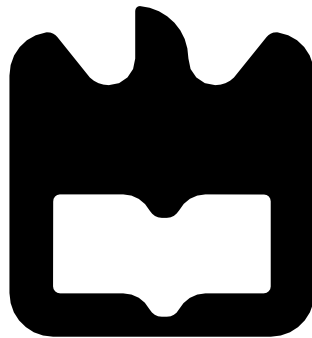




**Francisco José
Simões Campos**

**Encapsulamento de circuitos óticos integrados –
aproximação agnóstica**





**Francisco José
Simões Campos**

**Encapsulamento de circuitos óticos integrados –
aproximação agnóstica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor António Teixeira e do Engenheiro Francisco Rodrigues da PICadvanced S.A.

Dedico este trabalho à minha família, sobretudo à minha avó Maria Amélia Pereira Cardoso.

o júri

presidente

Professor Doutor Telmo Reis Cunha

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

Professora Doutora Maria do Carmo Raposo de Medeiros

Professora Associada da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Professor Doutor António Luís Jesus Teixeira

Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

A presente dissertação marca a conclusão do meu percurso académico. Quero primeiramente agradecer a minha família que me ajudou e apoiou em todos os passos deste percurso. E me proporcionaram todas as condições para que pudesse terminar esta etapa com sucesso.

Em segundo lugar quero agradecer aos meus orientadores, os professores António Teixeira, Mário Lima e ao engenheiro Francisco Rodrigues por me guiarem na elaboração deste trabalho.

Quero também agradecer a toda a equipa da PICadvanced pela disponibilidade e excelente ambiente de trabalho que me proporcionaram. Agradeço em particular ao engenheiro Hugo Neto com quem tive a oportunidade de trabalhar diretamente e cuja ajuda foi essencial para a conclusão desta dissertação.

Este trabalho é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Regional do Centro (CENTRO 2020) do Portugal 2020 [Projeto HeatIT com o nº 017942 (CENTRO-01-0247-FEDER-017942)].

Este trabalho é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) do Portugal 2020 [Projeto Virtual Fiber Box com o nº 033910 (POCI-01-0247-FEDER-033910)].

palavras-chave

PIC, Holder, Encapsulamento elétrico, Encapsulamento térmico, Linhas Coplanares, Linhas Diferenciais, Parâmetros S

resumo

No presente trabalho pretende-se estudar alguns dos maiores desafios que se encontram ao tentar produtizar um PIC (photonic integrated circuit). Com esse objetivo, inicialmente é abordado o estado da arte do encapsulamento ótico, elétrico e térmico. Inicia-se o estudo com o foco no encapsulamento elétrico, mais concretamente em determinar as regras de desenho, ou seja, definir parâmetros como comprimento, largura e distância para linhas coplanares e diferenciais construídas no substrato de silício (este é o substrato que o circuito intermédio usa para fazer a alimentação do PIC).

O substrato de silício onde as linhas são construídas é designado por Holder e tem a função de, numa mesma estrutura, facilitar os três tipos de encapsulamento (ótico, elétrico e térmico), que um PIC necessita. Para além das alimentações DC, são necessários sinais de alta frequência para a modulação dos elementos ativos. Essas pistas para altas frequências fazem parte do encapsulamento elétrico e fazem a ligação elétrica através de “Wire Bonding” entre o PIC e a eletrónica externa.

Após esta otimização, é estudado o encapsulamento térmico através da simulação do conjunto térmico [TEC (thermo-electric Cooler)+Holder+PIC] para diferentes epóxis, variando a condutividade térmica da mesma. A epóxi é um componente importante a ter em conta na assemblagem de um PIC, porque normalmente possui menor condutividade térmica de que o PIC e o Holder, e deste modo pode tornar-se uma resistência térmica à dissipação de calor. Conclui-se o trabalho com uma série de regras de desenho a serem aplicadas na conceção de sistemas de gestão térmica e elétrica em PICs.

keywords

PIC, Holder, Electrical packaging, Thermal packaging, Coplanar lines, Differential lines, S parameters

abstract

This work intends to study some of the biggest challenges that are encountered when trying to produce a PIC (photonic integrated circuit). For this purpose, the state of the art of optical, electrical and thermal encapsulation is initially addressed. The study begins with a focus on electrical encapsulation, more specifically in determining the rules of design, that is, defining parameters such as length, width and distance for coplanar and differential lines built on the silicon substrate (this is the substrate that the intermediate circuit uses to power the PIC).

The silicon substrate on which the lines are built is called Holder and has the function of, in the same structure, facilitating the three types of encapsulation (optical, electrical and thermal), which a PIC needs. In addition to DC supplies, high frequency signals are required for the modulation of the active elements. These high-frequency tracks are part of the electrical packaging and make the electrical connection through "Wire Bonding" between the PIC and the external electronics.

After this optimization, the thermal encapsulation is studied through the simulation of the thermal set [TEC (thermo-electric Cooler) + Holder + PIC] for different epoxies, varying the thermal conductivity of the same. Epoxy is an important component to take into account when assembling a PIC, because it normally has less thermal conductivity than the PIC and Holder, and thus can become a thermal resistance to heat dissipation. The work is concluded with a series of design rules to be applied in the design of thermal and electrical management systems in PICs.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Acrónimos	x
1 Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
1.4 Contribuições.....	4
2 Encapsulamento de circuitos óticos	5
2.1 Regras de Encapsulamento.....	5
2.2 Acoplamento da fibra ao chip.....	8
2.2.1 Técnicas de Ajuste Ativo.....	8
2.2.2 Técnicas de Ajuste Passivo.....	9
2.2.2.1 Liga.....	10
2.2.2.2 Flip-Chip.....	12
2.2.3 Acoplamento de grade.....	14
2.2.4 Acoplamento de borda.....	17
2.3 Linhas Coplanares	19
2.3.1 Substrato.....	20
2.3.2 Propriedades de um substrato	20
2.3.2.2 Perdas no dielétrico	21
2.3.2.3 Isolamento Elétrico (Resistividade).....	21
2.3.2.4 Condutividade Térmica	21
2.3.3 Silício.....	21
2.3.4 FR-4.....	22
2.3.5 Rogers RO3006	22
2.4 Par Diferencial.....	22

2.4.1 Transmissão com um único canal ou transmissão com dois canais (diferencial)	23
2.5 Wire Bonding	24
2.6 Controlo Térmico de um circuito ótico	26
2.6.1 Funcionamento de um TEC	27
3 Encapsulamento Elétrico	29
3.1 Simulador Advanced Design System	29
3.2 Definição de um substrato no ADS	29
3.5 Regras de desenho das linhas CPW	30
3.5.1 Comprimento	30
3.5.2 Largura	33
3.5.3 Impacto da distância entre linhas CPW	35
3.5.4 Largura das linhas de massa	36
3.5.5 Espessura do dielétrico	38
3.5.6 Curvatura das linhas	41
3.5.7 Dimensões recomendadas para as linhas CPW	43
3.5.8 Linhas CPW com outros substratos	43
3.7 Regras de desenho do Par Diferencial	45
3.7.1 Comprimento	45
3.7.2 Largura	48
3.7.3 Distância entre linhas do par diferencial	49
3.7.4 Distância entre pares diferenciais	51
3.7.5 Espessura do dielétrico	53
3.7.6 Curvatura das linhas	55
3.7.7 Dimensões recomendadas para o par diferencial	56
3.8 Desenho de linhas de teste a fabricar	57
3.8.1 Linhas Coplanares	57
3.8.3 Linhas do Par Diferencial	58
3.8.4 Linhas fabricadas	65
3.8.5 Montagem para medição	65
3.9 Resultados e análise dos resultados das linhas medidas	66

3.9.1 Linhas Coplanares	66
3.9.2 Linhas Diferenciais.....	72
3.10 Conclusão	75
4 Encapsulamento Térmico	76
4.1 ANSYS.....	76
4.2 Simulação térmica do modelo de um PIC	76
4.3 Simulação térmica do conjunto Holder + PIC	79
4.4 Simulação térmica do conjunto TEC+ Holder + PIC	85
4.5 Montagem laboratorial dos testes térmicos realizados	88
4.5.1 Descrição dos testes, resultados e análise de resultados	89
4.5.1.1 Caracterização do sensor de temperatura.....	89
4.5.1.2 Evolução da temperatura com e sem TEC.....	91
4.5.1.3 Impacto da temperatura no comprimento de onda.....	92
4.6 Conclusão.....	93
Capítulo 5	94
5.1 Conclusão.....	94
5.2 Trabalho Futuro.....	95

Lista de Figuras

Figura 2.1 Orientação elétrica e ótica de um PIC[4]	5
Figura 2.2 PICs com orientações elétricas e óticas diferentes [1]	6
Figura 2.3 Ligações elétricas entre o PIC e o exterior [1]	7
Figura 2.4 Posicionador de seis eixos [3]	9
Figura 2.5 Passos da técnica Liga [4]	10
Figura 2.6 Matriz de acoplamento das fibras ao chip[6]	11
Figura 2.7 Ilustração da técnica de Flip-Chip[4]	12
Figura 2.8 Auto ajuste dos pontos de contacto devido as forças de tensão[4]	13
Figura 2.9 Preenchimento por resina epóxi do espaço entre substrato e chip[8]	14
Figura 2.10 (a)Esquemático da vista lateral de um silício sobre isolador (SOI) acoplador de grade; (b) Esquemático 1D da vista superior de acoplador de grade; (c e d) Imagens microscópicas de um acoplador de grade 1D e 2D respetivamente.[9]	14
Figura 2.11 (a) orientação do encapsulamento ótico; (b) geometria vertical ou “pigtail”; (c) geometria planar[1]	15
Figura 2.12 Vista lateral de um conjunto de fibras “pigtail” acoplado a um PIC; (b)Vista lateral de um conjunto de fibras planas acopladas a um PIC; (c) Esquema de uma matriz de fibras com acoplamento de grade[1] ..	16
Figura 2.13 (a) Encapsulamento “Kovar Butterfly” para acoplamento de borda; (b) Imagem microscópica do acoplamento de borda usando uma fibra com a ponta em forma de lente (lensed fiber); (c) Esquemático de um acoplamento de borda usando uma fibra com a ponta em forma de lente e um guia de onda cônico[3]	18
Figura 2.14 Esquemático de linhas coplanares (CPW)[12]	19
Figura 2.15 Esquemático de um par diferencial[19]	23
Figura 2.16 Tecnologia de Wire Bonding[24]	25
Figura 2.17 Métodos de Wire Bonding[26]	25
Figura 2.18 (a) Evolução da temperatura em função do tempo do EIC(à preto), PIC (à vermelho) e da diferença entre a temperatura do EIC e do PIC (à azul); (b) À vermelho temos o arrefecimento do PIC assim que o TEC é ligado, à verde temos a evolução da temperatura e em função do tempo para a situação em que o PIC e TEC são ligados simultaneamente[3]	26
Figura 2.19 Modelo de um refrigerador termoelétrico [27]	28
Figura 3.1 Definição do substrato no ADS	29
Figura 3.2 Desenho das linhas CPW em Solidworks (à esquerda), layout no ADS das mesmas linhas (à direita)	30
Figura 3.3 Parâmetros S das linhas simuladas	31
Figura 3.4 Transmissão e Reflexão em função do comprimento	32
Figura 3.5 Acoplamento entre linhas CPW para vários comprimentos	32

Figura 3.6 Janela da ferramenta LineCalc	33
Figura 3.7 Reflexão e Transmissão em função da largura.....	34
Figura 3.8 Acoplamento em função da largura	34
Figura 3.9 Transmissão e Reflexão em função da distância entre linhas CPW	35
Figura 3.10 Acoplamento em função da distância entre linhas CPW.....	36
Figura 3.11 Linhas coplanares com uma largura de linha de massa de 10um (esquerda), gráficos dos parâmetros S resultantes da simulação (direita).....	37
Figura 3.12 Transmissão e Reflexão em função da largura das linhas de massa.....	37
Figura 3.13 Acoplamento em função da largura das linhas de massa	38
Figura 3.14 Transmissão e Reflexão em função da espessura do dielétrico	39
Figura 3.15 Acoplamento em função da espessura do dielétrico.....	39
Figura 3.16 Transmissão, reflexão e acoplamento para uma espessura do dielétrico de 700um	40
Figura 3.17 Transmissão, reflexão e acoplamento para uma espessura do dielétrico de 1100um	41
Figura 3.18 Linha CPW com um ângulo de 90° e raio de curvatura 0° (à esquerda) , Linha CPW com um ângulo de 90° e um raio de curvatura de 90um (à direita)	42
Figura 3.19 Transmissão e Reflexão em função do raio de curvatura.....	42
Figura 3.20 Para três substratos diferentes é apresentado a transmissão e reflexão em função do comprimento	44
Figura 3.21 Desenho das linhas PD em Solidworks (à esquerda), layout no ADS das mesmas linhas (à direita)	45
Figura 3.22 De cima para baixo e da esquerda para a direita temos três gráficos referentes a transmissão e reflexão dos três pares de linhas, o último gráfico diz respeito ao acoplamento entre os pares de linhas	46
Figura 3.23 Parâmetros de reflexão S(1,1), S(3,3) e S(6,6) em função do comprimento das linhas	46
Figura 3.24 Parâmetros de transmissão S(1,2), S(3,4) e S(5,6) em função do comprimento das linhas.....	47
Figura 3.25 Parâmetros de acoplamento S(1,4), S(1,6), S(4,2) e S(6,3) em função do comprimento das linhas	47
Figura 3.26 Transmissão e Reflexão para os vários valores de comprimento	48
Figura 3.27 Acoplamento para os vários valores de comprimento.....	48
Figura 3.28 Parâmetros de transmissão para as várias distâncias entre linhas do par diferencial.....	49
Figura 3.29 Reflexão em função da distância entre linhas do par diferencial	50
Figura 3.30 Parâmetros de reflexão em função da distância entre linhas para o intervalo em estudo	50
Figura 3.31 Parâmetros de transmissão em função da distância entre linhas para o intervalo em estudo	51
Figura 3.32 Impacto na transmissão e reflexão da distância entre pares de linhas diferenciais	52
Figura 3.33 Impacto no acoplamento da distância entre pares de linhas diferenciais	52
Figura 3.34 Transmissão em função da espessura do dielétrico	53
Figura 3.35 Reflexão em função da espessura do dielétrico.....	54
Figura 3.36 Acoplamento em função da espessura do dielétrico.....	54
Figura 3.37 Layout de três pares diferenciais com curvaturas diferentes	55
Figura 3.38 Transmissão (à esquerda) e reflexão (à direita) dos três pares de linhas diferenciais	56

Figura 3.39 Blocos com as linhas a imprimir	57
Figura 3.40 Primeiro bloco com linhas diferenciais a imprimir	59
Figura 3.41 Segundo bloco com linhas diferenciais a imprimir	60
Figura 3.42 Terceiro bloco com 2 pares de linhas diferenciais a imprimir	62
Figura 3.43 Quarto bloco com 2 pares de linhas cada com 3 exemplares	63
Figura 3.44 Três pares de linhas com ângulos de 90° e raios de curvatura variados	64
Figura 3.45 Caixa com os 14 blocos imprimidos	65
Figura 3.46 Montagem para medição das linhas	66
Figura 3.47 Parâmetros S da linha CPW2_1 medidos	67
Figura 3.48 Parâmetros S da linha CPW2_1 simulados	67
Figura 3.49 Largura das linhas de 86um	69
Figura 3.50 Largura das linhas de 138um	69
Figura 3.51 Largura das linhas de 174um	70
Figura 3.52 Comprimento da linha de 300um	71
Figura 3.53 Comprimento da linha de 600um	71
Figura 3.54 Comprimento da linha de 1000um	72
Figura 3.55 Parâmetros S da linha PD1_2	74
Figura 4.1 Modelo simplificado de um PIC apenas com os componentes ativos	77
Figura 4.2 Diagrama de temperatura do PIC simulado	78
Figura 4.3 Diagrama de temperatura do PIC simulado	78
Figura 4.4 Esquemático do conjunto Holder+PIC (à esquerda) e esquemático do conjunto TEC+Holder+PIC (à direita)	80
Figura 4.5 Temperatura atingida pelo PIC quando considerado contacto térmico ideal entre os três blocos em contacto	80
Figura 4.6 Temperatura atingida pelo PIC sem camada de epóxi entre o PIC e o Holder	81
Figura 4.7 Simulação térmica do conjunto usando a epóxi NOA60 com uma espessura de 50um	81
Figura 4.8 Simulação térmica do conjunto usando a epóxi NOA60 com uma espessura de 50um, considerando convecção com o ar	82
Figura 4.9 Representação gráfica dos dados da tabela 4.3	83
Figura 4.10 Condutividade térmica em função da temperatura, para as 5 espessuras de epóxi simuladas	84
Figura 4.11 Representação gráfica da espessura da epóxi vs a temperatura do PIC	85
Figura 4.12 Simulação do conjunto com a epóxi TCER75 com uma espessura de 50um	87
Figura 4.13 Simulação do conjunto com a epóxi TCER75 com uma espessura de 50um com uma Mesh mais “grossa”	88
Figura 4.14 Diagrama de blocos da montagem implementada	88
Figura 4.15 Montagem laboratorial	89
Figura 4.16 Linearização da relação Temperatura vs Resistência	90
Figura 4.17 Sensor RTD sem condensação (à esquerda) e com condensação (à direita)	91

Figura 4.18 Evolução da temperatura ao longo de 4 minutos.....	91
Figura 4.19 Comprimento de onda vs Temperatura	92

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Dimensões das linhas com um ângulo de 90°	58
Tabela 3.2 Dimensões do primeiro bloco de linhas diferenciais a imprimir	59
Tabela 3.3 Dimensões das linhas do par diferencial presentes no bloco 2	61
Tabela 3. 4 Dimensões das linhas do terceiro bloco a imprimir	62
Tabela 3.5 Dimensões dos três pares de linhas com ângulo de 90°	64
Tabela 3.6 Parâmetros de transmissão e reflexão para a simulação e medição e impedância medida e simulada	68
Tabela 3.7 Parâmetros S para a simulação e medição e impedância medida e simulada	73
Tabela 4. 1 Potência elétrica de cada componente ativo	77
Tabela 4.2 Epóxis e respetiva condutividade térmica.....	79
Tabela 4.3 Temperatura do PIC para as diversas epóxis com diferentes espessuras	83
Tabela 4.4 Diferença de temperaturas das simulações com e sem contacto térmico ideal entre o TEC e o Holder	86

Acrónimos

ADS	Advanced Design System
CPW	Linhas Coplanares
PCB	Placa de Circuito Impressa
EIC	Circuito Eletrónico Integrado
EPIC	Consórcio Europeu da Indústria de Fotónica
FC	Flip-Chip
FTTH	Fibra até a Casa
INESC-MN	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores-Microsistemas e Nanotecnologias
NTC	Coefficiente de Temperatura Negativo
NOA60	Norland Optical Adhesive 60
OEIC	Circuito Integrado Optoeletrónico
OSA	Analisador de Espectro Ótico
PIC	Circuito Fotónico Integrado
PID	Proporcional Integral Derivativo
PD	Par Diferencial
PMF	Polarization Maintaining Fibers
RF	Rádio Frequência
RTD	Resistência Detetora Térmica
Si	Silício
SMD	Dispositivo de Montagem em Superfície
SMF	Fibra Monomodo
SOA	Amplificador Ótico Semicondutor
TEC	Refrigerador Termoelétrico

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo pretende enquadrar o trabalho desenvolvido e contribuições no âmbito da dissertação. No tópico 1.1 é apresentado o contexto e motivação, o tópico 1.2 descreve os objetivos principais a atingir, o tópico 1.3 apresenta a forma como está organizada esta dissertação e o tópico 1.4 lista as principais contribuições.

1.1 Contexto e Motivação

A crescente procura por serviços de alta qualidade que tem vindo a ocorrer nos últimos anos, tem levado ao desenvolvimento, pelos operadores, de redes de fibra que vão até a casa do cliente (tecnologia FTTH). Estas redes, comparativamente às redes tradicionais de cobre têm a vantagem de possuir maior largura de banda e baixa atenuação. As redes de fibra implicam a utilização de recetores e transmissores óticos tanto do lado do cliente, como do lado do operador. A necessidade de ter um transceptor (recetor e transmissor), a um baixo custo motivou o surgimento de circuitos óticos integrados (PICs), que de forma similar aos circuitos elétricos integrados, agregam no mesmo circuito integrado lasers, moduladores e amplificadores óticos[1].

Para serem usados comercialmente os PICs necessitam de ser encapsulados, o que constitui o maior desafio atual da tecnologia. O encapsulamento de um PIC é mais desafiante e mais caro, comparativamente ao encapsulamento eletrónico. Uma vez que requer alinhamento na ordem dos micrómetros de componentes óticos, implica um elevado número de ligações elétricas e necessita de controlo de temperatura em tempo real. Deste modo, o encapsulamento fotónico de um PIC é dividido em três vertentes, encapsulamento ótico, elétrico e térmico[2].

O principal desafio do encapsulamento ótico é o acoplamento da luz entre o PIC e uma fibra, uma vez que existe uma grande diferença de tamanhos entre o núcleo de uma fibra, aproximadamente 10 μm para fibras monomodo, e dimensões menores de um micrómetro para os guias de onda dentro do PIC[2].

A maioria dos processos fotônicos em silício não integra no mesmo chip componentes óticos e elétricos. Desta forma o encapsulamento elétrico é responsável por fazer a ligação entre chip ótico e chip elétrico. O que implica a utilização de linhas de transmissão com altas taxas de transmissão, e com grande largura de banda entre os chips. A ligação entre os chips é feita recorrendo a *Wire Bonding* ou *Flip-Chip*[2].

O encapsulamento térmico é essencial, pois os dispositivos fotônicos como lasers e amplificadores óticos semicondutores (SOAs), têm uma grande dependência com a temperatura. Uma variação de alguns graus pode levar a que o laser ou o amplificador deixe de operar na zona para a qual este foi concebido. Assim o controlo da temperatura é vital para o bom funcionamento do PIC[3].

1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta dissertação foca-se no estudo do encapsulamento elétrico e térmico de circuitos óticos integrados. Este estudo foi realizado tendo por base os seguintes objetivos:

- Apresentação do estado da arte do encapsulamento ótico, elétrico e térmico usado no projeto de circuitos óticos integrados.
- Determinação de regras de desenho de linhas de transmissão coplanares e diferenciais para altas frequências construídas num substrato de silício.
- Obtenção do modelo térmico de um PIC.
- Estudo do impacto da espessura e condutividade de diferentes epóxis na temperatura atingida pelo PIC, que se encontra montado numa estrutura de silício denominada por Holder, onde são efetuados os três tipos de encapsulamento.

1.3 Estrutura

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, cuja descrição é apresentada de seguida:

- **Capítulo 1: Introdução** Neste capítulo é apresentado o contexto e motivação que levou a realização deste trabalho. É também exposta a estrutura, os objetivos e contribuições no âmbito desta dissertação.
- **Capítulo 2: Encapsulamento de circuitos óticos integrados** Este capítulo descreve de forma sumária as regras de encapsulamento usadas atualmente na montagem de circuitos óticos integrados.
- **Capítulo 3: Encapsulamento Elétrico:** Neste capítulo é apresentado o conjunto de simulações realizadas, que permitiu chegar às regras de desenho para as linhas coplanares e par diferencial. Também é descrito o uso das regras de desenho obtidas através da simulação para desenhar linhas coplanares e diferenciais, que foram impressas no substrato simulado. As linhas fabricadas foram medidas, de forma a obter os seus parâmetros S, que foram comparados com os parâmetros S obtidos através de simulação.
- **Capítulo 4: Encapsulamento Térmico:** Este capítulo apresenta as simulações térmicas realizadas para o PIC montado num Holder. Estudou-se o conjunto PIC mais Holder agregado através de epóxis com diferentes espessuras e com diferentes condutividades térmicas, para ver a influência provocada na temperatura final do PIC. Neste tópico também é descrito um conjunto de testes térmicos realizados em laboratório no conjunto simulado.
- **Capítulo 5: Conclusão e trabalho futuro:** Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões das simulações e testes realizados, e sugere um conjunto de tópicos de trabalho adicional a realizar.

1.4 Contribuições

As contribuições principais desta dissertação são:

- Obtenção das regras de desenho de linhas coplanares e par diferencial no substrato do Holder.
- Estudo do impacto da espessura de uma determinada epóxi entre o PIC e o Holder, e o Holder e o TEC na temperatura em regime estacionário atingida pelo PIC.
- Estudo da influência da condutividade de diferentes epóxios na temperatura final do PIC.

Capítulo 2

2. Encapsulamento de circuitos óticos

Neste capítulo são apresentadas as regras de encapsulamento atualmente usadas, são descritas as técnicas de acoplamento da fibra ao chip. São apresentadas as linhas coplanares e diferenciais, bem como as principais características de um substrato. São abordados três substratos diferentes, e a técnica de *Wire Bonding* é apresentada. Para finalizar é exposto o motivo do controlo térmico e como este é efetuado.

2.1 Regras de Encapsulamento

Para garantir que os PICs são encapsulados de forma eficiente e facilmente reproduzível, a European Photonics Industry Consortium (EPIC) define regras de encapsulamento. Estas regras cobrem o encapsulamento ótico e elétrico e estabelecem a dimensão e localização recomendada para os portos óticos e elétricos no PIC. Para além do silício, estas regras são aplicadas ao fosfato de índio e são seguidas, as boas práticas do encapsulamento. A figura que se segue, representa um PIC com cada uma das suas faces correspondendo a um ponto cardinal. Este sistema de coordenadas vai ser usado para localizar os portos óticos e elétricos na face do PIC.

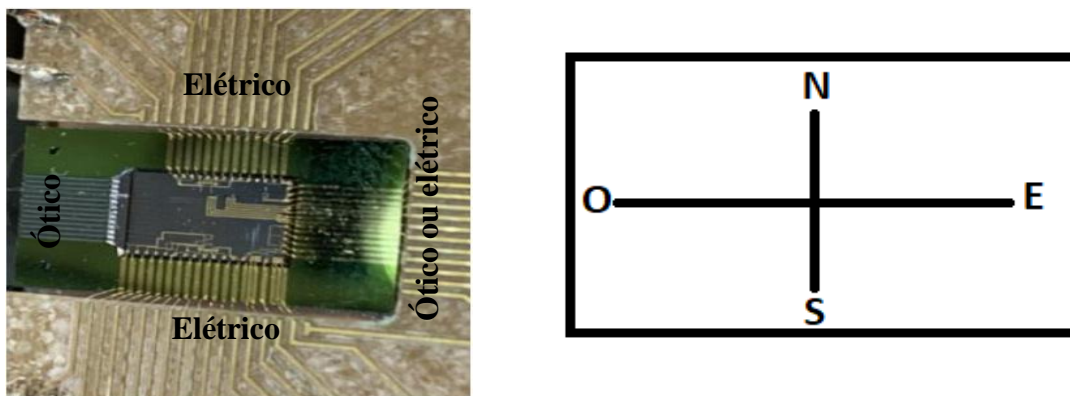


Figura 2.1 Orientação elétrica e ótica de um PIC[4]

O que as regras de encapsulamento dizem é que conexões elétricas e óticas não são permitidas na mesma face. Assim a face Oeste e a face Este são destinadas às ligações óticas e as faces Norte e Sul são destinadas às ligações elétricas. A face Este também pode ser usada, caso necessário no desenho do PIC, para estabelecer conexões elétricas, mas nunca

elétricas e óticas simultaneamente. Na figura que se segue são apresentados 5 PICs com orientações elétricas e óticas diferentes.[5]

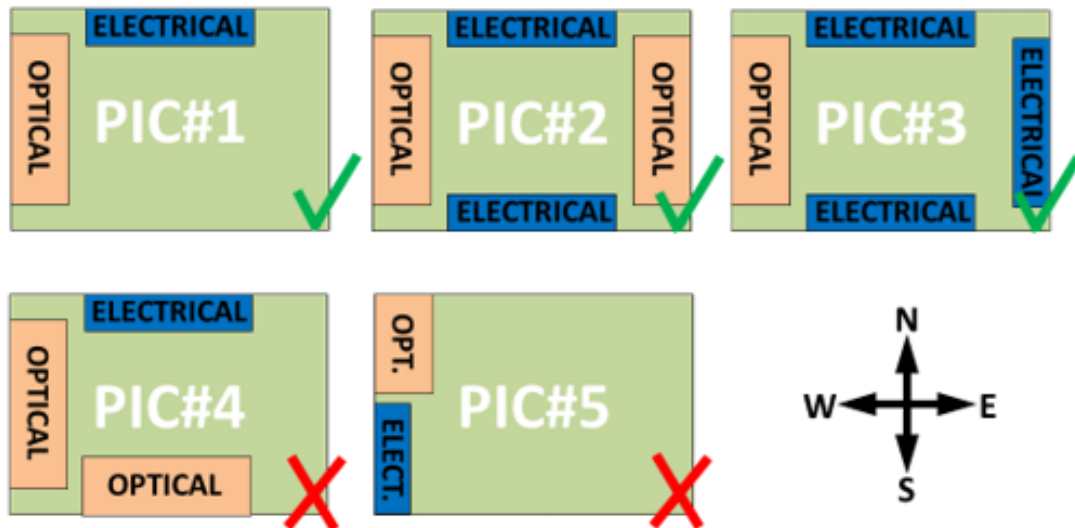


Figura 2.2 PICs com orientações elétricas e óticas diferentes [1]

Os PICs #1-#3 seguem as regras de encapsulamento acima referidas. Já o PIC#4 não segue as regras de encapsulamento porque a face Sul é usada para ligações óticas em vez de ligações elétricas. O PIC#5 na face Oeste contém ligações óticas e elétricas na mesma face, violando a principal regra de que conexões elétricas e óticas não podem coexistir na mesma face.

Wire-bonding é a técnica utilizada para estabelecer ligações elétricas entre o PIC e o contacto exterior, por exemplo uma PCB. Para assegurar a qualidade do wire-bonding a localização e intervalo entre os blocos metalizados estão definidas nas regras de encapsulamento.

Através da figura seguinte podemos visualizar estas regras de encapsulamento para DC, figura 2.3 d), e RF figura 2.3 e).

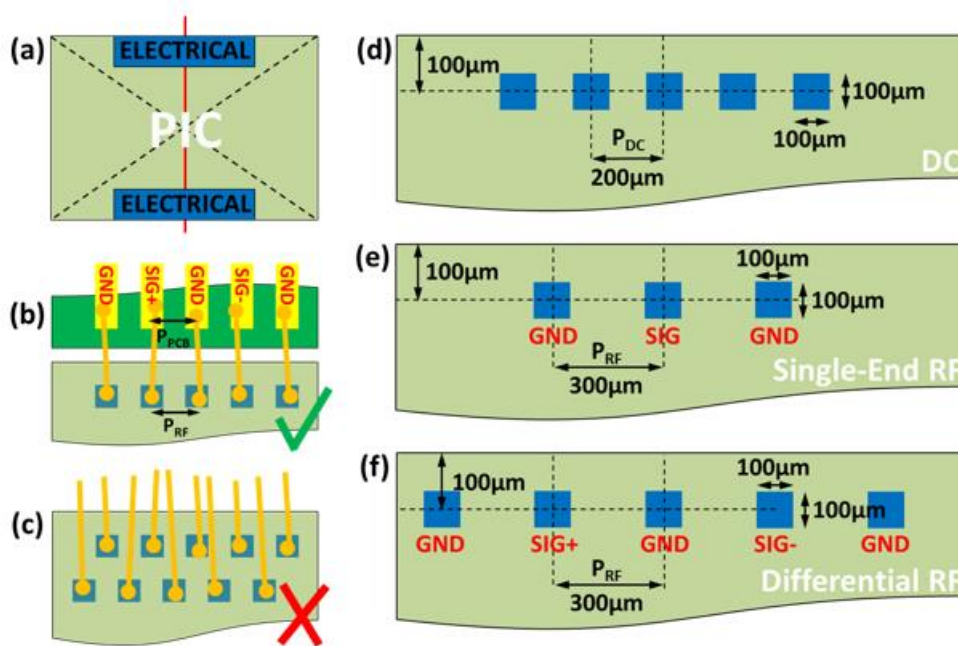


Figura 2.3 Ligações elétricas entre o PIC e o exterior [1]

Tanto as conexões DC como RF devem ter blocos metalizados quadrados com um comprimento de lado de $100\ \mu\text{m}$. Os blocos quadrados de metal devem estar localizados a $100\ \mu\text{m}$ da borda do PIC. Para DC os blocos de ligação devem estar separados por um intervalo de $200\ \mu\text{m}$, enquanto para RF esse intervalo deve ser de $300\ \mu\text{m}$.

Para um sinal de um único canal RF as vias devem ser (Massa/Sinal/Massa), figura 2.3d). Já para um sinal diferencial RF as vias devem ser (Massa/Sinal+/Massa/Sinal-/Massa), figura 2.3f). Se num PIC existem vias elétricas DC e RF a localização recomendada para todas as vias DC é ao longo da borda Norte, já a localização recomendada para todas as vias RF é ao longo da borda Sul. Para assegurar ligações como as demonstradas na figura 2.3b) e evitar a todo o custo ligações como na figura 2.3c) tanto o intervalo como a ordem dos blocos de ligação no PIC devem corresponder ao da PCB que este se está a ligar.[1]

2.2 Acoplamento da fibra ao chip

Um *link* de fibra ótica é altamente dependente da capacidade de fazer o acoplamento entre a luz emitida por uma fonte ótica na fibra. Este é um problema importante e complexo, uma vez que a luz emitida por um laser diverge e o núcleo de uma fibra ótica ao qual pretendemos fazer o acoplamento tem um diâmetro muito pequeno. É evidente que em qualquer acoplamento desta natureza se pretende transmitir o máximo de potência ótica possível entre o transmissor e o recetor. Assim, a eficiência de acoplamento é a razão entre a potência ótica entregue à fibra, P_T , sobre a potência ótica da fonte P_S [6].

$$\eta = \frac{P_T}{P_S} \quad (2.1)$$

A eficiência do acoplamento entre dois meios é expresso em termos de percentagem e é sempre inferior a 100%. Isto deve-se ao facto de ocorrerem perdas no acoplamento entre dois sistemas, e a luz sofre fenómenos de absorção e espalhamento.

Outra forma de caracterizar a eficiência do acoplamento é através das perdas por acoplamento, e assim a expressão 2.1 é transformada na expressão 2.2 que é dada em dB [2]:

$$L = -10 \log(\eta) \quad (2.2)$$

O acoplamento da fibra ao chip é caracterizado por duas técnicas distintas, são elas Técnicas de Ajuste Ativo e Técnicas de Ajuste Passivo.

