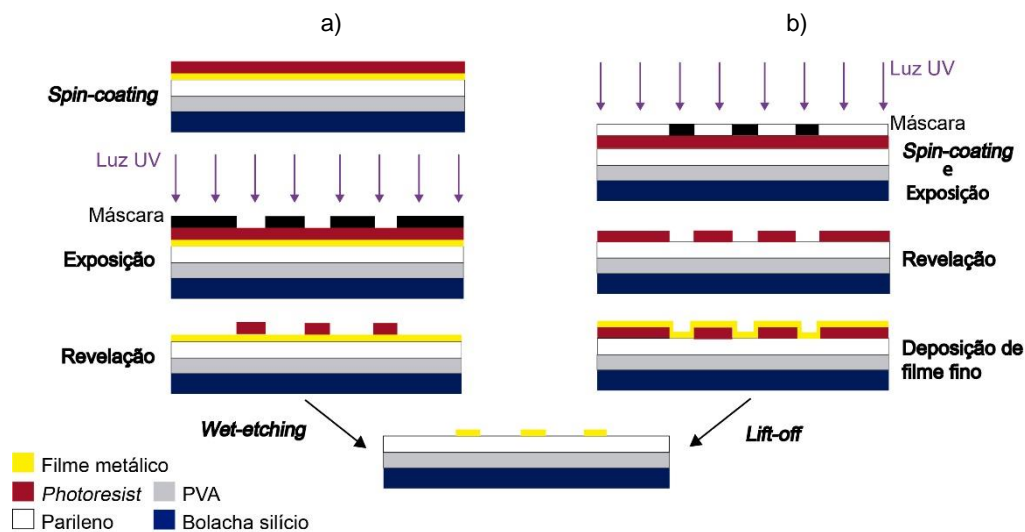


Figura 5.4: Esquema do processo de fotolitografia (não está à escala). a) Processo por erosão. b) Por *lift-off*.

Estes procedimentos são realizados sempre que se pretende ter alguma geometria de filmes finos. No entanto, é necessário também fazer ligações entre camadas diferentes. Por outras palavras, para que as antenas produzidas tenham os terminais na mesma direção (figura 5.3c), sem que haja curto-circuito nas pistas, deve depositar-se parileno para encapsular e depois abrir essa camada para permitir a ligação entre o novo filme metálico (terminal) e a pista da camada de baixo, bem como manter os dois terminais em contacto com o exterior. Neste seguimento, realiza-se fotolitografia com o padrão das áreas que se pretende abrir no parileno e procede-se à erosão por plasma de oxigénio (*dry etching*). As máscaras utilizadas neste processo estão expostas na figura 5.5.

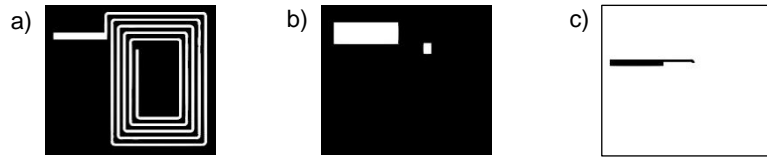


Figura 5.5: Design final otimizado. a) Máscara para padronizar, por erosão, o primeiro filme metálico depositado. b) Máscara utilizada no *dry-etching*; o parileno é aberto nas zonas a branco. c) Máscara para criar o terminal da antena, por *lift-off*, por cima da camada de encapsulamento.

No sistema de erosão seca (*dry etching*), que se observa na figura 5.6 a o substrato é colocado numa câmara de vácuo por cima do cátodo que gera um plasma quando é introduzido o gás ( $O_2$ ). Em semelhança ao sistema de *sputtering*, descrito no Capítulo 3, o cátodo é bombardeado pelos iões do plasma, que seguem trajetórias paralelas à normal da sua superfície, criando um perfil anisotrópico de erosão no substrato [43]. Este processo, esquematizado na figura 5.6 b, teve uma duração de 10 min, considerando a espessura da camada de encapsulamento de parileno (tabela 5.1) e originou a abertura no filme correspondente à máscara representada na figura 5.5 b. Finalmente, é depositado o último filme fino de cobre e, por *lift-off*, é padronizado o último terminal conforme se mostra na máscara da figura 5.5 c e se esquematiza na figura 5.6 b.

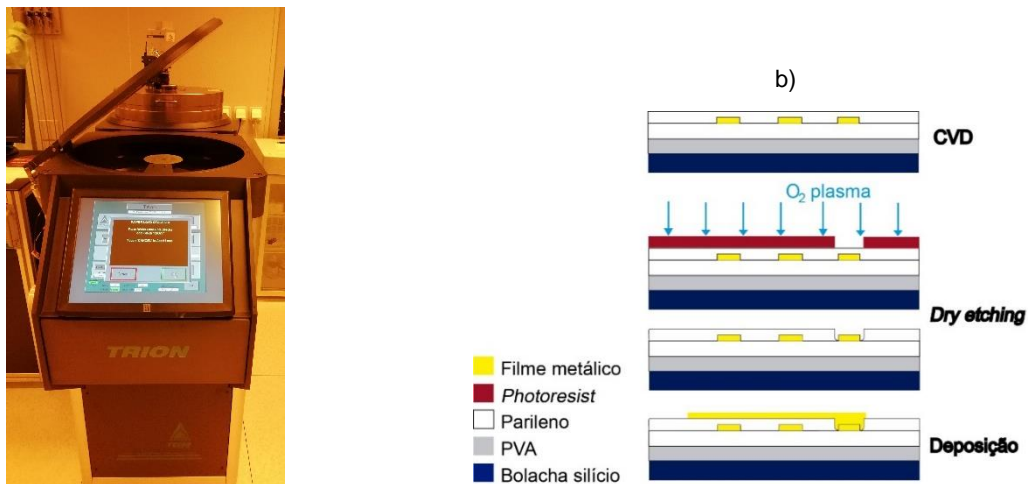


Figura 5.6: a) Sistema de *dry-etching* (Zona amarela da câmara limpa, CEMOP). b) Esquema do processo de *etching* e da finalização do protótipo.

### 5.3.3. Peel-off do parileno

A última etapa da produção do dispositivo corresponde ao *peel-off* do parileno depositado no substrato de silício (*carrier*), permitindo, então, adquirir as membranas flexíveis. Assim sendo, numa tina de água aquecida a 80 °C, mergulhou-se a amostra durante uns minutos para que o PVA se dissolvesse e se obtivesse a antena flexível. Por forma a que este processo fosse mais rápido, passou-se uma lâmina nas arestas da bolacha de silício, para raspar o parileno presente nessas zonas e facilitar a infiltração da água até à camada sacrificial. A figura seguinte apresenta fotografias deste processo em diferentes fases.

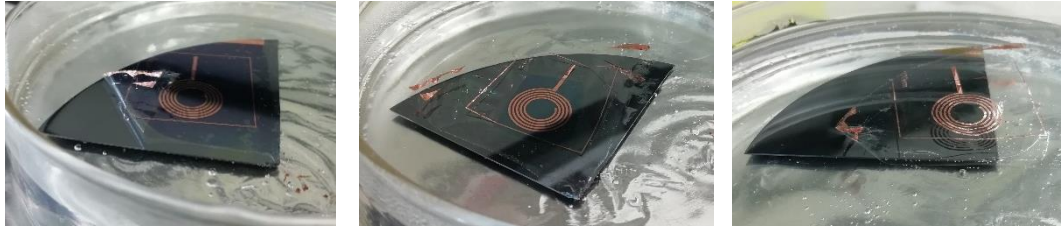


Figura 5.7: Fases sequenciais do processo de *peel-off* do parileno (antena teste).

## 5.4. Caracterização Superficial

No âmbito da caracterização dimensional dos filmes finos, recorreu-se ao perfilómetro *Ambios XP-Plus 200 Stylus* para medir a sua espessura. Este aparelho possui uma ponta de diamante, com um raio de  $2,5\ \mu\text{m}$ , que se desloca na vertical ( $z$ ) até estar em contacto com a amostra e depois varre-a na horizontal ( $x$ ), aplicando uma força de contacto (entre  $0,03$  a  $10\ \text{mg}$  [44]). O perfilómetro faz o varrimento num certo intervalo definido pelo utilizador (até  $55\ \text{mm}$  [44]) e, caso exista um degrau causado pela diferença de alturas no substrato, a conversão do sinal analógico em digital permite obter o perfil. Desta forma, é possível medir a espessura de todos os filmes depositados, tanto os metálicos, como os de parileno que, apesar de serem poliméricos, oferecem resistência à ponta, sem sofrerem danos.

Por outro lado, com o objetivo de medir a largura das pistas metálicas, padronizadas por litografia, utilizou-se o microscópio ótico *Olympus BX51*. Este aparelho ligado a um computador, permitiu a recolha de imagens, bem com a medição da sua geometria com o auxílio do *software* do microscópio.

## 5.5. Caracterização Elétrica

### 5.5.1. Curvas corrente-tensão (I-V)

Uma importante característica das antenas produzidas é a sua resistência, tendo em conta as suas dimensões. Para além da utilização de um multímetro digital, que é usado para o teste da continuidade, de forma a garantir a correta medição do valor de resistência, utilizou-se um sistema *Keysight Agilent 4155C* para obter as curvas I-V de cada antena. Neste aparelho, colocaram-se duas pontas de prova em cada terminal da antena (figura 5.8), foi-lhes aplicada uma diferença de potencial (DC) e mediu-se a resposta da antena em termos de corrente. Uma vez obtida a curva da corrente em função da tensão, determinando o declive da reta, obtém-se o valor da resistência, em regime contínuo.

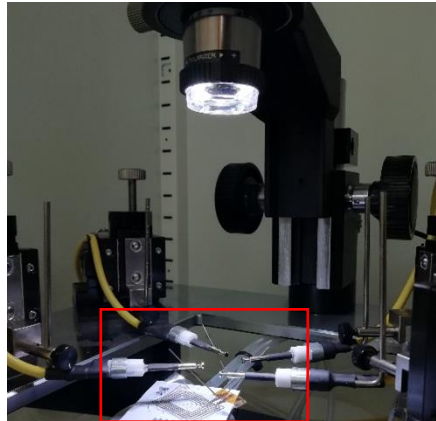


Figura 5.8: *Probe station* do *Agilent 4155C*. Encontram-se identificadas as pontas de prova em contacto com uma antena.

### 5.5.2. Espectroscopia de impedância

Na caracterização elétrica de antenas de radiofrequência é fundamental a correta análise da sua impedância, bem como da sua resposta à variação da frequência em termos de indutância, resistência e capacidade.

Neste sentido, recorreu-se ao analisador de impedância *Agilent 4294A* que, através de uma ponta de prova, aplica aos terminais da antena um sinal sinusoidal de amplitude 0,5 V e cuja frequência varia num intervalo de 40 Hz a 110 MHz medindo com elevada precisão a impedância [27]. Uma vez que este valor é complexo, em cada teste que se faz, o sistema mede apenas suas componentes real e imaginária do vetor de impedância e o *software* do sistema consegue convertê-las nos parâmetros desejados ( $|Z|$ ,  $\theta$ ,  $|Y|$ , R, X, G, B, C ou L) [27].

Este aparelho oferece a possibilidade de mudar a ponta de prova que melhor se ajusta à amostra a testar. À vista disso, utilizou-se a *pin probe*, apresentada na figura 5.9, para substratos rijos e o adaptador com *clip lead* que permitiu ligar um *zif* para substratos flexíveis.



Figura 5.9: Analisador de impedância (CEMOP), em funcionamento com a *pin probe*.

### 5.5.3. Medição da amplitude do sinal

De forma a testar o comportamento das antenas produzidas, utilizou-se um módulo de RFID (*VMA405*), que permite a leitura e escrita de etiquetas de RFID e consiste, fundamentalmente, numa

antena e num chip *MFRC522*. Este módulo é alimentado quando ligado ao *Arduino*, como se verifica na figura 5.10, com +3.3 V e tem uma frequência de trabalho de 13.56 MHz [45].