2.2.1 Técnicas de Ajuste Ativo

As técnicas ativas significam que o acoplamento entre a fibra e o chip é feito manualmente com recurso a posicionadores, como o que se pode ver na figura 2.4. Normalmente movendo a fibra através do posicionador com o chip fixo vai-se procurando o ponto onde a potência transmitida para a fibra é máxima. Atingindo o ponto de potência máxima a fibra é fixada permanentemente. O posicionador referido tem seis graus de liberdade para descrever a

posição e movimento de um corpo no espaço. Três lineares (x,y,z) e três angulares ($\theta_x,\theta_y,\theta_z$) [7].

Este método maximiza a eficiência do acoplamento e é vantajoso na área de investigação onde as quantidades são pequenas. É uma técnica demorada e cara relativamente ao número de chips montados, e desta forma deve ser substituída por técnicas de ajuste passivo quando o objetivo é a produção em massa[8].

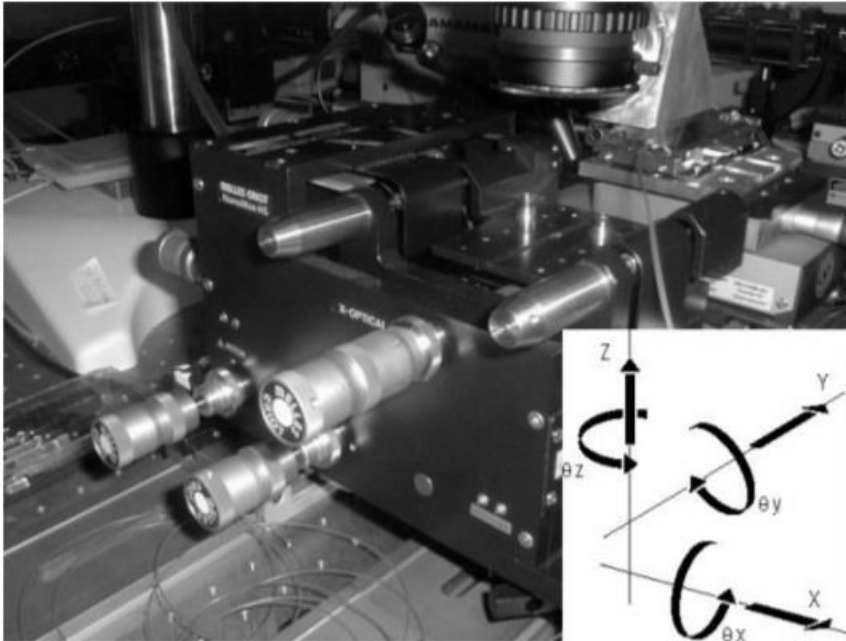


Figura 2.4 Posicionador de seis eixos [3]

2.2.2 Técnicas de Ajuste Passivo

Devido as desvantagens apontadas para o alinhamento ativo torna-se evidente que para diminuir o custo de chips montados, temos de recorrer a técnicas de Ajuste Passivo. Nas técnicas passivas existem estruturas no chip como ranhuras em V, que permitem que o acoplamento da fibra ao chip seja feito por máquinas de alta precisão. Simplicidade e poupança de tempo são as vantagens apontadas ao alinhamento passivo relativamente ao alinhamento ativo. Contrariamente ao alinhamento ativo, no alinhamento passivo a maximização da potência transmitida para a fibra não é um dos critérios seguidos. Deste modo o alinhamento passivo apresenta maiores perdas por acoplamento[9]. LIGA (do alemão Litografia, Eletroformação, Moldagem) e Flip-Chip são dois exemplos de técnicas de alinhamento passivo.[8]

2.2.2.1 Liga

LIGA é uma técnica de moldagem de plástico desenvolvida em 1985 e que se baseia em três passos:

1. Litografia de raios X;
2. Galvanoplastia;
3. Técnica de moldagem de plástico.

A técnica começa pela produção da máscara, de seguida a máscara é atingida por radiação X que vai imprimir a máscara no substrato e gerar espaços vazios. O próximo passo é a galvanoplastia que vai preencher os espaços vazios de acordo com a máscara impressa, preparando desta forma o molde. Após a remoção da estrutura gerada pelo molde o último passo consiste em usar essa estrutura mestre para a produção em massa de dispositivos de plástico moldados[8]. Os três passos em que consiste a técnica LIGA e que foram descritos anteriormente podem ser visualizados mais detalhadamente na figura seguinte.

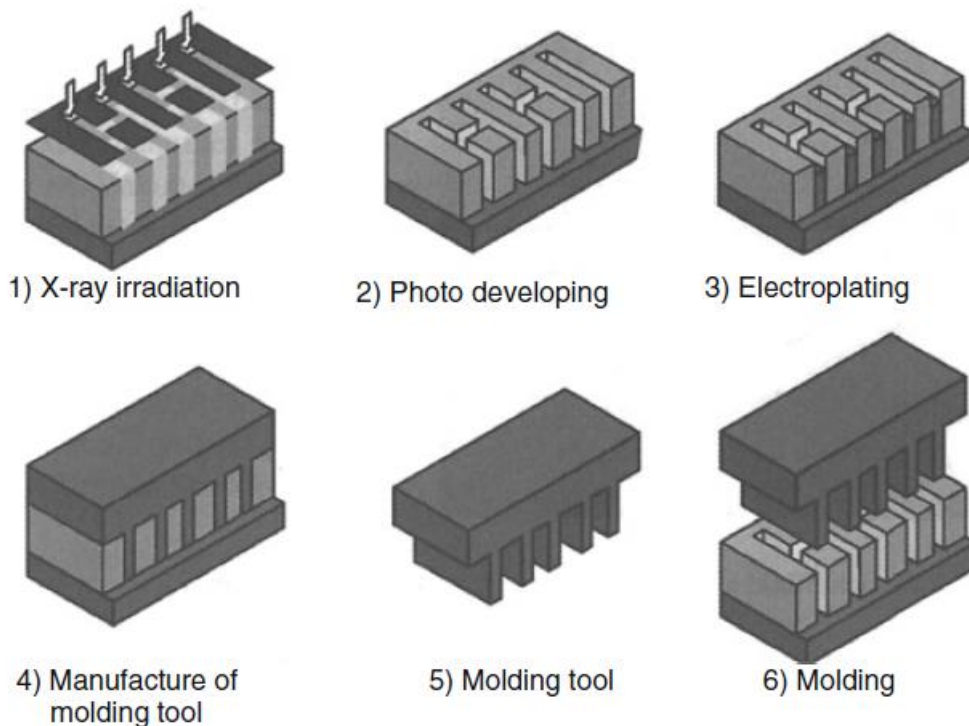


Figura 2.5 Passos da técnica Liga [4]

A técnica LIGA permite a fabricação de microdispositivos tridimensionais com dimensões laterais na ordem dos micrómetros e alturas de vários centímetros em materiais como o plástico, metais e cerâmica. A figura 2.6 apresenta uma estrutura produzida através da técnica LIGA para efetuar o acoplamento da fibra ao chip.[10]

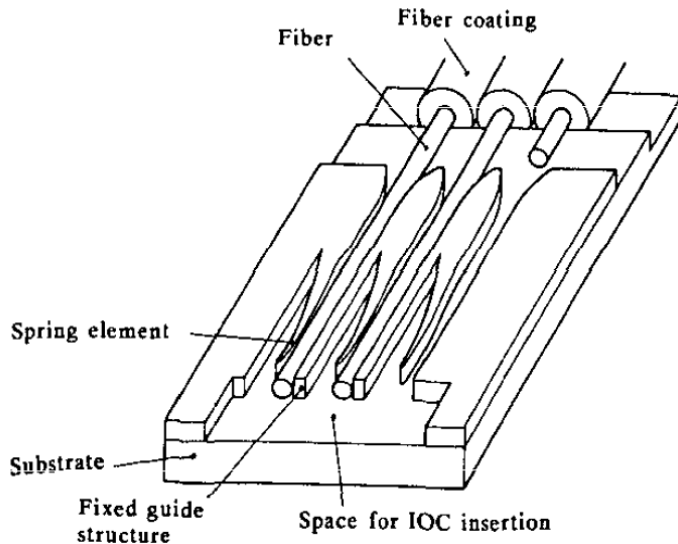


Figura 2.6 Matriz de acoplamento das fibras ao chip[6]

Como é visível pela figura 2.6, as fibras são guiadas pelas ranhuras no material, que estão diretamente posicionadas em relação aos guias de onda do chip ótico. As ranhuras possuem um elemento que atua como uma mola e que permitem posicionar horizontalmente a fibra com alta precisão. O posicionamento vertical é feito por uma placa de cobertura, não visível na figura. As vantagens deste tipo de estrutura em comparação com as técnicas de acoplamento de fibra convencionais são [10]:

- i) O coeficiente de expansão térmica do substrato pode ser igualado ao material do chip ótico.
- ii) O uso de ranhuras com elementos de mola simplifica o manuseio e o posicionamento da fibra.
- iii) A estrutura de acoplamento pode ser adaptada para fibras com diâmetros diferentes.

2.2.2.2 Flip-Chip

A técnica *Flip-Chip* descreve a montagem de um componente eletrônico diretamente no substrato de forma “virada para baixo” daí o termo em inglês *flip*. O chip é ligado eletricamente e fisicamente ao substrato através de vários pontos de contacto, em ouro ou cobre, ao longo da periferia do chip. Esta técnica foi criada pela IBN nos anos sessenta, mas apenas ganhou relevância para o domínio ótico recentemente devido as suas vantagens relativamente a técnicas mais antigas como o *Wire-Bonding*. [11]

Com *Flip-Chip* conseguimos ter mais pontos de ligação entre chip e substrato, do que aqueles que o *Wire-Bonding* permite. Para além disso perdemos o efeito da indutância parasita associada aos fios do *Wire-Bonding*, o que nos permite dizer que com *Flip-Chip* conseguimos ter larguras de banda superiores. Na figura 2.7 pode-se ver o encapsulamento de OEIC num substrato de sílica. Um encapsulamento do tipo *Flip-Chip* ocupa uma área muito menor do que o *Wire-Bonding*, ainda com a vantagem de ter menores custos de encapsulamento.

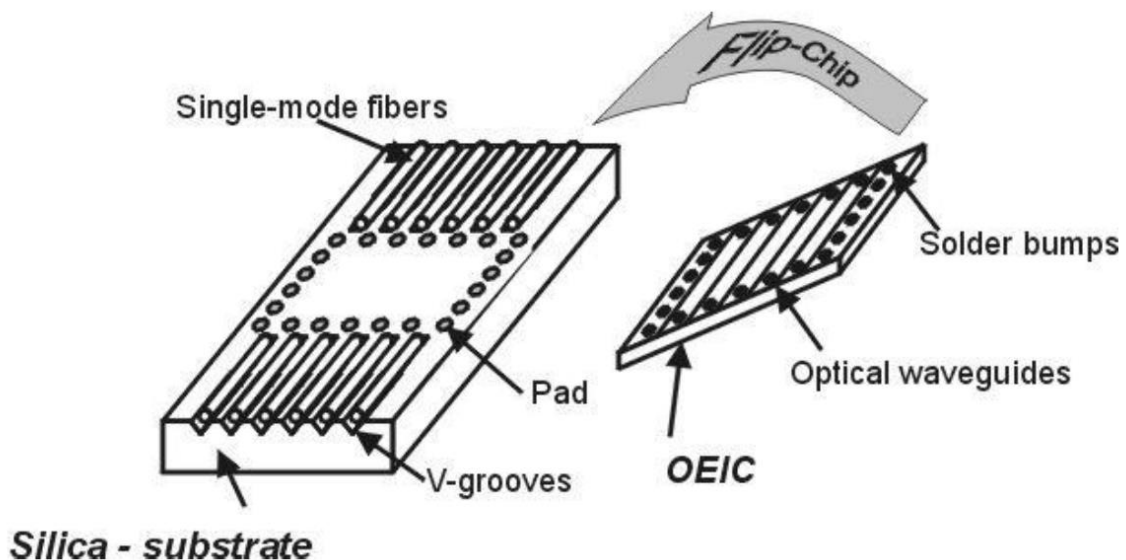


Figura 2.7 Ilustração da técnica de Flip-Chip[4]

Os pontos de contacto representados na figura 2.7 como “*solder bumps*” são cobertos com solda. Depois de alinhados os pontos de contacto dos dois dispositivos são submetidos a força e calor, o que faz com que a solda derreta e de seguida arrefeça garantindo assim a conexão elétrica e a estabilidade física do OEIC. As ranhuras em V também representadas na figura por “*V-grooves*” servem para alinhar as fibras de forma a proceder ao encapsulamento ótico.

Esta técnica tem ainda mais duas propriedades que vale a pena referenciar e que lhe conferem maior robustez. A primeira é o auto ajuste dos pontos de contacto que pode ser visível na figura 2.8.

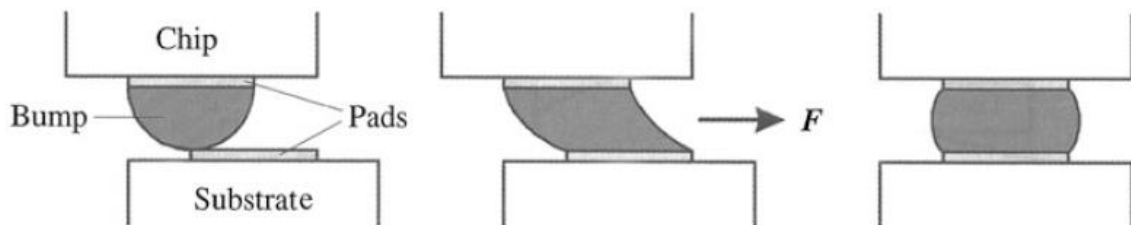


Figura 2.8 Auto ajuste dos pontos de contacto devido as forças de tensão[4]

O auto ajuste é um fenómeno físico que ocorre devido a pressão e coesão entre moléculas. Quando a solda se encontra no estado líquido, devido a temperatura que o dispositivo é sujeito, as forças de tensão superficial tenderão para o alinhamento da estrutura.[8]

O que poderia constituir um problema é resolvido através da segunda propriedade desta técnica que se denomina preenchimento. O problema coloca-se da seguinte forma. Ao contrário do *Wire-Bonding* esta técnica é mais suscetível as variações de temperatura, pois enquanto no *Wire-Bonding* temos alguma liberdade de movimento. Quando se trata do *Flip-Chip* os pontos de contacto são colados entre o chip e o substrato, não tendo nenhuma liberdade de movimento. Devido a diferença entre coeficientes de expansão térmica entre chip e substrato, estes expandem e contraem a ritmos diferentes exercendo pressão sobre os pontos de contacto entre os dois dispositivos. Este problema foi resolvido através do preenchimento (“*Underfill*”) do espaço vazio entre chip e substrato por epóxis, como de resto se mostra na figura seguinte.[12]

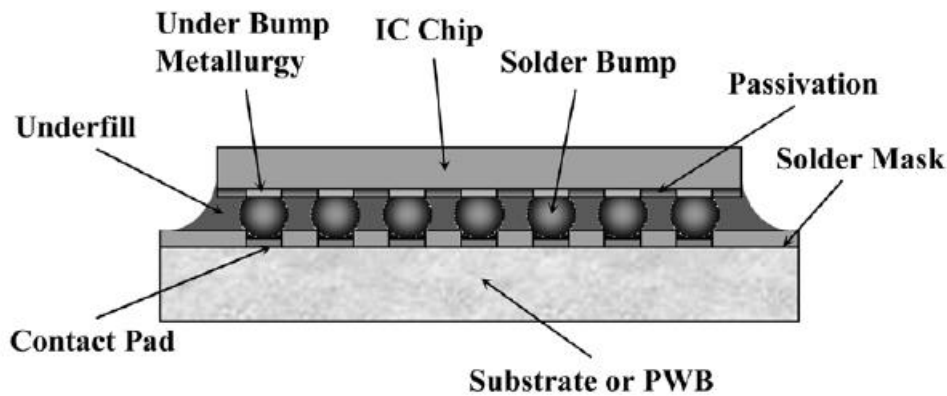


Figura 2.9 Preenchimento por resina epóxi do espaço entre substrato e chip[8]

O preenchimento por epóxi faz com que qualquer tensão entre chip e substrato seja distribuída uniformemente. Desta forma, o chip e o substrato ficam acoplados mecanicamente o que faz com que estes se movimentem em sincronia, tirando desta forma a pressão sobre os pontos de solda. [12]

2.2.3 Acoplamento de grade

De uma forma simplificada, o acoplamento da fibra ao chip neste caso consiste numa estrutura periódica de dimensões micrométricas. A estrutura é gravada por processos litográficos na camada de guia de onda do PIC, de forma a criar uma interferência coerente, condição que acopla difrativamente a fibra ao guia de onda do PIC.[3] Na figura seguinte é ilustrada a configuração básica de um acoplador de grade.

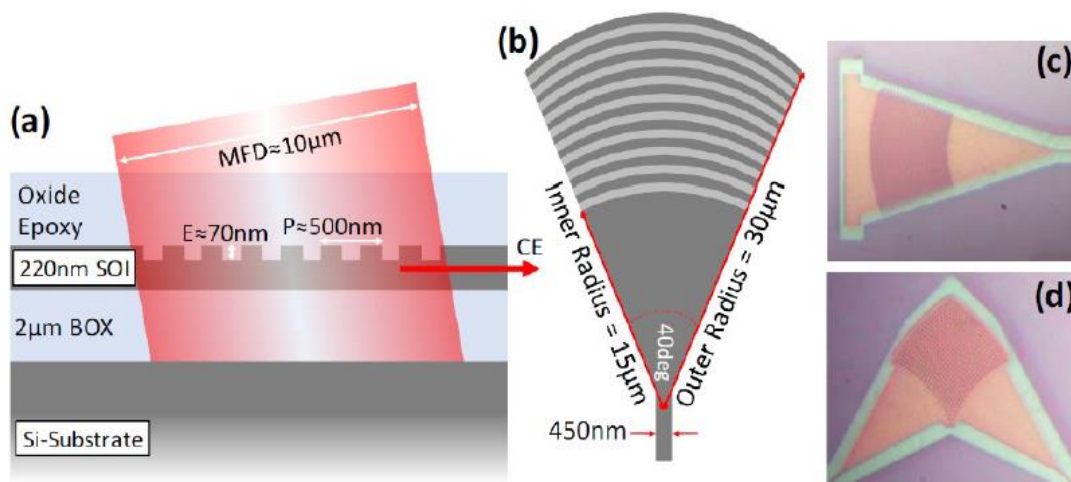


Figura 2.10 (a)Esquemático da vista lateral de um silício sobre isolador (SOI) acoplador de grade; (b) Esquemático 1D da vista superior de acoplador de grade; (c e d) Imagens microscópicas de um acoplador de grade 1D e 2D respetivamente.[9]

O acoplamento de grade surge como o tipo de acoplamento mais comum para fotônica em silício. Devido a sobretudo dois motivos, o primeiro é que oferece alguma tolerância no alinhamento, quando comparado com outro tipo de acoplamentos, o segundo é que este tipo de acoplamento é compatível com uma única fibra e com uma matriz de fibras.[5]

Existem duas geometrias possíveis para fazer a ligação entre a fibra e o acoplador de grade são elas geometria planar e geometria vertical, esta última também é conhecida como geometria “pigtail”. No entanto, a geometria planar é a recomendada porque oferece melhor estabilidade mecânica e o PIC é encapsulado com um perfil mais baixo. Independentemente da geometria, para garantir a máxima eficiência de acoplamento no comprimento de onda desejado, é necessário que o modo ótico para o acoplamento de grade deva ocorrer no ângulo de incidência correto, isto é, normalmente a 8° ou 10° [5]. A figura que se segue ilustra as duas geometrias de acoplamento referidas.

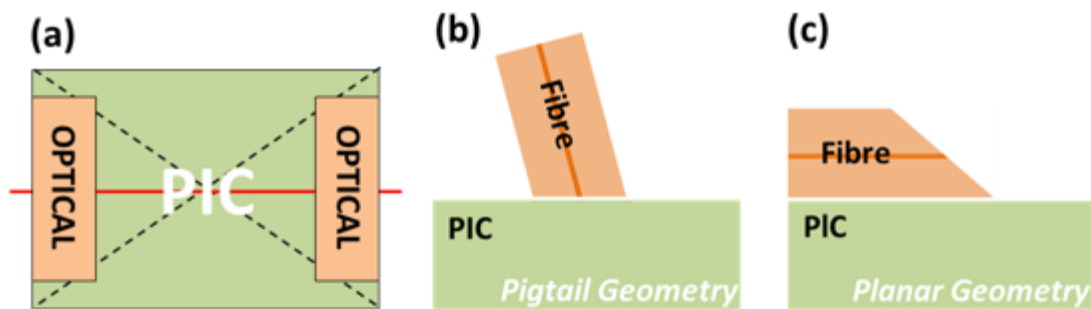


Figura 2.11 (a) orientação do encapsulamento ótico; (b) geometria vertical ou “pigtail”; (c) geometria planar[1]

No alinhamento de uma única fibra tem-se perdas de acoplamento de -1dB por $\pm 2\mu\text{m}$, deste modo é necessário um feedback ótico ativo para alinhar a fibra de maneira ideal. Para um acoplamento fibra PIC “direto”, o alinhamento fibra acoplamento de grade pode ser otimizado, maximizando a potência transmitida para a fibra.

Já quanto a uma matriz de fibras o acoplamento de grade define as seguintes regras de encapsulamento:

- A matriz de fibras deve ser disposta em uma linha, paralela à borda da matriz do PIC e a uma distância de pelo menos 0.5-1.0mm da sua borda;

- A distância entre a matriz de fibras e à borda do PIC deve corresponder aos diâmetros das fibras;
- A matriz de fibras no acoplamento de grade deve estar centrada em relação ao PIC;
- O primeiro e o último canal da matriz de fibras deve estar conectado de forma a formar um curto circuito ótico.

A figura 2.12 demonstra algumas regras de encapsulamento referidas anteriormente.

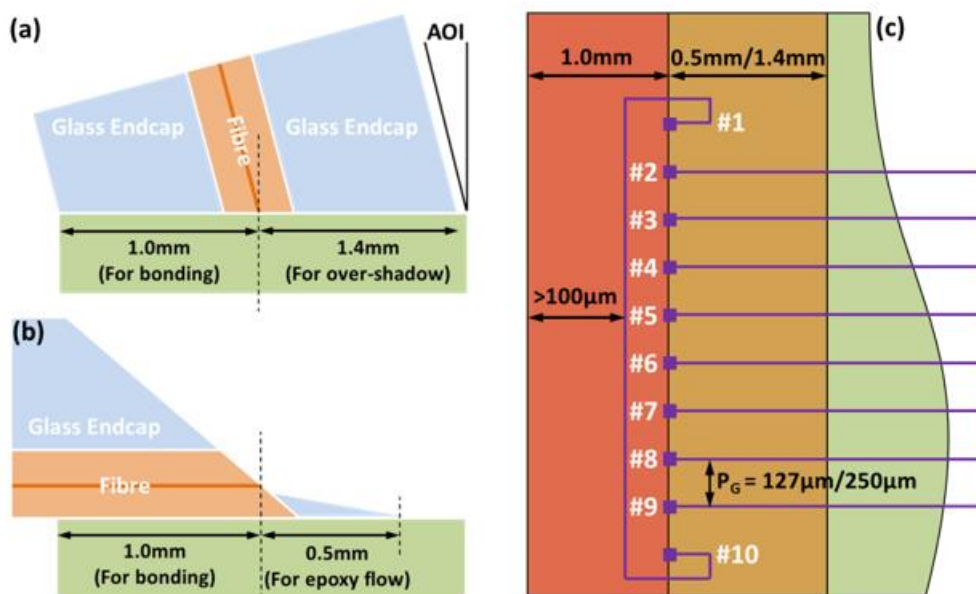


Figura 2.12 Vista lateral de um conjunto de fibras “pigtail” acoplado a um PIC; (b) Vista lateral de um conjunto de fibras planas acopladas a um PIC; (c) Esquema de uma matriz de fibras com acoplamento de grade[1]

Ao número de canais necessários para um dado PIC, deve sempre adicionar-se os dois canais que irão formar o curto circuito ótico. O alinhamento ativo de uma matriz de fibras, maximizando a transmissão por fibra através do curto circuito ótico, assegura que todos os canais intermediários na matriz de fibras estão bem alinhados. Esta abordagem funciona bem para matriz de fibras *SMF* (*Single Mode Fibres*) e *PMF* (*Polarization Maintaining Fibres*), desde que o intervalo entre fibras, corresponda exatamente aos diâmetros das fibras usadas, exemplo disso é um intervalo de 250 µm ou 127 µm, como se pode ver na figura 2.12c)[5]

As fibras e matrizes de fibras são ligadas ao PIC usando epóxis. E para garantir uma ligação ótica e mecânica estável, é recomendado ter uma “zona de exclusão” de 0.5 a 1mm entre acopladores de grade e a borda do PIC. Para além disso, como haverá fluxo de epóxi da região onde está a ser usada para o corpo do PIC é recomendado para a geometria planar uma zona de exclusão de 0.5mm entre o acoplamento de grade e o centro do PIC, como é evidenciado pela figura 2.12b). Para matrizes de fibra na geometria “*pigtail*”, para a zona de “*over-shadow*”, figura 2.12a) é recomendada uma zona de exclusão de 1.4mm em direção ao centro da matriz do PIC[5].

2.2.4 Acoplamento de borda

O acoplamento de borda é outra técnica alternativa ao acoplamento de grade para resolver o problema da diferença de tamanho apresentada por uma fibra e pelos guias de onda do PIC. Assim, o acoplamento de borda é uma técnica para a transferência de luz entre fibras óticas e guias de onda ao longo da borda do PIC. Com a utilização de fibras com a ponta em forma de lente (*lensed fibers*) e guias de onda cônicos (*Spot Size Converters*), esta técnica oferece largura de banda, polarização independente e perdas por inserção melhores que 1dB[13]. No entanto este tipo de acoplamento tem tolerâncias de alinhamento mais rigorosas, o que tende a diminuir a flexibilidade quando comparado com o acoplamento de grade.

O acoplamento de borda com uma lente (com cerca de 3um ou menos) ou uma fibra clivada (na ordem dos 10 um) permite o acoplamento prático de chip para a fibra. Se a fibra estiver montada numa ponteira metálica, que possa ser convenientemente presa na posição ideal de alinhamento por soldagem a laser, exemplo disso é o encapsulamento “*Kovar Butterfly*” apresentado na figura 2.13.

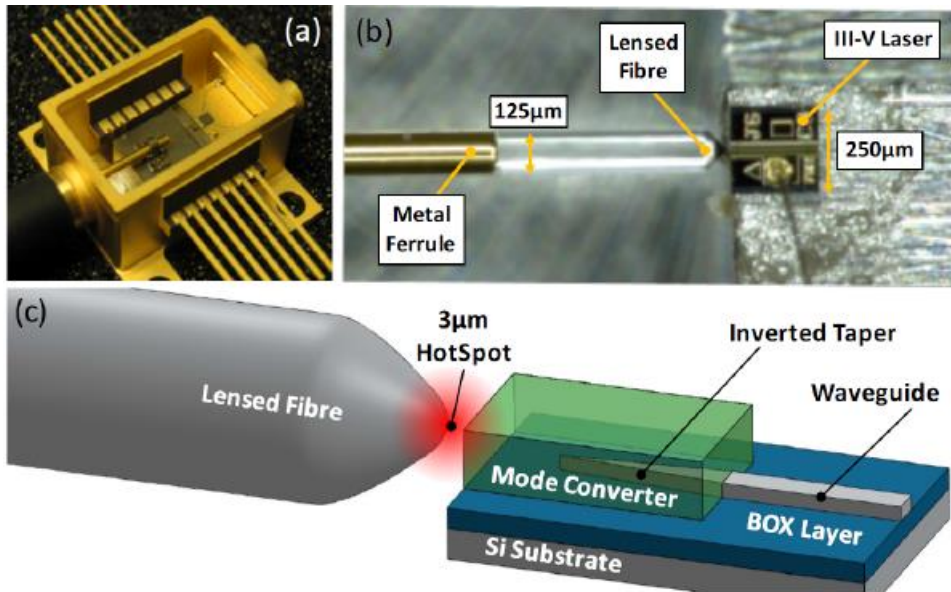


Figura 2.13 (a) Encapsulamento “Kovar Butterfly” para acoplamento de borda; (b) Imagem microscópica do acoplamento de borda usando uma fibra com a ponta em forma de lente (*lensed fiber*); (c) Esquemático de um acoplamento de borda usando uma fibra com a ponta em forma de lente e um guia de onda cônico[3].

Quando se pretende fazer o acoplamento de borda para uma matriz de fibras as seguintes recomendações de devem ser seguidas[5]:

- As fibras devem ter o seu núcleo alinhado na mesma direção;
- O intervalo entre fibras numa matriz deve ser estabelecido para 127μm ou 250μm;
- Deve ser usadas sempre que disponíveis fibras com a ponta em forma de lente (*lensed fibers*).

A não utilização de fibras com a ponta em forma de lente (*lensed fibers*) no acoplamento com guias de onda cónicos com um tamanho na ordem dos 10μm, causa uma severa redução na eficiência do acoplamento. De forma a diminuir as reflexões das superfícies de acoplamento, a abordagem à adotar é usar guias de onda angulares fabricados tipicamente com um ângulo de 8°. Desta forma no acoplamento entre estes guias de onda angulares e uma matriz fibras, é necessário um ajuste para garantir que a separação entre guias de onda corresponda exatamente a separação das fibras.

O acoplamento de borda é mais usado em chips fabricados em fosfato de índio, onde é mais adequado no acoplamento entre o laser e a fibra. No entanto, o acoplamento de borda também pode ser transferido para chips fabricados em silício, seguindo as duas regras que

se seguem. Em primeiro, o acoplamento ótico é feito com uma fibra com a ponta em forma de lente (*lensed fiber*) e um guia de onda com a forma de um cone invertido. E em segundo, o acoplamento ótico é feito entre uma fibra padrão e um conversor de modo de 10 μm . Em ambos os casos, é importante garantir que o guia de onda invertido em forma de cone e o conversor de modo estejam a distância correta da borda do PIC para realizar o acoplamento.

2.3 Linhas Coplanares

O inventor das linhas coplanares foi Cheng P.Wen em 1969. E tal como é ilustrado na figura 2.14, uma linha coplanar consiste numa linha central de largura (W) e comprimento (L), separada por uma distância (G) de dois planos de massa finitos, que podem ou não ter a mesma dimensão da linha condutora. Tanto a faixa condutora como as duas faixas de massa têm uma espessura (T) e estão assentes num dielétrico caracterizado pela sua espessura (H) e constante dielétrica (ϵ_r).[14]

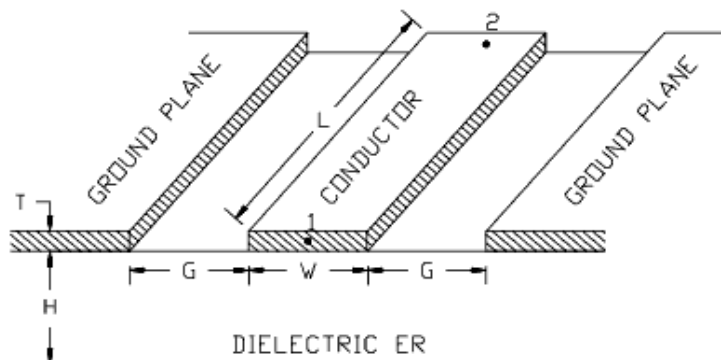


Figura 2.14 Esquemático de linhas coplanares (CPW)[12]

As linhas coplanares apresentam algumas vantagens quando comparadas com outras linhas de transmissão, como as linhas *microstrip*. Para além de serem de fácil fabricação, o fato da faixa condutora e da faixa de massa estarem no mesmo plano permite a montagem fácil de dispositivos do tipo SMD (*surface mounted devices*), eliminando assim a necessidade de criar buracos para aceder ao plano de massa.

O campo eletromagnético fica concentrado nos dois planos de massa e no dielétrico e assim este tipo de linhas de transmissão apresentam baixa dispersão e radiação. Quando temos linhas CPW lado a lado, duas faixas de massa existem entre a parte condutora de cada

linha, diminuindo assim o acoplamento entre linhas CPW. Deste modo, os circuitos que usam linhas coplanares em vez de linhas *microstrip* podem ter uma maior densidade de linhas sem ter interferências entre elas. Para isso acontecer as faixas de massa devem estar sempre ao mesmo potencial.[15]

A impedância característica e a atenuação neste tipo de linhas de transmissão é dada por um conjunto de parâmetros, são eles a largura da faixa condutora (W), a distância entre faixa de massa e faixa condutora (G) e a permissividade e espessura do dielétrico.

2.3.1 Substrato

No contexto de eletrônica o termo substrato refere-se a estrutura que serve de fundação para a construção de componentes eletrônicos como transístores e circuitos integrados. Falar de substrato implica falar de dielétrico, que designa o material ou conjunto de materiais que compõem um substrato. Todos os dielétricos são materiais isoladores, o que significa que dentro de certos limites de tensão nenhuma corrente irá percorrer este material. No entanto, quando o material dielétrico é colocado a uma diferença de potencial, este fica polarizado. Significa que na presença de um campo elétrico externo os elétrons ficaram alinhados na direção positiva do campo. Dependendo do potencial do campo elétrico externo e da energia de ligação das moléculas, o material fica polarizado ou volta ao seu estado inicial.[16][17].

2.3.2 Propriedades de um substrato

2.3.2.1 Constante dielétrica

A constante dielétrica também denominada de permissividade relativa é uma medida das propriedades dielétricas de um material na sua capacidade de armazenar carga. É um valor adimensional é obtém-se pela razão entre a permissividade de um material e a permissividade do vazio. Pretende-se ter uma constante dielétrica com um valor baixo, uma vez que para altas frequências, isso traduz-se numa diminuição das capacitâncias parasitas que se desenvolvem entre linhas.[18]

2.3.2.2 Perdas no dielétrico

As perdas no dielétrico são uma medida das perdas de sinal devido a absorção do campo eletromagnético pelo substrato e dissipadas como calor. Na escolha de um substrato, materiais com perdas no dielétrico pequenas são preferíveis, pois reduzem a quantidade de perdas da estrutura condutora. [19]

2.3.2.3 Isolamento Elétrico (Resistividade)

O isolamento elétrico é uma medida da quantidade de elétrons conduzidas por um material. Quanto maior é o isolamento elétrico de um substrato maior será a sua capacidade de evitar o surgimento de correntes. A capacidade de isolação é dependente da espessura do material, assim para uma dada resistência total um material com maior resistividade apresentara uma espessura mais fina do que um material com menor resistividade.[18]

2.3.2.4 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma medida de transferência de calor através do corpo de um material. É dado em Watt por metro Kelvin($W/(m \cdot K)$), e este valor indica a eficiência de condução de calor através do volume de um material. Esta é uma característica de um substrato, pois muitas vezes os substratos são responsáveis por conduzir calor desde um dispositivo ativo até ao dissipador de calor. Numa dada situação se o substrato escolhido tem uma condutividade térmica baixa, relativamente a potência dissipada pelo dispositivo ativo. A condução de calor através do substrato pode não ser suficiente para manter o dispositivo a uma temperatura constante, o que leva ao aumento de temperatura do dispositivo o que pode provocar uma diminuição do desempenho deste ou em último caso levar a rutura do dispositivo.[18]

2.3.3 Silício

O silício é um semicondutor bem presente na eletrónica nos dias atuais. Algumas das suas aplicações são os transístores BJT e MOSFET e processadores, contruídos em substratos de silício e que são amplamente usados num grande número de aplicações. Para o sucesso do

silício contribui o fato de ter uma cadeia de produção bem estabelecida e com processos de fabrico eficientes.

Para além disto é um substrato barato e com boa condutividade térmica comparativamente a outros substratos. Tem boas propriedades isoladoras e é mecanicamente estável. No entanto, este substrato apresenta um desempenho cada vez mais baixo para as altas frequências.[18]

2.3.4 FR-4

FR-4 que significa “*Fire Resistant*” é um substrato constituído por fibra de vidro embebido em resina epóxi. É um substrato versátil e bastante usado no fabrico de PCBs. Tem uma constante dielétrica típica de 4.7, mas está varia entre 4.35 e 4.8. A constante dielétrica depende ligeiramente da frequência e do fabricante. FR-4 é um material anisotrópico, ou seja, as propriedades do FR-4 não são iguais em todas as direções. Como principal vantagem tem o facto de ser um substrato barato, no entanto não é muito adequado para altas frequências devido à sua alta tangente de perdas.[20]

2.3.5 Rogers RO3006

O substrato Rogers RO3006 é composto por *polytetrafluroethylene (PTFE)* preenchido com cerâmica. É um substrato usado comercialmente para aplicações na banda das micro-ondas devido às suas características. Essas características incluem uma constante dielétrica de 6.15 estável numa gama ampla de temperaturas. Bom desempenho para altas frequências devido a baixas perdas no dielétrico. Tem excelentes propriedades mecânicas e permite a construção de placas multicamada.[21]

2.4 Par Diferencial

Um par diferencial é constituído por duas linhas de transmissão paralelas e situadas no mesmo plano. Estas linhas são atravessadas por sinais de igual amplitude e polaridade

oposta. As linhas têm um comprimento (L) e largura (W), estão separadas por uma distância (S) e cada par de linhas diferencial está afastado de uma distância (G).

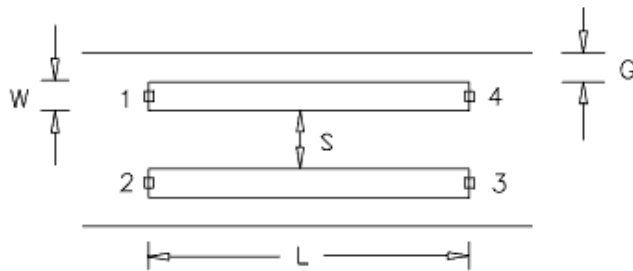


Figura 2.15 Esquemático de um par diferencial [19]

Um par diferencial tem as seguintes características:

- As linhas do par de transmissão diferenciais são uniformes e tem a mesma impedância ao longo do seu comprimento de forma a minimizar as reflexões e a distorção.
- As linhas do par diferencial têm de ser simétricas, ou seja, tem de ter a mesma largura e a distância que as separa tem de ser a mesma ao longo da linha. A existência de assimetrias resulta em que sinais diferenciais sejam convertidos em sinais de modo comum.
- Simetria também implica ter o mesmo comprimento, para que o atraso temporal nas duas linhas seja igual.
- Tem de existir acoplamento entre as duas linhas, para que qualquer interferência que exista afete as duas linhas de igual forma e no fim da linha de transmissão possa ser eliminado por um amplificador diferença.[22]

2.4.1 Transmissão com um único canal ou transmissão com dois canais (diferencial)

De seguida são apresentadas algumas vantagens da transmissão de sinais por linhas diferenciais comparativamente a transmissão de sinal por um único canal. Mas primeiramente convém perceber o que é um sinal diferencial e um único sinal. Na

transmissão por sinais diferenciais os dados são enviados de um ponto para outro usando dois sinais complementares. Cada sinal do par complementar é enviado pelo seu próprio canal de transmissão. A informação está contida na diferença entre os dois sinais ao contrário da transmissão utilizando um único canal em que a informação está contida entre um canal de transmissão e a massa. Na transmissão com apenas um canal é usado apenas uma linha de transmissão por cada canal de informação, mais uma linha de transmissão de massa que é usado por vários canais. Assim na transmissão por par diferencial é preciso praticamente o dobro de linhas de transmissão do que na transmissão por um único canal. Isto pode apresentar-se como uma desvantagem, no entanto isso é compensado pelas vantagens que se enumeram de seguida da transmissão por par diferencial, que são:[23][24]

- Maior imunidade a interferência eletromagnética e cruzamento da informação de linhas de transmissão próximas
- Sinais diferenciais precisam de tensões mais baixas para operar do que sinais com um canal. Com tensões mais baixas temos o benefício de ter menos potência consumida e reduzir as emissões eletromagnéticas.
- Como temos eliminação de ruído em modo comum, as linhas de transmissão diferenciais apresentam um melhoramento na Relação Sinal Ruído (SNR)

2.5 Wire Bonding

Wire Bonding é a técnica de fornecer uma ligação elétrica entre um chip e um dispositivo externo, como é visível na figura 2.16. Esta ligação é feita através de fios muito finos de ouro, alumínio ou cobre. Apesar da existência de outras técnicas de ligação deste tipo, como a já apresentada *Flip-Chip*, *Wire Bonding* ainda é a técnica dominante de ligação atualmente, representando mais de 95% do encapsulamento elétrico. Um dos motivos desta técnica ser ainda a mais usada está relacionada com o seu baixo custo e elevada flexibilidade.[25]

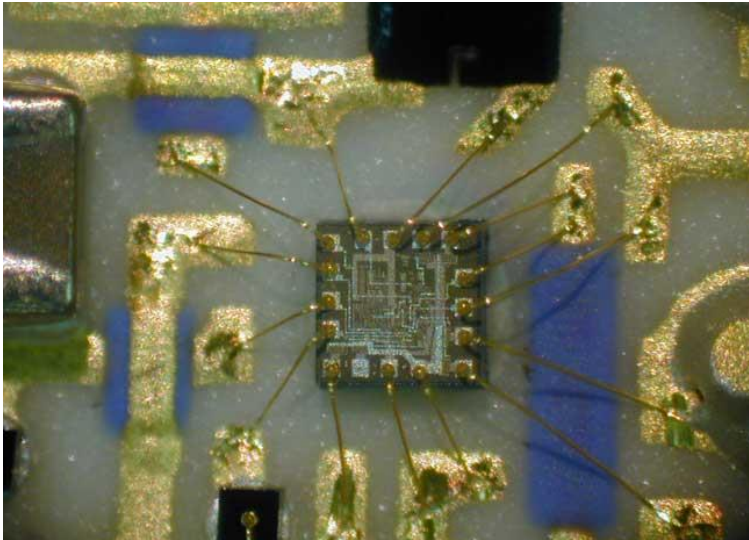


Figura 2.16 Tecnologia de Wire Bonding[24]

O ouro é o principal material dos fios devido a sua fiabilidade e facilidade de montagem, no entanto, e por causa do seu alto custo, outros materiais como o alumínio e o cobre têm sido usados. O cobre é a alternativa preferida devido ao seu menor custo, alta resistência mecânica e baixa resistência elétrica[26].

A tecnologia de *Wire Bonding* pode ser caracterizada pelo método de ligação (*Ball Bonding* ou *Wedge Bonding*) ou pelo mecanismo usado para fazer a ligação (Termocompressão, Ultrassônica ou Termossônica). Os mecanismos de ligação por Termocompressão e Termossônica produzem *Ball Bonding*, ilustrado na figura 2.17a). Já o mecanismo Ultrassônico produz uma ligação do tipo *Wedge Bonding*, ilustrado na figura 2.17b). A figura 2.17 representa estes dois métodos de ligação.

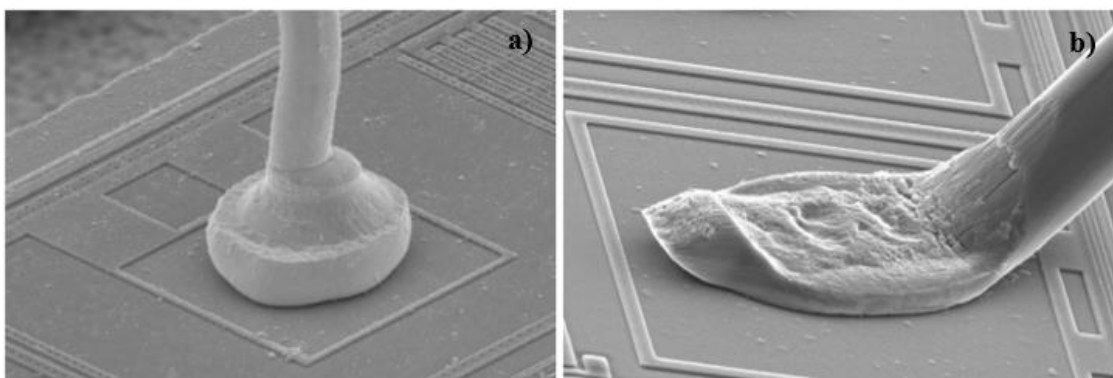


Figura 2.17 Métodos de Wire Bonding[26]

2.6 Controlo Térmico de um circuito ótico

A performance e estabilidade de um circuito ótico dependem da sua temperatura absoluta e da estabilidade desta. Do mesmo modo que um integrado elétrico é composto por componentes ativos e passivos, um integrado ótico também é composto por componentes ativos (lasers e amplificadores óticos) e passivos (guias de onda).

Estes mesmos dispositivos ativos para além de aquecerem o integrado por efeito de Joule são altamente sensíveis a variações de temperatura, por exemplo uma variação de temperatura pode fazer com que um laser deixe de emitir luz no comprimento de onda para o qual este foi polarizado. Deste modo, de forma a garantir a estabilidade da temperatura de trabalho de um circuito ótico integrado, tendo em consideração a potência dissipada por este e a temperatura ambiente a que este possa estar sujeito, é necessário usar um mecanismo ativo de regulação de temperatura. O mecanismo usado nos dispositivos óticos denomina-se refrigerador termoelétrico ou TEC, do inglês *thermo-electric cooler*. Na figura que se segue é ilustrado o comportamento de um EIC e PIC quando não temos regulação da temperatura, figura 2.18a) e com regulação de temperatura figura 2.18b).

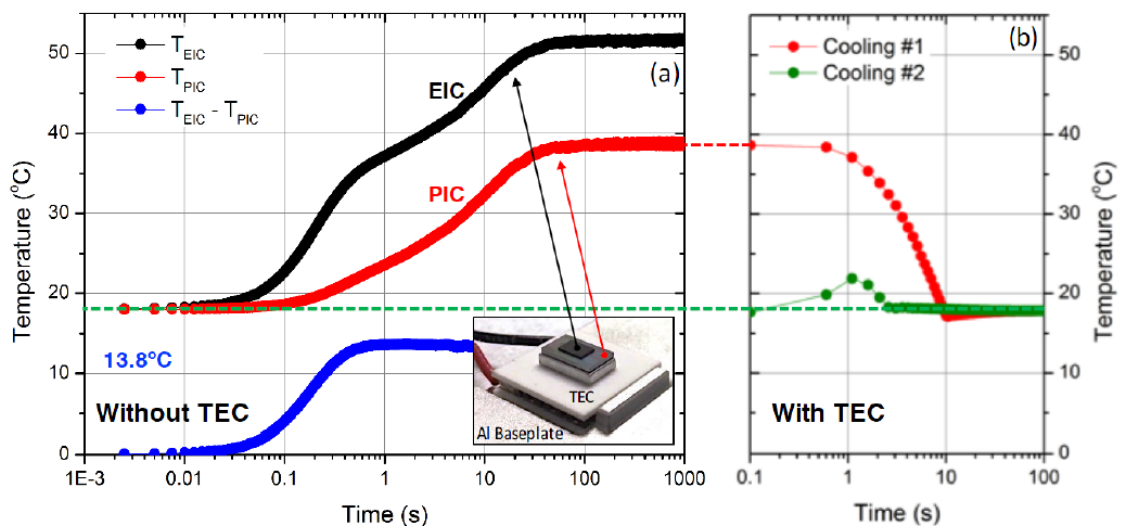


Figura 2.18 (a) Evolução da temperatura em função do tempo do EIC(a preto), PIC (a vermelho) e da diferença entre a temperatura do EIC e do PIC (a azul); (b) A vermelho temos o arrefecimento do PIC assim que o TEC é ligado, a verde temos a evolução da temperatura e em função do tempo para a situação em que o PIC e TEC são ligados simultaneamente[3].

Pela observação da figura 2.18a) constatamos que quando o EIC e PIC são ligados, com o TEC desligado a temperatura de ambos aumenta até atingir um patamar onde estabiliza. Esse patamar é 52°C para o EIC e 38°C para o PIC. Tanto o EIC como o PIC têm uma evolução semelhante da temperatura, mas atingem temperaturas diferentes em regime estacionário. Isto deve-se à potência dissipada por cada um ser diferente e ao facto do EIC estar integrado no PIC, ou seja, existe transferência de temperatura por condução do EIC para o PIC.

Na mesma figura ainda temos a curva a azul que representa a diferença de temperaturas entre o EIC e o PIC, essa temperatura em regime estacionário é de 13.8°C e pode ser usada para determinar a resistência térmica entre o EIC e o PIC[3]. Na figura 2.18b) que representa a continuação da figura a) quando o TEC é ligado, verificamos que o PIC leva apenas 10 segundos até atingir a temperatura de operação. Também na figura 2.18b) a verde temos tal como indica a legenda da figura o comportamento da temperatura para a situação em que o PIC e o TEC são ligados simultaneamente. Neste caso o PIC apenas atinge os 22°C até o TEC atuar e estabilizar a temperatura. Isto é conseguido graças a um controlador PID e a um termistor no integrado do PIC que fornece a realimentação necessária para o controlador atuar.

2.6.1 Funcionamento de um TEC

Refrigeradores termoelétricos também conhecidos como refrigeradores de Peltier são bombas de calor de estado sólido que utilizam o efeito de Peltier para mover calor. O efeito de Peltier foi descoberto por Jean Peltier em 1834. O efeito descreve que quando corrente elétrica atravessa duas junções de dois materiais distintos (um termopar), existe um efeito de aquecimento que não pode ser explicado unicamente pelo efeito de Joule. De fato Peltier observou que dependendo da direção da corrente o efeito provocado pode ser de aquecer ou refrigerar[27].

Este efeito observa-se em termopares, mas convém lembrar que os metais também são bons condutores térmicos, o que tende a trabalhar contra o gradiente de temperatura observado por Peltier. Na prática materiais semicondutores termoelétricos são usados na

construção de um TEC. Como referido um TEC é construído usando dois semicondutores diferentes, um tipo n e outro tipo p. Os dois semicondutores são posicionados termicamente em paralelo e são unidos numa extremidade por uma placa metálica condutora, tal como se pode observar na figura 2.19.

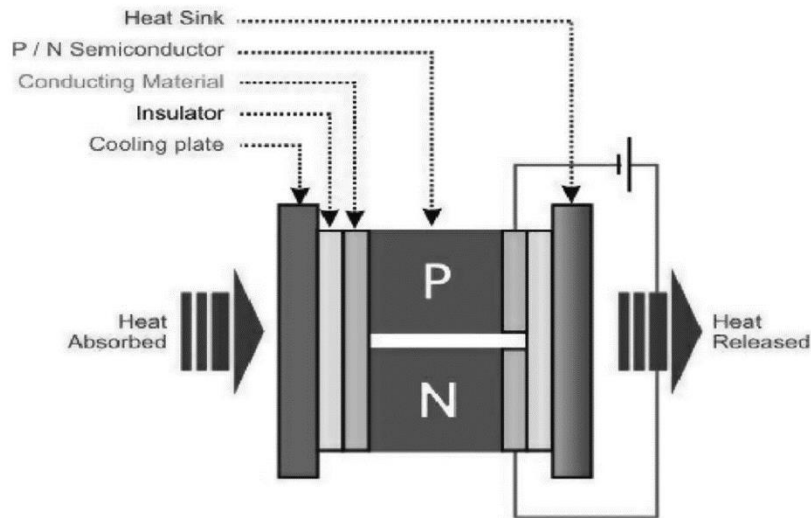


Figura 2.19 Modelo de um refrigerador termoelétrico [27]

Uma tensão é aplicada às extremidades dos dois materiais semicondutores, fazendo com que uma corrente elétrica percorra os dois semicondutores em série. Os dois semicondutores a serem percorridos por uma corrente originam uma diferença de temperatura resultando no efeito de Peltier. Observando a figura 2.19 constatamos que para o sentido da corrente imposto pela fonte de tensão temos absorção de calor junto da vizinhança da placa de refrigeração. Este calor vai ser libertado no lado oposto do TEC. Se a direção da corrente for alterada, através da alteração da polaridade da fonte de tensão, o lado de absorção de calor passa a ser o lado de libertação, e o lado de libertação o de absorção[27].

Capítulo 3

3. Encapsulamento Elétrico

Neste capítulo são apresentadas todas as simulações necessárias para obter as regras de desenho das linhas coplanares e das linhas par diferencial no substrato dado. Por fim, e com as regras de desenho já definidas desenharam-se umas linhas de teste que foram impressas e medidas e cujos resultados se comparam às simulações das mesmas.

3.1 Simulador Advanced Design System

Todas as simulações elétricas foram realizadas no Advanced Design System (ADS). Este é um software de desenho eletrónico automático para RF desenvolvido pela Keysight Technologies. O ADS é uma ferramenta completa no desenho de RF, pois permite desenho de esquemático, geração de layout, simulação de circuitos no domínio do tempo e no domínio da frequência e simulação electromagnética.[28]

3.2 Definição de um substrato no ADS

O primeiro passo para começar a simular as linhas no ADS foi a definição do substrato onde estas linhas iriam ser construídas. Neste caso as linhas vão ser implementadas na estrutura do Holder e por isso o substrato vai ser o silício. Na figura seguinte pode-se ver a definição do substrato no ADS e as várias camadas que o constituem.

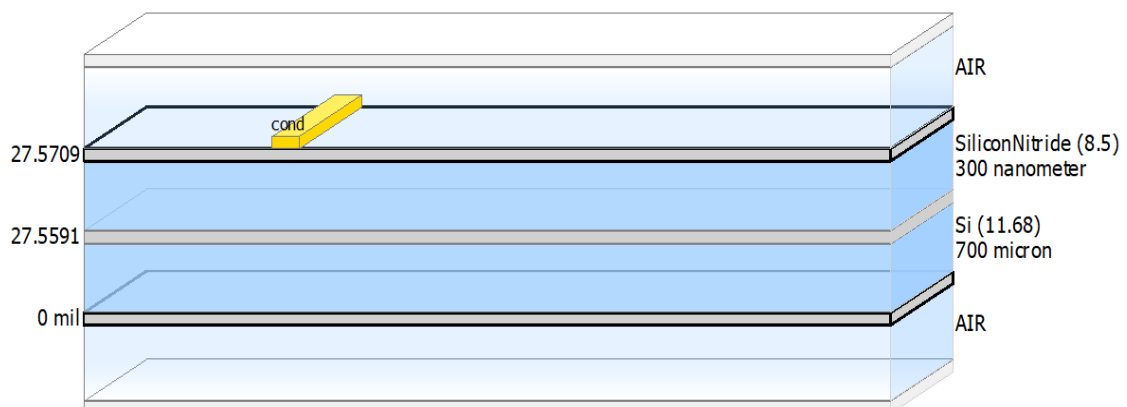


Figura 3.1 Definição do substrato no ADS

A primeira camada, como é visível na figura é uma camada de ar exigida pelo ADS, de seguida temos um plano de interface, entre a camada de ar e a camada de dielétrico que é o silício com uma espessura de 700 μm e constante dielétrica de 11.68 Acima do silício temos um outro plano de interface com o segundo dielétrico que é o nitrato de silício com uma espessura de 300 nm e uma constante dielétrica de 8.5.

Esta camada de nitrato de silício é necessária porque os substratos de RF exigem que a resistência superficial seja na ordem dos $\text{M}\Omega$ por cm. Como o silício só tem uma resistência superficial na ordem dos $10\text{K}\Omega$ por cm. Deste modo, uma camada adicional entre o silício e o condutor tem de ser adicionada.[8] Por fim temos de novo um plano de interface entre o nitrato de silício e o condutor.

3.5 Regras de desenho das linhas CPW

3.5.1 Comprimento

A primeira dimensão a estudar nas linhas CPW foi o comprimento, para isso desenhou-se na ferramenta SolidWorks como se apresenta na figura 3.2 (à esquerda) uma linha com as seguintes dimensões:

Largura=34.0 μm , Distância entre linhas=20.0 μm , Intervalo entre pares de linhas=50 μm , comprimento=100.0 μm . Esta linha tem uma impedância de 50Ω . Importou-se a referida linha para o ADS figura 3.2 (à direita) e simulou-se.

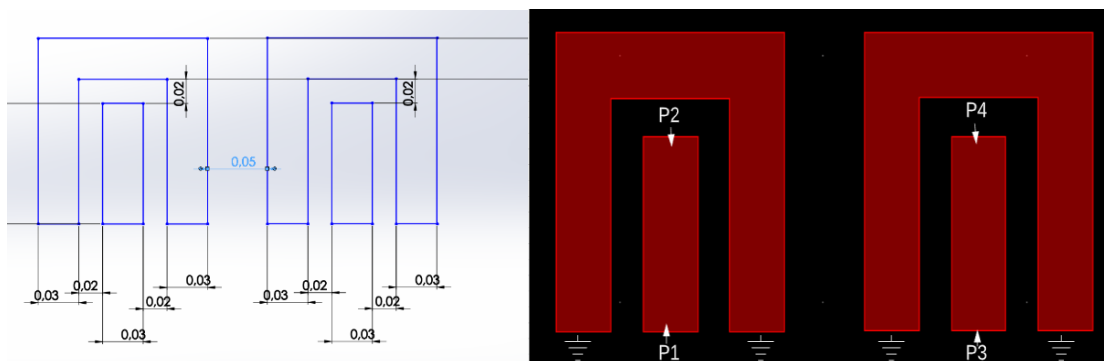


Figura 3.2 Desenho das linhas CPW em Solidworks (à esquerda), layout no ADS das mesmas linhas (à direita)

Os resultados da simulação são apresentados na figura seguinte.

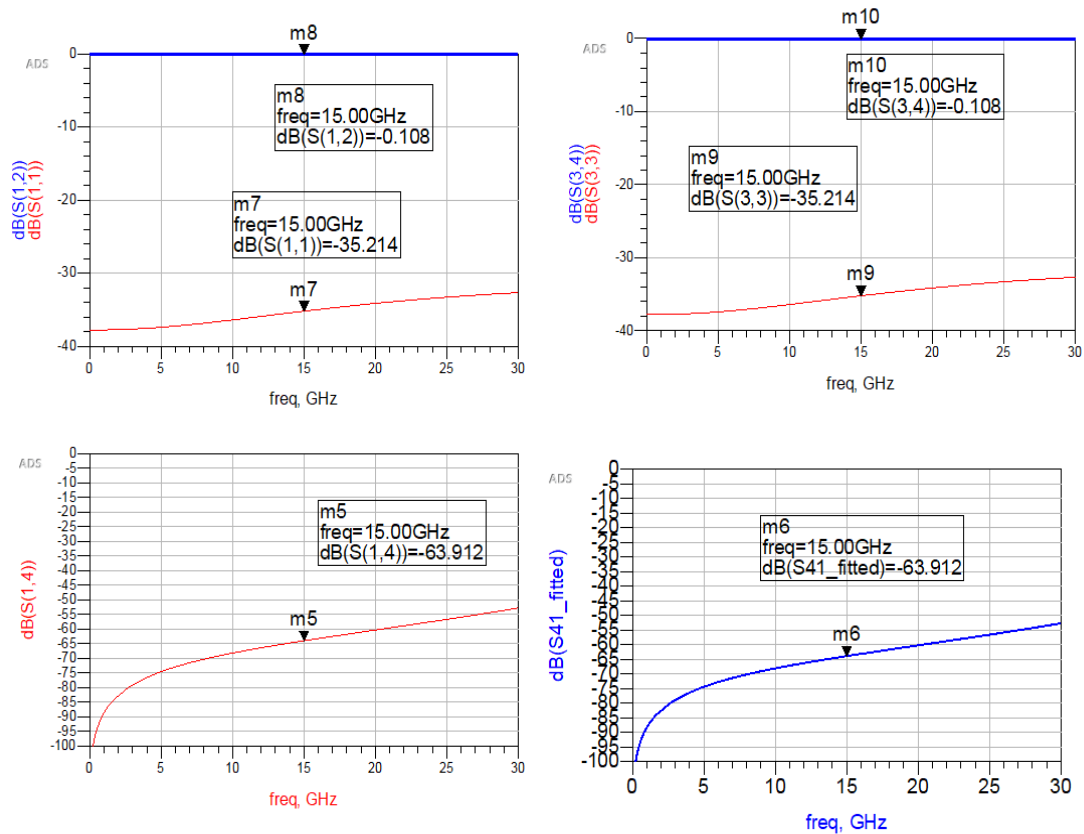


Figura 3.3 Parâmetros S das linhas simuladas

Os parâmetros $S(1,1)$ e $S(1,2)$ dizem respeito a transmissão. $S(3,3)$ e $S(3,4)$ são parâmetros de reflexão e o $S(1,4)$ e $S(2,3)$ são parâmetros de acoplamento.

Assim com a largura e intervalo entre pares de linhas fixo foi-se variando o comprimento desde 100um até 1400um e foram tirados os parâmetros S a 15GHz, de várias figuras semelhantes a figura 3.3. Com estes dados contruiu-se uma tabela que deu origem ao seguinte gráfico da transmissão e reflexão em função do comprimento das linhas.

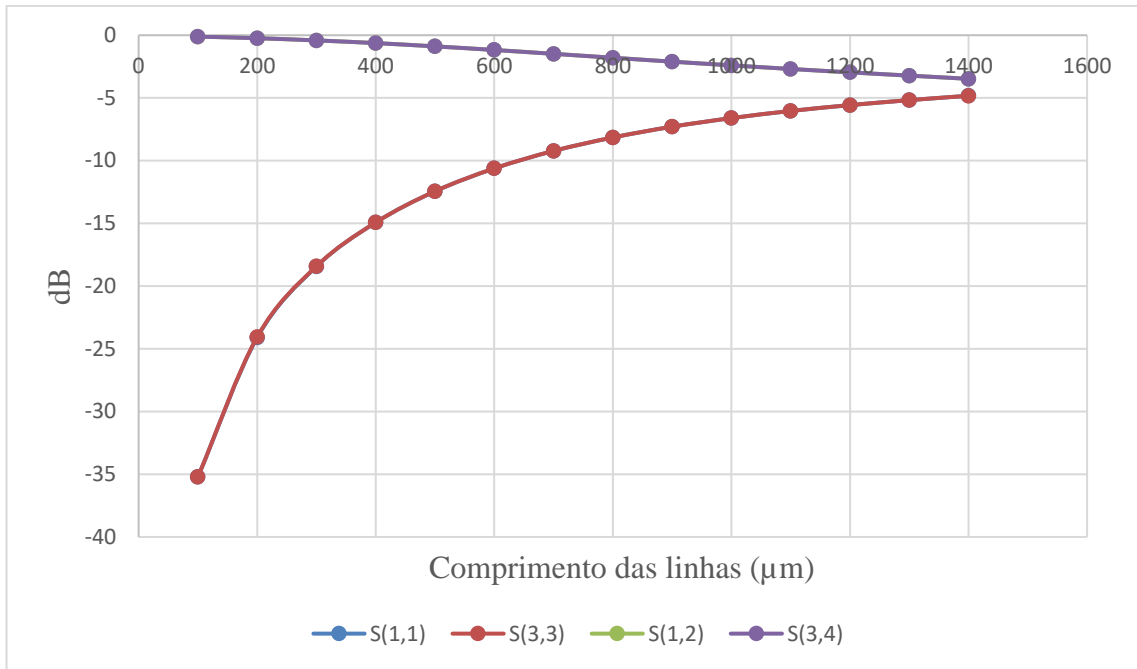


Figura 3.4 Transmissão e Reflexão em função do comprimento

Pela observação do gráfico conclui-se que a transmissão e reflexão pioram à medida que aumentamos o comprimento da linha. Os parâmetros de reflexão $S(1,1)$ e $S(3,3)$, e os parâmetros de transmissão $S(1,2)$ e $S(3,4)$ coincidem porque as linhas são exatamente iguais.

Com os dados dos parâmetros $S(1,4)$, também se contruiu um gráfico do acoplamento em função do comprimento das linhas, que se apresenta de seguida.

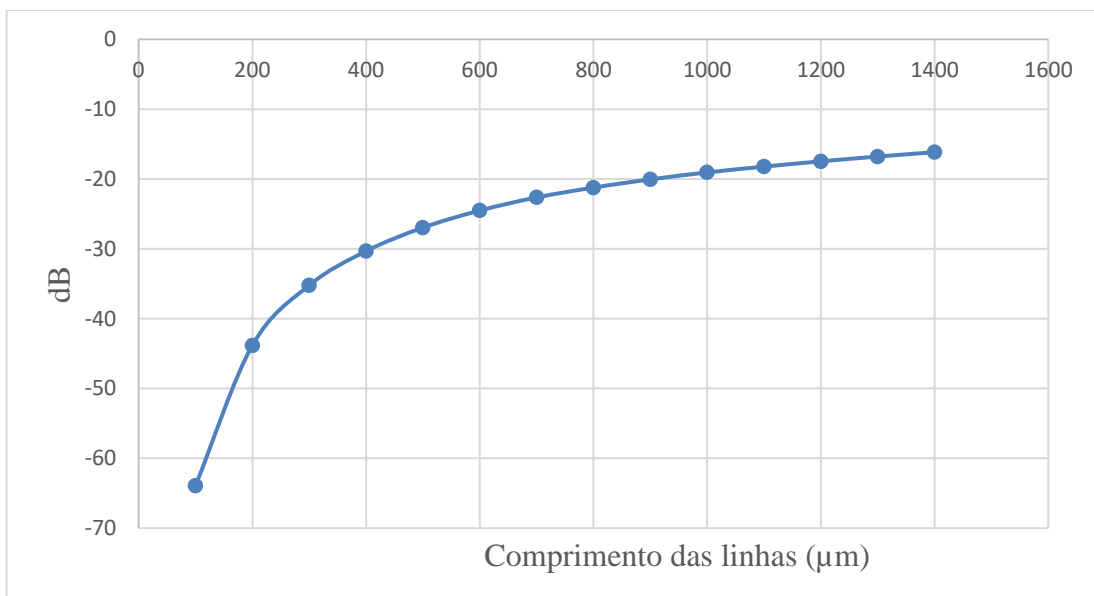


Figura 3.5 Acoplamento entre linhas CPW para vários comprimentos

Tal como a reflexão e transmissão o acoplamento também piora com o aumento do comprimento.

3.5.2 Largura

Para o estudo da largura procedeu-se de forma idêntica ao estudo do comprimento. Neste caso o comprimento foi fixado a 1200um e variou-se a distância entre linhas de 10.0um até 120um e a largura correspondente foi calculada utilizando a ferramenta LineCal, como se evidência na figura 3.6. Nesta figura para uma distância entre linhas(G) de 10um corresponde uma largura de 16.9um.

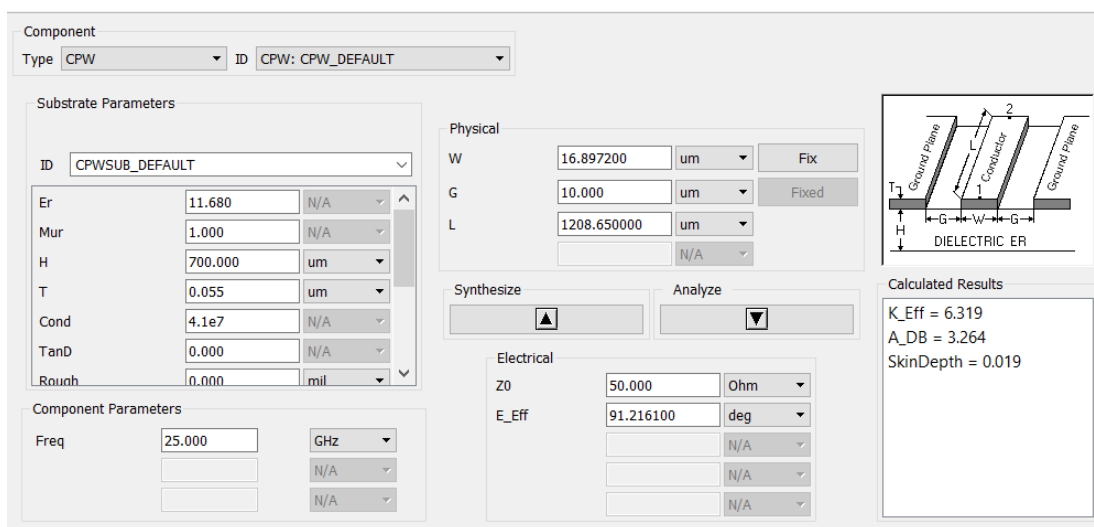


Figura 3.6 Janela da ferramenta LineCalc

Para várias distâncias entre linhas e correspondentes larguras registaram-se os parâmetros S numa tabela que serviram para construir os seguintes gráficos da reflexão e transmissão em função da largura (figura 3.7) e acoplamento em função da largura (figura 3.8).