Simultaneamente, com as pontas de prova de osciloscópio ligadas em curto-circuito, formando uma antena de uma volta, a forma do sinal gerado pelo módulo pode ser observada no ecrã do osciloscópio. Da mesma forma, ao ligar as antenas produzidas ao osciloscópio e aproximando-as do leitor de RFID pode ser observado o sinal induzido na antena.

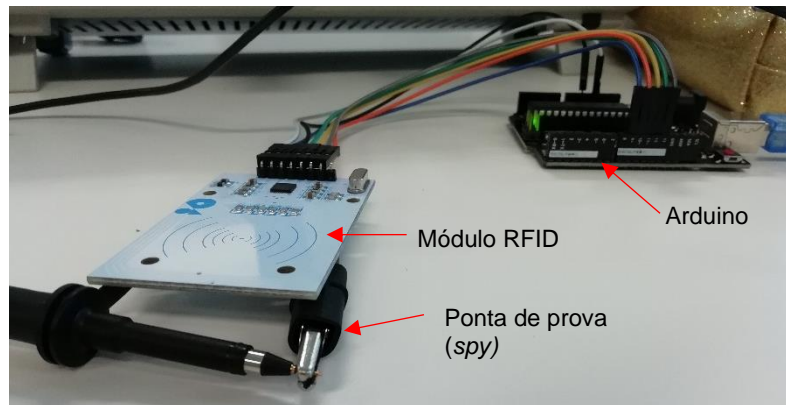


Figura 5.10: Módulo de RFID VMA405 ligado ao *Arduino*.



# 6

## Análise e Discussão de Resultados

No decorrer deste trabalho foi feita uma análise completa sobre produção de antenas em parileno, desde a decisão sobre qual o melhor metal a depositar e qual a técnica a usar (mencionadas no Capítulo 3), ao estudo da influência da geometria das antenas e que culminou na sua caracterização. Os métodos utilizados para obter os resultados estão descritos no Capítulo 5 e a evolução e discussão dos mesmos apresenta-se ao longo dos seguintes subcapítulos.

### 6.1. Escolha do metal

Com o objetivo de otimizar o processo de deposição de filmes finos e obter um valor de resistência baixo, testaram-se quatro metais de elevada condutividade elétrica depositados por três técnicas diferentes. Os parâmetros empregues estão descritos no Capítulo 5 e alguns dos resultados encontram-se na tabela 6.1.

O processo de pulverização catódica, apesar de ter sido considerado promissor, apresentou alguns problemas, associados a uma fuga de oxigénio, gerando filmes oxidados e, por isso, muito resistentes. Por outro lado, a evaporação térmica apenas possibilitava, em média, a deposição de 80 nm de alumínio, o que resultava em filmes muito finos e de resistência elevada. Pelo mesmo motivo, por produzir filmes com espessura limitada, a evaporação de ouro/titânio por *e-beam* não demonstrou ser a melhor escolha, ainda que a resistência dos filmes fosse mais baixa. Por último, evaporou-se cobre por *e-beam* o que viabilizou a deposição de filmes mais espessos e com menor resistência, tendo sido o processo escolhido para produção da maioria das antenas. Reforça-se que a escolha do uso desta técnica e do cobre se baseou, também, na comparação do valor de resistência obtido (medido com o *Agilent 4155C*) com o valor esperado, tendo em conta a expressão 6.1:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (6.1)$$

Na expressão anterior,  $R$  corresponde ao valor da resistência de um fio condutor,  $\rho$  à resistividade elétrica,  $l$  diz respeito ao comprimento total do enrolamento e  $A$  à secção transversal das pistas metálicas.

Tabela 6.1: Relação entre as técnicas de deposição, o metal depositado e a resistência do filme, tanto a obtida experimentalmente como a calculada teoricamente, considerando os valores de espessura e largura de pistas experimentais. Resultados para o mesmo design de antena: geometria circular com 4 espiras, com  $d_{int} = 11,01$  mm,  $d_{ext} = 17,78$  mm e largura de pistas de 500  $\mu\text{m}$  (valores teóricos).

	Pulverização Catódica	Evaporação Térmica	Evaporação por Feixe de Eletrões	
Metal	Cobre	Alumínio	Ouro/Titânio	Cobre
Espessura pistas (nm)	$297 \pm 10$	$101 \pm 4$	$113 \pm 12$	$692 \pm 5$
Largura pistas ( $\mu\text{m}$ )	$484 \pm 19$	$548 \pm 4$	$496 \pm 5$	$489 \pm 3$
Resistência esperada ( $\Omega$ )	$54,7 \pm 1,1$	$91,2 \pm 3,6$	$73,4 \pm 7,5$	$8,95 \pm 0,08$
Resistência ( $\Omega$ )	$1780,3 \pm 0,1$	$743 \pm 3$	$188,6 \pm 0,3$	$12,2 \pm 0,4$

Nas figuras 6.1a e 6.1b, apresentam-se imagens de microscópio ótico de dois exemplos de antenas produzidas em vidro, em que os filmes foram depositados por evaporação térmica assistida por feixe de eletrões e padronizados por *lift-off*. A figura 6.1b diz respeito a uma ampliação da antena de cobre completa exposta na fotografia da 6.1c e cujos parâmetros estão indicados na tabela 6.1.

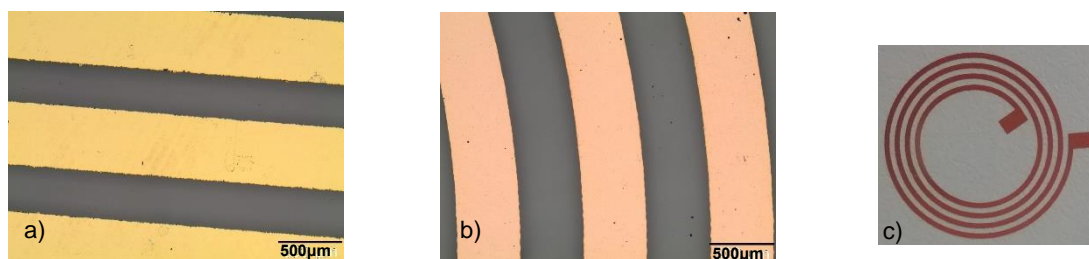


Figura 6.1: Imagens de dois exemplos de antenas produzidas em vidro por *lift-off*. a) Antena retangular de ouro e titânio (evaporação por *e-beam*). b) Antena circular de cobre (evaporação por *e-beam*). c) Antena completa circular de cobre.

Os dados das antenas, que podem ser contemplados na tabela de cima, foram retirados através de gráficos como os apresentados na figura 6.2. Na figura da esquerda encontra-se um exemplo de perfil que diz respeito a uma espessura de pista da antena de cerca de 700 nm. Na figura 6.2b) mostra-se uma curva de corrente em função da tensão aplicada (DC) na antena e que permite obter a resistência da mesma, através do declive da reta.

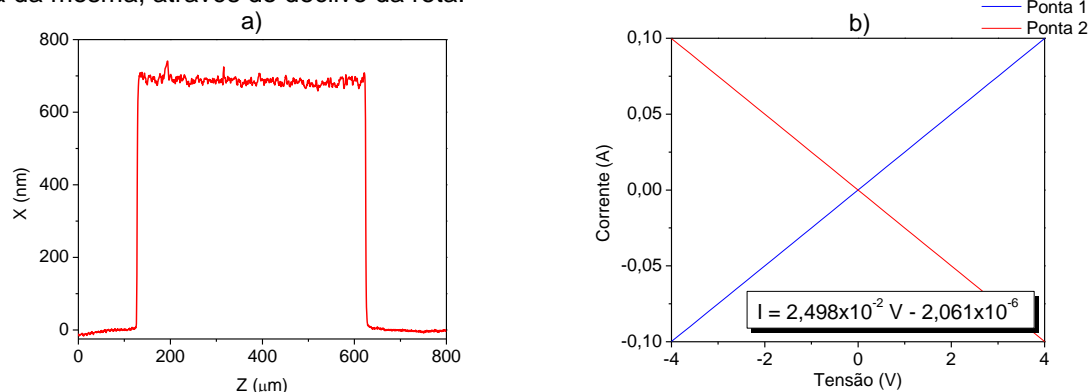



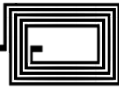

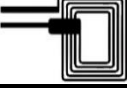
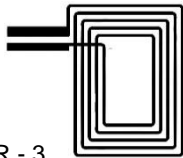
Figura 6.2: a) Exemplo do perfil, criado pelo perfilómetro, de uma pista metálica de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  de largura. b) Curva da corrente, medida pelas pontas do *Agilent 4155C*, em função da tensão aplicada. Neste caso, pela lei de Ohm, corresponde a um valor de resistência de 40,04  $\Omega$  (inverso do declive).

## 6.2. Influência da geometria

O processo de produção de filmes foi otimizado e consistiu na evaporação resistiva de cobre, assistida por feixe de elétrons, cuja espessura dos filmes ficou compreendida no intervalo de 500 nm a 800 nm. Posto isto, a seguinte etapa do estudo focou-se na produção de antenas com duas geometrias e variadas dimensões e número de espiras, resultando em parâmetros diferentes (Resistência, Indutância), como se pode analisar pelos valores abaixo apresentados. A tabela 6.2 reúne a evolução do design das antenas produzidas, incluindo dados de cinco, entre elas duas de geometria circular (C) e três retangulares (R), com dimensões semelhantes entre as C-1 e R-1 e as C-2 e R-2 (altura total x largura total do enrolamento). Depois de fixado o número de espiras, aumentaram-se as dimensões gerais, já que estas têm uma forte influência no valor de indutância de uma antena e obteve-se uma geometria otimizada, a R-3. Na tabela apresentam-se dois valores de resistência, um esperado que consiste no cálculo de resistência, utilizando a expressão 6.1, com os valores medidos da secção transversal (espessura do filme e largura das pistas) e um valor real medido pelo *Agilent 4155C*. Por último, estão expostos também, os valores esperados de indutância de cada antena, tendo em conta os valores reais de resistência e as dimensões da respetiva antena, calculados através das expressões 2.13 e 2.15.

Ao longo deste trabalho, todos os desenhos foram testados primeiramente depositando o cobre diretamente sobre vidro. Posto isto, uma vez que os desenhos de C-1 e R-1 foram os primeiros a serem reproduzidos, os valores obtidos acerca destas dizem respeito a antenas produzidas em vidro. Após a otimização dos processos de produção, realizou-se a padronização no parileno e, por isso, os valores apresentados das antenas C-2, R-2 e R-3 foram adquiridos nestas condições, ainda que mantendo a sua produção em vidro.

Tabela 6.2: Parâmetros de antenas produzidas, com diferentes geometrias, dimensões (altura total x largura total), valor de resistência e de indutância esperados.

Geometria	Dimensões (mm <sup>2</sup> )	Espessura filme (nm)	Resistência (Ω)		Indutância (μH) Esperada
			Esperada	Real	
C - 1 	18 x 18	742 ± 12	8,3 ± 0,2	11,65 ± 0,02	0,4 ± 0,1
R - 1 	19 x 13	776 ± 5	11,7 ± 0,2	14,48 ± 0,03	0,87 ± 0,02
C - 2 	13 x 13	512 ± 59	12 ± 2	13,19 ± 0,02	0,3 ± 0,4
R - 2 	15 x 12	512 ± 12	17,2 ± 04	15,73 ± 0,03	0,74 ± 0,02
R - 3 	25 x 18	796 ± 66	15 ± 2	35,1 ± 0,1	1,30 ± 0,02

Note-se que em Apêndices se encontra o dimensionamento mais detalhado de todas as geometrias desenhadas.

A figura 6.3 mostra várias antenas do tipo C-2 e R-2 em diferentes estágios de produção e sob diferentes substratos. Na figura 6.3a encontram-se antenas de cobre em parileno, antes da última deposição para padronizar o terminal em falta e na figura 6.3b pode observar-se uma antena finalizada de cobre diretamente em vidro (geometria C-2).