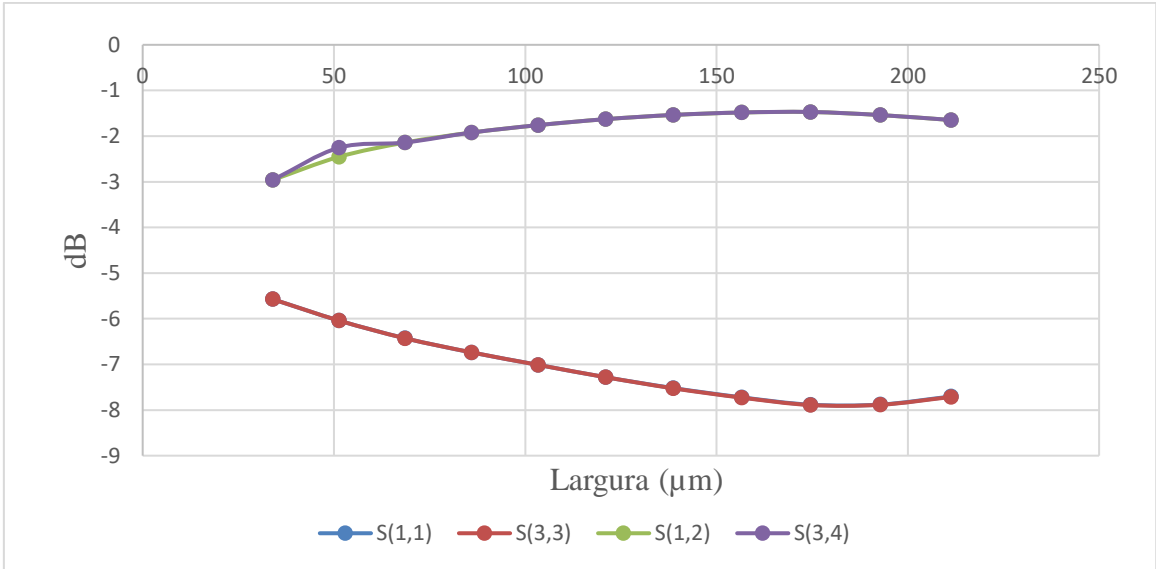


Figura 3.7 Reflexão e Transmissão em função da largura

A transmissão e reflexão melhoram à medida que aumentamos a largura até $W=174.6\mu\text{m}$, ou seja, os últimos dois pontos da transmissão e reflexão já são piores em relação aos pontos anteriores.

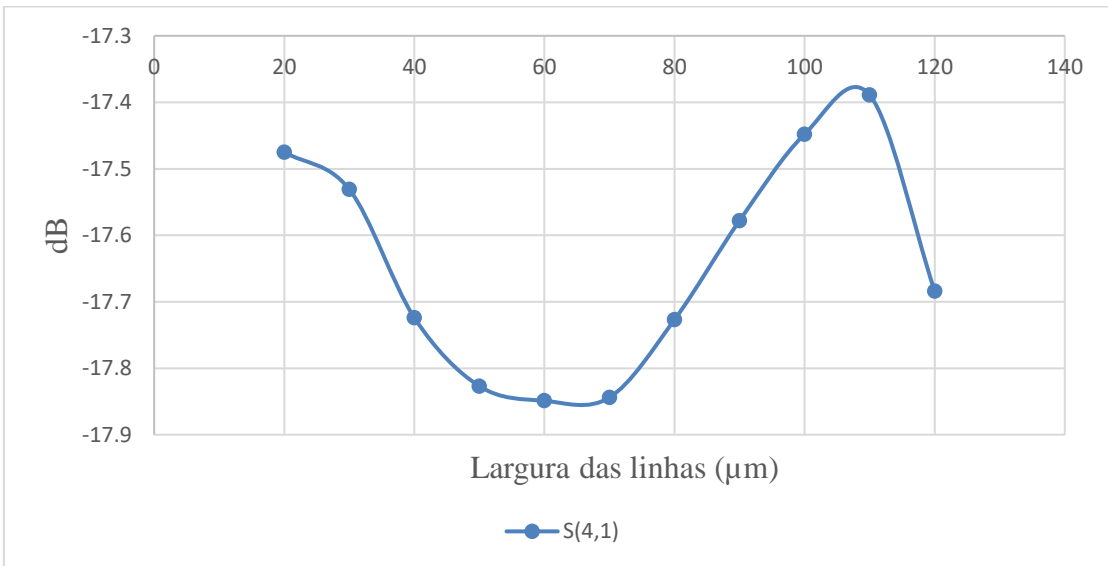


Figura 3.8 Acoplamento em função da largura

O acoplamento tem variações pouco significativas, mas melhora até $W=121\mu\text{m}$, depois piora até atingirmos $W=192,85$ depois no último ponto volta a melhorar.

3.5.3 Impacto da distância entre linhas CPW

Para fazer este estudo fixou-se a largura e comprimento das linhas e variou-se a distância entre linhas CPW. Este estudo foi feito para um comprimento de 100 μm , distância entre linhas de 50 μm e largura de 86 μm . Aumentou-se a distância entre linhas partindo de 10 μm até 190 μm e registámos os resultados, que se mostram de seguida na forma de 2 gráficos, um para a reflexão e transmissão e outro para o acoplamento.

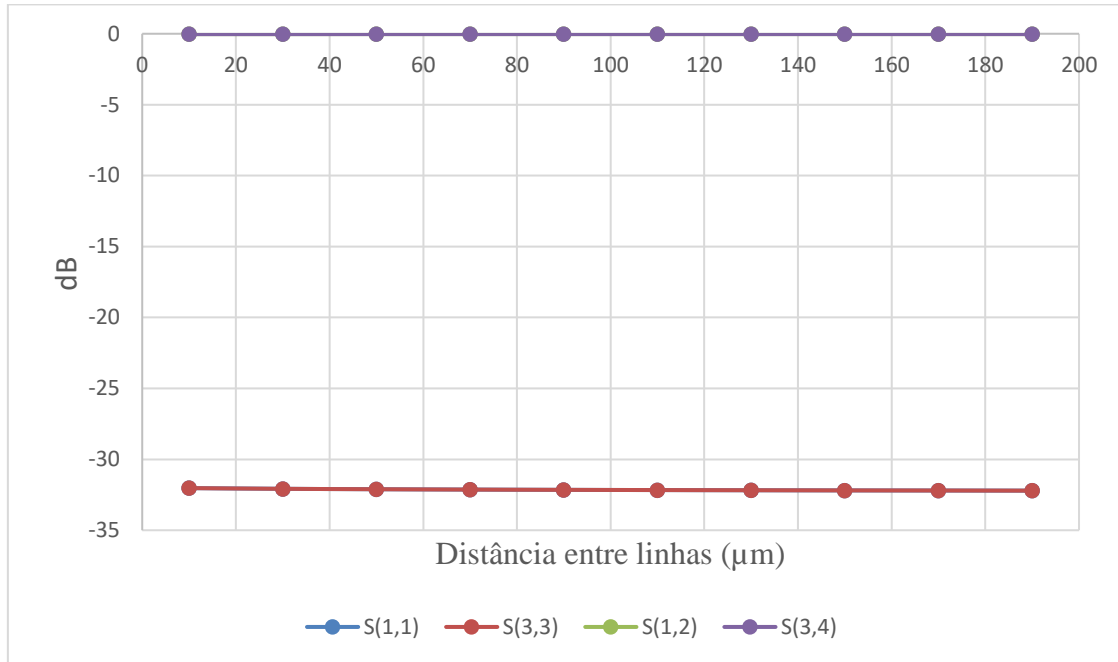


Figura 3.9 Transmissão e Reflexão em função da distância entre linhas CPW

Pela observação gráfica o impacto da distância entre linhas é muito pouco significativo.

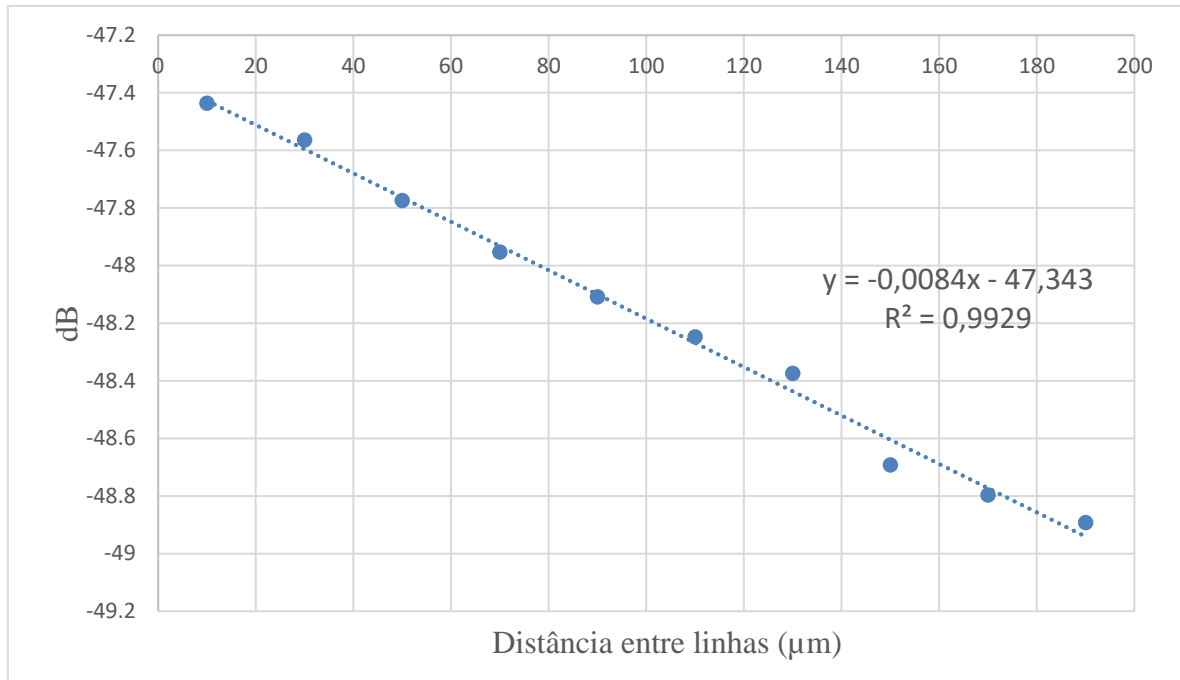


Figura 3.10 Acoplamento em função da distância entre linhas CPW

Quanto ao acoplamento este também melhora e demonstra um comportamento aproximadamente linear com o aumento da distância, como seria de esperar uma vez de quanto mais afastadas estão as linhas menos influência existe entre as duas.

3.5.4 Largura das linhas de massa

Em todos os estudos anteriores manteve-se a largura das linhas laterais de massa igual a largura da linha de sinal. Nesta seção pretende-se saber de que modo a largura das linhas de massa influencia a transmissão, reflexão e acoplamento. Para isso selecionou-se uma linha que se apresenta na figura seguinte, com as dimensões: comprimento=1200 µm, distância entre pares de linhas=30 µm e largura da linha de massa =51.3 µm. E partindo de uma largura de linha de massa de 10 µm, em intervalos de 20 µm variou-se a largura até 110 µm e observaram-se os gráficos seguintes dos parâmetros S.

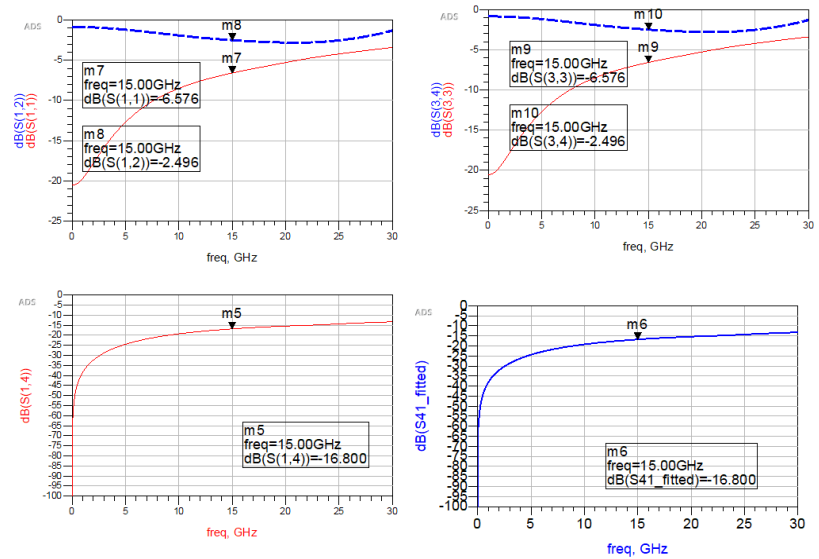
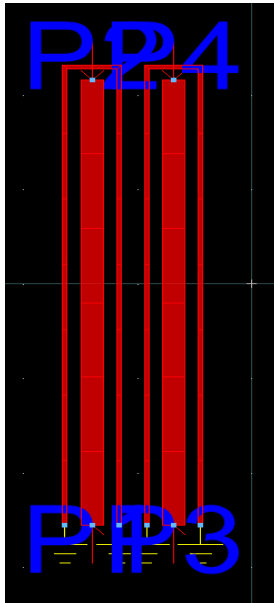


Figura 3.11 Linhas coplanares com uma largura de linha de massa de 10 μm (esquerda), gráficos dos parâmetros S resultantes da simulação (direita)

Com gráficos semelhantes ao da figura 3.11, resultantes das várias simulações do intervalo já referido, registaram-se os parâmetros S de reflexão ($S(1,1)$ e $S(3,3)$), transmissão ($S(1,2)$ e $S(3,4)$) e acoplamento $S(1,4)$, obtendo-se dois gráficos, que se apresentam de seguida. Um da transmissão e reflexão em função das linhas de massa e um segundo do acoplamento em função das linhas de massa.

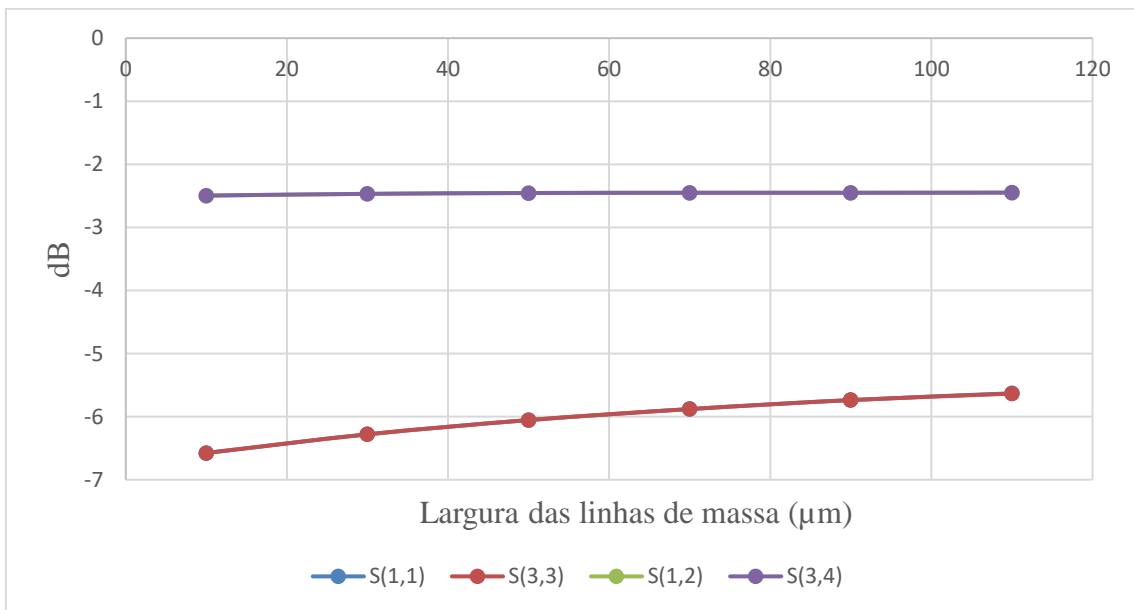


Figura 3.12 Transmissão e Reflexão em função da largura das linhas de massa

Da análise gráfica pode-se dizer que a largura das linhas de massa tem pouco impacto na transmissão e reflexão. Mas no intervalo simulado a transmissão melhorou cerca de 0.081dB e a reflexão piorou 0.5dB.

Na figura que se segue mostra-se o impacto do aumento da largura no acoplamento.

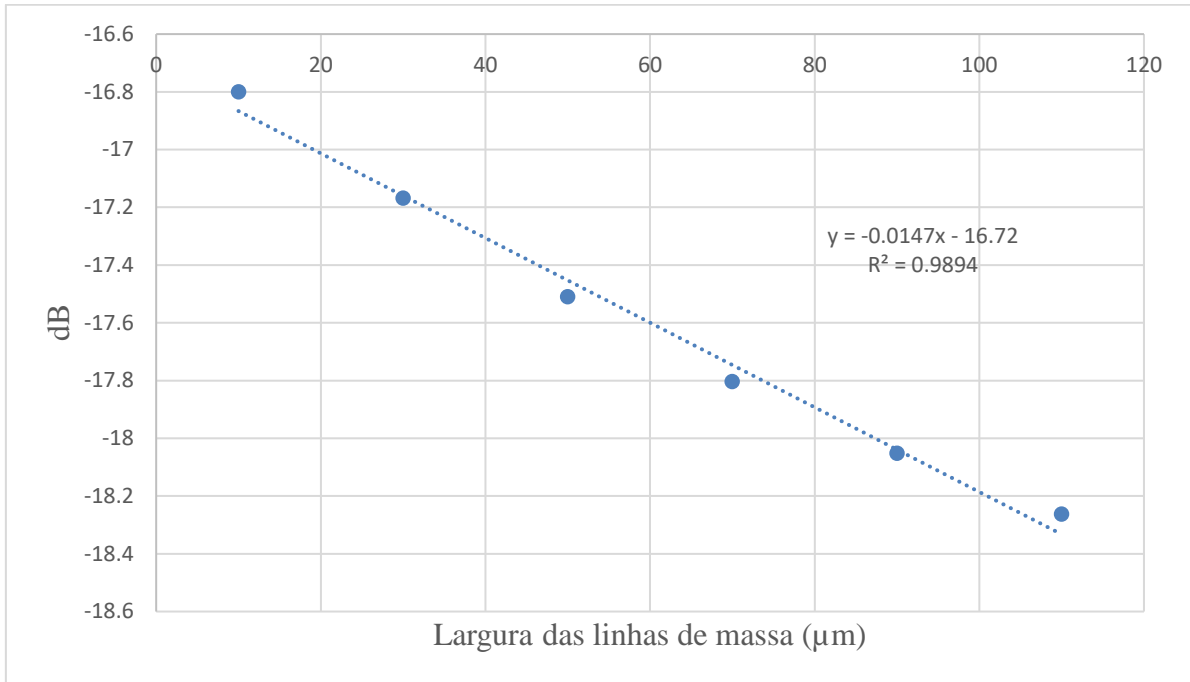


Figura 3.13 Acoplamento em função da largura das linhas de massa

Ao contrário da transmissão e reflexão onde o impacto é reduzido, no acoplamento o efeito que o aumento da largura das linhas de massa tem é de melhorar o acoplamento em 4.8dB.

3.5.5 Espessura do dielétrico

Em todas as simulações realizadas anteriormente a espessura do dielétrico foi mantida em 700 µm, tal como foi referido na definição do substrato, porque é a espessura dada pelo fabricante. Nesta seção pretendemos estudar a influência da camada de substrato na transmissão, reflexão e acoplamento. Para isso construímos um par de linhas CPW com as seguintes dimensões: comprimento=1400 µm, largura da linha de sinal e de massa=100 µm, distância entre linhas =100 µm. A espessura foi variada desde 0 µm até 1400 µm em intervalos de 100 µm os dados obtidos são apresentados de seguida na forma de gráfico.

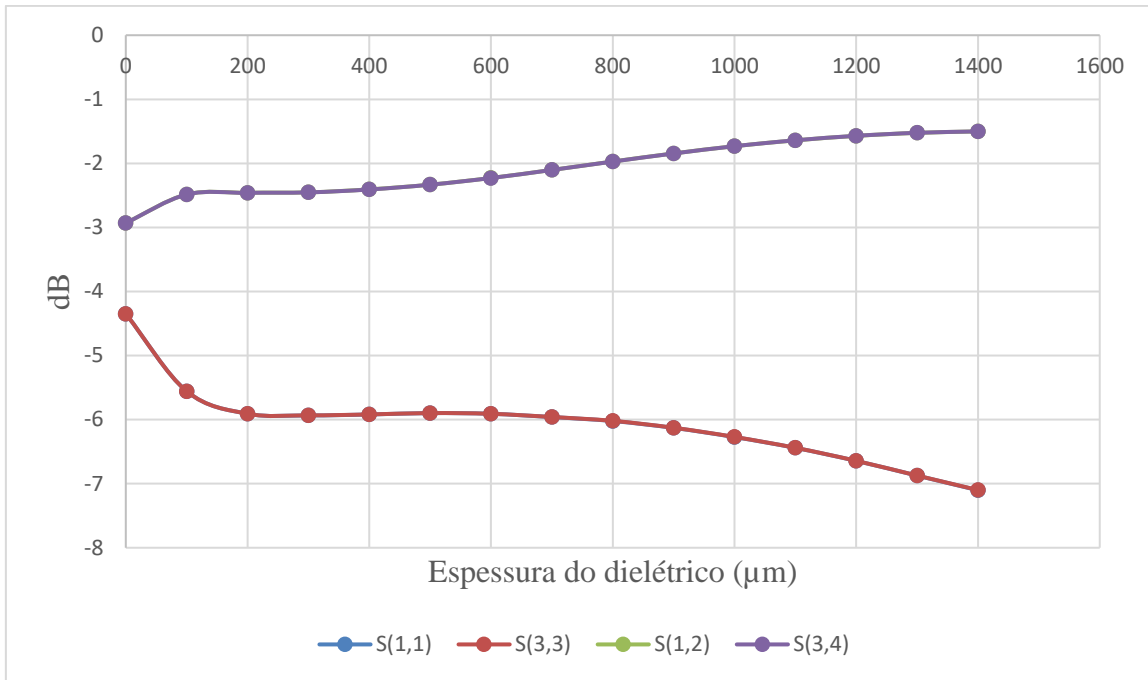


Figura 3.14 Transmissão e Reflexão em função da espessura do dielétrico

Com o dielétrico definido para uma espessura de 700 μm pode-se dizer pela análise gráfica que se diminuirmos a espessura a transmissão e reflexão pioram. Já se aumentarmos a espessura do substrato acima dos 700 μm usados, a transmissão e reflexão melhoram.

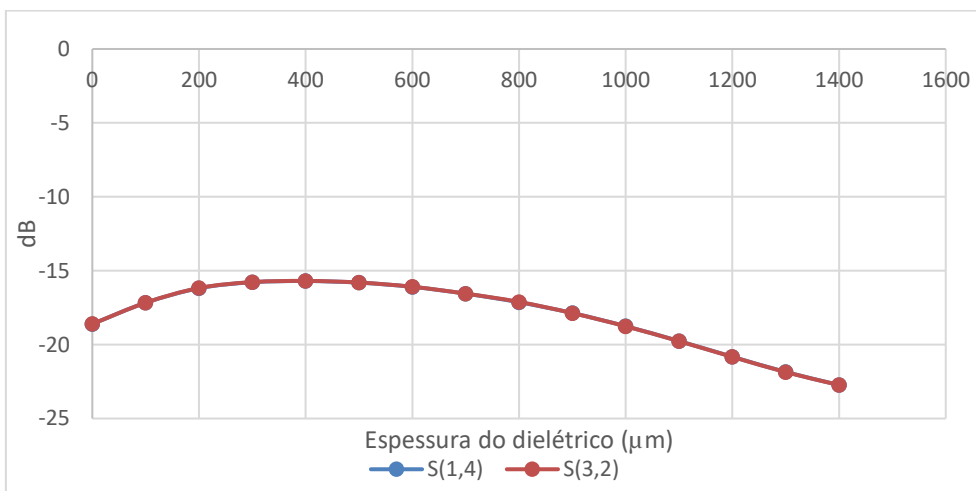


Figura 3.15 Acoplamento em função da espessura do dielétrico

Quanto ao acoplamento abaixo dos 700 μm, este piora ligeiramente e depois volta a melhorar à medida que nos aproximamos de espessuras baixas. Acima dos 700 μm o acoplamento melhora sempre.

Em seguida são apresentadas duas imagens que demonstram o impacto do aumento da espessura do substrato na transmissão, reflexão e acoplamento. Na figura 3.16 temos os dois primeiros gráficos referentes a reflexão e transmissão e nos dois últimos o acoplamento para um substrato com uma espessura de 700 μm . É visível nos gráficos da transmissão e reflexão que acima dos 15GHz a reflexão e transmissão estão muito próximas. A 15GHz o intervalo entre a transmissão e reflexão é de 3.9dB.

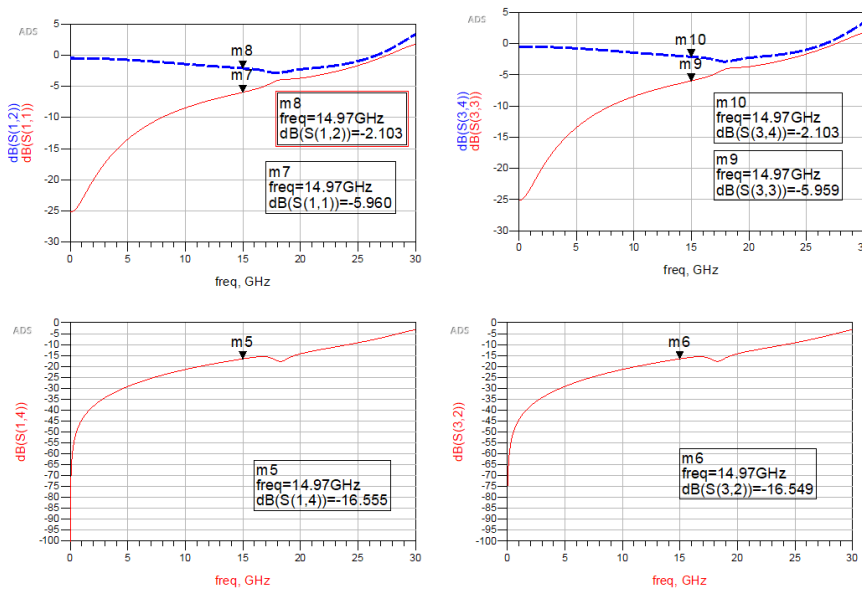


Figura 3.16 Transmissão, reflexão e acoplamento para uma espessura do dielétrico de 700 μm

Na figura 3.17, temos os mesmos gráficos do que na figura anterior, mas agora a espessura do substrato é de 1100 μm . Comparativamente a figura anterior, agora temos um intervalo entre a transmissão e reflexão de 4.8 dB. O que significa que tanto a transmissão quanto a reflexão melhoraram 0.5 dB. Com a mudança de espessura o acoplamento também melhora 3.2dB. As figuras 3.16 e 3.17 vêm confirmar o que se observa nos gráficos 3.14 e 3.15.

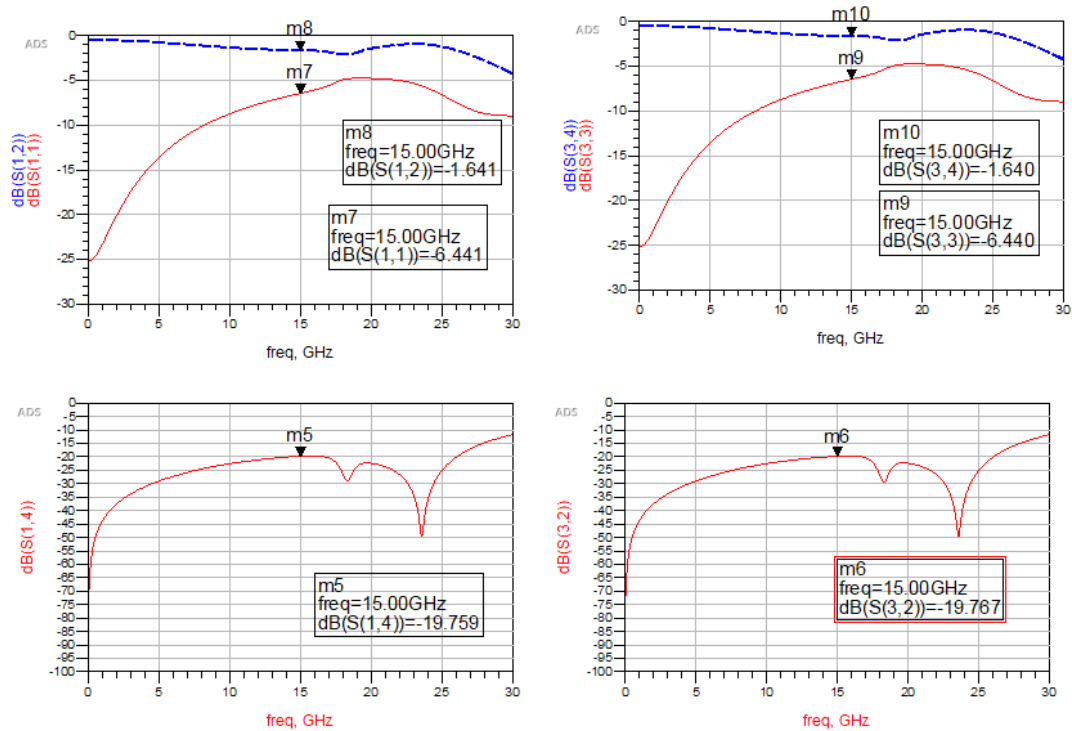


Figura 3.17 Transmissão, reflexão e acoplamento para uma espessura do dielétrico de 1100 μm

3.5.6 Curvatura das linhas

O último estudo feito para as linhas CPW, foi ver qual era a influência na transmissão e reflexão se adicionássemos curvas às linhas. Deste modo, desenhamos linhas com as seguintes dimensões: comprimento = 1000 μm, largura = 34 μm, com um ângulo de 90° e com vários raios de curvatura como se evidencia nas figuras seguintes.

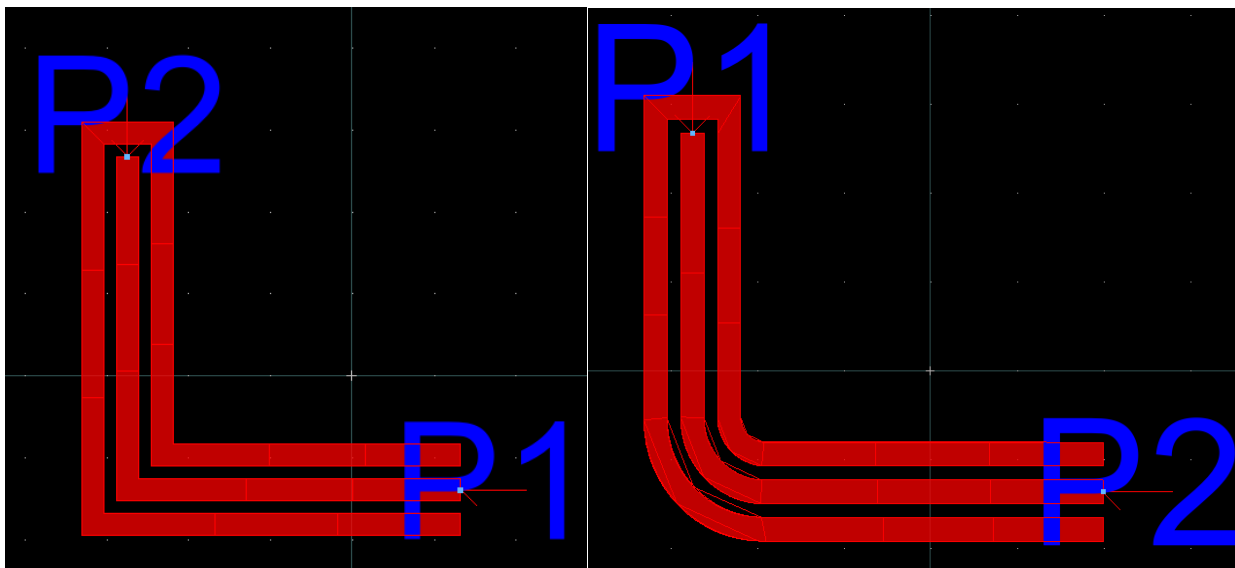


Figura 3.18 Linha CPW com um ângulo de 90° e raio de curvatura 0° (à esquerda) , Linha CPW com um ângulo de 90° e um raio de curvatura de 90um (à direita)

Para os vários raios de curvatura analisámos o impacto provocado na transmissão e reflexão, que se apresenta na figura seguinte.

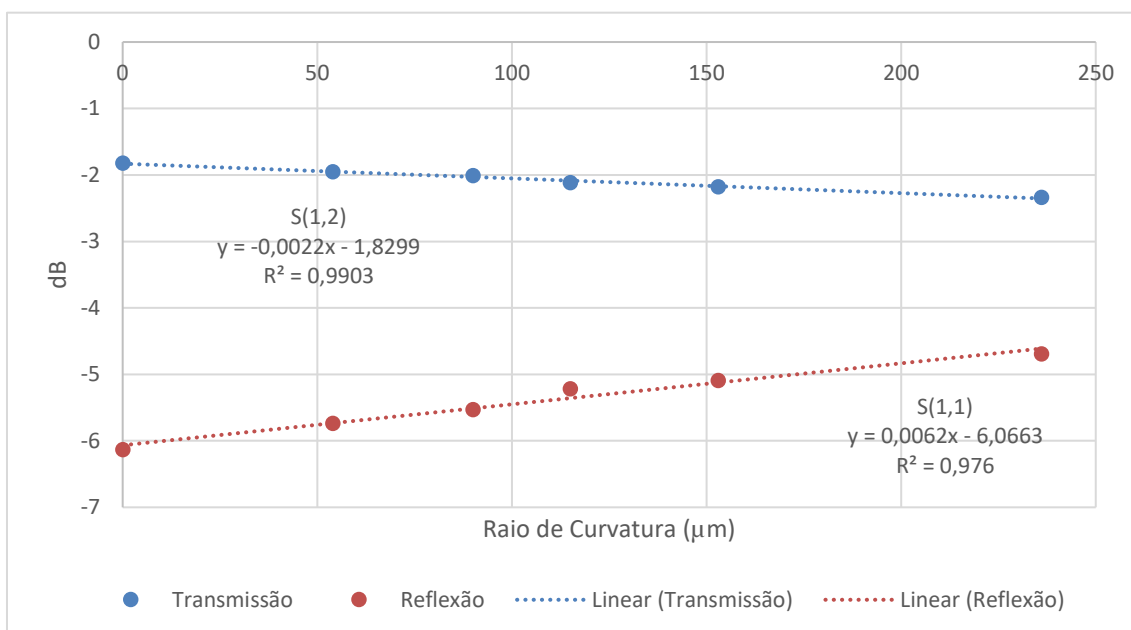


Figura 3.19 Transmissão e Reflexão em função do raio de curvatura

Pelo gráfico podemos concluir que curvas com ângulos de 90° devem ter o menor raio de curvatura possível, pois a transmissão e reflexão pioram à medida que o raio de curvatura aumenta.

3.5.7 Dimensões recomendadas para as linhas CPW

A partir do estudo apresentado para os vários parâmetros das linhas CPW, chegou-se as dimensões recomendadas no desenho destas linhas que se apresenta de seguida:

- Comprimento $\rightarrow L < 1\text{mm}$ (o menor possível)
- Distância entre condutor e plano de massa $\rightarrow G = 30\mu\text{m}$
- Largura das linhas de sinal e de massa $\rightarrow W_{\text{signal}} = W_{\text{massa}} = 51.3\mu\text{m}$
- Distância entre duas linhas CPW $\rightarrow [30; 50]\mu\text{m}$
- Curvatura das linhas \rightarrow Ângulos de 90° com o menor raio possível

3.5.8 Linhas CPW com outros substratos

Tendo em conta que o silício não tem grande desempenho para as altas frequências. Fez-se o estudo do comprimento para dois substratos diferentes. Um dos substratos usados foi o FR-4 porque é um substrato amplamente usado no fabrico de PCBs, o outro foi o Rogers RO3006 que é um substrato mais adequado para as altas frequências. Para proceder a estas simulações construíram-se 2 pares de linhas novas. Um para o FR-4 com as dimensões de $W(\text{largura}) = 148.0\ \mu\text{m}$ e $G(\text{distância entre linhas}) = 20.0\ \mu\text{m}$. Para simular o impacto na transmissão e reflexão com o aumento do comprimento, este foi variado deste $100\ \mu\text{m}$ até $1400\mu\text{m}$, tal como foi feito para o silício.

Para o Rogers RO3006 procedeu-se de igual forma e o par de linhas desenhado tem as seguintes dimensões, $W = 95.0\ \mu\text{m}$ e $G = 20.0\ \mu\text{m}$ o comprimento foi variado como já se referiu. Foi necessário proceder ao desenho de novos pares de linhas para cada substrato porque a impedância muda com a alteração do substrato e é necessário que esta seja igual a 50Ω , porque as linhas são simuladas com impedância nos portos de entrada e saída de 50Ω . Posto isto representou-se no mesmo gráfico que se apresenta de seguida, a transmissão e reflexão em função do comprimento das linhas para os três substratos diferentes.

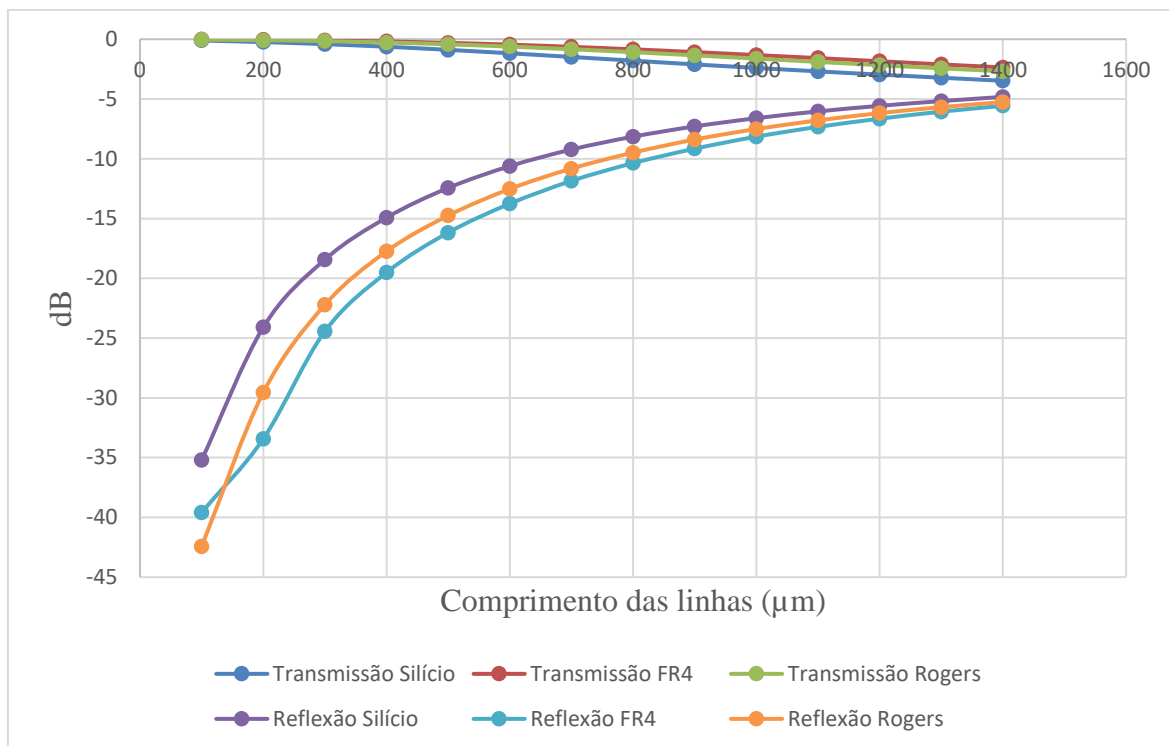


Figura 3.20 Para três substratos diferentes é apresentado a transmissão e reflexão em função do comprimento

Para podermos comparar os três substratos a espessura do FR-4 e Rogers foi de 700 μm, ou seja, igual à do silício. O comportamento da transmissão e reflexão dos três substratos é idêntica e verifica-se para os três que a transmissão piora de forma aproximadamente linear com o comprimento. Já na reflexão também verificamos a mesma curva de diminuição da reflexão com o aumento do comprimento.

No entanto podemos constatar que entre os três substratos o FR-4 tem o melhor comportamento em termos de reflexão e transmissão. A transmissão para os 1400mm é cerca de 1dB melhor quando comparado com o silício e 0.7 dB melhor comparado ao Rogers. Quanto a reflexão à medida que aumentamos o comprimento aparenta a apresentar melhores resultados do que o silício e o Rogers, mas verifica-se que para 1400 mm de comprimento o seu valor é bastante próximo do silício e do Rogers, ou seja, a única melhoria significativa encontra-se na melhoria de 1dB na transmissão. Tendo o FR-4 apresentado os melhores resultados, o silício é francamente o substrato com os piores resultados entre os três e o Rogers situa-se a meio termo entre o Silício e o FR-4.

3.7 Regras de desenho do Par Diferencial

3.7.1 Comprimento

Tal como se fez para as linhas CPW, começou-se o estudo das linhas par diferencial pelo parâmetro do comprimento. Para isso utilizaram-se as linhas que se mostram na figura 3.21, que se encontravam desenhadas num Holder. As linhas têm as seguintes dimensões, $L=2.6$ mm, como as linhas formam um “*tapper*” estas não têm a mesma largura ao longo da linha, por isso numa extremidade a largura é de $150\ \mu\text{m}$ e terminam com uma largura de $300\ \mu\text{m}$, a distância entre linhas é constante e igual a $10\ \mu\text{m}$, e o espaçamento entre 2 pares de linhas também é constante e igual a $350\ \mu\text{m}$. Na figura 3.21 à direita mostra-se as mesmas linhas importadas no simulador ADS com os portos definidos e prontas para simulação.

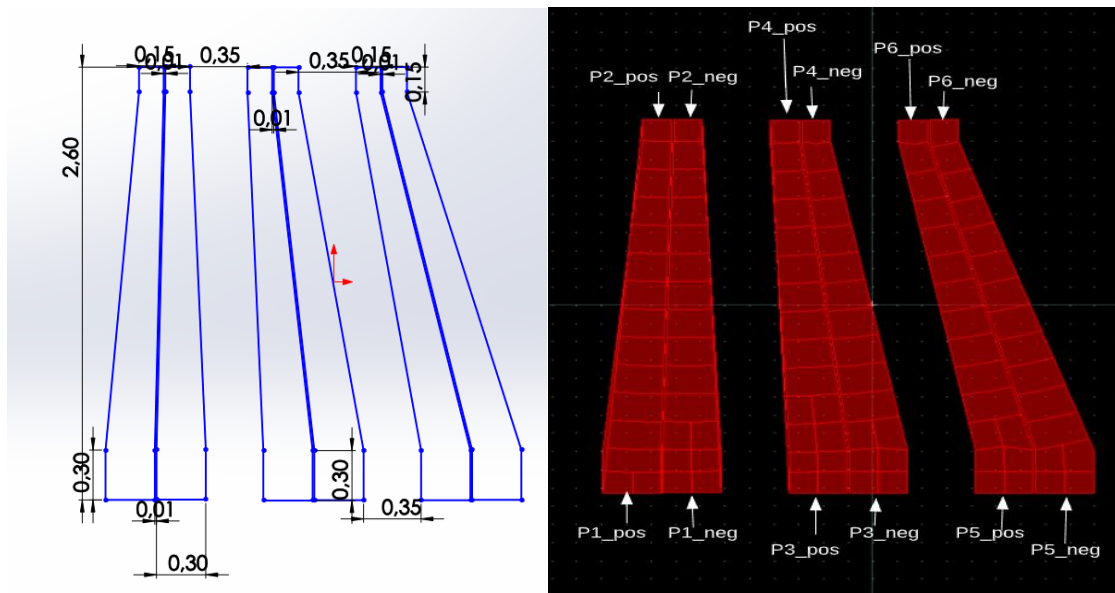


Figura 3.21 Desenho das linhas PD em Solidworks (à esquerda), layout no ADS das mesmas linhas (à direita)

Os resultados de simulação seguintes, dizem respeito às linhas apresentadas anteriormente. Nos três primeiros gráficos temos os parâmetros de transmissão($S(1,2)$; $S(3,4)$ e $S(5,6)$) e reflexão($S(1,1)$; $S(3,3)$ e $S(6,6)$) e no último gráfico temos quatro parâmetros de acoplamento($S(1,4)$; $S(1,6)$; $S(6,3)$ e $S(4,2)$).

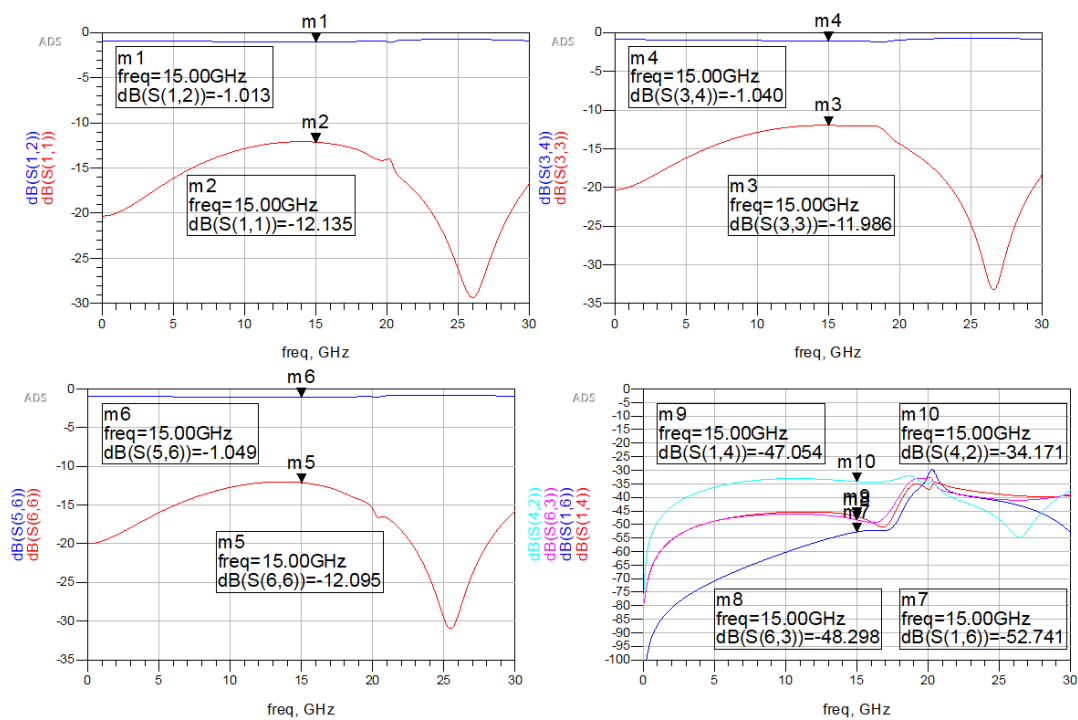


Figura 3.22 De cima para baixo e da esquerda para a direita temos três gráficos referentes a transmissão e reflexão dos três pares de linhas, o último gráfico diz respeito ao acoplamento entre os pares de linhas

De seguida manteve-se todas as dimensões constantes, exceto o comprimento, para o qual obtivemos várias figuras semelhantes à figura 3.22, para vários valores de comprimentos. Com as simulações obtidas construímos uma tabela que foi preenchida com os parâmetros S de reflexão, transmissão e acoplamento recolhidos a 15GHz. Esses mesmos resultados são apresentados graficamente nas três figuras seguintes.

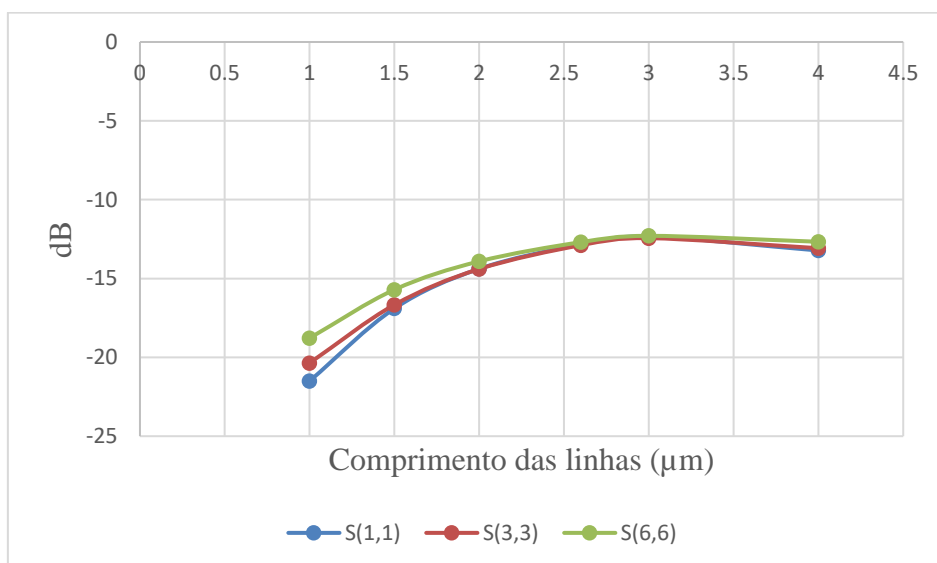


Figura 3.23 Parâmetros de reflexão S(1,1), S(3,3) e S(6,6) em função do comprimento das linhas

Pela análise gráfica pode-se afirmar que os parâmetros de reflexão pioram à medida que o comprimento aumenta.

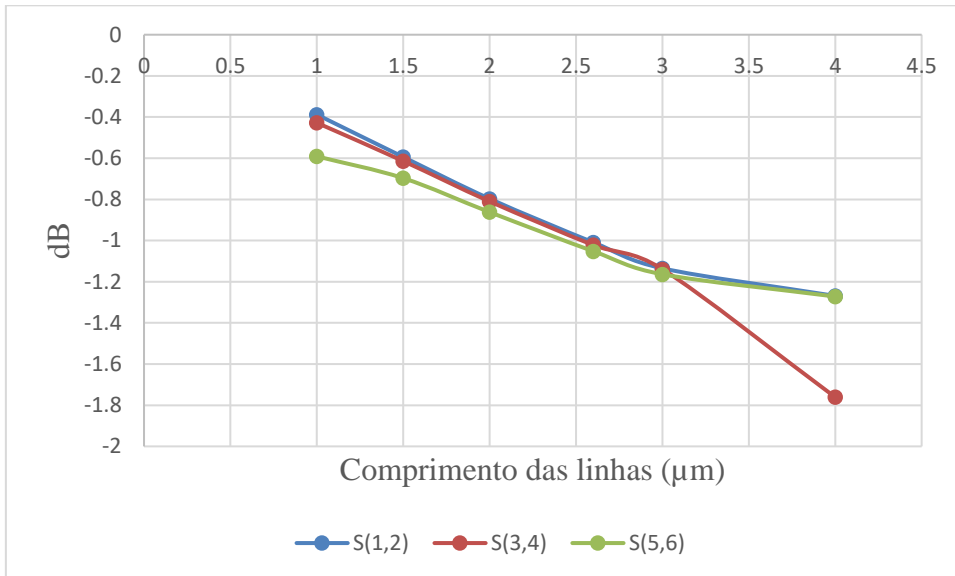


Figura 3.24 Parâmetros de transmissão S(1,2), S(3,4) e S(5,6) em função do comprimento das linhas

Constata-se pelo gráfico que a transmissão piora à medida que aumentamos o comprimento.

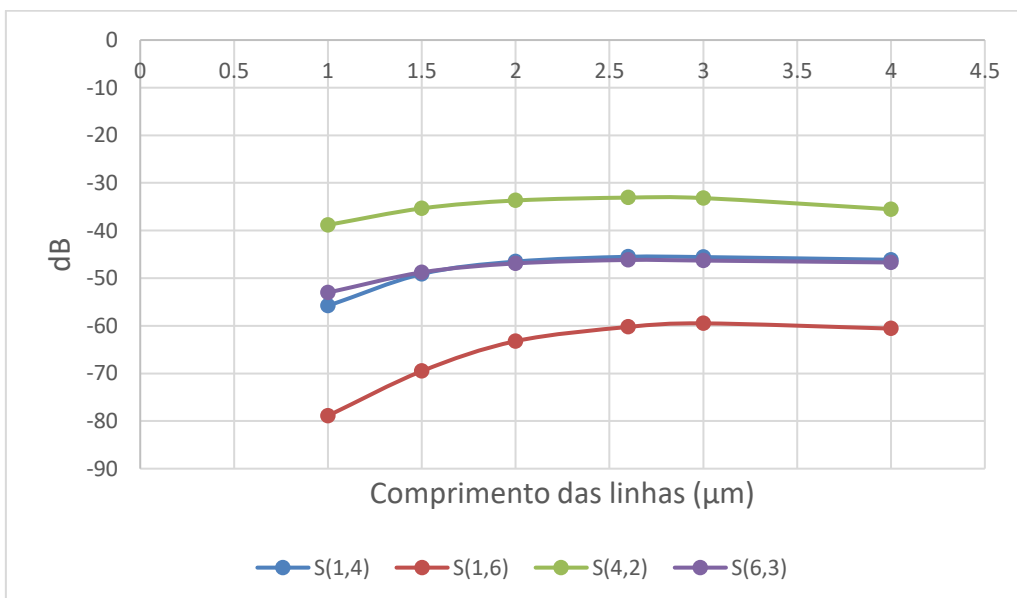


Figura 3.25 Parâmetros de acoplamento S(1,4), S(1,6), S(4,2) e S(6,3) em função do comprimento das linhas

Tal como vimos anteriormente para a reflexão e transmissão, o acoplamento também piora à medida que aumentamos o comprimento da linha.

3.7.2 Largura

Para o estudo da largura considerou-se o par de linhas usado para o estudo do comprimento e mantiveram-se todas as dimensões constantes, excetuando a largura que se variou entre os 50 e 500 μm em intervalos de 50 μm . Registaram-se os parâmetros de transmissão, reflexão e acoplamento para as várias distâncias, que são evidenciados nas duas figuras seguintes e que nos ajudam a observar o comportamento dos referidos parâmetros com a variação da largura.

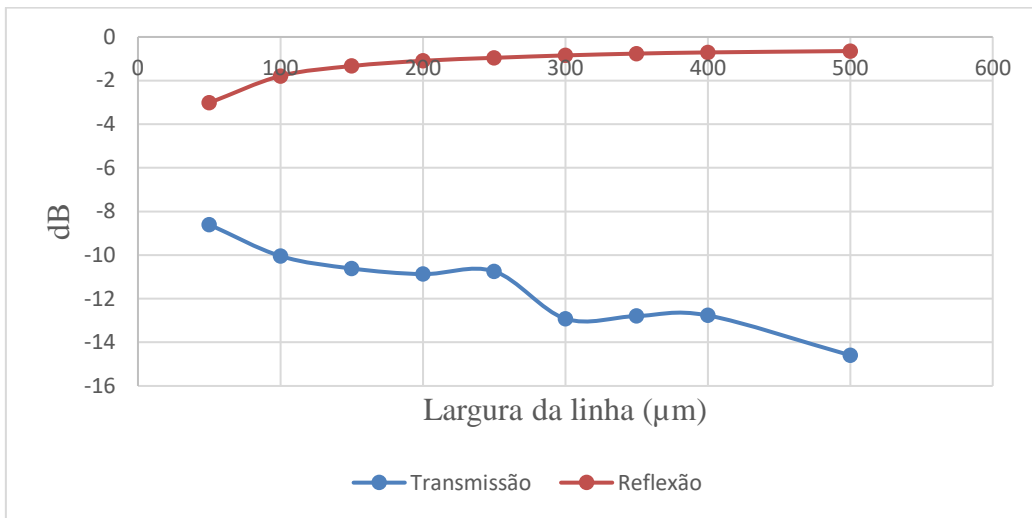


Figura 3.26 Transmissão e Reflexão para os vários valores de comprimento

Como é observável pela figura 3.26, a transmissão diminui e a reflexão aumenta, o que se traduz numa melhoria tanto da transmissão como da reflexão com o aumento da largura.

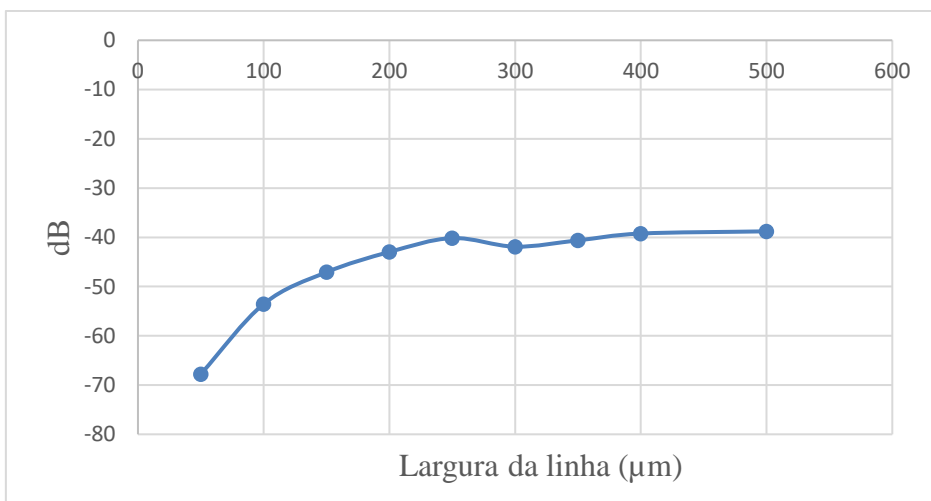


Figura 3.27 Acoplamento para os vários valores de comprimento

Da figura 3.27 constata-se que excetuando o ponto para uma largura de 300 μm a tendência é de o acoplamento diminuir em valor numérico, ou seja, piorar à medida que aumentamos a largura.

3.7.3 Distância entre linhas do par diferencial

Utilizou-se a estrutura de linhas usada para estudar a influência do comprimento, para estudar o impacto da distância entre linhas diferenciais do mesmo par. Para isso mantiveram-se todas as outras dimensões constantes e apenas se variou a distância entre linhas. Os dados obtidos para a transmissão, reflexão e acoplamento são apresentados nas três figuras seguintes.

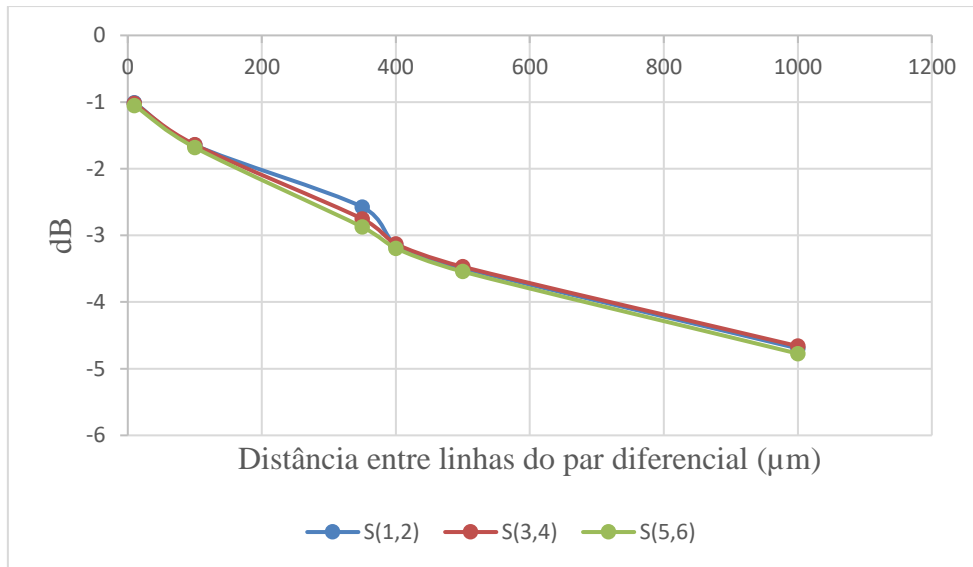


Figura 3.28 Parâmetros de transmissão para as várias distâncias entre linhas do par diferencial

Percebe-se pela figura 3.28, que a tendência dos parâmetros de transmissão é a de piorar à medida que aumentamos a distância entre linhas do mesmo par.

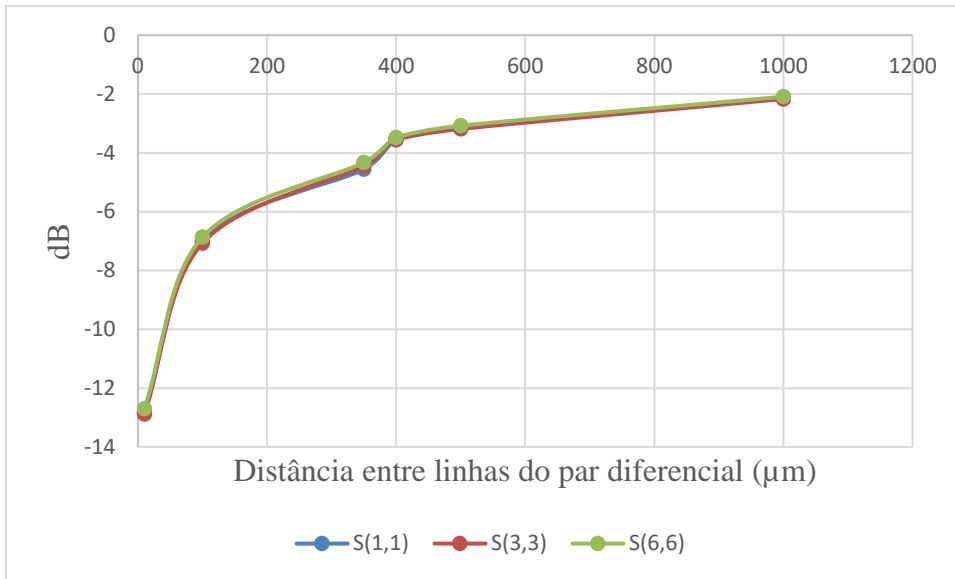


Figura 3.29 Reflexão em função da distância entre linhas do par diferencial

Pela figura 3.29, os parâmetros de reflexão também pioram à medida que aumentamos o comprimento.

Na figura 3.28 e 3.29 é visível que entre os dois primeiros pontos, 10 e 100μm a transmissão e reflexão apresentam um comportamento aproximadamente linear. Deste modo, voltou-se a simular os parâmetros de transmissão e reflexão para o intervalo entre 10 e 50μm.

Os dois gráficos seguintes apresentam os resultados obtidos.

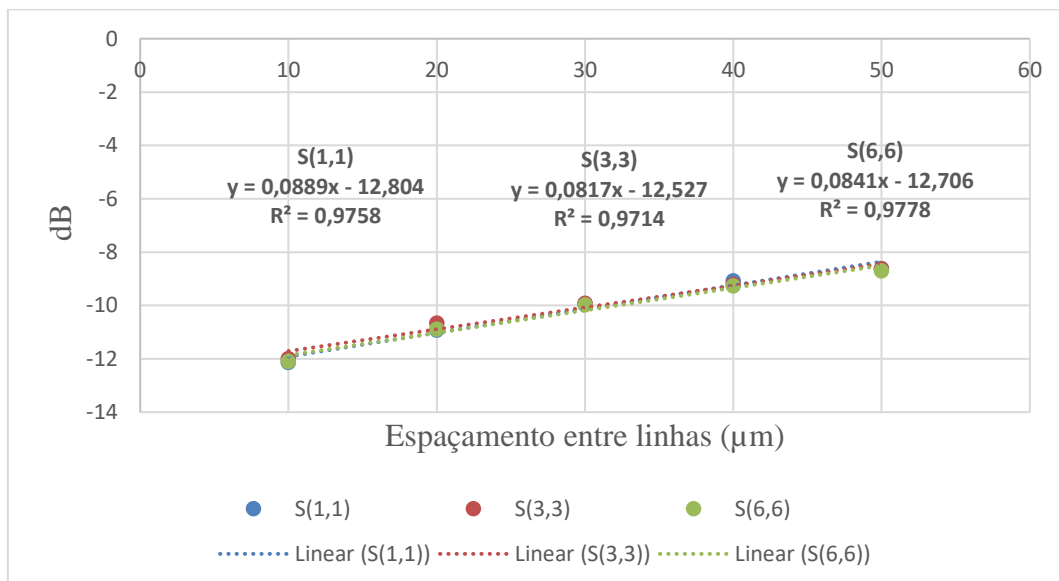


Figura 3. 30 Parâmetros de reflexão em função da distância entre linhas para o intervalo em estudo

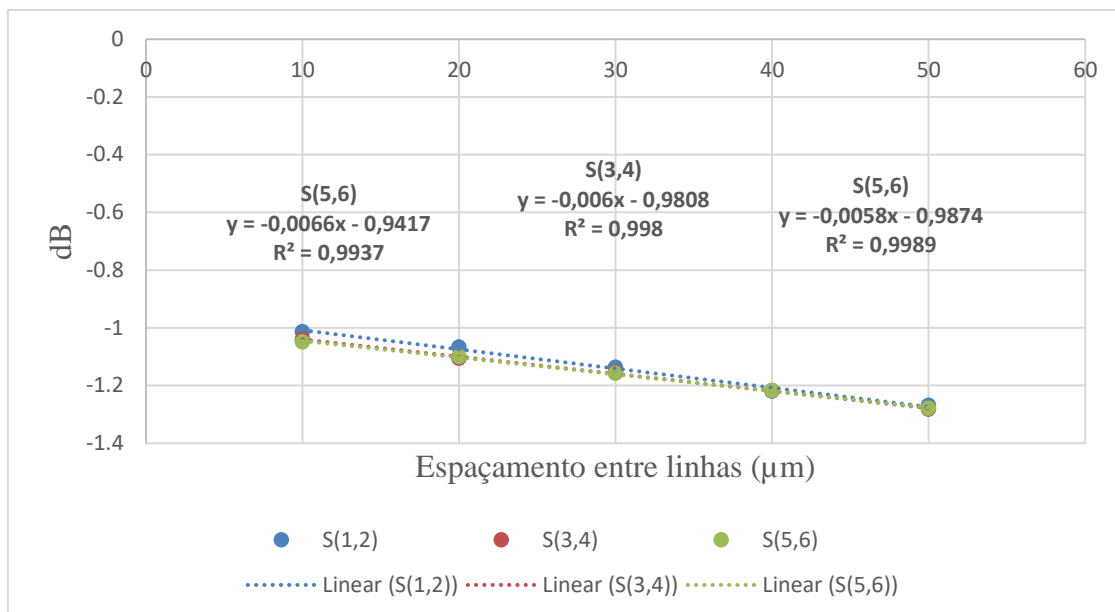


Figura 3.31 Parâmetros de transmissão em função da distância entre linhas para o intervalo em estudo

Os melhores resultados de transmissão e reflexão quando é estudada a distância entre linhas ocorrem para o intervalo $[10;50]\mu\text{m}$. Neste intervalo os parâmetros variam de forma aproximadamente linear com o espaçamento entre linhas, assim de forma a ter os melhores resultados de transmissão e reflexão a distância entre linhas deve estar compreendida neste intervalo.

3.7.4 Distância entre pares diferenciais

Para estudar o impacto na transmissão, reflexão e acoplamento da distância entre pares de linhas diferenciais, procedeu-se de igual forma aos estudos anteriores. Com dois pares de linhas diferenciais já usadas nos estudos anteriores, manteve-se todas as outras dimensões constantes e apenas se alterou a distância entre pares de linhas diferenciais. A distância entre pares foi variada desde $20\ \mu\text{m}$ até $500\ \mu\text{m}$ e os resultados na transmissão, reflexão e acoplamento são apresentados nas duas figuras seguintes.

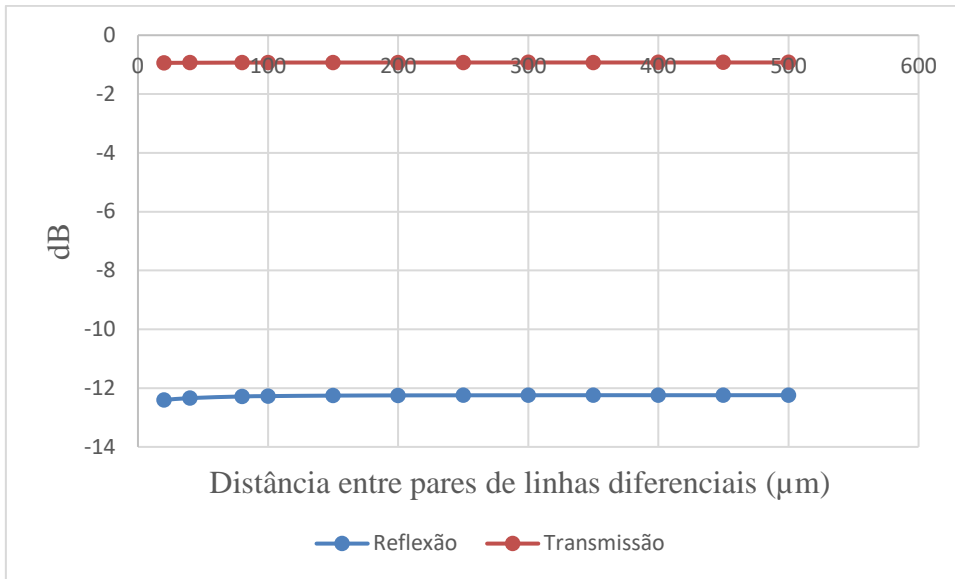


Figura 3.32 Impacto na transmissão e reflexão da distância entre pares de linhas diferenciais

Como é visível pela figura 3.32, o declive das retas de transmissão e reflexão é praticamente nulo. De fato a transmissão têm tendência a melhorar ligeiramente, cerca de 0.015 dB em todo o intervalo de simulação. E a reflexão têm tendência a piorar ligeiramente, cerca de 0.165 dB no intervalo de simulação [20;500]μm. Isto significa que qualquer que seja a distância entre pares de linhas neste intervalo o impacto na transmissão e reflexão é reduzido.