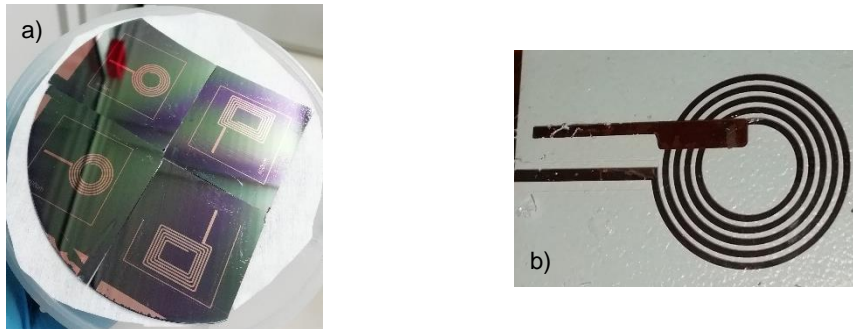


Figura 6.3: Antenas de cobre em fases diferentes de produção. a) Antenas C-2 e R-2 em parileno (Parileno/Si). b) Antena C-2 finalizada em vidro.

### 6.3. Caracterização de Impedância

Posteriormente à produção das antenas, realizou-se a sua caracterização com o auxílio da espectroscopia de impedância, referida no Capítulo 4 e que permitiu obter os espectros apresentados abaixo.

#### Substrato

Durante o processo de otimização de deposição e de padronização, as antenas foram depositadas diretamente sobre vidro e sobre parileno e, para que se fizesse a caracterização completa, estudou-se a influência desses substratos no comportamento da antena, antes de se fazer o *peel-off* da membrana de parileno. Desta forma, realizou-se a espectroscopia de impedância, utilizando o *pin probe* do *Agilent 4294A*, para as antenas em silício e em vidro (figura 6.4a) e o adaptador com *cleap head* ligado ao *zif* para caracterizar a antena depois do *peel-off* (figura 6.4c).

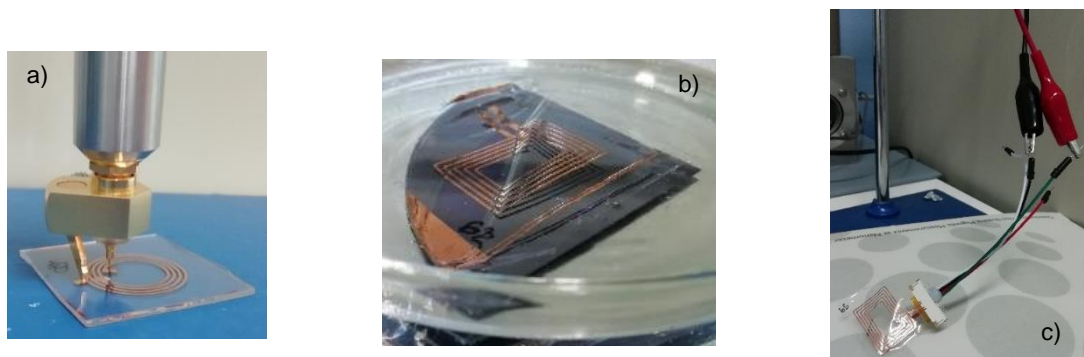


Figura 6.4: a) Exemplo da aplicação do *pin probe* no substrato, durante a execução dos testes a uma antena C-1. b) Fotografia durante o processo de *peel-off* da antena R-3. c) Membrana flexível de parileno com antena R-3, ligado ao *agilent* através do *zif*.

Posto isto, a figura 6.5 consiste no espectro do módulo de impedância de duas antenas de cobre do tipo R-3: a preto está apresentada a curva da antenna produzida em parileno/Si (pistas de cobre sobre parileno depositado na bolacha de silício), a tracejado a curva depois de se fazer o *peel-off* dessa antenna e a curva azul preenchida diz respeito à segunda antenna diretamente depositada em vidro (pistas de cobre sobre vidro).

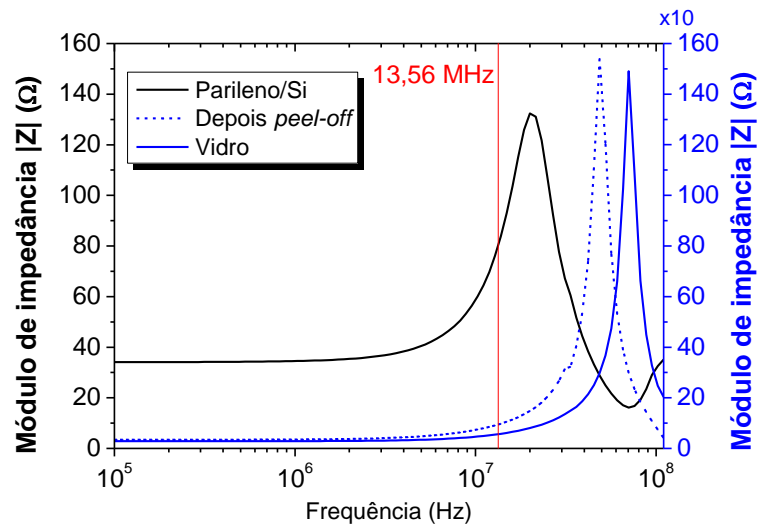


Figura 6.5: Gráfico da variação do módulo de impedância com a frequência de uma antenna R-3 com parileno como substrato (curva a preto), da antenna em membrana flexível, depois do *peel-off* (curva a tracejado) e de outra antenna R-3 produzida em cima de vidro (curva a azul).

Analisando o gráfico de cima verifica-se que, para a mesma geometria de antenna, há uma discrepância de valores máximos de impedância e um desvio no pico de ressonância, consoante se o substrato *carrier* é o silício ou o vidro. Portanto, quando a antenna em parileno está sob a bolacha de silício, o pico de ressonância é mais largo e próximo dos 13,56 MHz, enquanto que para a antenna produzida diretamente em cima do vidro os valores de impedância aumentam uma ordem de grandeza e o seu pico de ressonância aproxima-se dos 70 MHz. Para além disso, observa-se que depois de se fazer o *peel-off* da membrana flexível, a curva de impedância assemelha-se à da antenna em vidro, havendo ainda uma aproximação do valor de frequência de ressonância aos 13,56 MHz.

Assim, deduz-se que o substrato de silício influencia o comportamento da antenna, uma vez que se trata de um semiconductor e, por isso, é possível que possam ser induzidas correntes parasitas que afetem os valores de impedância medidos [27]. Em contrapartida, esse fenómeno não se verifica na antenna em vidro, já que se trata de um material dielétrico. Dito isto, e tendo em conta a semelhança entre as curvas azuis, depreende-se que o parileno também não influencia os parâmetros medidos, em virtude das suas propriedades dielétricas, mostrando a sua aplicação vantajosa enquanto substrato e camada de encapsulamento. Reforça-se esta ideia ao verificar a proximidade entre o valor de resistência da antenna produzida vidro, que corresponde a  $R_{vidro} = (33,45 \pm 0,09)\Omega$  e ao da antenna R-3 produzida em parileno, que toma um valor de  $R_{parileno} = (35,1 \pm 0,1)\Omega$ .

## Antena completa

A evolução do desenho das antenas culminou na geometria R-3, sendo que esta garante um valor esperado de indutância mais alto e apresenta bons resultados na caracterização elétrica. Posto isto, procede-se a uma análise detalhada, nomeadamente do espectro do módulo de impedância e da fase em função da frequência de uma antena R-3 flexível e finalizada, como se mostra na figura 6.6.

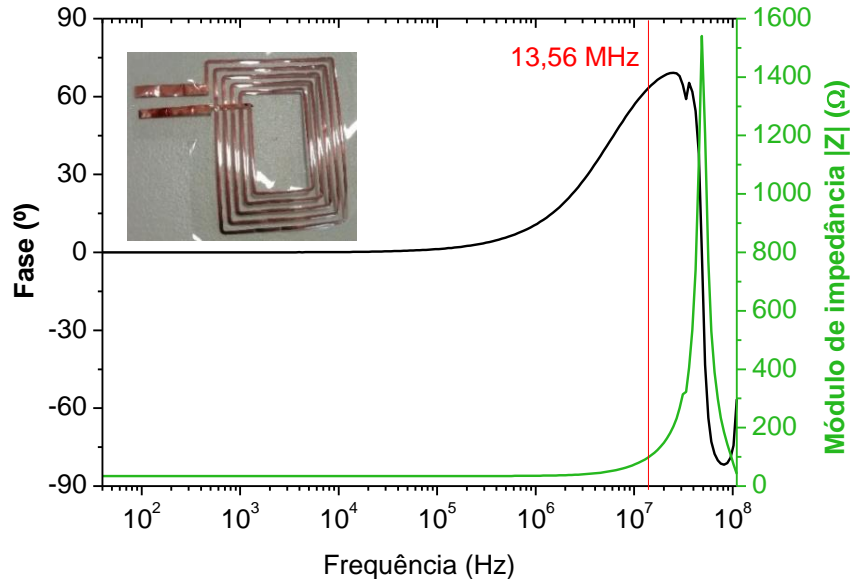


Figura 6.6: Espectro de fase e de módulo de impedância. A imagem apresenta a antena retangular (R-3) de cobre em parileno que se utilizou para retirar os dados apresentados (25,39 mm x 18,18 mm; largura de pistas:  $(490,7 \pm 4,5) \mu\text{m}$ ; espaçamento entre pistas:  $(728 \pm 15) \mu\text{m}$ ; espessura do filme das pistas:  $(796 \pm 51) \text{nm}$ ).

Observa-se que, para baixas frequências, a impedância e o ângulo de fase se mantêm constantes, sendo que o último toma um valor de  $0^\circ$  e, por isso, pode-se confirmar o comportamento puramente resistivo da antena. Com o aumento da frequência, mais especificamente a partir de  $10^6$  Hz, verifica-se um aumento dos valores dos dois parâmetros, o que corresponde à predominância do comportamento indutivo. Constata-se também que, no pico de ressonância da antena, a fase retoma um valor nulo e, a partir desse valor elevado de frequência, a fase desce para valores negativos.

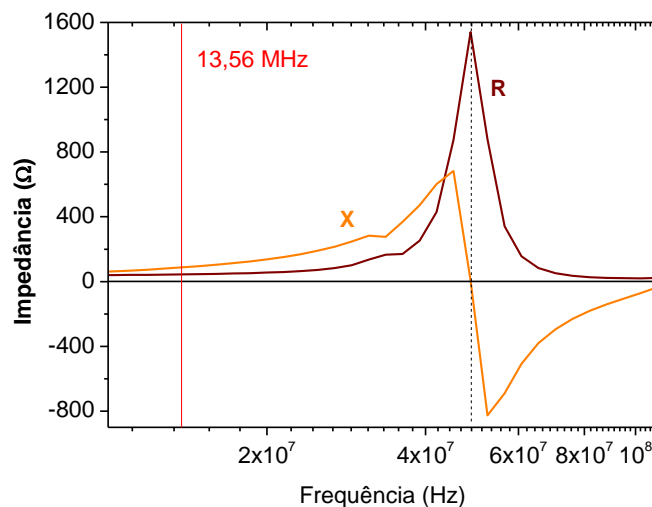


Figura 6.7: Espectro de impedância discriminada em resistência ( $\text{Real}(Z)$ ) e reatância ( $\text{Img}(Z)$ ), no intervalo de 10 MHz a 110 MHz.

Na figura de cima, verifica-se que na frequência de ressonância (48 MHz) a reatância é nula, logo a antena é puramente resistiva e o seu valor de resistência é máximo, coincidindo com o valor do módulo de impedância no pico de ressonância da figura 6.6. Para frequências abaixo da de ressonância, a parte imaginária da impedância (reatância) é positiva e, por isso, a antena tem um comportamento indutivo, sendo este o intervalo de frequências relevante para este estudo. Para valores de frequência superiores à de ressonância, a reatância é negativa e a capacidade parasita que surge entre pistas metálicas predomina.