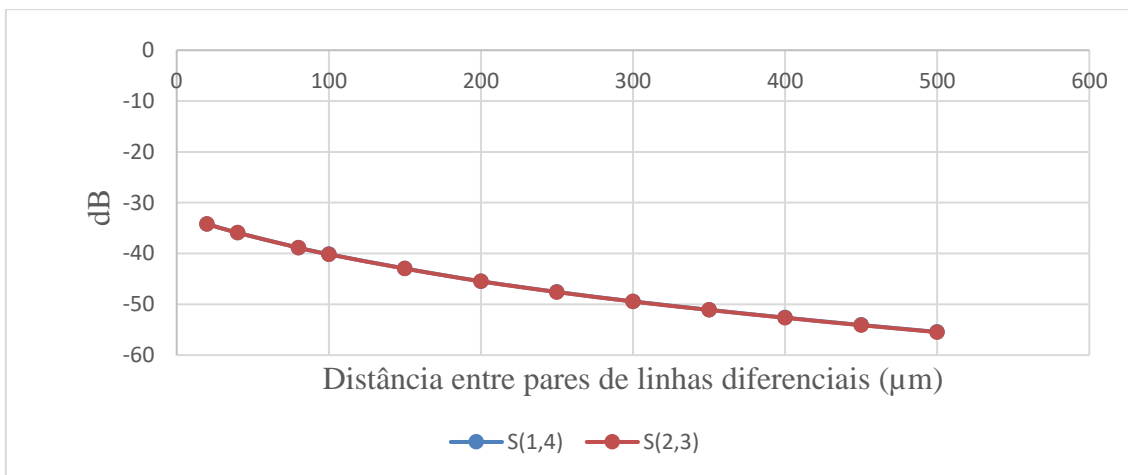


Figura 3.33 Impacto no acoplamento da distância entre pares de linhas diferenciais

O impacto do aumento da distância entre pares de linhas diferenciais, tal como seria expectável e como se pode verificar pela figura 3.33 é a de melhorar o acoplamento pois estamos a afastar o campo eletromagnético gerado por cada par de linha.

3.7.5 Espessura do dielétrico

Tal como se procedeu para as linhas CPW, nesta seção vai-se proceder à variação da espessura do dielétrico de forma a perceber o impacto que este tem na reflexão, transmissão e acoplamento. Para isso usou-se a mesma estrutura de linhas utilizada para o estudo do comprimento, com três comprimentos distintos como se pode verificar na figura seguinte.

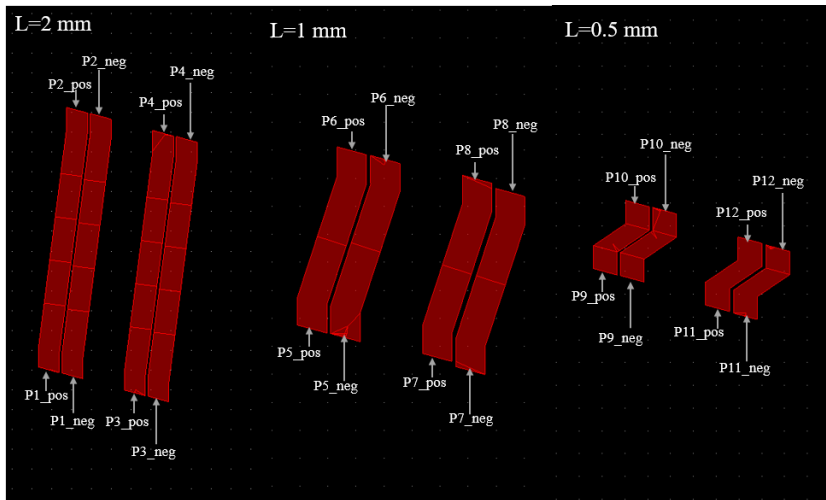


Figura 3.34 Pares de linhas com três comprimentos diferentes para o estudo da espessura do dielétrico

A espessura do dielétrico foi variada desde $0 \mu\text{m}$, ou seja, sem dielétrico, até uma espessura de 1 mm . Os resultados de simulação obtidos apresentam-se nos gráficos de reflexão, transmissão e acoplamento em função da espessura do dielétrico, que se seguem.

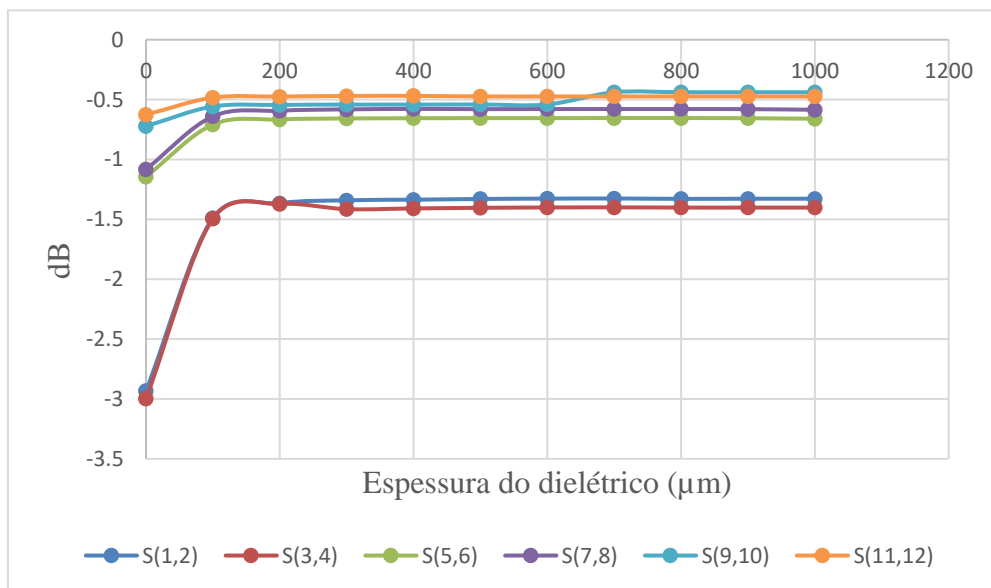


Figura 3.35 Transmissão em função da espessura do dielétrico

O aumento da espessura do dielétrico contribui para o melhoramento da transmissão entre 0 e 100 μm , como se pode visualizar pela figura 3.35. No entanto entre os 300 e 1000 μm a melhoria na transmissão é de apenas 0.116dB.

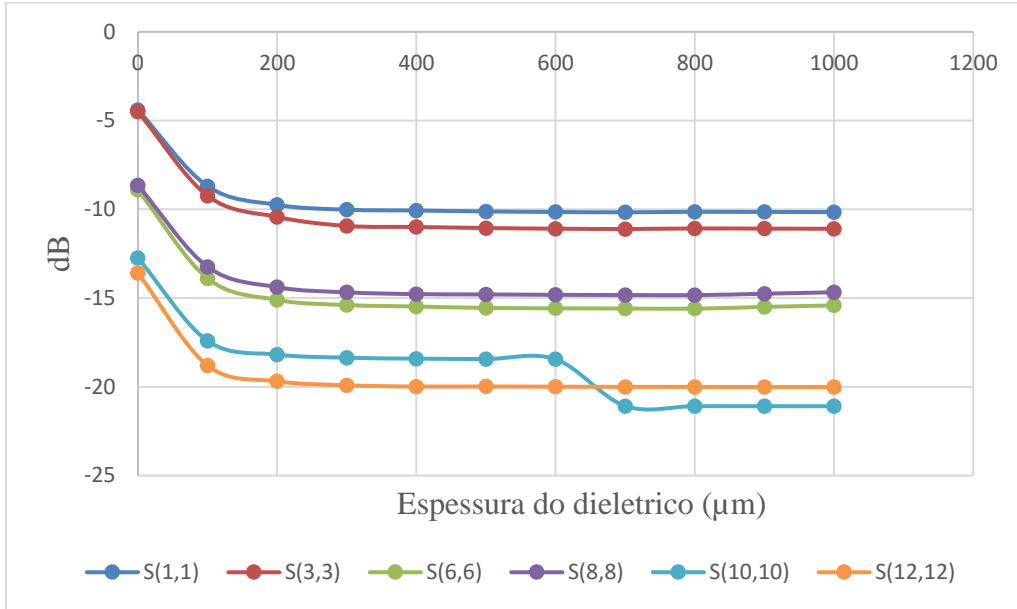


Figura 3.36 Reflexão em função da espessura do dielétrico

Tal como se verificou para a transmissão, na reflexão um aumento na espessura do dielétrico só produz melhorias significativas para uma gama inicial, neste caso entre os 0 e 300 μm . Para além dos 300 μm até os 1000 μm a melhoria na reflexão é cerca de 0.069dB, ou seja, muito pouco significativa.

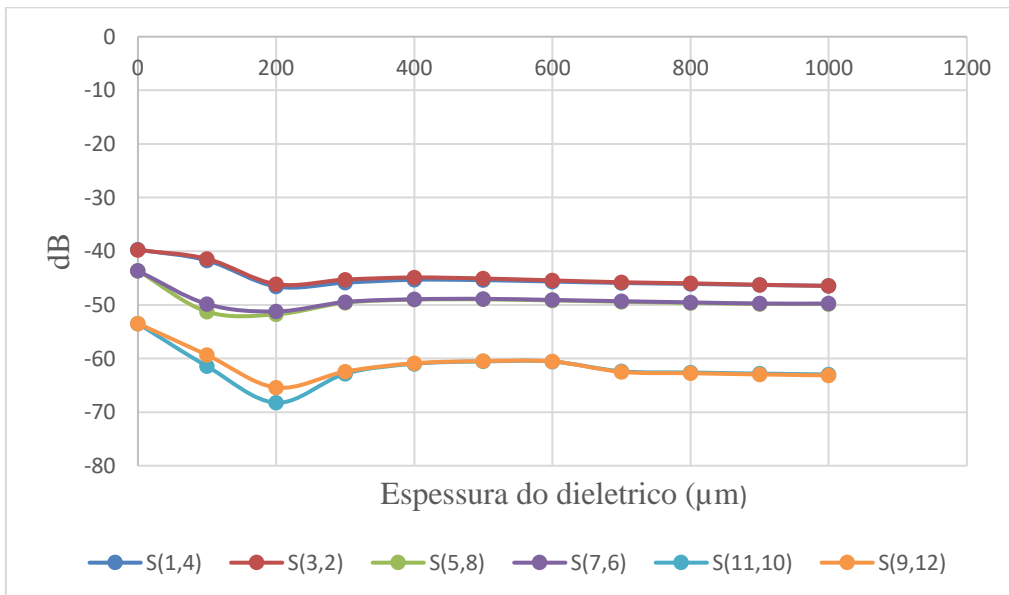


Figura 3.37 Acoplamento em função da espessura do dielétrico

No caso do acoplamento temos o mesmo comportamento verificado para a transmissão e reflexão, ou seja, melhorias para os primeiros 200 μm de espessura e partir daí praticamente que estabiliza até aos 1000 μm de espessura simulados. Isto significa que estando a trabalhar com uma espessura de dielétrico de 700 μm , aumentar ou diminuir a espessura deste dentro do intervalo de [300;1000] μm prova-se que não traz grandes melhorias na transmissão, reflexão e acoplamento.

3.7.6 Curvatura das linhas

O último estudo feito para as linhas do par diferencial foi ver o impacto que curvas de 90° com ângulos de curvatura diferentes têm na transmissão e reflexão. Para isso contrui-se os três pares de linhas diferenciais que se apresentam na figura seguinte, em que PD1, PD2 e PD3 são pares diferenciais com uma curvatura de 90° e com respetivamente um raio de curvatura de 0 μm , 179 μm e 687 μm .

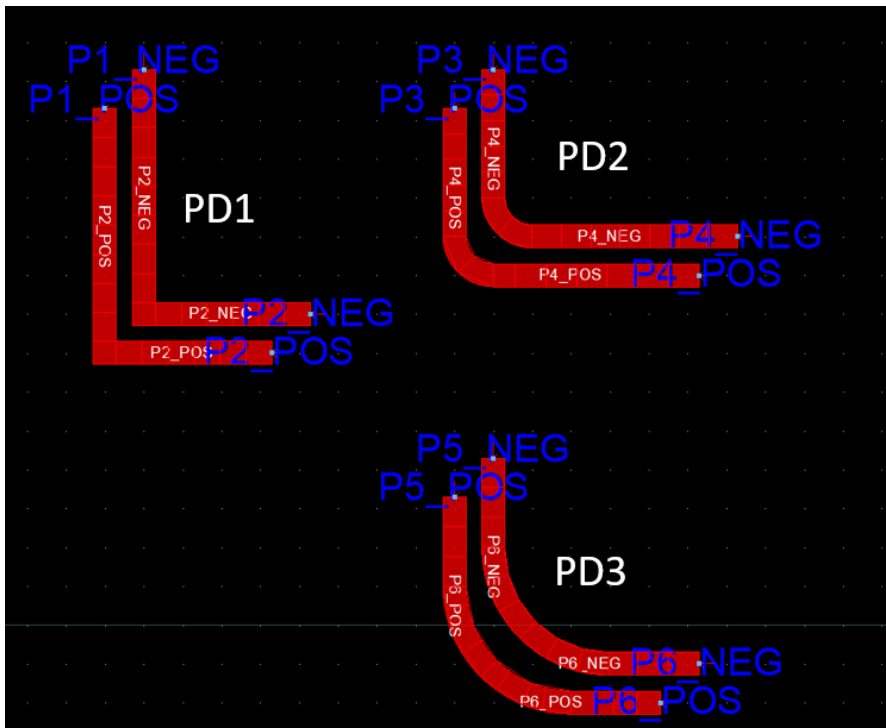


Figura 3.38 Layout de três pares diferenciais com curvaturas diferentes

Nas duas figuras seguintes apresentam-se os resultados da transmissão e reflexão para os três pares de linhas diferenciais. A vermelho tem-se PD1, a azul tem-se PD2 e a rosa tem-se PD3.

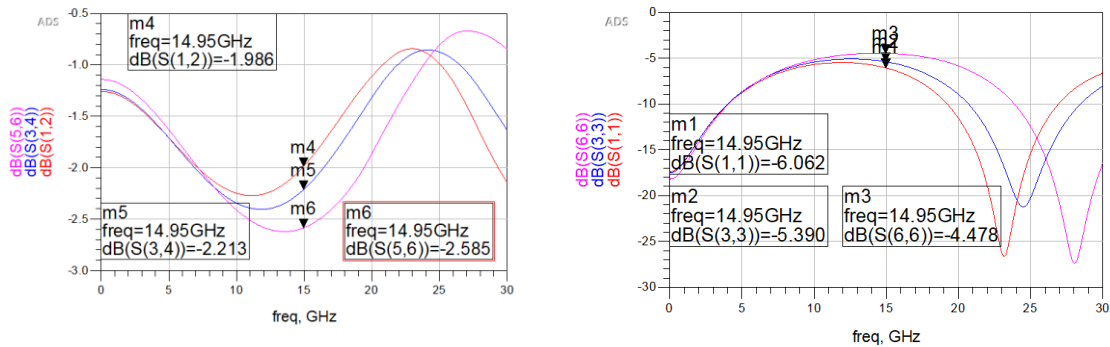


Figura 3.39 Transmissão (à esquerda) e reflexão (à direita) dos três pares de linhas diferenciais

A vermelho tem-se o par diferencial (PD1) com melhor transmissão e reflexão comparativamente aos outros dois. De seguida a azul temos PD2 que se situa em termos de transmissão e reflexão entre PD1 e PD3. E por fim a rosa temos PD3, que é o par diferencial que apresenta pior transmissão e reflexão. Assim pode-se concluir que quando temos curvas com um ângulo de 90° o raio de curvatura deve ser o menor possível para não prejudicar a reflexão e a transmissão.

3.7.7 Dimensões recomendadas para o par diferencial

Depois do estudo feito para os vários parâmetros do par diferencial, de seguida sugerem-se as regras de desenho:

- Comprimento $\rightarrow L < 2\text{mm}$ (o menor possível)
- Distância entre linhas do mesmo par $\rightarrow S = 20\mu\text{m}$
- Largura das linhas $\rightarrow W = 150\mu\text{m}$ (a maior possível)
- Distância entre dois pares $\rightarrow [20; 50]\mu\text{m}$
- Curvatura das linhas \rightarrow Ângulos de 90° com o menor raio possível

3.8 Desenho de linhas de teste a fabricar

3.8.1 Linhas Coplanares

Depois de se ter chegado através de simulação às regras de desenho das linhas coplanares, o passo seguinte passou por desenhar algumas linhas de teste para serem medidas e poderem ser comparadas com as simulações das mesmas. Para isso teve-se em conta os parâmetros que mais afetam a transmissão e reflexão das linhas coplanares, que são tal como foi visto o comprimento e a largura da linha de sinal. Deste modo, para a mesma largura de linha foram desenhadas linhas com três comprimentos diferentes 300, 600 e 1000 μm . E para o mesmo comprimento foram desenhadas linhas com quatro larguras diferentes.

No caso da largura, como já foi mencionado, está diretamente relacionada com o intervalo entre linha de sinal e linha de massa, e desta forma o procedimento que já foi utilizado foi o de atribuir quatro valores para o intervalo entre linhas, foram eles 20, 50, 80 e 100 μm . E os valores de largura correspondes dados pela ferramenta LineCalc foram de 34, 86, 138 e 174 μm . Os restantes parâmetros referentes a estas linhas não foram variados, ou seja, a largura da linha de sinal e da linha de massa foram mantidas iguais, e a distância entre pares de linhas foi sempre de 50 μm . Isto deve-se ao fato destes dois parâmetros apresentarem pequenas alterações na transmissão e reflexão, e que seriam muito difíceis de ver em termos práticos. As linhas desenhadas foram agrupadas em 2 blocos, que se apresentam na figura 3.40.

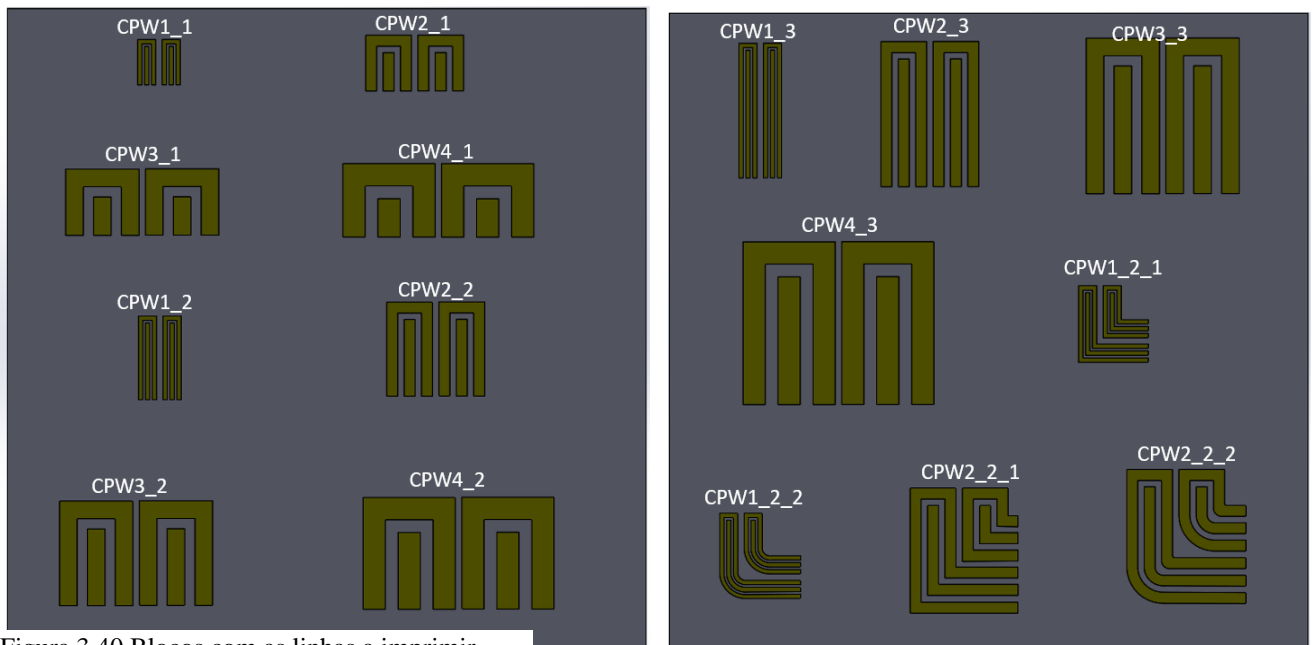


Figura 3.40 Blocos com as linhas a imprimir

Para além das linhas mencionadas, foram desenhadas 2 pares de linhas com curvatura como é visível no bloco à direita. Estes pares distinguem-se por terem largura de linhas diferentes. A dimensão dos dois pares é dada na tabela seguinte.

	CPW1_2_1	CPW1_2_1	CPW2_2_1	CPW2_2_2
Comprimento (um)	600	600	600	600
Largura (um)	34	34	86	86
Intervalo entre pista de sinal e massa (um)	20	20	50	50
Intervalo entre pares (um)	50	50	50	50
Raio de Curvatura (um)	0	100	0	65

Tabela 3.1 Dimensões das linhas com um ângulo de 90°

Estas linhas foram desenhadas com o objetivo de comprovar aquilo que foi visto através da simulação, isto é, quanto maior é a curvatura das linhas com um ângulo de 90° piores são os resultados da transmissão e reflexão.

3.8.3 Linhas do Par Diferencial

Tal como foi visto para as linhas coplanares, os parâmetros que mais afetam a transmissão e reflexão das linhas de um par diferencial são o comprimento e a largura. Posto isto, desenhou-se um conjunto de linhas que permita verificar o que acontece com a transmissão e reflexão quando se altera o comprimento e a largura das linhas.

Para o caso do par diferencial para além do estudo do comprimento e da largura também foram desenhadas pares de linhas em que a única dimensão que se alterou foi o comprimento entre pares. As linhas foram agrupadas em blocos, e a figura que se segue apresenta o primeiro conjunto de linhas cujas dimensões se encontram na tabela 3.2.

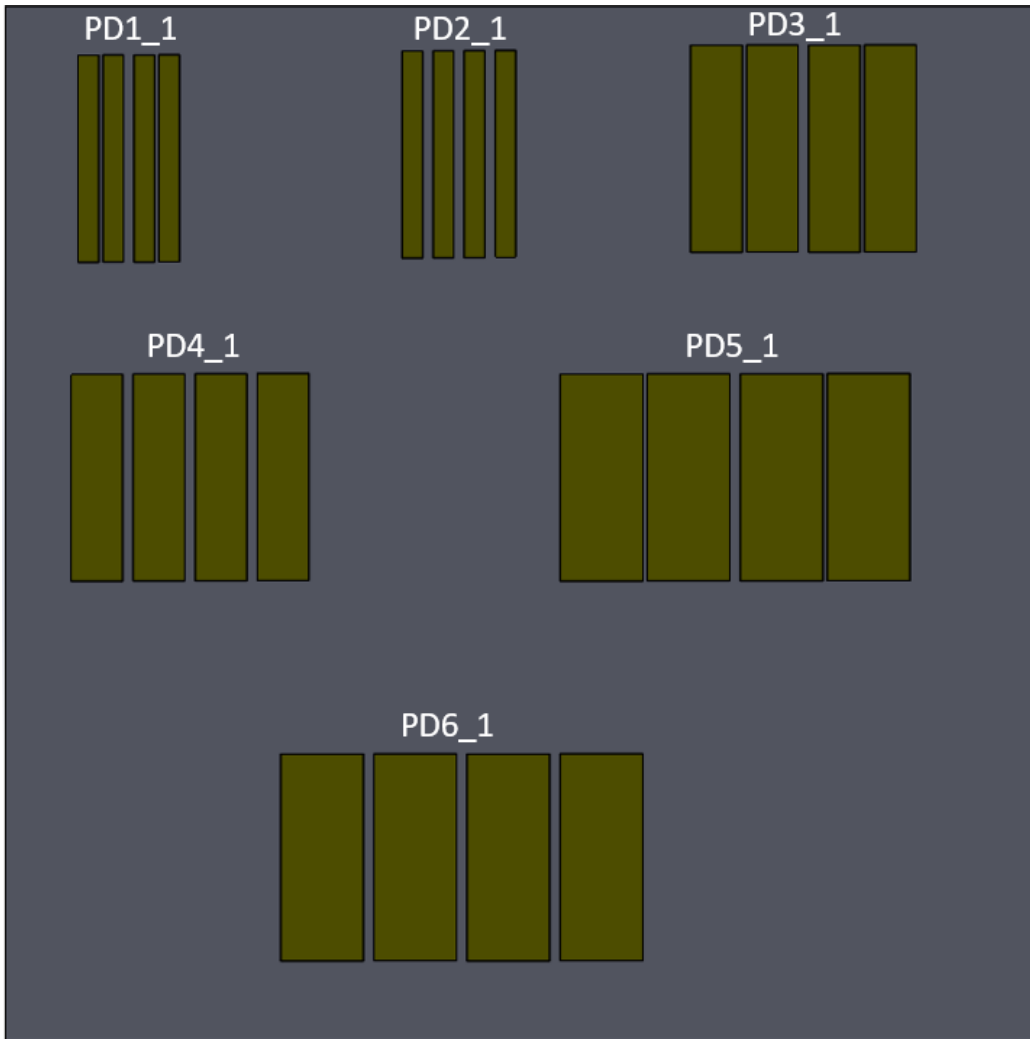


Figura 3.41 Primeiro bloco com linhas diferencias a imprimir

	PD1_1	PD2_1	PD3_1	PD4_1	PD5_1	PD6_1
Comprimento (mm)	1	1	1	1	1	1
Largura (um)	100	100	250	250	400	400
Distância entre linhas do mesmo par (um)	20	50	20	50	20	50

Tabela 3.2 Dimensões do primeiro bloco de linhas diferenciais a imprimir

Tal como se verifica para o comprimento, a distância entre pares de linhas foi sempre mantida igual a 50um.

Pela tabela constata-se também que as linhas foram agrupadas em três pares, e que os parâmetros a variar foram a largura e a distância entre linhas. Assim, para o mesmo comprimento, distância entre linhas do mesmo par podemos verificar a influência de aumentar a largura das linhas de 100, para 250 e para 400um. Para três larguras diferentes pretende-se observar o impacto de alterar a distância entre linhas do mesmo par de 20 para 50um.

No segundo bloco de linhas que se apresenta de seguida, pretendeu-se estudar os mesmos parâmetros do que no bloco anterior, só que para um comprimento de linha de 2mm.

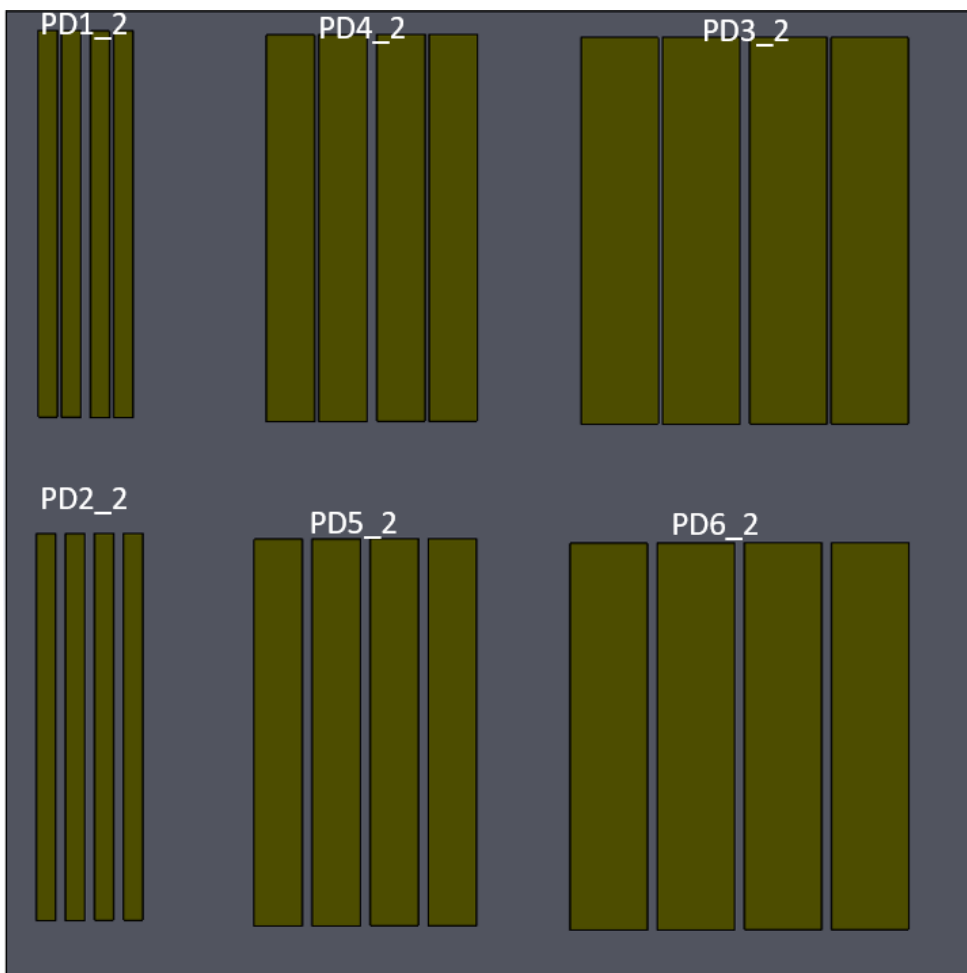


Figura 3.42 Segundo bloco com linhas diferenciais a imprimir

Tal como foi apresentado para o primeiro bloco, a tabela que se segue apresenta as dimensões das linhas agrupadas no segundo bloco.

	PD1_2	PD2_2	PD3_2	PD4_2	PD5_2	PD6_2
Comprimento (mm)	2	2	2	2	2	2
Largura (μm)	100	100	250	250	400	400
Distância entre linhas do mesmo par (μm)	20	50	20	50	20	50

Tabela 3.3 Dimensões das linhas do par diferencial presentes no bloco 2

As mesmas observações feitas para o primeiro bloco, podem ser tiradas para o segundo bloco só que para um comprimento de linhas de 2mm. Isto é as linhas também estão agrupadas em pares de três, e também se pretende estudar o efeito de aumentar a largura de 100, para 250 e no fim para 400 μm . O impacto no aumento de 30 μm entre linhas no mesmo par é algo que também se pretende observar. Para além disso juntamente com as linhas do bloco 1 pode-se estudar o efeito de aumento do comprimento de linhas para os três pares de linhas a medir.

Apesar de nas regras de desenho recomendadas para as linhas do par diferencial se ter definido que o comprimento das linhas não deveria exceder os 2mm, simularam-se e desenharam-se linhas com um comprimento de 4mm, que se apresentam na figura seguinte.

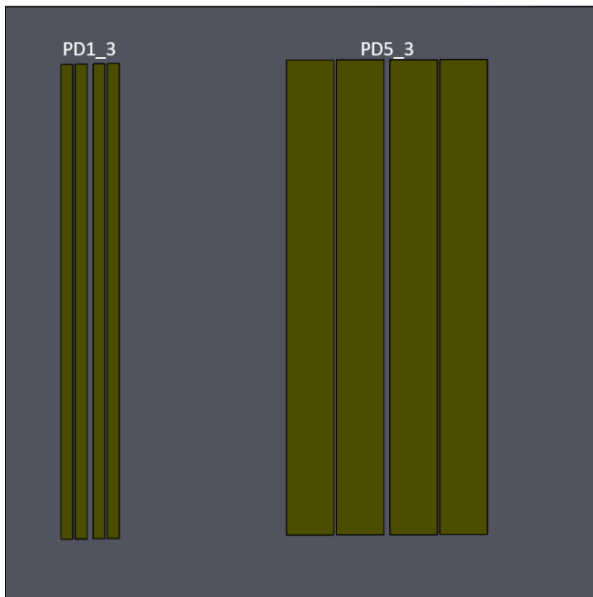


Figura 3.43 Terceiro bloco com 2 pares de linhas diferenciais a imprimir

Tabela 3. 4 Dimensões das linhas do terceiro bloco a imprimir

	PD1_3	PD5_3
Comprimento (mm)	4	4
Largura (um)	100	400
Distância entre linhas do mesmo par (um)	20	20

O objetivo deste terceiro bloco foi estudar o efeito de dobrar o comprimento em relação ao bloco 2, para dois pares de linhas diferentes um com a largura de 100um e outro com a largura de 400um.

Foi para impressão um quarto bloco, com as seguintes estruturas de linhas que se apresenta de seguida.

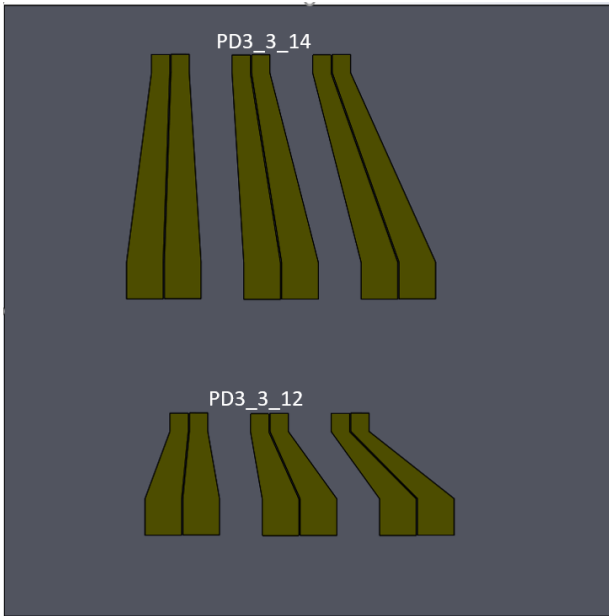


Figura 3.44 Quarto bloco com 2 pares de linhas cada com 3 exemplares

Estas são linhas das quais se partiram para obter as regras de desenho apresentadas e constituem linhas usadas num Holder, daí ser importante ter dados experimentais das mesmas. Estas linhas têm ainda a particularidade de não ter a mesma largura ao longo de todo o comprimento, algo que não é muito perceptível na figura. As linhas denominadas como PD3_3_12 tem um comprimento de 2mm, iniciam-se com uma largura de 150 μm e terminam com 300 μm , tem uma distância entre linhas do mesmo par de 20 μm e a distância entre pares é de 350 μm . As linhas PD3_3_14 tem a mesmas dimensões das linhas anteriores com a exceção de o seu comprimento ser só de 1mm.