De forma a simplificar o circuito equivalente da antena e os cálculos associados despreza-se a capacidade parasita inerente. No entanto, para ajustar a frequência de ressonância das antenas produzidas, pode voltar a considerar-se o circuito RLC e a expressão (2.4) que determina essa frequência para este tipo de circuitos equivalentes. Assim, em termos de design e produção, aumentando a área total metálica, é possível aumentar a capacidade da antena e, por isso, aproximar a respetiva frequência de ressonância dos 13,56 MHz.

### Antena comercial

De seguida, fez-se um estudo comparativo com uma antena comercial proveniente de um cartão de metro, cujas características estão apresentadas na tabela 6.3 e na imagem na figura 6.8. A geometria R-3 é a que mais se assemelha à antena comercial, por isso, os seguintes espectros referem-se aos dados das duas antenas.

Tabela 6.3: Parâmetros da antena retangular, em papel, do cartão de metro utilizado para fazer estudos comparativos com as antenas produzidas.

Número de espiras	Dimensões (mm <sup>2</sup> )	Largura das pistas (μm)	Espessura (μm)	Resistência (Ω)
7	70 x 46,5	665 ± 5	141 ± 1	4,5 ± 0,1

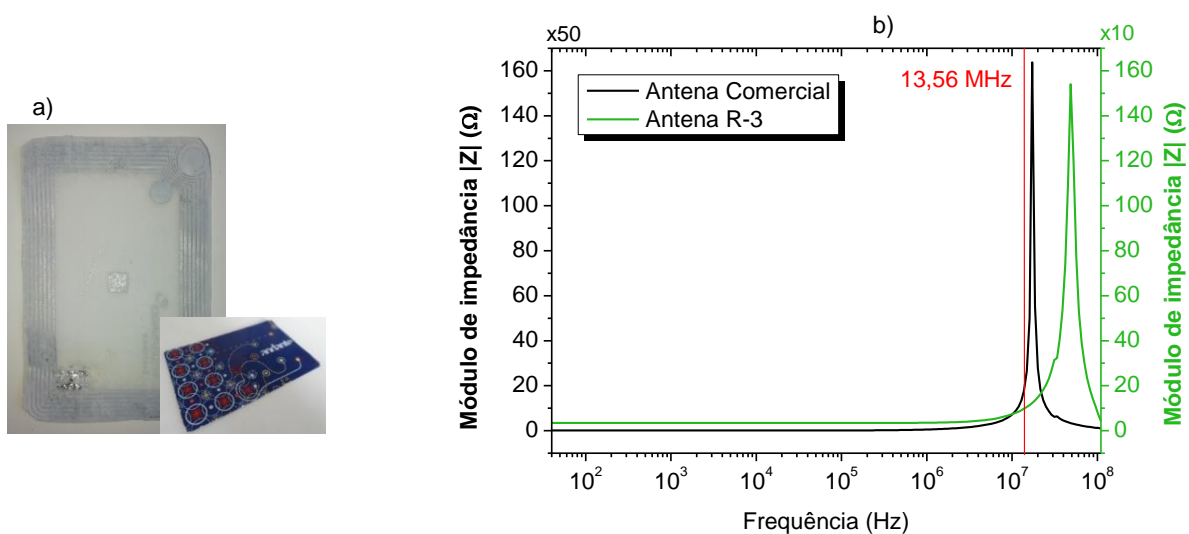


Figura 6.8: a) Imagem da antena retangular do cartão de metro comum. b) Espectro do módulo de impedância da antena comercial e da produzida R-3.

O espectro ostenta a comparação entre a impedância da antena de cobre produzida (presente na figura 6.6) e a da antena do cartão, onde se nota uma diferença significativa nos valores máximos de impedância. Para além disso, observa-se que a frequência do pico de ressonância da antena do cartão está muito próxima da linha dos 13,56 MHz. Este valor de frequência de ressonância é o da etiqueta de RFID (antena e chip), no entanto, quanto mais próximo estiver o pico de ressonância da antena deste valor, mais otimizada está a antena e, por isso, maior a transferência de energia e a corrente gerada, bem como maior a distância de leitura. Assim, conclui-se que são as dimensões e parâmetros da antena comercial que garantem um módulo de impedância elevado, apesar de um valor de resistência baixo e, por isso, permitem uma maior corrente gerada e uma maior transferência de energia, sendo coerente com uma distância de leitura maior (distância de validação do cartão).

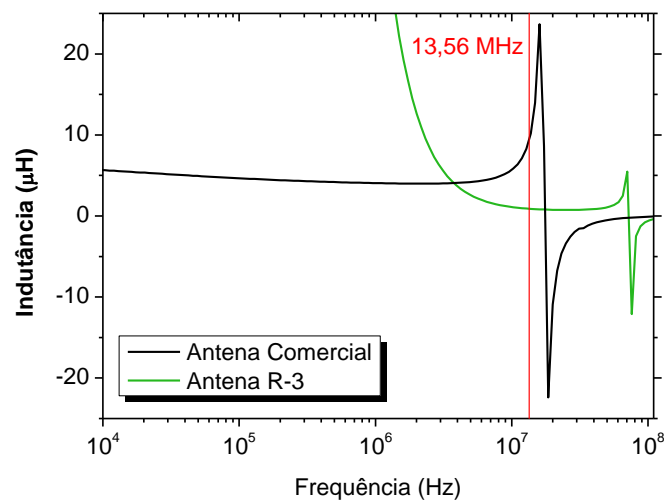


Figura 6.9: Espectro de indutância da antena comercial e da produzida R-3, no intervalo de 0,01 MHz a 110 MHz.

Analisando o espectro da indutância das duas antenas, confirma-se que, apesar terem um comportamento semelhante, os parâmetros da antena R-3 produzida (número de espiras, dimensões, espessura das pistas) não permitem que o seu valor de indutância seja maior e, por isso, a frequência de ressonância também é mais afastada dos 13,56 MHz.

## 6.4. Amplitude do sinal gerado

Por forma a avaliar o desempenho das antenas produzidas, utilizou-se o módulo de RFID em modo emissor e mediu-se a amplitude do sinal gerado nelas. À vista disso, aproximando a ponta de prova do osciloscópio (antena espia) do módulo, que estava ligado ao *Arduino*, como descrito na subsecção 5.5.3, foi possível adquirir a amplitude do sinal sinusoidal gerado. Da mesma maneira, utilizando apenas a antena R-3 nas proximidades do módulo (como representado na figura 6.10a), foi possível adquirir amplitude máxima do sinal induzido nesta, com a frequência de 13,56 MHz, como se mostra na figura 6.10b.

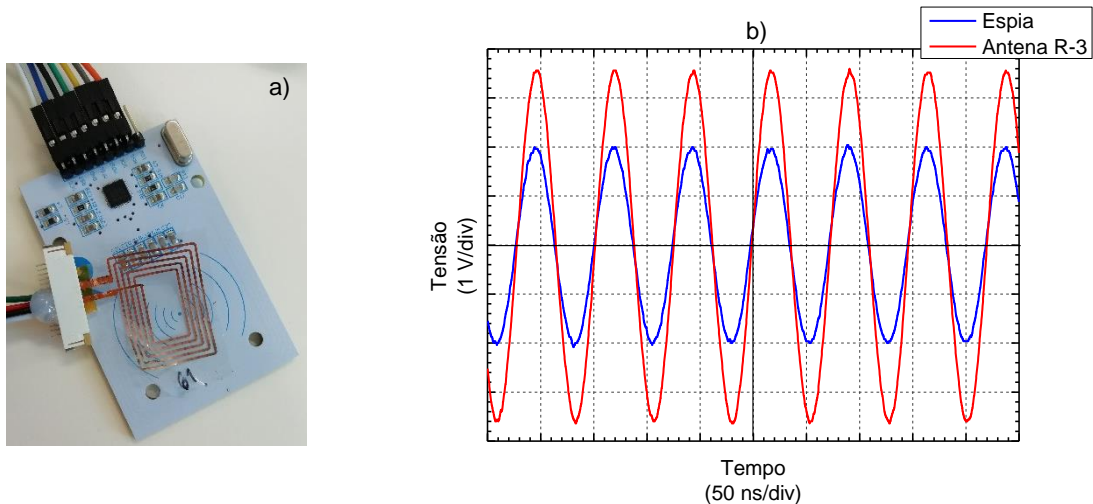


Figura 6.10: a) Posição da antena R-3 (ligada ao osciloscópio), por cima do emissor de RFID, durante a aquisição de dados. b) Sinal medido pelo osciloscópio, gerado na ponta de prova sozinha (antena espia – espira única, sinal a azul) e na antena produzida em parileno R-3 (sinal a vermelho) e induzido pelo módulo de RFID.

De seguida, tendo a antena espia de um lado do emissor, ligada a um canal do osciloscópio, e aproximando a antena R-3, ligada a outro canal, como exposto na figura 6.11a, verificou-se a ligeira perturbação que causa no sinal da primeira, provocando uma diminuição de 0,4 V na sua amplitude (figura 6.11b). Para além disso, observa-se que a amplitude do sinal gerado na antena R-3 é cerca de três vezes menor do que o sinal quando ela está nas proximidades do emissor sozinha, ou seja, relativamente ao sinal que o emissor gera diretamente nessa antena (sinal a vermelho na figura 6.10b). Assim, depreende-se que o sinal gerado na antena R-3 é induzido pela antena espia e não pelo módulo de RFID, pelo que se confirma o acoplamento indutivo entre antenas.

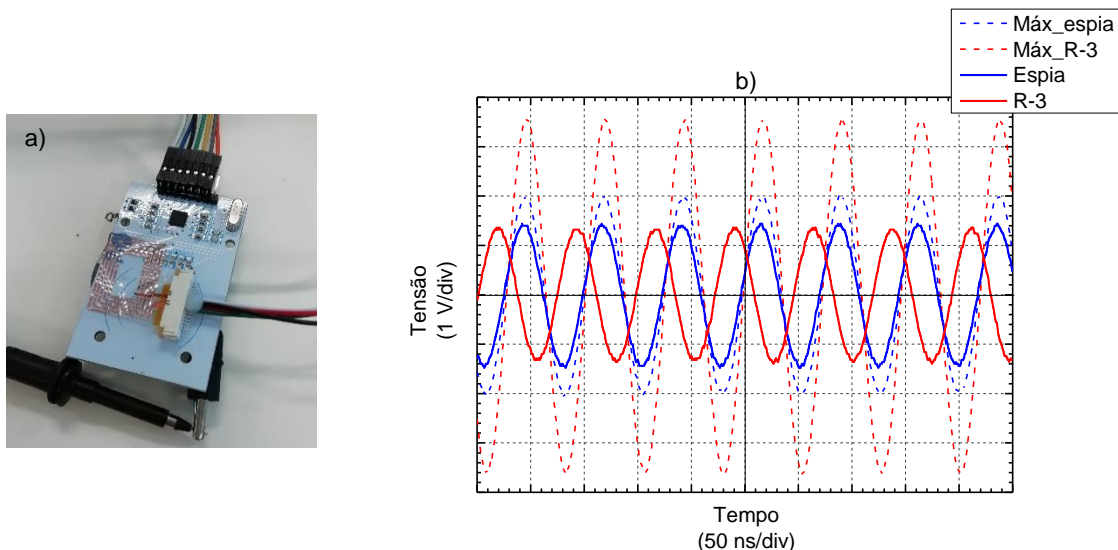


Figura 6.11: Teste de acoplamento entre o módulo de RFID, a antena espia e a antena R-3. a) Posição dos três elementos, sendo que foi a antena produzida que se aproximou do emissor e da antena espia. b) Sinais medido pelo osciloscópio: a tracejado o sinal de amplitude máxima das antenas e a linha preenchida corresponde ao sinal das antenas quando próximas uma da outra.

O mesmo comportamento se verifica com uma antena R-2 e com a antena do cartão do metro, onde a amplitude do sinal gerado nessas antenas é menor do que a amplitude do sinal da antena espia, que, por sua vez, perde alguma intensidade quando se dá o acoplamento. Para além disso, confirma-

se, novamente, a importância das dimensões e da indutância no acoplamento indutivo e, por isso, na amplitude do sinal gerado em cada antena.

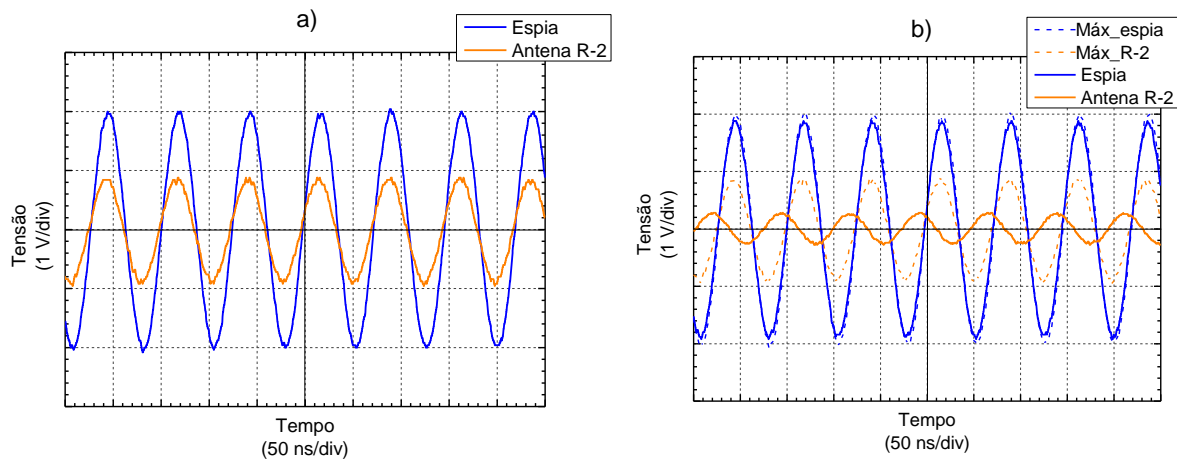


Figura 6.12: Dados do osciloscópio: teste de acoplamento entre o módulo de RFID, a antena espia e a antena R-2. a) Amplitude máxima do sinal das antenas quando isoladas e b) comparação entre os sinais de amplitude máxima (linhas a tracejado) e os sinais provenientes das antenas quando acopladas (linhas preenchidas).

Adicionalmente, ao analisar a figura 6.13a, reforça-se a ideia de que a amplitude da tensão é proporcional ao campo magnético gerado [25] e este campo, e conseqüentemente o desempenho da antena, é influenciado pelo número de espiras e pela secção transversal de cada espira. Assim, comparando a figura de baixo com a figura 6.10b, verifica-se a diferença entre a antena produzida com 5 espiras e uma antena com mais do dobro do tamanho e com 7 espiras.

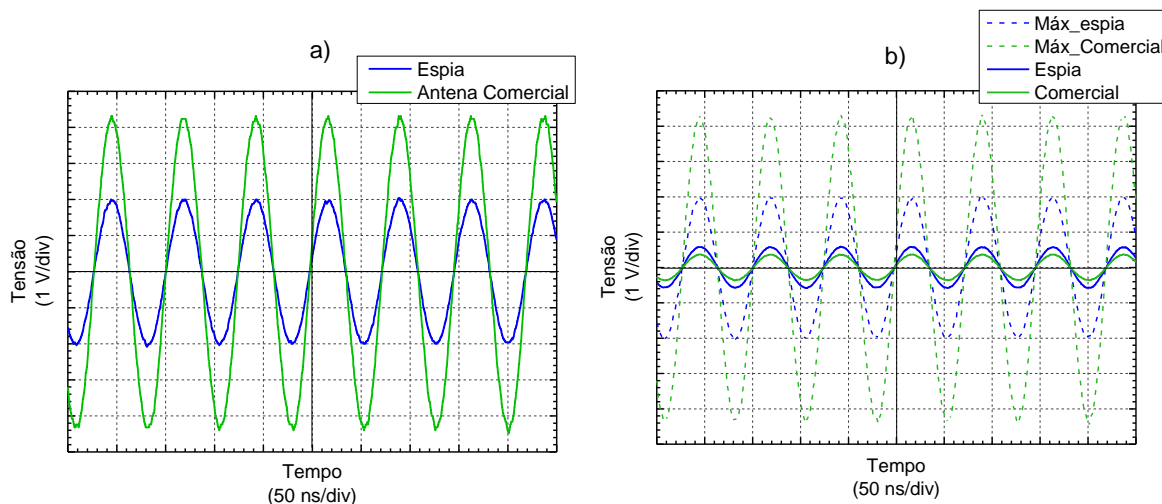


Figura 6.13: Dados do osciloscópio: teste de acoplamento entre o módulo de RFID, a antena espia e a antena comercial do cartão de metro. a) Amplitude máxima do sinal das antenas quando isoladas e b) comparação entre os sinais de amplitude máxima (linhas a tracejado) e os sinais provenientes das antenas quando acopladas (linhas preenchidas).

## 6.5. Testes em superfícies curvas

Tendo em vista a aplicação *wearable*, testou-se o comportamento da antena produzida em parileno quando em contacto com uma superfície húmida (gelatina), com um raio de curvatura de aproximadamente 1,6 cm, e em contacto com a pele, como se mostra pela figura 6.14.



Figura 6.14: Testes da antena R-3 em superfícies conformáveis. a) Membrana de parileno em contacto direto com gelatina. b) Membrana de parileno em contacto com a pele da mão.

Numa primeira fase, realizou-se espectroscopia de impedância com o intuito de estudar a influência do meio nas características elétricas da antena. Pela figura 6.15, onde se pode comparar o módulo de impedância da membrana solta (Parileno), verifica-se que as superfícies curvas (Gelatina e Pele) provocam uma redução do valor máximo de impedância, bem como uma diminuição do valor da frequência de ressonância. Observam-se também oscilações do valor de impedância, tanto no pico de ressonância como para frequências mais elevadas.

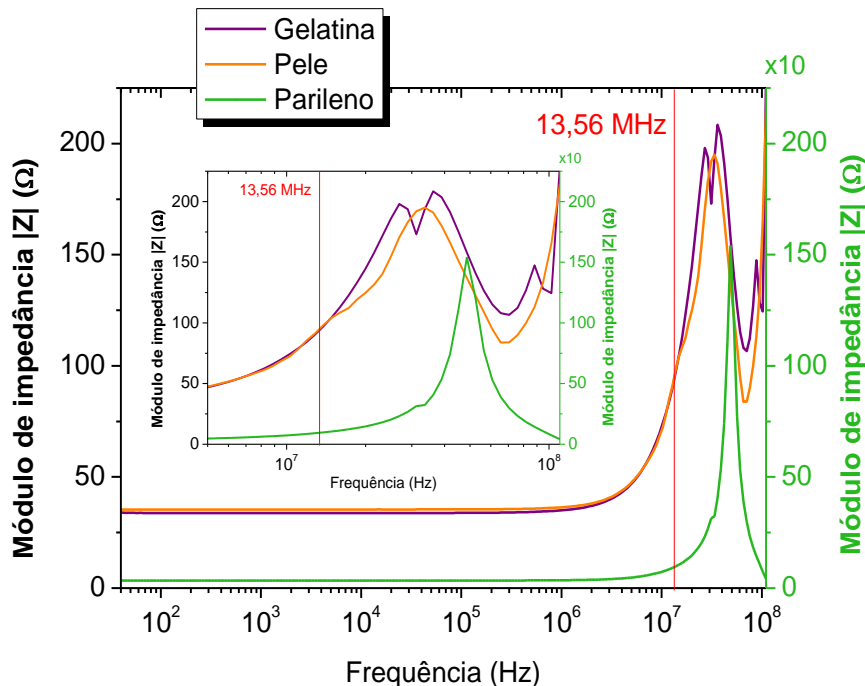


Figura 6.15: Espectro do módulo de impedância da membrana flexível (curva verde), da membrana em contacto com a gelatina (curva roxa) e em contacto com pele da mão (curva laranja).

Analisando os espectros individualmente, e adicionando a curva da fase (figuras 6.16 e 6.17), é possível aferir que até à marca 13,56 MHz as antenas mantêm o seu comportamento resistivo e indutivo e que o comportamento capacitivo é atenuado nas altas frequências, ao contrário do que se observou anteriormente. Verifica-se, também, que o valor máximo de fase não coincide com o pico de ressonância, no entanto, nessa frequência, a fase toma um valor perto de  $0^\circ$ , coincidindo com a predominância do comportamento resistivo, que se constatou em espectros precedentes.

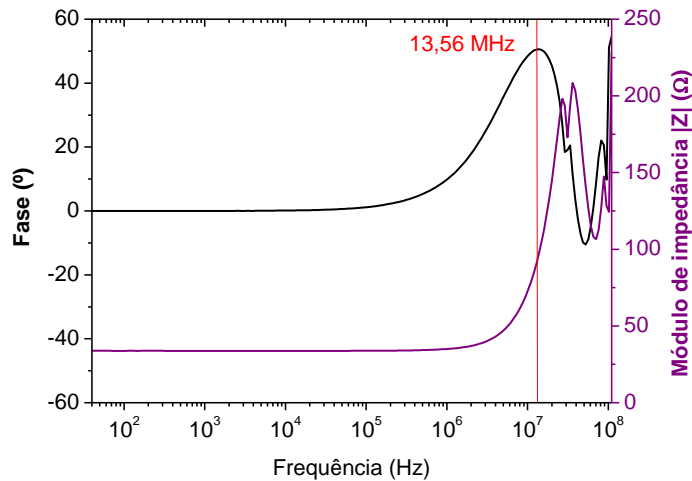


Figura 6.16: Espectro do módulo de impedância e de fase da membrana flexível em contacto com a gelatina e com um raio de curvatura de 1,6 cm.

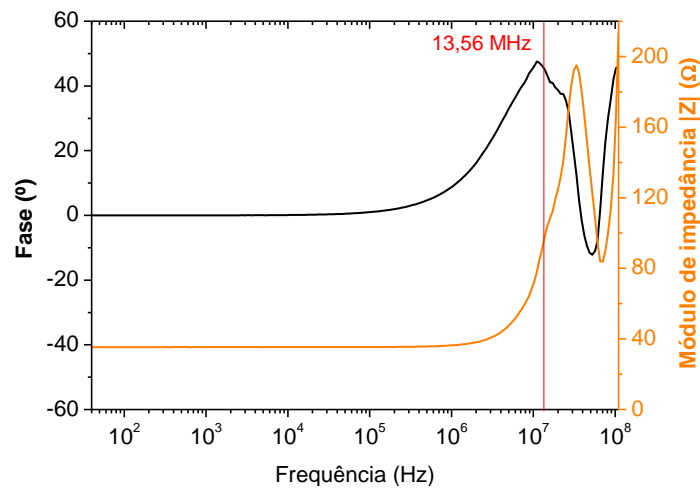


Figura 6.17: Espectro do módulo de impedância e de fase da membrana flexível em contacto com a pele da mão, tendo em vista a aplicação final *wearable*.

Por forma a confirmar o correto funcionamento da antena, repetiram-se os testes com o módulo de RFID, ligando a antena ao osciloscópio e adquiriram-se os dados que se mostram figura 6.18.