Foi para impressão um quinto último bloco referente as linhas diferencias, que se apresenta de seguida. Este bloco contém apenas linhas com ângulos de 90° e raios de curvatura variados, sendo o objetivo estudar a influência dos mesmos, de resto tal como foi feito para as linhas coplanares.

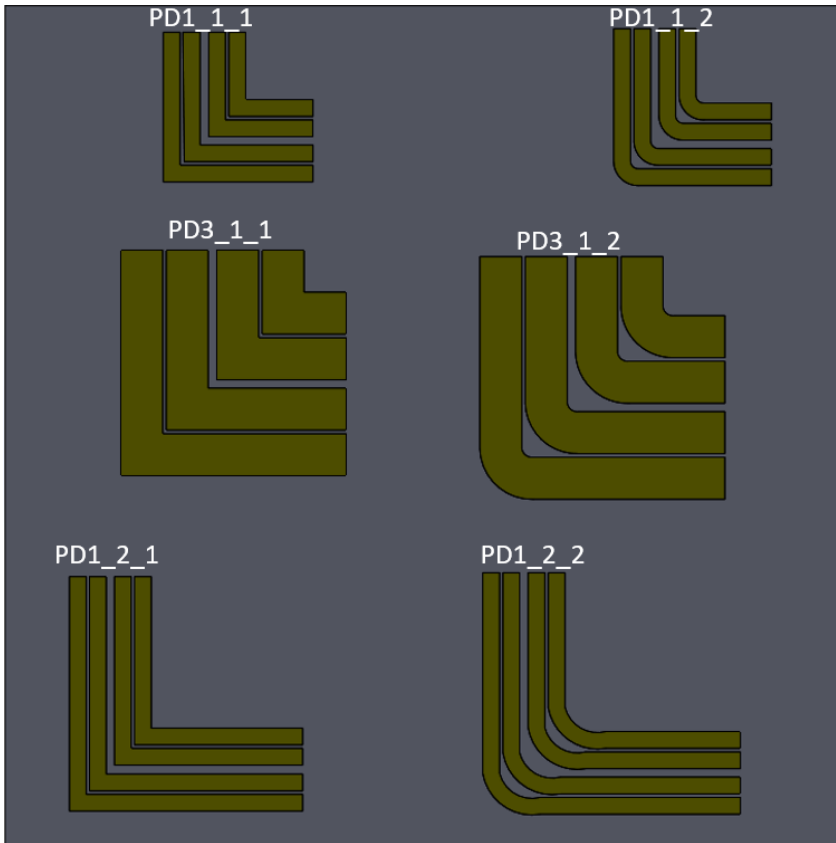


Figura 3.45 Três pares de linhas com ângulos de 90° e raios de curvatura variados

As linhas encontram-se legendadas e as suas dimensões podem ser consultadas na tabela seguinte.

	PD1_1_1	PD1_1_2	PD3_1_1	PD3_1_2	PD1_2_1	PD1_2_2
Comprimento (mm)	1	1	1	1	2	2
Largura (um)	100	100	250	250	100	100
Raio de Curvatura (um)	0	45	0	60	0	30

Tabela 3.5 Dimensões dos três pares de linhas com ângulo de 90°

Na tabela apenas estão representadas as dimensões que variam entre os três conjuntos de linhas, o valor da distância entre linhas e o valor da distância entre pares manteve-se

constante é igual respetivamente a 20 e 50 μ m. O objetivo com este conjunto de linhas é o de estudar para a transmissão e reflexão quando se altera de um par de linhas com 90° sem ângulo, para um par de linhas em que temos um ângulo de curvatura.

3.8.4 Linhas fabricadas

Os dois blocos correspondentes as linhas coplanares e os cinco blocos referentes as linhas do par diferencial foram fabricados pelo Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores - Microssistemas e Nanotecnologias, através de técnicas litográficas e de deposição de ouro, no substrato de silício já apresentado no início do capítulo. Para cada bloco que foi enviado para produção foram produzidos 2 exemplares, o que resultou num total de 14 blocos de linhas de teste que se podem ver na figura seguinte.

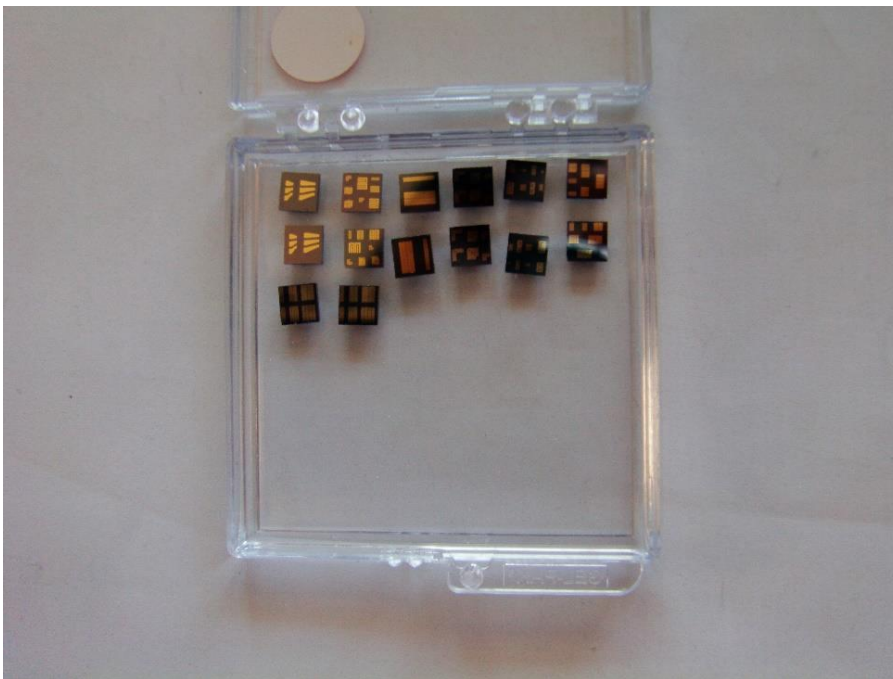


Figura 3.46 Caixa com os 14 blocos fabricados

3.8.5 Montagem para medição

Para medir os blocos fabricados recorreu-se ao laboratório de RF do Instituto de Telecomunicações 2, onde existe o equipamento necessário para fazer a medição dos parâmetros S das linhas. Uma ilustração da montagem de medição é apresentada na figura seguinte.

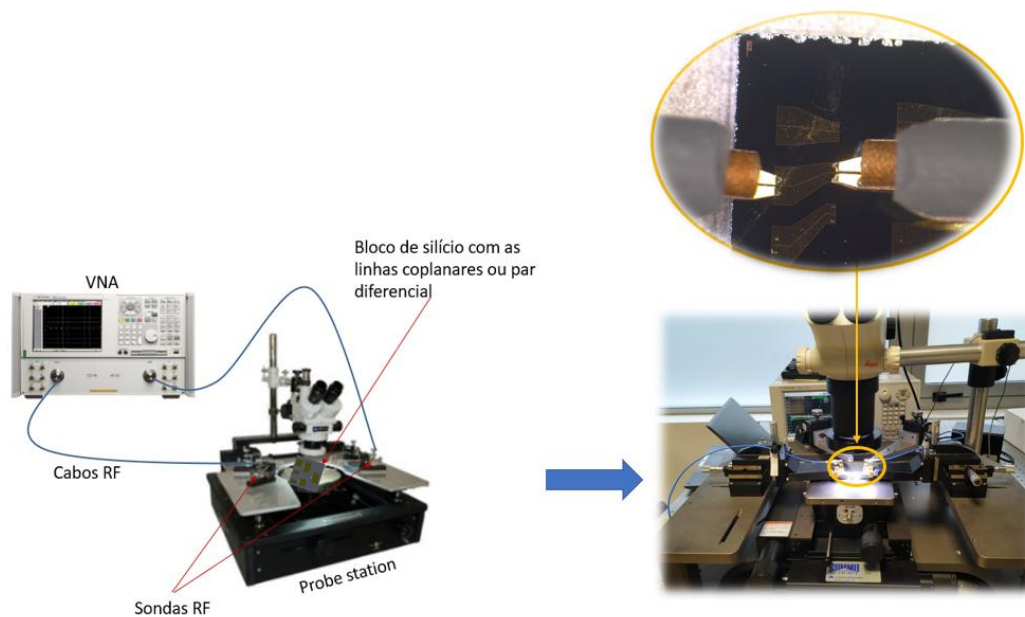


Figura 3.47 Montagem para medição das linhas

Como é visível na figura 3.47, a montagem possui dos equipamentos essenciais a Probe Station e o VNA. A Probe Station permite movimentar as sondas RF com precisão de micrómetros para que estas sejam colocadas no início e no fim da linha que se pretende medir. As duas sondas encontram-se ligadas ao VNA por cabos RF. A medição é feita a partir do VNA, com este a gerar um sinal que vai passar pela linha em teste e desta forma medir a potência transmitida entre o porto 1 e o porto 2, leia-se início e fim da linha, e a potência refletida pelo porto 1. Com estas ondas o VNA apresenta-nos os parâmetros S de transmissão e reflexão que nos permite caracterizar as linhas e comparar com os mesmos parâmetros simulados.

3.9 Resultados e análise dos resultados das linhas medidas

3.9.1 Linhas Coplanares

Os parâmetros S medidos para a linha CPW2_1 são mostrados na figura seguinte, logo abaixo temos os parâmetros S da linha simulada.

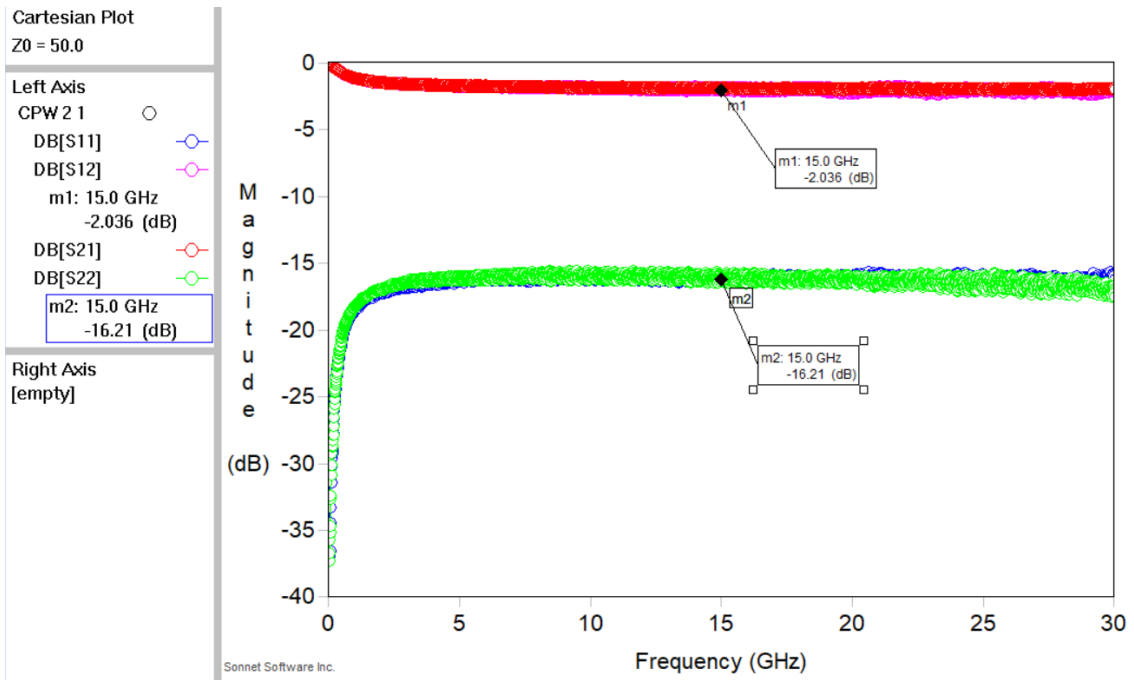


Figura 3.48 Parâmetros S da linha CPW2_1 medidos

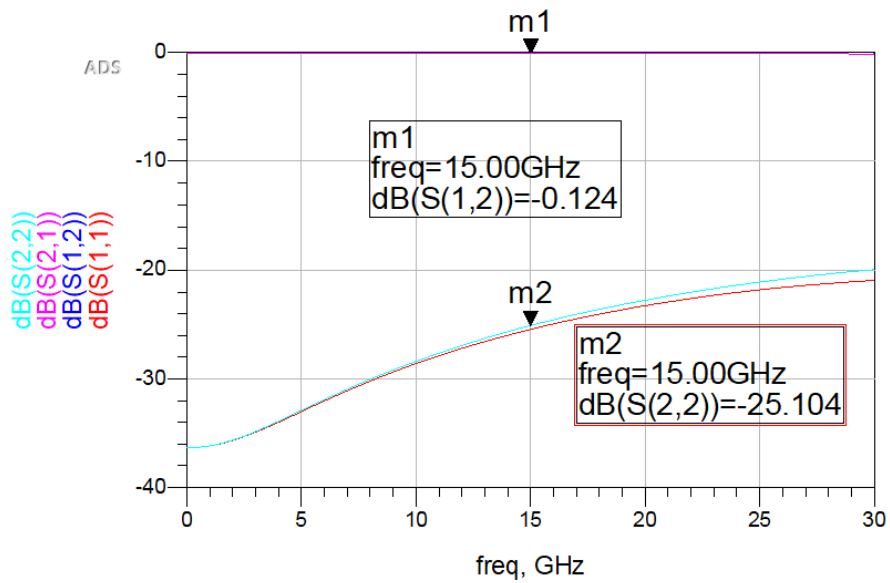


Figura 3.49 Parâmetros S da linha CPW2_1 simulados

O parâmetro S(1,2) de transmissão e o parâmetro S(1,1) de reflexão, para a simulação e medição são apresentados na tabela seguinte para cada linha coplanar. Para cada linha também se apresenta a impedância simulada e medida.

<i>Linha</i>	Simulação		Medições		Impedância	
	S(1,2)	S(1,1)	S(1,2)	S(1,1)	Simulada	Medida
CPW2_1	-0.154	-25.976	-1.987	-10.94	53.737+j3.89	36.66-j3.890
CPW3_1	-0.11	-31.505	-1.354	-15.3	52.718-j0.268	36.06-j4.983
CPW4_1	-0.013	-29.593	-0.918	-16.21	52.355-j2.473	28.35-j5.269
CPW2_2	-0.413	-13.975	-4.47	-12.22	64.691+j17.994	32.72+j5.2
CPW3_2	-0.202	-16.636	-4.17	-12.75	62.206+j11.267	31.49-j3.225
CPW4_2	-0.108	-18.195	-4.114	-13.24	61.392+j7.69	30.48-j2.83
CPW2_3	-1.276	-8.225	-7.054	-13	93.904+j37.405	21.73-j7.311
CPW3_3	-0.925	-9.395	-5.955	-13.66	88.685+j28.4	38.44+j16.5
CPW4_3	-0.779	-10.093	-5.7	-13.832	85.958+j23.928	40.63+j16.67

Tabela 3.6 Parâmetros de transmissão e reflexão para a simulação e medição e impedância medida e simulada

As linhas CPW1_1, CPW1_2 e CPW1_3 não foram medidas, porque não existia uma sonda com um intervalo entre pistas de 50 μm . A sonda mais próxima com 100 μm de intervalo não permitiu fazer a medida porque não consegue ao mesmo tempo tocar na pista de sinal e de massa. Também não foram medidas as linhas com curvatura de 90°, porque os posicionadores onde se encontram afixadas as sondas e o posicionador onde se encontra poisado o bloco de silício não permitem.

Para melhor interpretar a informação que se apresenta na tabela 3.6, em função dos parâmetros das linhas estudados. Em seguida são apresentados três gráficos, que correspondem a linhas com largura constante, e em que se compara a transmissão e reflexão medida e simulada para os três valores de comprimentos de linhas medidos.

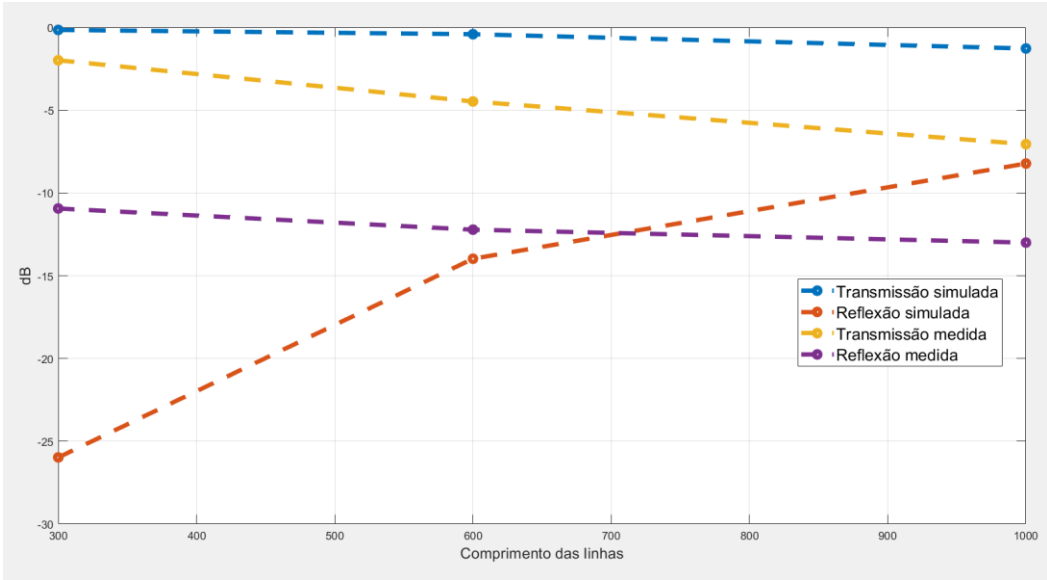


Figura 3. 50 Largura das linhas de 86um

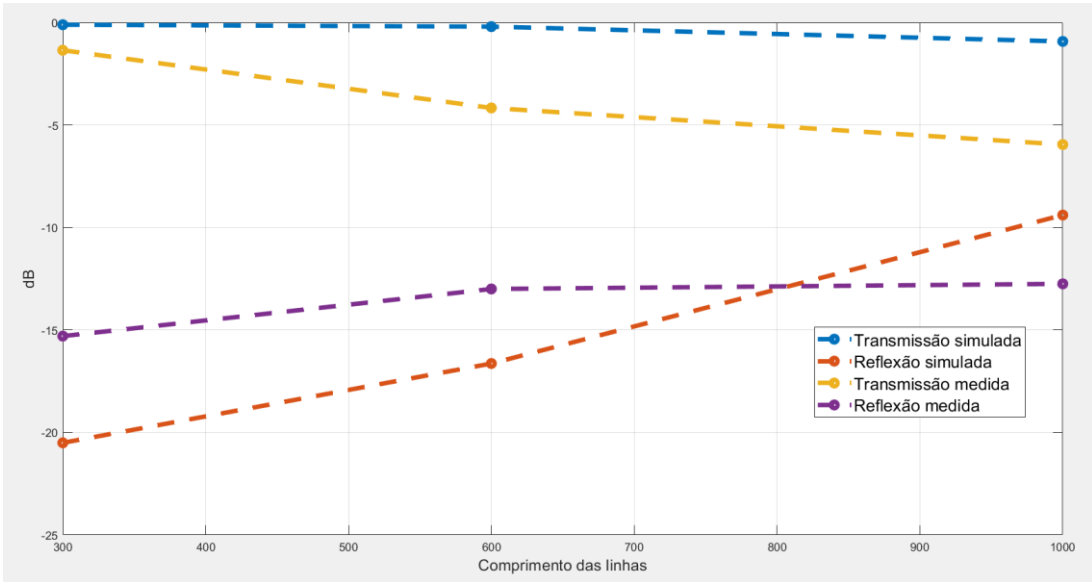


Figura 3. 51 Largura das linhas de 138um

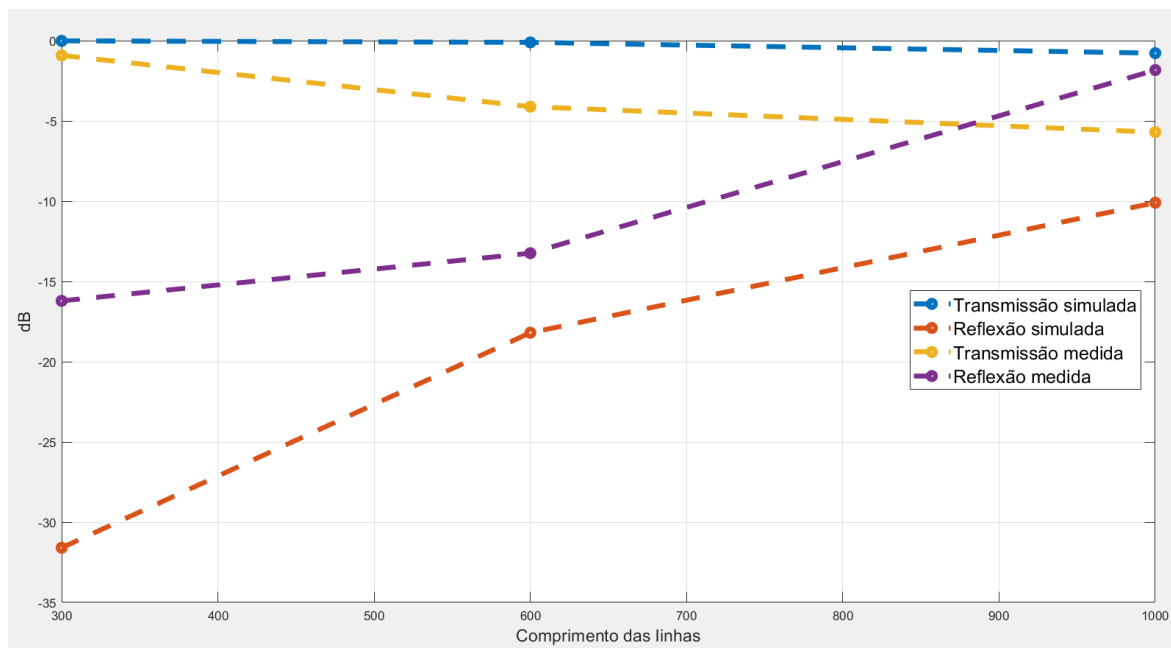


Figura 3.52 Largura das linhas de 174μm

Em cada gráfico observa-se que apesar da transmissão medida e simulada diferir no pior caso em 6dB, ambas apresentam a mesma tendência, a de piorar, ou seja, apresenta valores mais negativos à medida que aumentamos o comprimento da linha. Quanto a reflexão, simulada e medida esta também apresenta o comportamento de piorar à medida que o comprimento aumenta. Excetuando o caso das linhas com 86μm de largura em que a reflexão medida tende a melhorar ligeiramente. Assim e apesar da discrepância dos parâmetros S entre resultados medidos e simulados, que pode ser explicado em parte pela diferença entre a impedância com que a linha foi simulada e a impedância real que a linha apresenta, concluímos que tal como vimos na simulação, o aumento do comprimento das linhas faz piorar tanto a reflexão como a transmissão.

Apesar de ter menos impacto do que o comprimento, a largura também influencia a transmissão e reflexão das linhas. De seguida, e de igual forma ao que se fez no ponto anterior, apresentam-se três gráficos correspondentes a três comprimentos de linhas medidos, em que se compara a transmissão e reflexão medida e simulada para três larguras de linhas diferentes.

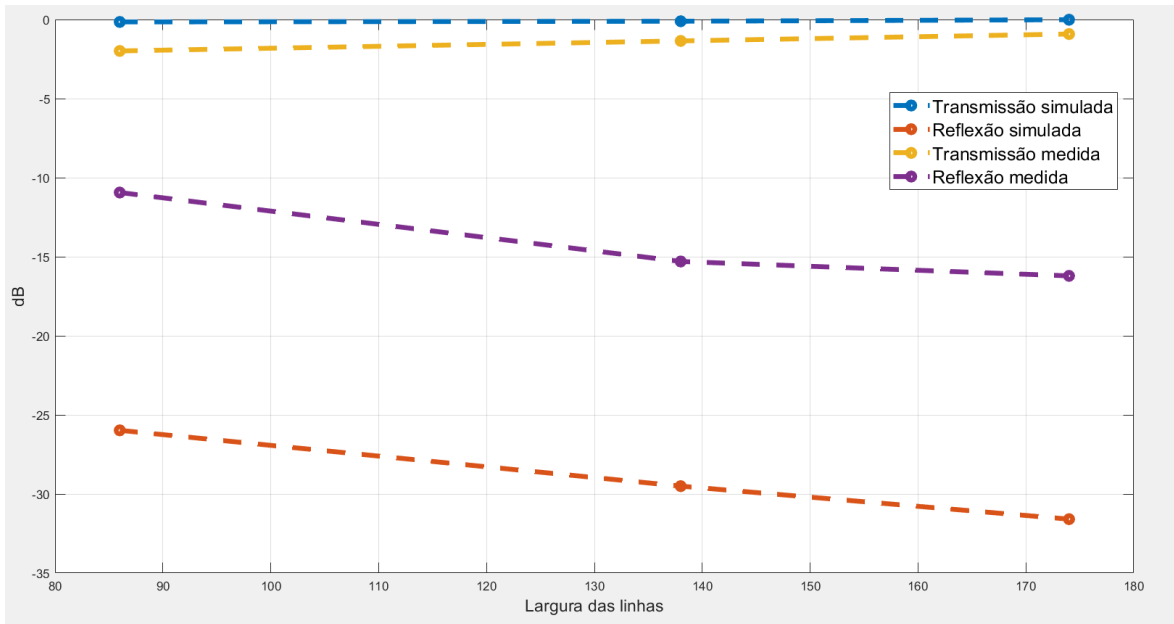


Figura 3.53 Comprimento da linha de 300um

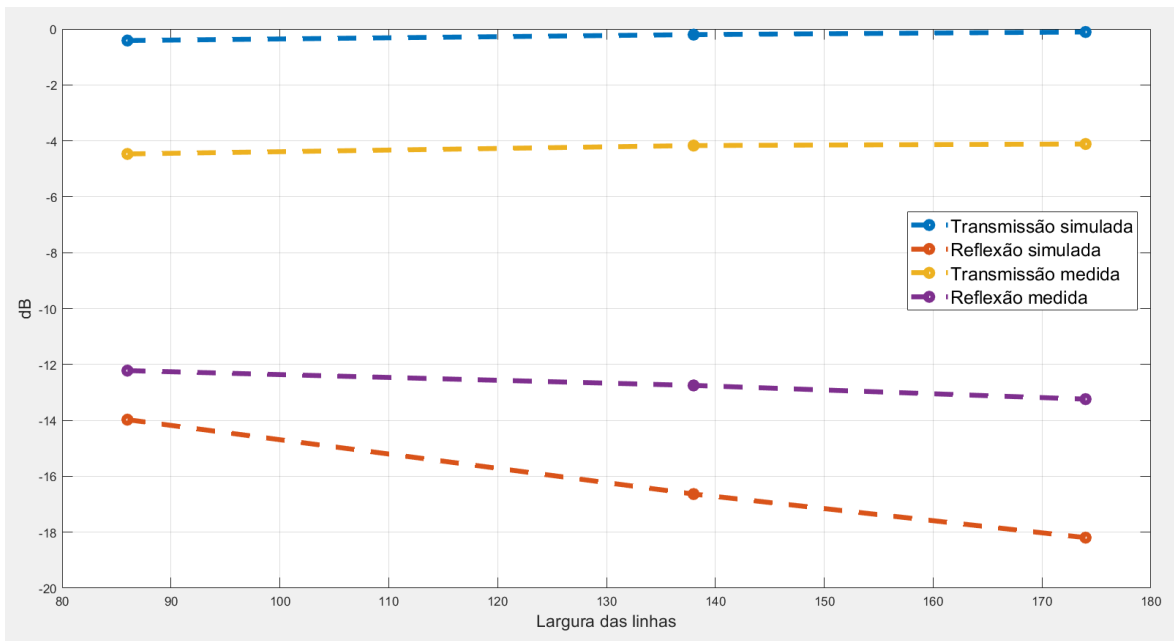


Figura 3.54 Comprimento da linha de 600um

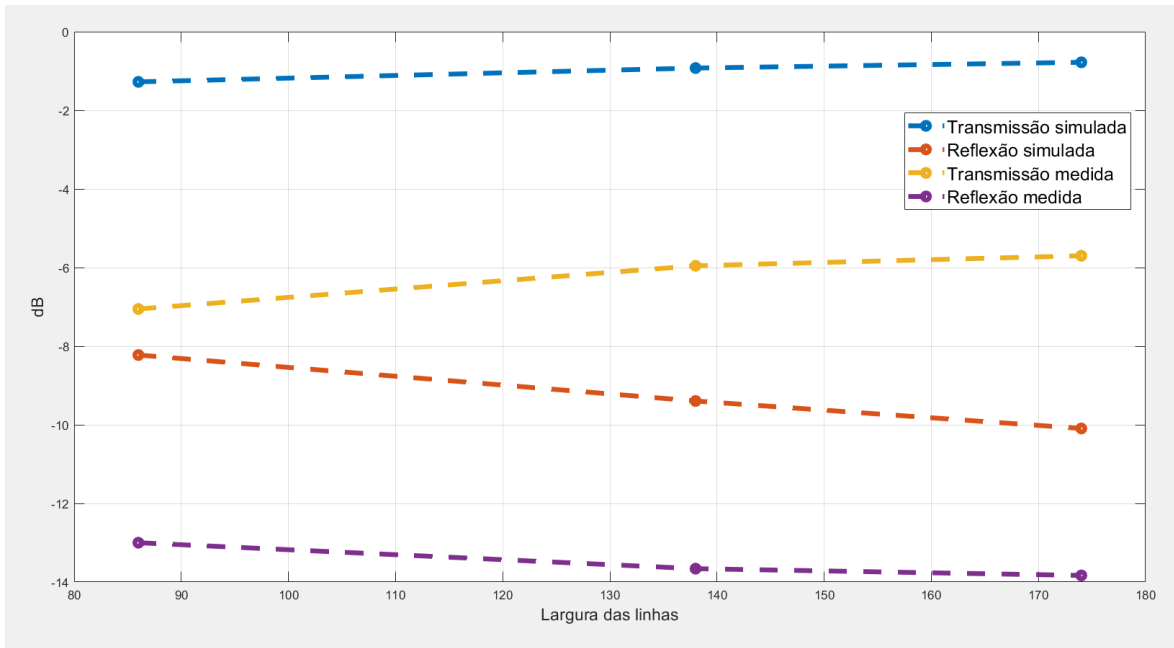


Figura 3.55 Comprimento da linha de 1000um

Pela observação dos três gráficos conclui-se que a transmissão e reflexão medida, segue a tendência da simulada, ou seja a de melhorar à medida que a largura das linhas aumenta.

3.9.2 Linhas Diferenciais

Na tabela 3.7 é apresentado os parâmetros de transmissão e reflexão medidos e simulados para as linhas diferenciais. Na mesma tabela também é apresentada a impedância simulada e medida das mesmas linhas.

<i>Linhas</i>	Simulação		Medições		Impedância	
	S(2,1)	S(1,1)	S(2,1)	S(1,1)	Simulada	Medida
<i>PD1_1</i>	-0.661	-12.263	-5.236	-11.36	72.755+j20.022	30.74+j10.67
<i>PD2_1</i>	-0.923	-9.366	-5.492	-9.017	80.030+j34.538	101.8+j15.27
<i>PD3_1</i>	-0.287	-16.567	-5.856	-8.995	63.163+j10.558	23.92+j3.11
<i>PD4_1</i>	-0.381	-13.588	-5.034	-12.13	67.852+j17.394	31.06+j6.79
<i>PD5_1</i>	-0.139	-25.72	-6.234	-8.467	55.021+j2.086	22.67+j2.324
<i>PD6_1</i>	-0.172	-19.237	-5.527	-9.444	59.632+j7.149	25.06+j4.553

<i>PD1_2</i>	-1.217	-9.05	-10.17	-8.845	102.018-j13.931	25.11+j11.52
<i>PD2_2</i>	-1.708	-6.434	-10.84	-9.017	138.485-j17.819	20.8+j12.02
<i>PD3_2</i>	-0.693	-10.728	-10.22	-9.068	89.296-j10.276	31.49-j3.225
<i>PD4_2</i>	-0.937	-8.528	-9.154	-14.03	108.07-j12.493	24.85+j8.413
<i>PD5_2</i>	-0.404	-13.972	-10.64	-8.147	73.698-j7.321	35.31+j8.668
<i>PD6_2</i>	-0.566	-10.845	-9.546	-11.83	88.790-j9.388	31.17+j9.091
<i>PD1_3</i>	-1.287	-26.037	-20.96	-9.635	55.203-j0.7	27.03+j11.51
<i>PD5_3</i>	-0.468	-18.262	-18.74	-10.78	46.798-j11.469	28.17+j6.346
<i>PD3_3_12</i>	-0.637	-11.929	-11.09	-8.672	76.983-j18.086	23.44+j5.596
<i>PD3_3_14</i>	-0.271	-18.417	-6.251	-8.073	69.088+j24.051	21.71-j1.011

Tabela 3.7 Parâmetros S para a simulação e medição e impedância medida e simulada

Pela observação da tabela pode-se afirmar que os parâmetros S do primeiro bloco de linhas apresentado, que corresponde às primeiras 6 linhas presentes na tabela, apesar de apresentarem valores de transmissão que diferem cerca de 5dB, dos valores de transmissão simulados. Estes valores de transmissão não se alteram muito entre linhas praticamente iguais, como é o caso da linha PD1_1 e PD2_1, em que a única alteração entre as linhas é o espaçamento entre pares de linhas, que passa de 20 μm para 50 μm . E como foi constatado anteriormente através de simulação, esta variação não tem um impacto significativo no valor da transmissão. Ou seja, estes valores apesar da discrepância que apresentam da simulação são aceitáveis.