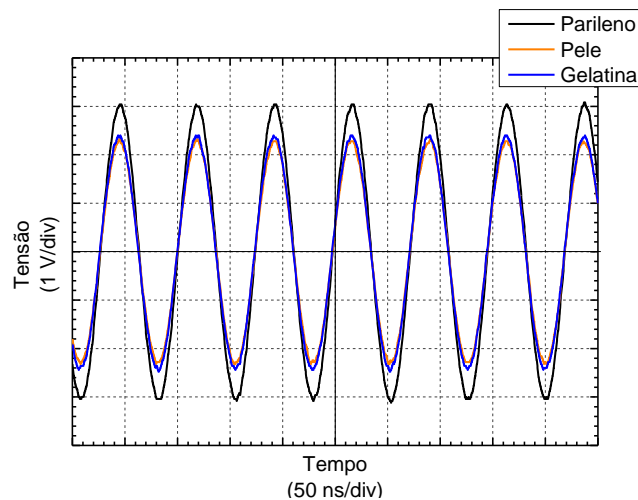


Figura 6.18: Comparação entre o sinal gerado na antena e medido pelo osciloscópio, quando se encontra isolada, como nos testes anteriores (sinal a preto), quando por cima de gelatina (sinal a azul) e quando por cima da pele da mão (sinal a laranja).

Constata-se, assim, que quando se aproxima o emissor da antena, a amplitude do sinal gerado é semelhante à do sinal gerado na antena quando se encontra isolada. Desta forma, é possível concluir que as antenas produzidas em parileno mantêm o seu correto desempenho, mesmo quando sujeitas a humidade, superfícies curvas e a contacto direto com a pele.

## 6.6. Distância de leitura

Seguidamente, realizaram-se testes para determinar a distância máxima entre a antena e o emissor que permite o acoplamento indutivo e, conseqüentemente, a possibilidade de detetar e medir o sinal gerado.

Então, começou por se garantir uma distância mínima (figura 6.19a) e medir, no osciloscópio, a amplitude máxima do sinal gerado. Numa segunda fase, afastou-se progressivamente o emissor da antena (figura 6.19b) até que o sinal detetado fosse mínimo, como se mostra na figura 6.19c e, assim, determinou-se a distância máxima que possibilita o acoplamento entre antenas e indução eletromagnética e que é aproximadamente 5 cm. No entanto, depreende-se que este sinal, apesar de ainda ser detetado, apresenta algum ruído e pode não ter amplitude suficiente para gerar corrente que permita alimentar outra eletrónica.

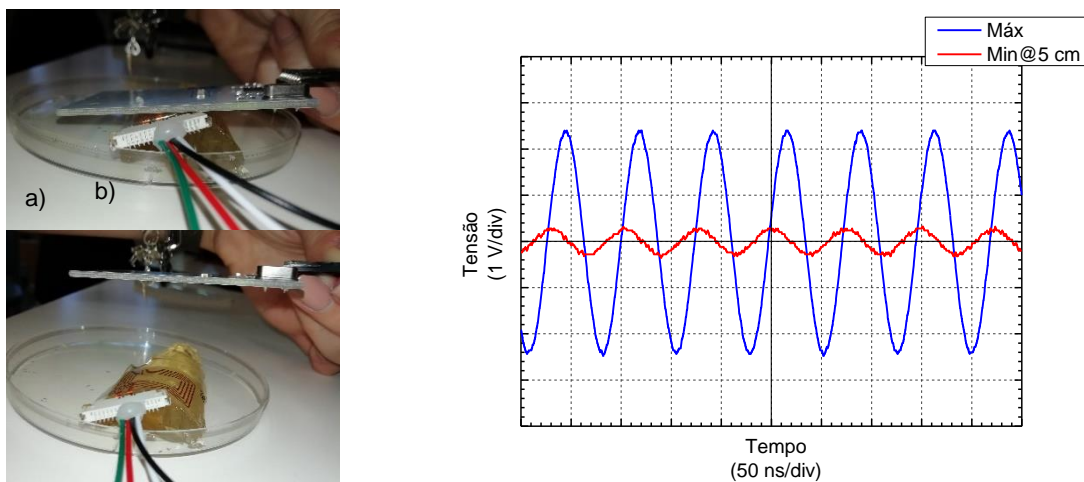


Figura 6.19: Distância máxima de leitura. a) Distância mínima entre o módulo de RFID, que corresponde à amplitude máxima do sinal gerado. b) Distância máxima que permite a deteção do sinal pelo osciloscópio. c) Amplitude do sinal gerado na antena R-3, a onda a azul corresponde ao sinal gerado quando o emissor se encontra junto dela e a vermelha diz respeito à amplitude detetada, que corresponde a uma distância de leitura máxima de aproximadamente 5 cm.

## 6.7. Corrente gerada

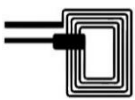
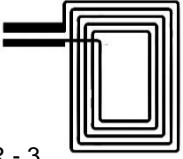
Finalmente, considerando os parâmetros medidos de resistência e indutância das antenas produzidas em parileno e a equação 2.15, é possível calcular a corrente esperada que é gerada em cada antena, quando esta se encontra próxima do emissor de RFID. Assim, calculando o módulo da amplitude da corrente, considerando  $z = a + jb$  e  $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ , vem que:

$$|\hat{i}| = \hat{u} \times \sqrt{\frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (6.2)$$

onde  $\hat{u}$  corresponde à amplitude da tensão do sinal gerado na antena,  $R$  o seu valor de resistência,  $\omega$  a frequência angular e, por fim,  $L$  o valor da indutância, medida a essa frequência.

Recorrendo aos dados reais de resistência, de indutância a 13,56 MHz e amplitude máxima da tensão observada no osciloscópio, calcula-se o valor esperado de corrente, como se apresenta na tabela 6.4.

Tabela 6.4: Parâmetros ( $R$ ,  $L$ ) de duas antenas produzidas em parileno e a respetiva corrente, que se espera ser gerada, quando lhe incide um sinal de 13,56 MHz.

Geometria	Resistência ( $\Omega$ ) [Real]	Indutância ( $\mu\text{H}$ ) [Real]	Amplitude tensão (V)	Corrente gerada (mA) [Esperada]
R - 2 	$15,73 \pm 0,03$	$0,6018 \pm 0,0005$	$0,84 \pm 0,01$	$15,6610 \pm 0,0002$
R - 3 	$35,1 \pm 0,1$	$1,267 \pm 0,001$	$3,56 \pm 0,01$	$31,3499 \pm 0,0005$

Uma vez que, na presença do emissor, é gerada corrente na antena, como prova de conceito, tentou alimentar-se um LED vermelho (5 mm), segundo o circuito apresentado na figura abaixo [46]. Desta forma, tendo em conta os valores esperados de corrente que se mostram na tabela 6.4 e a corrente típica para este LED (*DC forward current* [47]) de 20 mA, espera-se que apenas a antena R-3 gere corrente suficiente para o acender.

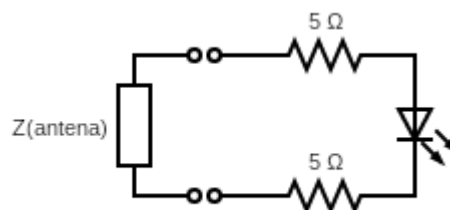


Figura 6.20: Circuito elétrico usado para ligar um LED vermelho, alimentado pela corrente gerada na antena quando na presença de um emissor de RFID.

Na figura 6.21, observa-se a montagem do circuito de cima com a antena a receber o sinal proveniente do emissor e confirma-se que o modelo R-2 não gera corrente suficiente para alimentar o circuito. Assim se apura que, como esta antena tem uma menor área e menor valor de indutância e, por isso, um menor campo magnético induzido, como se viu pela amplitude da tensão (figura 6.12a), o fluxo do campo magnético será menor, segundo a expressão (2.2). Consequentemente, a força eletromotriz será menor (expressão 2.3) e, por isso, a capacidade de converter o sinal eletromagnético em diferença de potencial (corrente) será menor.

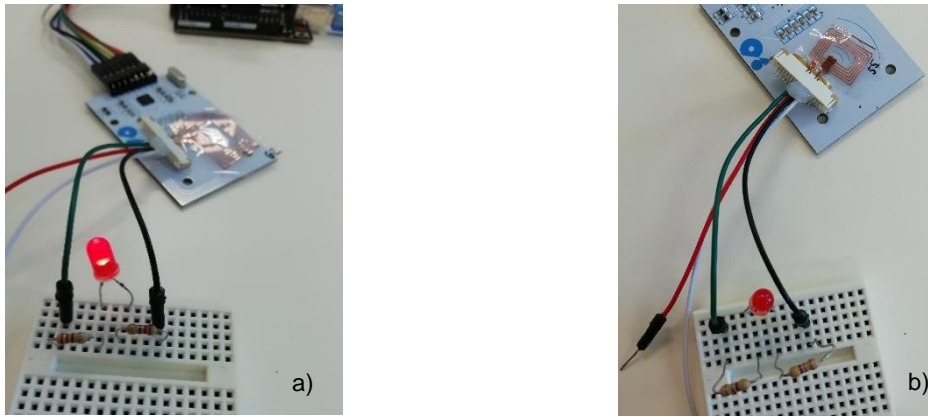


Figura 6.21: Prova de conceito: corrente induzida na antena. a) Antena R-3 permite que o LED pisque, no entanto, como a frequência é 13,56 MHz, não é possível detetar e, por isso, é uma luz constante. b) Antena R-2 não era corrente suficiente e, por isso, o LED não acende.

Como visto anteriormente, quando a antena R-3 é colocada por cima da gelatina, apesar de haver uma pequena atenuação no sinal nela gerado, esta mantém-se funcional. Na figura 6.22, é possível confirmar esse facto já que o LED acende, quando se aproxima o emissor de RFID da antena e o sinal gerado tem amplitude máxima e se apaga quando a fonte se afasta da antena, a uma distância maior que a de leitura.

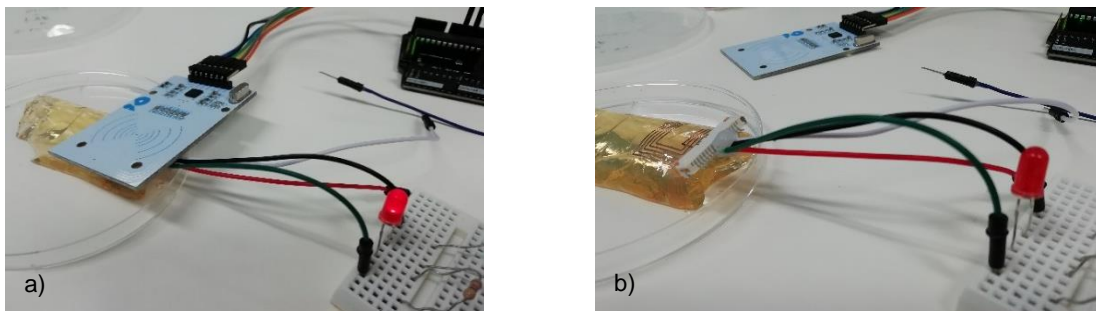


Figura 6.22: Prova de conceito: corrente induzida na antena R-3, num meio húmido. a) Distância mínima entre emissor e antena, por isso, a amplitude do sinal gerado é máxima e o LED acende. b) Quando o emissor se afasta, a antena não deteta o sinal e não é gerada corrente para acender o LED.

Na subsecção 6.6, constatou-se que a uma distância de cerca de 5 cm era possível detetar o sinal do emissor gerado na antena. No entanto, na figura 6.23, confirma-se que, na realidade, a uma distância menor esse sinal já não tem amplitude suficiente para gerar corrente que alimente o LED.

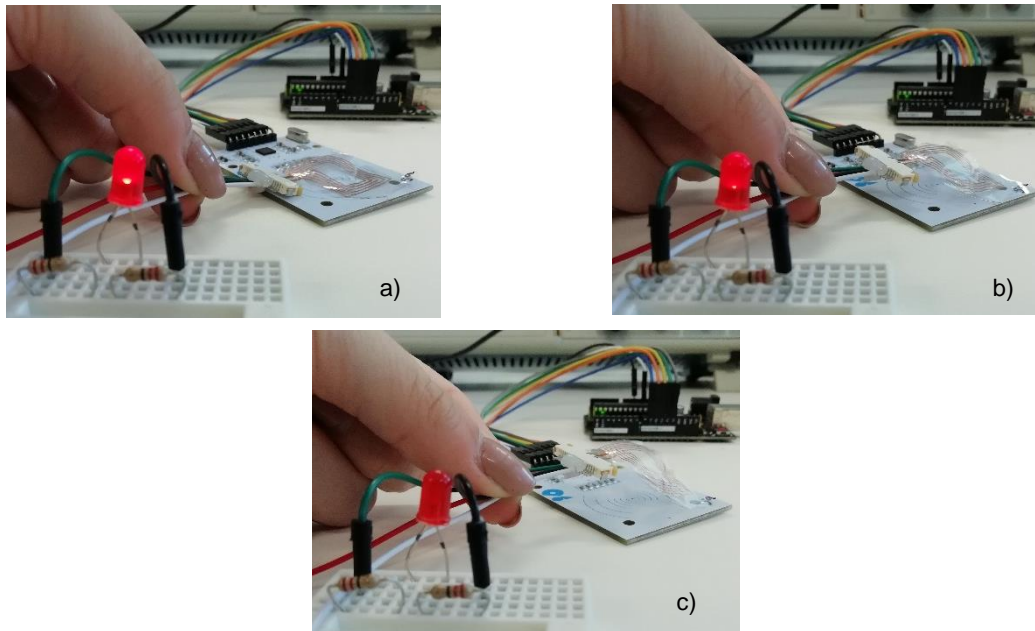


Figura 6.23: Prova de conceito: corrente induzida na antena R-3 e distância de leitura. a) Distância mínima entre emissor e antena, por isso, a amplitude do sinal gerado é máxima e o LED acende. b) Aumento da distância entre emissor e recetor (antena), por isso o sinal terá uma amplitude menor e a intensidade luminosa no LED é menor. c) Aumento da distância (emissor e recetor afastados cerca de 2 cm), o sinal gerado não tem amplitude para que seja gerada corrente suficiente e o LED não acende.

Deste modo, conclui-se que os parâmetros da antena R-3 limitam a sua distância de leitura, ou seja, a distância entre ela e o emissor de RFID que permite o acoplamento indutivo, em cerca de 2 cm.



## Conclusões e Perspetivas Futuras

O principal objetivo deste trabalho consistia na projeção e produção de antenas de radiofrequência passivas de filme fino em membranas ultrafinas de Parileno-C, tendo como finalidade a sua aplicação em dispositivos *wearable*.

No decorrer deste projeto, comprovou-se que as membranas ultrafinas de parileno são compatíveis com técnicas comuns de produção de microeletrónica e, por isso, foi possível padronizar filmes finos sob a sua superfície. Ademais, utilizar membranas com 5  $\mu\text{m}$  de espessura, enquanto camada de substrato, permitiu a manipulação dos dispositivos criados no parileno, sem que houvesse rutura das membranas ou danificação da eletrónica, mantendo a elevada flexibilidade e transparência que as caracteriza. Acrescenta-se que se aferiu que o Parileno-C como substrato e camada de encapsulamento não afetou o comportamento elétrico dos filmes condutores, tendo até impedido a oxidação dos mesmos, ao servir de barreira a espécies gasosas e líquidas.

No que diz respeito às antenas, fabricaram-se antenas de filme fino, maioritariamente de cobre, cuja espessura variava entre 500 a 800 nm e com um valor baixo de resistência do enrolamento, entre 10 a 40  $\Omega$ , consoante as suas dimensões. Tendo em mente a teoria por detrás das antenas de RF, bem como o estudo comparativo com uma antena comercial, concluiu-se que as antenas produzidas apresentam o comportamento esperado em termos de impedância. Não obstante a limitação em termos de alcance, causada pelas reduzidas dimensões, número de espiras e espessura do filme de cobre, verificou-se que nas proximidades de um emissor de RF se proporciona o acoplamento indutivo com as antenas concebidas.

Posto isto, demonstrou-se que por indução eletromagnética é gerado um sinal aos terminais da antena e induzida corrente quando nela incide um sinal de radiofrequência (13,56 MHz – frequência *standard*) e, por isso, o protótipo final é capaz de alimentar outros dispositivos eletrónicos que a ele estão ligados, como no caso do LED. Mais uma vez, reforça-se a importância das dimensões e parâmetros (R, L) no desempenho da antena, visto que além de influenciarem a sua frequência de ressonância e o seu alcance, condicionam também a corrente gerada.

Este trabalho culminou numa antena de filme fino de cobre (dimensões: 25 mm x 18 mm), sob uma membrana transparente de parileno e encapsulada pelo mesmo polímero e que gera cerca de 31 mA de corrente, quando é aproximado ao máximo um emissor de RF (13,56 MHz). Este protótipo demonstrou também manter o seu comportamento e correto funcionamento quando é colocado em superfícies curvas, como a pele, e quando é submetido a condições de humidade. Portanto, a antena desenvolvida cumpre o seu objetivo, uma vez que permite um sistema passivo, ao ser conjugada com outra eletrónica, sem fios e adequado para aplicações *wearable*.

O estudo acerca das antenas de RF permitiu identificar quais os parâmetros relevantes e que devem ser explorados aquando da projeção e desenvolvimento de uma etiqueta de RFID. Desta forma, deve começar-se por escolher um chip de RFID, como o MLX90129 [1], [31] ou um chip de NFC, como o NT3H2111 [48] e delinear a antena para que se garanta a correspondência entre impedâncias de entrada, bem como uma frequência de ressonância de 13,56 MHz do sistema. Assim, tendo conhecimento acerca da capacidade de entrada do chip, que é da ordem do pF, e através das suas dimensões e do número de espiras, é possível ajustar a indutância da antena para garantir as duas condições referidas anteriormente. Finalmente, deve ter-se em conta o cálculo e estudo acerca do fator de qualidade, bem como a largura de banda, das antenas futuramente produzidas.



## Referências

- [1] S. Wen, H. Heidari, A. Vilouras, and R. Dahiya, "A Wearable Fabric-Based RFID Skin Temperature Monitoring Patch," *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1–3, 2016.
- [2] J. Heikenfeld *et al.*, "Wearable sensors: modalities, challenges and prospects," *Lab Chip*, vol. 18, no. 2, pp. 209–386, 2018.
- [3] J. Kim *et al.*, "Miniaturized Battery-Free Wireless Systems for Wearable Pulse Oximetry," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 27, no. 1, 2016.
- [4] M. Lin *et al.*, "Flexible Polymer Device Based on Parylene-C with Memory and Temperature Sensing Functionalities," vol. 9, no. 310, pp. 1–9, 2017.
- [5] T. Marszalek, M. Gazicki-lipman, and J. Ulanski, "Parylene C as a versatile dielectric material for organic field-effect transistors," *Beilstein J. Nanotechnology*, vol. 8, pp. 1532–1545, 2017.
- [6] I. H. Khawaji, C. Chindam, O. O. Awadelkarim, and A. Lakhtakia, "Dielectric Properties of and Charge Transport in Columnar Microfibrous Thin Films of Parylene C," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 64, no. 8, pp. 3360–3367, 2017.
- [7] Y. H. Jung *et al.*, "A Compact Parylene-Coated WLAN Flexible Antenna for Implantable Electronics," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 1382–1385, 2015.
- [8] V. C. Caniça, "Development of sensors in ultrathin membranes of Parylene C," Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2018.
- [9] Y. Duroc and S. Tedjini, "RFID: A key technology for Humanity," *Comptes Rendus Phys.*, vol. 19, pp. 64–71, 2018.
- [10] R. Singh, E. Singh, and H. S. Nalwa, "Inkjet printed nanomaterial based flexible radio frequency identification (RFID) tag sensors for the internet of nano things," *RSC Adv.*, vol. 7, pp. 48597–48630, 2017.
- [11] A. Kiourti, "RFID Antennas for Body-Area Applications," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 60,

no. 5, pp. 14–25, 2018.

- [12] *PDS 2010 LABCOTER™ 2 Parylene Deposition System Operator's Manual*. Specialty Coating Systems, 2003.
- [13] Y. Liu, “Novel Parylene Filters for Biomedical Applications,” PhD dissertation. California Institute of Technology, 2016.
- [14] D. Wright, B. Rajalingam, S. Selvarasah, M. R. Dokmeci, and A. Khademhosseini, “Cell and Protein Compatibility of Parylene-C Surfaces,” *Langmuir*, vol. 23, pp. 11718–11725, 2007.
- [15] X. Tu, J. Wei, B. Wang, Y. Tang, J. Shi, and Y. Chen, “Patterned parylene C for cell adhesion, spreading and alignment studies,” *Microelectron. Eng.*, vol. 175, pp. 56–60, 2017.
- [16] S. Kuppasami and R. H. Oskouei, “Parylene Coatings in Medical Devices and Implants: A Review,” *Univers. J. Biomed. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 9–14, 2015.
- [17] Para Tech Coating, “Parylene Properties Chart for Parylene N, C, D.” [Online]. Available: [http://www.parylene.com/pdfs/PTC-Parylene\\_Properties\\_Chart.pdf](http://www.parylene.com/pdfs/PTC-Parylene_Properties_Chart.pdf). [Accessed: 14-Sep-2019].
- [18] M. A. Surmeneva *et al.*, “Effect of parylene C coating on the antibiocoorsive and mechanical properties of different magnesium alloys,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 427, pp. 617–627, 2018.
- [19] H. Aubert, “RFID technology for human implant devices,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 12, no. 7, pp. 675–683, 2011.
- [20] B. W. An *et al.*, “Smart Sensor Systems for Wearable Electronic Devices,” *Polymers (Basel)*, vol. 9, no. 303, 2017.
- [21] A. E. Abdulhadi, “Design and Experimental Evaluation of Compact RFID Tags for UHF RFID Applications,” PhD dissertation. McGill University, 2014.
- [22] Suzanne Smiley, “Operating Principles: Coupling,” *RFID Insider - atlasRFIDstore*, 2016. [Online]. Available: [https://blog.atlasrfidstore.com/operating-principles-coupling?fbclid=IwAR0MyFBximOSsu-2elAhj9d4o6zEAo4igFp0XAPMYEYOld\\_tuivkUGBfXdE](https://blog.atlasrfidstore.com/operating-principles-coupling?fbclid=IwAR0MyFBximOSsu-2elAhj9d4o6zEAo4igFp0XAPMYEYOld_tuivkUGBfXdE). [Accessed: 27-Aug-2019].
- [23] G. T. Resort, P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. Member, S. Lazar, and A. A. F. Regions, “An Overview of Near Field UHF RFID,” in *2007 IEEE International Conference on RFID*, 2007, pp. 167–174.
- [24] S. Kalayci, “Design of a Radio Frequency Identification (RFID) Antenna,” M. S. Thesis. Electrical and Electronics Engineering Department. Middle East Technical University, 2009.
- [25] “Magnetic Loop Antenna Theory,” 2013. [Online]. Available: <https://sidstation.loudet.org/antenna-theory-en.xhtml>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [26] STMicroelectronics, “How to design a 13.56 MHz Customized Antenna for NFC/RFID Tags,” no. February. pp. 1–20, 2019.
- [27] Agilent Technologies, “Agilent Impedance Measurement Handbook: A guide to measurement technology and techniques.” [Online]. Available: [www.agilent.com/find/impedance](http://www.agilent.com/find/impedance).

- [28] D. L. Chinaglia, G. Gozzi, R. A. M. Alfaro, and R. Hessel, "Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 30, no. 4, 2008.
- [29] M. Grossi and B. Riccò, "Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: A review," *J. Sensors Sens. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 303–325, 2017.
- [30] "Desvio de Fase," *Macao Communications Museum*. [Online]. Available: [http://macao.communications.museum/por/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2\\_4\\_4\\_PhaseShift.html](http://macao.communications.museum/por/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_4_4_PhaseShift.html). [Accessed: 09-Sep-2019].
- [31] Melexis, "MLX90129: 13,56MHz sensor tag/datalogger IC." Datasheet, 2017.
- [32] F. Lévy, "Film Growth and Epitaxy: Methods," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016.
- [33] Dentonvacuum, "Weighing the Benefits of Sputtering vs. Evaporation - Denton Vacuum," 2018. [Online]. Available: <https://www.dentonvacuum.com/weighing-the-benefits-of-sputtering-vs-evaporation/>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [34] Matt Hughes, "What is E-Beam Evaporation?," 2016. [Online]. Available: <http://www.semicore.com/news/89-what-is-e-beam-evaporation>. [Accessed: 10-Aug-2019].
- [35] D. Sumanth Kumar, B. Jai Kumar, and H. M. Mahesh, "Quantum Nanostructures (QDs): An Overview," in *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, Woodhead Publishing, 2018, pp. 59–88.
- [36] Q. Wey, Y. Xu, and Y. Wang, "Textile surface functionalization by physical vapor deposition (PVD)," in *Surface Modification of Textiles*, Woodhead Publishing, 2009, pp. 58–90.
- [37] A. Janshoff, H.-J. Galla, and C. Steinem, "Biochemical Applications of Solid Supported Membranes on Gold Surfaces: Quartz Crystal Microbalance and Impedance Analysis," in *Membrane Science and Technology*, vol. 7, Elsevier, 2003, pp. 991–1016.
- [38] "Impedance and Impedance Matching," *National Instruments*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/06/impedance-and-impedance-matching.html>. [Accessed: 22-Aug-2019].
- [39] X. Ge and Z. Zhang, "Radiation Emulsion Polymerization," in *Radiation Technology for Advanced Materials*, Academic Press, 2019, pp. 183–205.
- [40] I. de O. Martins, "Parylene C as substrate , dielectric and encapsulation for flexible electronics applications," Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [41] S. R. Turner and R. C. Daly, "Photochemical and Radiation Sensitive Resists," in *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, Pergamon, 1989, pp. 193–225.
- [42] J. J. Licari and L. R. Enlow, "Thin Film Processes," in *Hybrid Microcircuit Technology Handbook*, 2nd ed., William Andrew Publishing, 1998, pp. 63–103.
- [43] J. W. Haus and A. Sarangan, "Nanofabrication," in *Fundamentals and Applications of*

*Nanophotonics*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 149–184.

- [44] “XP-Plus Series General Specifications and Options,” *Ambios Technology*, 2007. [Online]. Available: [www.ambiosotech.com](http://www.ambiosotech.com). [Accessed: 21-Aug-2019].
- [45] Velleman, “VMA495 user manual: Arduino compatible rfid read and write module.” 2017.
- [46] M. Fernando and A. Pinheiro, “Printable RF Antennas for Power Harvesting in Paper Electronics : Optimisation of Printable Materials and Substrates,” Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa., 2018.
- [47] “Universal LED in Ø 5 mm Tinted Diffused Package,” *Vishay Semiconductors*. Datasheet, 2017.
- [48] NXP B.V, “NT3H2111/2211: data sheet.” Datasheet, 2019.

## 9.1. Apêndice 1: Primeiras máscaras para litografia

Na figura 9.1 estão expostas as primeiras máscaras desenhadas para utilizar na fotolitografia, numa área de 10 cm x 10 cm. Nesta máscara encontram-se as antenas de geometria R-1 e C-1 (mencionadas no Capítulo 4), que correspondem à A.1. e A.6, respetivamente.

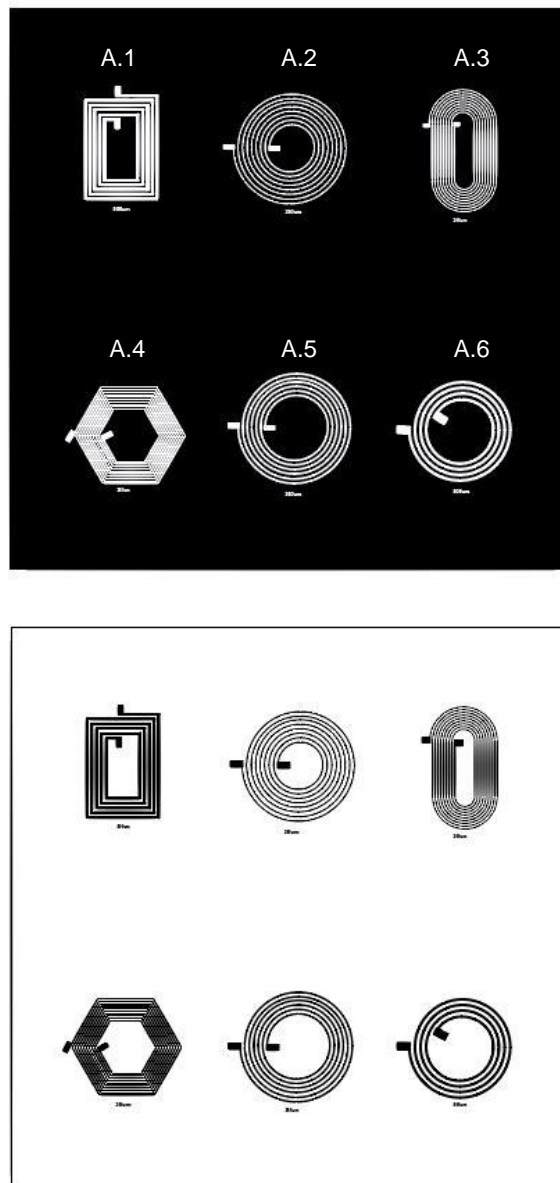


Figura 9.1: Máscaras iniciais para fotolitografia. Máscara positiva e respetiva máscara negativa.

Na tabela 9.1 é possível consultar os parâmetros dos desenhos das antenas apresentadas na figura anterior.

Tabela 9.1: Parâmetros das primeiras máscaras desenhadas de fotolitografia para a otimização dos processos de deposição.

<b>Modelo</b>	<b>Nº espiras</b>	<b>Altura total (mm)</b>	<b>Largura total (mm)</b>	<b>Largura pistas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Espaçamento entre pistas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
A.1	5	19	13	500	300
A.2	8	20	20	250	550
A.3	9	22	12	200	250
A.4	10	17	20	250	200
A.5	6	20	20	350	450
A.6	4	18	18	500	500

## 9.2. Apêndice 2: Máscaras para a produção em parileno

Numa segunda fase do design das máscaras para fotolitografia, e com a finalidade de se obter os dois terminais juntos para facilitar a caracterização, desenharam-se as seguintes antenas, numa área de 2,5 cm x 2,5 cm. As máscaras A.7 e A.8 foram usadas aquando da primeira deposição do filme metálico, depois da deposição da camada de substrato da Parileno-C; recorreu-se às máscaras A.7b e A.8b para o processo de *dry-etching*, com o intuito de abrir a camada de encapsulamento de parileno e permitir a exposição dos terminais das pistas; por fim, as máscaras A.7a e A.8a foram utilizadas para a última deposição do filme metálico para criar o terminal final.

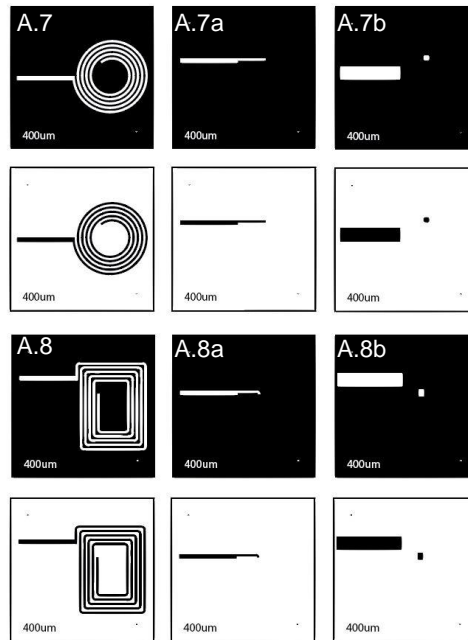


Figura 9.2: Máscaras para fotolitografia das antenas em parileno. Máscara positiva e respetiva máscara negativa.

Na tabela seguinte encontram-se expostos o dimensionamento das antenas A.7 e A.8, sendo que a largura total não inclui o comprimento dos terminais.

Tabela 9.2: Parâmetros das máscaras desenhadas para a produção de antenas em parileno.

Modelo	Nº espiras	Altura total (mm)	Largura total (mm)	Largura pistas (µm)	Espaçamento entre pistas (µm)
A.7	5	13	13	400	350
A.8	5	15	12	400	350

### 9.3. Apêndice 3: Máscaras de fotolitografia finais

Tendo em vista o aumento da superfície metálica das antenas, redesenharam-se as antenas A.7 e A.8 e alargou-se um dos terminais, como se pode ver pela figura 9.3. Note-se que as antenas A.7.1 e A.8.1 mantêm as características das anteriores (tabela 9.2) e representam as antenas C-2 e R-2 (mencionadas no Capítulo 6), respetivamente.

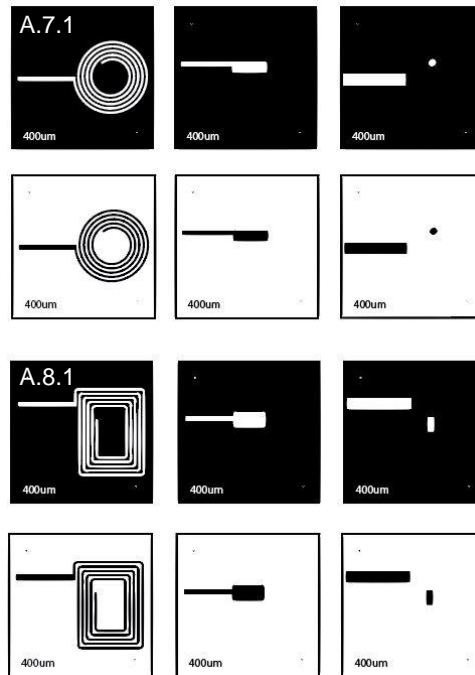


Figura 9.3: Máscaras otimizadas para fotolitografia das antenas em parileno. Máscara positiva e respetiva máscara negativa.

Finalmente, as variadas otimizações culminaram na máscara presente na figura 9.4 (geometria R-3, mencionada no Capítulo 6), que originou as antenas com os melhores resultados perante a caracterização elétrica e desempenho nos restantes testes.

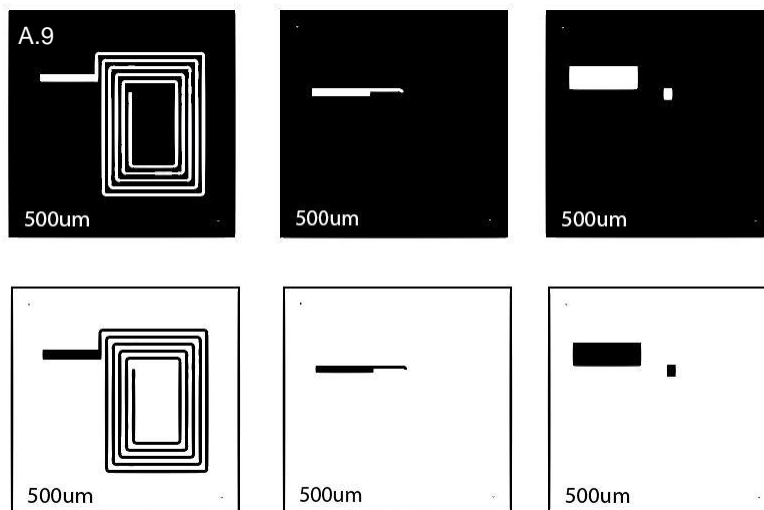


Figura 9.4: Máscara mais otimizada que permitiu produzir as últimas antenas em parileno. Máscara positiva e respetiva máscara negativa.

Tabela 9.3: Parâmetros da última máscara desenhada para a produção de antenas em parileno.

<b>Modelo</b>	<b>Nº espiras</b>	<b>Altura total (mm)</b>	<b>Largura total (mm)</b>	<b>Largura pistas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Espaçamento entre pistas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
A.9	5	25	18	500	780