Por outro lado, os restantes valores de transmissão e reflexão apresentados pelas linhas não é aceitável, porque em todos os casos temos uma reflexão superior ou valor da transmissão, como é visível na figura 3.55, para a linha PD1_2.

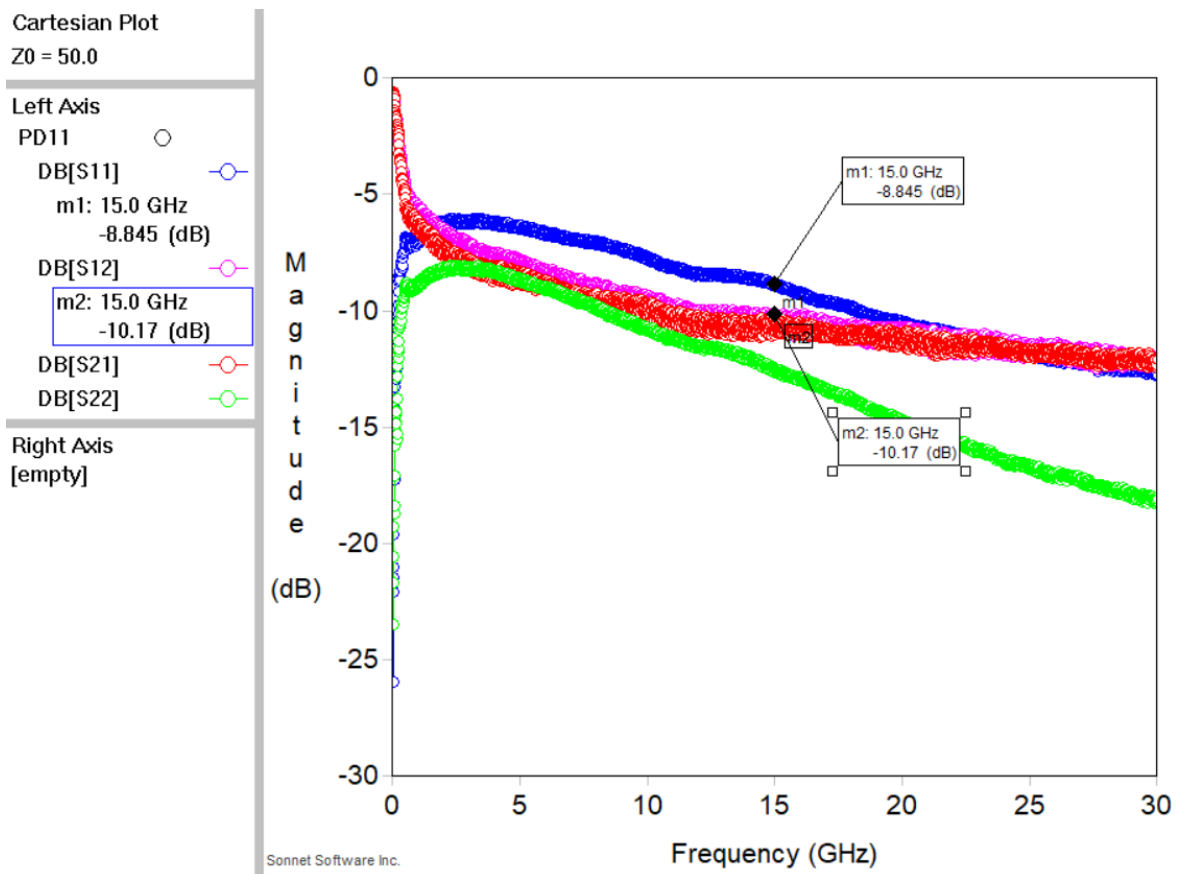


Figura 3.56 Parâmetros S da linha PD1_2

Como pode ser visto na figura 3.55 e consultado na tabela 3.7 a reflexão é superior a transmissão, cerca de -1.3dB, o que significa que as linhas estão totalmente desadaptadas para 50Ω, que é a impedância das sondas RF com que as linhas foram medidas e para a qual também foram simuladas.

Deste modo só podemos tirar conclusões das primeiras seis linhas medidas. Todas as linhas têm 1mm de comprimento e estão agrupadas em três grupos, em que cada grupo tem larguras diferentes, e dentro do mesmo grupo a única diferença entre as linhas é o espaçamento entre os pares de linhas. Assim as linhas PD1_1 e PD2_1 tem uma diferença entre a transmissão simulada de 0.3dB, e na transmissão medida de 0.2dB. A diferença entre a reflexão simulada e medida também é semelhante. Já para o par PD3_1 e PD4_1 a diferença entre transmissão simulada é de 0.09dB e na transmissão medida é de 0.822dB. No caso da reflexão temos uma diferença entre a reflexão simulada de 2.9dB, e de 3.1dB para a reflexão medida. Para o par final do bloco, PD5_1 e PD6_1 apresentam uma diferença inferior a 0.1dB para a transmissão simulada e de 0.7dB para a transmissão medida. Na reflexão a diferença na reflexão simulada é de 6.4dB, e na reflexão medida é de 1dB.

Tal como se verifica para os valores de transmissão simulados, também devíamos observar um melhoramento na transmissão medida com o aumento da largura das linhas no entanto a transmissão não sofre grandes alterações com a passagem de linhas com uma largura de 100 μm para linhas com uma largura de 400 μm .

3.10 Conclusão

A partir das simulações realizadas para as linhas coplanares pode-se concluir que o comprimento e largura são as variáveis que mais afetam a transmissão e a reflexão. Ao contrário, as variáveis distância entre linhas CPW e largura da linhas de massa não tem impacto significativo nos parâmetros S das linhas. Também se constatou que a transmissão e a reflexão melhoram para espessuras do substrato superiores a 700 μm .

Para as linhas diferenciais a simulação veio demonstrar que o comprimento e largura, tal como nas linhas coplanares, são as variáveis que também apresentam maior impacto nos parâmetros de transmissão e reflexão.

Das medidas experimentais para o caso das linhas coplanares e apesar destas serem discrepantes das simulações, confirmou-se que a transmissão e reflexão pioram com o aumento do comprimento e melhoram com o aumento da largura. No caso das linhas diferenciais os resultados práticos só permitiram corroborar que o espaçamento entre linhas diferenciais não tem grande impacto na transmissão e reflexão.

Capítulo 4

Encapsulamento Térmico

Este capítulo aborda o encapsulamento térmico do PIC. Em primeiro lugar apresentam-se os resultados de simulação conjunto TEC+Holder+PIC. No seguimento, apresentam-se os testes laboratoriais realizados ao mesmo conjunto.

4.1 ANSYS

Ansys é um software de simulação criado pela empresa com o mesmo nome fundada em 1970 por John A. Swanson. Ansys permite o desenho 3D e oferece ferramentas de simulação em várias áreas como eletrónica, fluídos, software embutido, materiais, estruturas, ótica e semicondutores.

As simulações térmicas realizadas neste capítulo foram realizadas usando o Ansys Workbench que corresponde a interface gráfica disponibilizada pelo simulador. Foi utilizado a opção de simulação térmica em estado estacionário pois o interesse é na temperatura após estabilização e não na evolução desta.

4.2 Simulação térmica do modelo de um PIC

Tal como existem regras de desenho óticas e elétricas na construção de um PIC, também existem regras térmicas. Como já foi referido os componentes óticos são altamente sensíveis a variação da temperatura para a qual foram concebidos para operar, deste modo devem minimizar as interferências térmicas entre os componentes que dissipam potência dentro de um PIC (Lasers, amplificadores, moduladores e *splitters*). Como é de prever está influência de temperaturas entre os componentes ativos é dependente da distância a que estes se encontram e da potência dissipada por cada um. Deste modo, têm de existir regras que estabeleçam por exemplo a distância mínima a que se podem encontrar 2 lasers a dissipar uma certa potência.

A figura 4.1 apresenta o modelo de um PIC criado em Solidworks com as mesmas dimensões apresentadas pelo PIC mas unicamente são representados os componentes ativos, que são os que tem interesse para a simulação térmica.

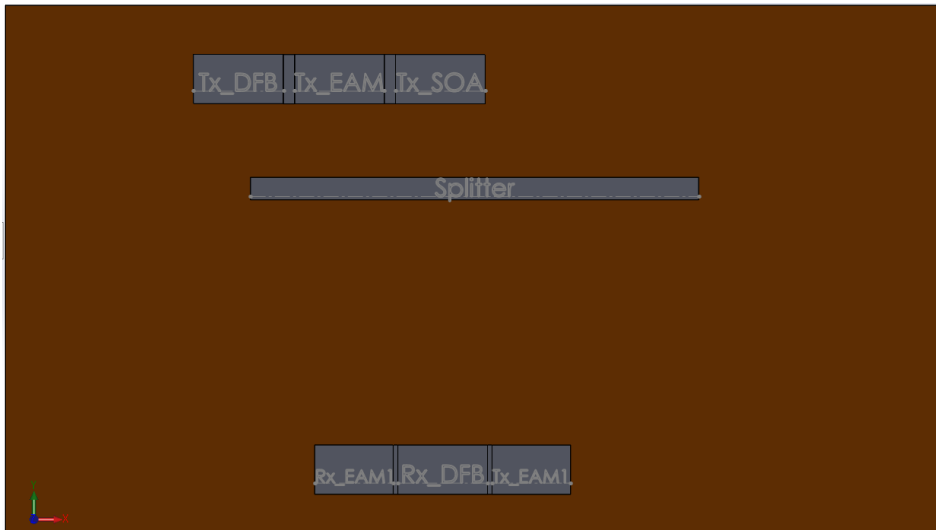


Figura 4.1 Modelo simplificado de um PIC apenas com os componentes ativos

Para procedermos à simulação temos de definir a potência dissipada por cada elemento ativo e a temperatura ambiente a que está o PIC, denominadas condições fronteira da simulação.

A tabela¹ que se segue apresenta a potência elétrica injetada em cada dispositivo (P_{el}), e a potência dissipada como calor pelos mesmos dispositivos (P_{diss}). P_{el} é calculado através da lei de Ohm ($V=R*I$) e da Potência elétrica ($P=V*I$). Destas duas equações surge a equação $P=R*I^2$ multiplicando a corrente ao quadrado injetada em cada dispositivo pela resistência apresentada pelo mesmo, obtemos a P_{el} . Já P_{diss} é 65% ² de P_{el} , menos para o caso do *Heater Splitter*. Os *heaters* presentes no laser DFB e no *Splitter* servem no caso do Laser para o colocar a temperatura própria de funcionamento, e no caso do *splitter* serve para aumentar o “*extinction ratio*” entre as polarizações transversal elétrica e transversal magnética. Deste modo no *Heater* toda a potência útil é potência dissipada, o que significa P_{el} igual a P_{diss} .

	DFB		Heater Laser		SOA		Heater Splitter		EAM	
	I _{max} (mA)	R (Ω)	I _{max} (mA)	R (Ω)	I _{max} (mA)	R (Ω)	I _{max} (mA)	R (Ω)	I _{max} (mA)	R (Ω)
	95	15	95	18	80	15	80	28	140	0,4
$P_{el}(mW)$	135		162		96		179,2		7,84	
$P_{diss}(mW)$	87,9		162		62,4		179,2		5,096	

Tabela 4. 1 Potência elétrica de cada componente ativo

¹ Tabela disponibilizada pela PICadvanced

² Informação fornecida pela PICadvanced

Tendo definido a potência dissipada através de calor por cada elemento, também foi definido que a temperatura na base inferior do PIC é de 35°C. Assim, na figura 4.2 é apresentado o diagrama de temperaturas do modelo do PIC.

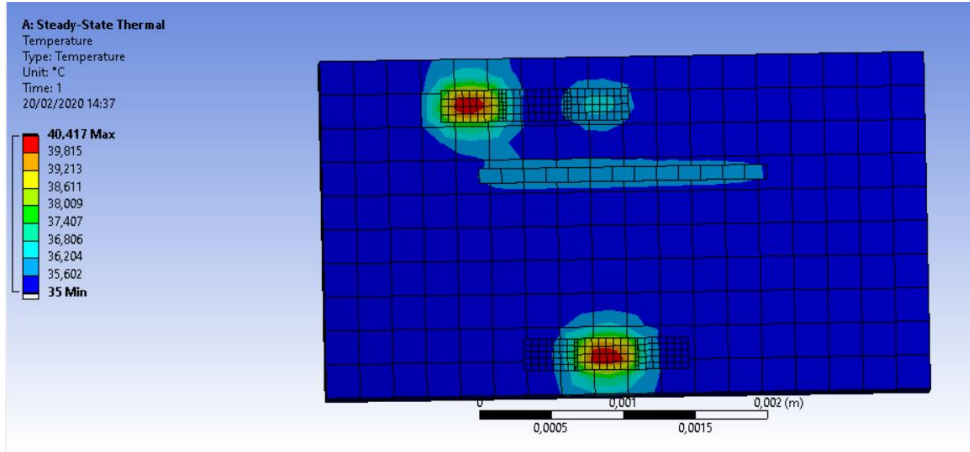


Figura 4.2 Diagrama de temperatura do PIC simulado

Como se pode constatar na figura 4.2 pela legenda, a temperatura máxima é atingida pelo laser DFB pois é este que dissipa mais potência, e nesta configuração é o único elemento que interfere ligeiramente na temperatura na temperatura dos EAMs.

Na figura 4.3 é apresentado o diagrama do fluxo de calor do PIC em estudo. Este fluxo é dado pela seguinte expressão

$$Q = \frac{P_{diss}}{A} \quad (\text{W/m}^2) \quad (4.1)$$

Onde Q representa o fluxo de calor, P_{diss} a potência dissipada sob a forma de calor e A representa a área do componente.

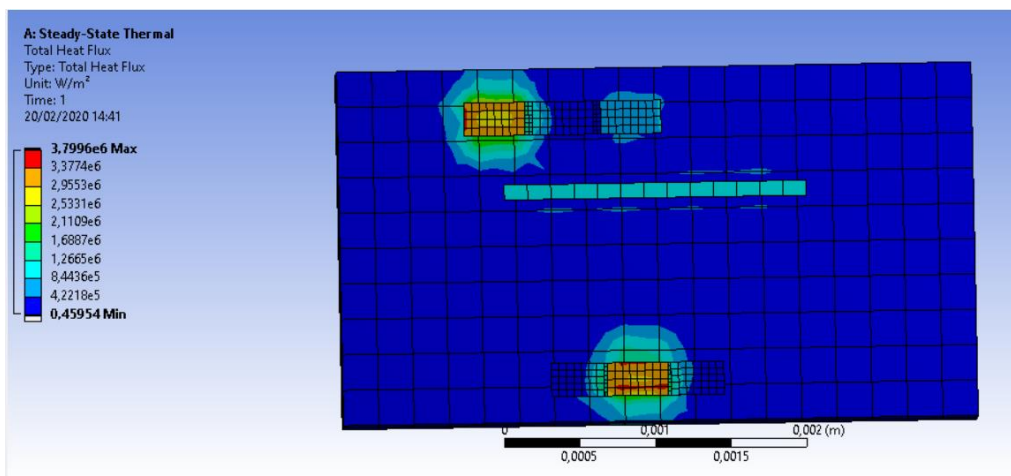


Figura 4.3 Diagrama de temperatura do PIC simulado

Esta figura corrobora o que foi concluído para a figura do diagrama de temperaturas, ou seja, o componente a dissipar mais potência é o laser DFB, cuja interferência de temperatura não tem grande impacto nos componentes adjacentes. O fluxo de calor apresentado pela legenda é elevado porque, apesar da potência dissipada ser na ordem dos mW a área dos elementos que dissipam essa potência é na ordem dos micrómetros, e pela expressão 4.1 surgem valores de fluxo de calor máximos na ordem dos 10^6 W/m^2 .

4.3 Simulação térmica do conjunto Holder + PIC

O PIC é fixado ao Holder usando uma epóxi. É importante que essa epóxi seja boa condutora de calor uma vez que a zona de fixação entre o Holder e o PIC vai ser responsável por dissipar praticamente todo o calor gerado pelo PIC. É por isso crucial usar uma epóxi com uma boa condutividade térmica. Neste seção pretende-se estudar a temperatura atingida pelo PIC montado num Holder para epóxis com diferentes condutividades térmicas e com diferentes espessuras. As espessuras de simulação escolhidas foram 50, 100, 150, 200 e 250 μm e as epóxis escolhidas são apresentadas na tabela 4.2.

<i>Epóxi</i>	Condutividade Térmica W/m.K
<i>NOA60</i>	0,17
<i>TCER75</i>	1,4
<i>LOCTITTE EA949</i>	1,8
<i>EPO-TEK EJ2108</i>	4
<i>H20E</i>	29
<i>EPO-TEK EK1000</i>	35,5

Tabela 4.2 Epóxis e respetiva condutividade térmica

Na figura 4.4 é apresentado o conjunto simulado, em que o bloco vermelho representa o PIC com as seguintes dimensões: $6*4*0,25\text{mm}^3$. Este bloco vai ser colocado na abertura existente no Holder e vai ser fixado a este através da epóxi representada pelo bloco a azul. O PIC é constituído por fosfato de índio (InP) com uma condutividade térmica de 68 (W/m.K). Já a camada de epóxi vai assumir diferentes condutividades e ter diferentes espessuras consoante a simulação a realizar. A cinzento temos o Holder com uma dimensão lateral de $14*8\text{mm}^2$ e uma espessura de 390 μm , sendo este bloco constituído por silício com

uma condutividade térmica de 148 (W/m.K). Na figura ao lado o bloco a verde representa o TEC responsável por impor uma temperatura na base inferior do Holder.

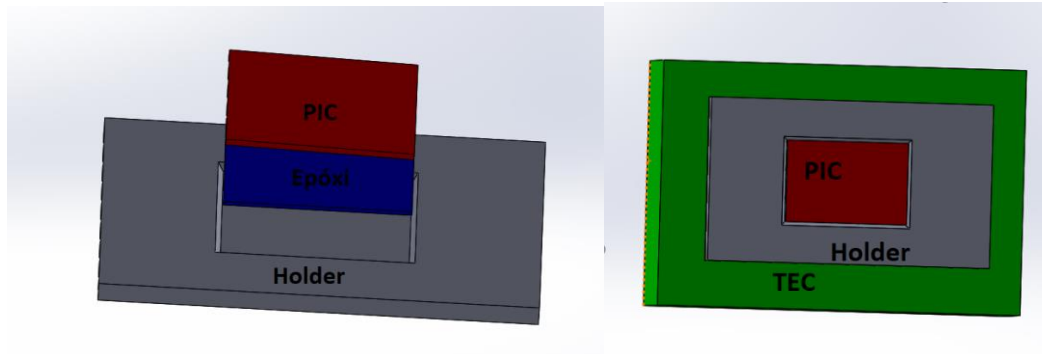


Figura 4.4 Esquemático do conjunto Holder+PIC (à esquerda) e esquemático do conjunto TEC+Holder+PIC (à direita)

Mas simulações que se apresentam de seguida definiu-se que a potência dissipada pelo PIC é de 0,75W. Este valor surge da soma de todos os componentes ativos presentes no PIC que foi apresentado. Também se considera que existe contacto térmico ideal entre o TEC e o Holder, ou seja, o TEC e a base inferior do Holder estão à mesma temperatura, que foi definida para 22°C.

Na figura 4.5 apresenta-se o diagrama de temperaturas do conjunto Holder + PIC considerando também contacto térmico ideal entre o Holder e o PIC, ou seja, o TEC impõe 22°C ao Holder que por sua vez apresenta esta temperatura em todo o bloco de silício e impõem também a temperatura de 22°C na base inferior do PIC.

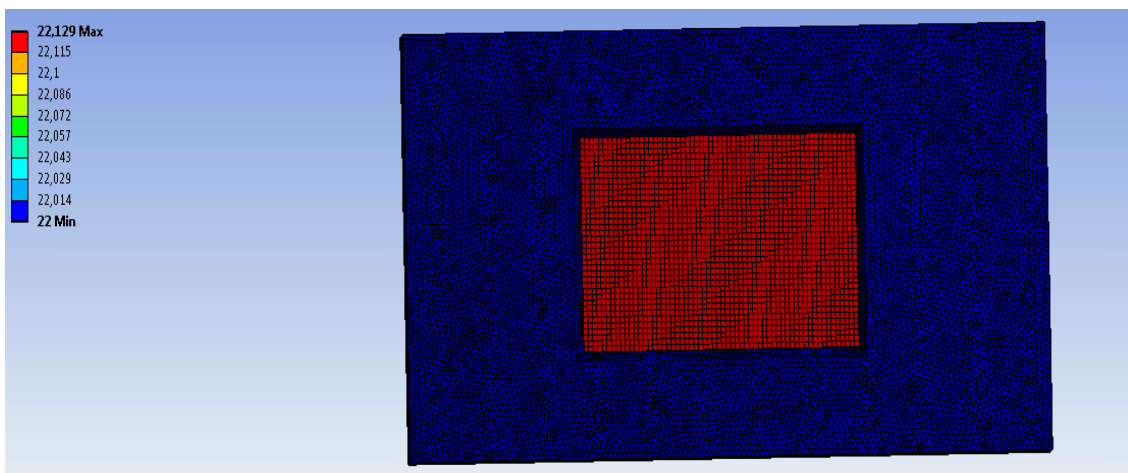


Figura 4.5 Temperatura atingida pelo PIC quando considerado contacto térmico ideal entre os três blocos em contacto

Pela figura verifica-se que com contacto térmico ideal o PIC atinge os 22,1°C.

O próximo passo foi considerar que o PIC está assente no Holder sem qualquer tipo de epóxi de fixação. O diagrama de temperatura obtido apresenta-se na figura seguinte.

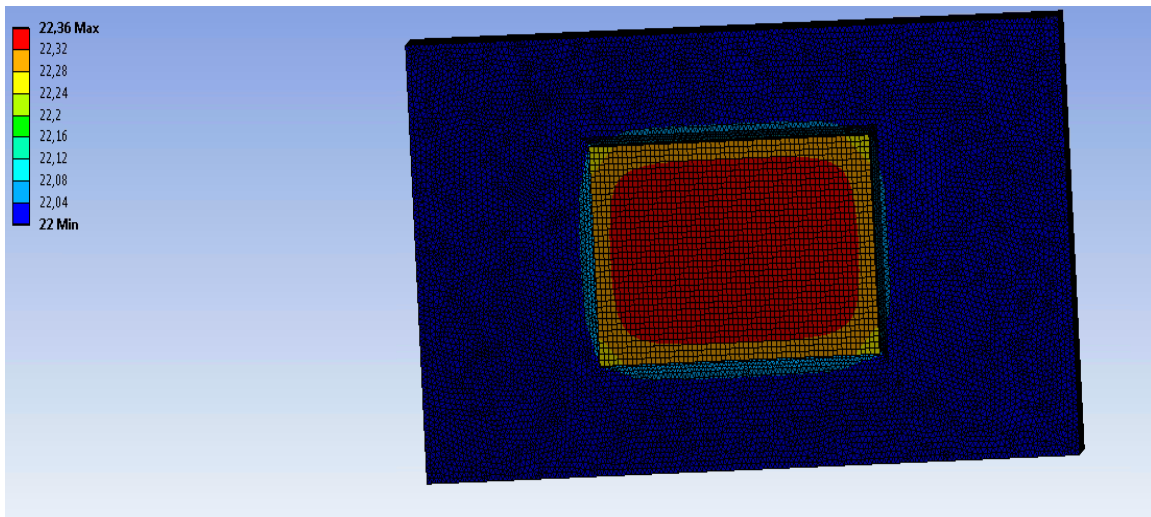


Figura 4.6 Temperatura atingida pelo PIC sem camada de epóxi entre o PIC e o Holder

Como seria de esperar quando temos o contacto térmico ideal será o valor mais baixo de temperatura que o PIC irá atingir. Sem epóxi, ou com um epóxi com boa condutividade nunca será comparado a situação de contacto térmico ideal e, portanto, não podemos obter valores de temperatura inferiores, tal como se verifica nesta simulação.

O diagrama de temperatura da figura 4.7 demonstra a temperatura do conjunto para a epóxi NOA60 com uma espessura de 50 µm.

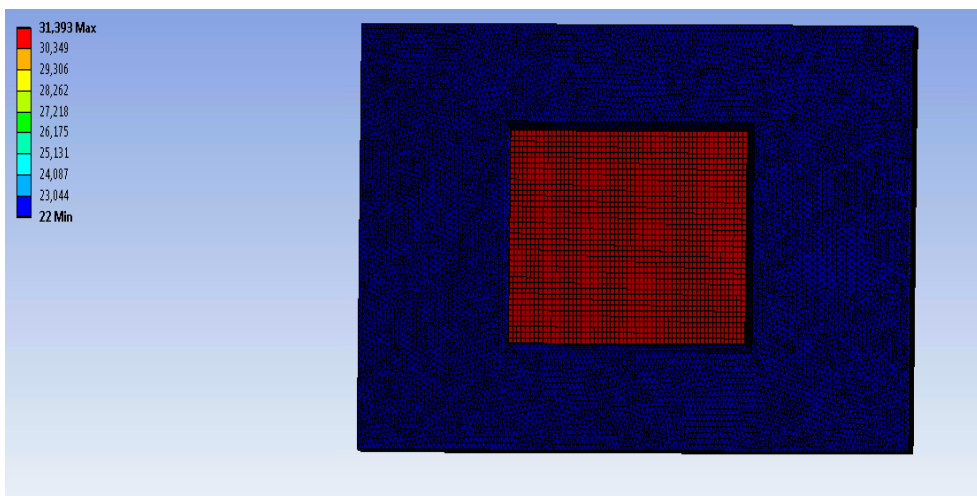


Figura 4.7 Simulação térmica do conjunto usando a epóxi NOA60 com uma espessura de 50 µm

Como a epóxi NOA60 tem uma condutividade térmica muito baixa a temperatura do PIC aumenta mais de 10°C, relativamente à situação em que não é usada epóxi.

A simulação seguinte pretende demonstrar que como já foi assumido, mas simulações anteriores praticamente todo o calor é dissipado pela base inferior do PIC, atravessa o Holder e é removido pelo TEC. No entanto existe troca de calor entre as superfícies expostas ao meio ambiente do PIC e do Holder.

Para constatar que a potência que se dissipa para o ambiente não tem impacto na temperatura final do PIC, refez-se a simulação anterior, mas nesta nova simulação considerou-se que tanto o PIC é o Holder libertam 5W/m² de calor para o ambiente, através das superfícies em contacto com o ar. Esta quantidade de calor é um valor especificado pelo simulador para a situação de ar estagnado. A temperatura atingida pelo PIC para a situação descrita apresenta-se de seguida.

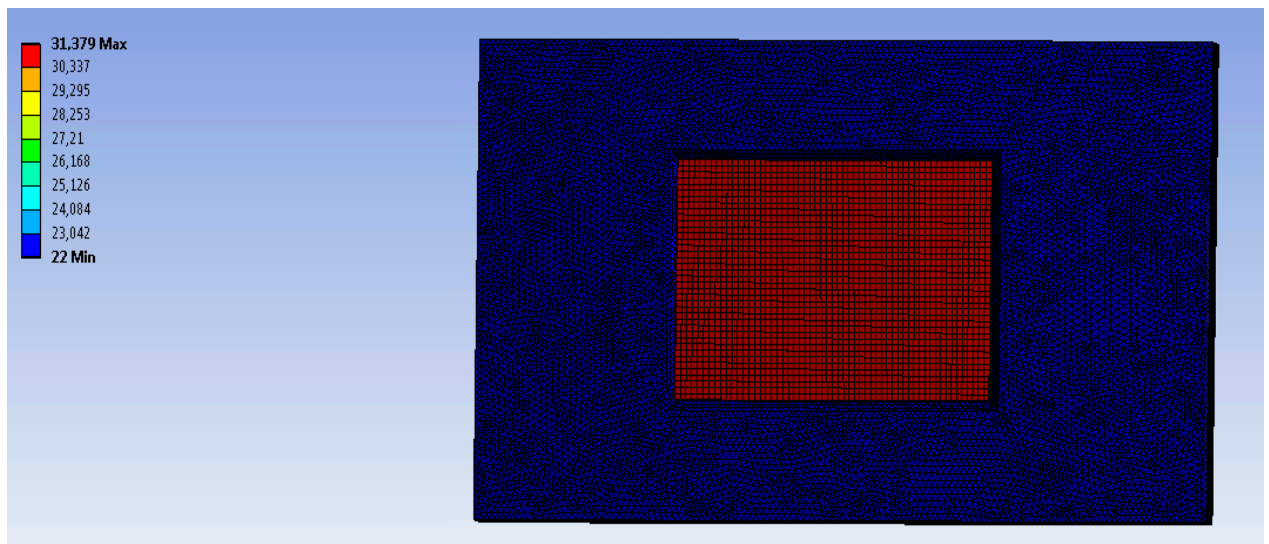


Figura 4.8 Simulação térmica do conjunto usando a epóxi NOA60 com uma espessura de 50µm, considerando convecção com o ar

Tal como o esperado com convecção com o meio ambiente a temperatura é ligeiramente mais baixa, mas essa diferença só se manifesta na segunda e terceira casa decimal, portanto não tem um impacto significativo. Desta forma para simplificar as simulações não se considera a percentagem de calor dissipada para o ar.

O conjunto de simulações que se realizaram de seguida, são repetição da simulação realizada para a epóxi NOA60 com 50 µm de espessura. O objetivo destas simulações é verificar como varia a temperatura do PIC para epóxis com diferentes condutividades

térmicas e com diferentes espessuras. Os resultados da simulação são apresentados na tabela seguinte.

<i>Epoxy</i>	Espessura da Epóxi(μm)				
	50	100	150	200	250
<i>NOA60</i>	31,393	40,583	49,774	58,965	68,156
<i>TCER75</i>	23,323	24,437	25,552	26,667	27,783
<i>LOCTITTE EA949</i>	23,075	23,941	24,808	25,676	26,543
<i>EPO-TEK EJ2108</i>	22,599	22,989	23,378	23,768	24,158
<i>H20E</i>	22,264	22,317	22,371	22,424	22,478
<i>EPO-TEK EK1000</i>	22,255	22,298	22,342	22,385	22,429

Tabela 4.3 Temperatura do PIC para as diversas epóxis com diferentes espessuras

O gráfico que se segue apresenta os mesmos dados contidos na tabela, e demonstra a variação da temperatura do PIC em função da espessura da camada de epóxi, para as seis epóxis.

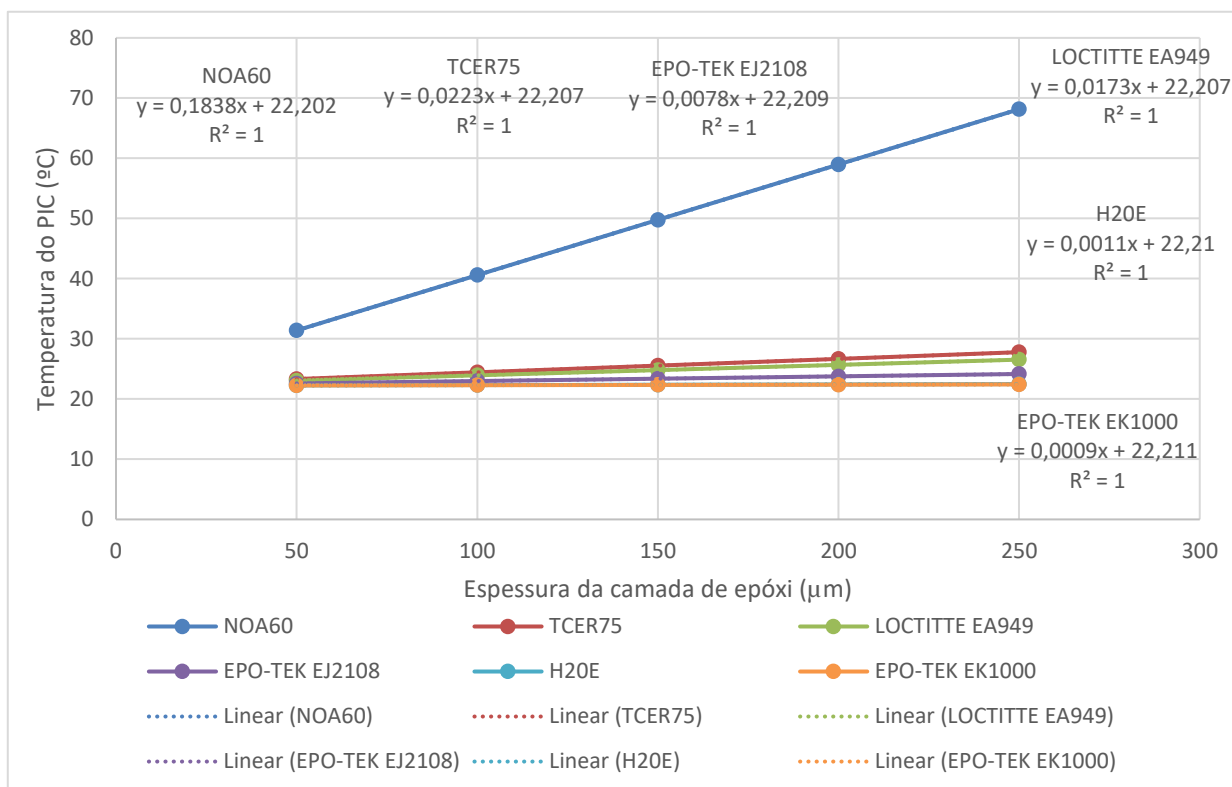


Figura 4. 9 Representação gráfica dos dados da tabela 4.3

A figura 4.9 representa a linearização da temperatura atingida pelo PIC em função da espessura da epóxi para as diferentes epóxis. Verifica-se que temos uma linearização com coeficiente de correlação igual a 1, o que significa que a relação entre espessura da epóxi e temperatura atingida pelo PIC é linear. Na figura também são apresentadas as equações resultantes da linearização para as seis epóxis diferentes. Com estas equações podemos obter a temperatura que o PIC vai atingir em regime estacionário, tendo conhecimento da espessura camada de epóxi usada para montar o PIC no Holder. Ainda através das equações constata-se que para x igual a zero, ou seja, quando não temos camada de epóxi o valor da ordenada na origem para as seis epóxis é diferente de 22,36°C, que foi a temperatura obtida na simulação apresentada na figura 4.6.

Para ter uma noção gráfica de como a condutividade térmica das diversas epóxis influencia a temperatura do PIC, apresenta-se na figura seguinte o gráfico da condutividade térmica vs temperatura para as 5 espessuras de epóxi simuladas.

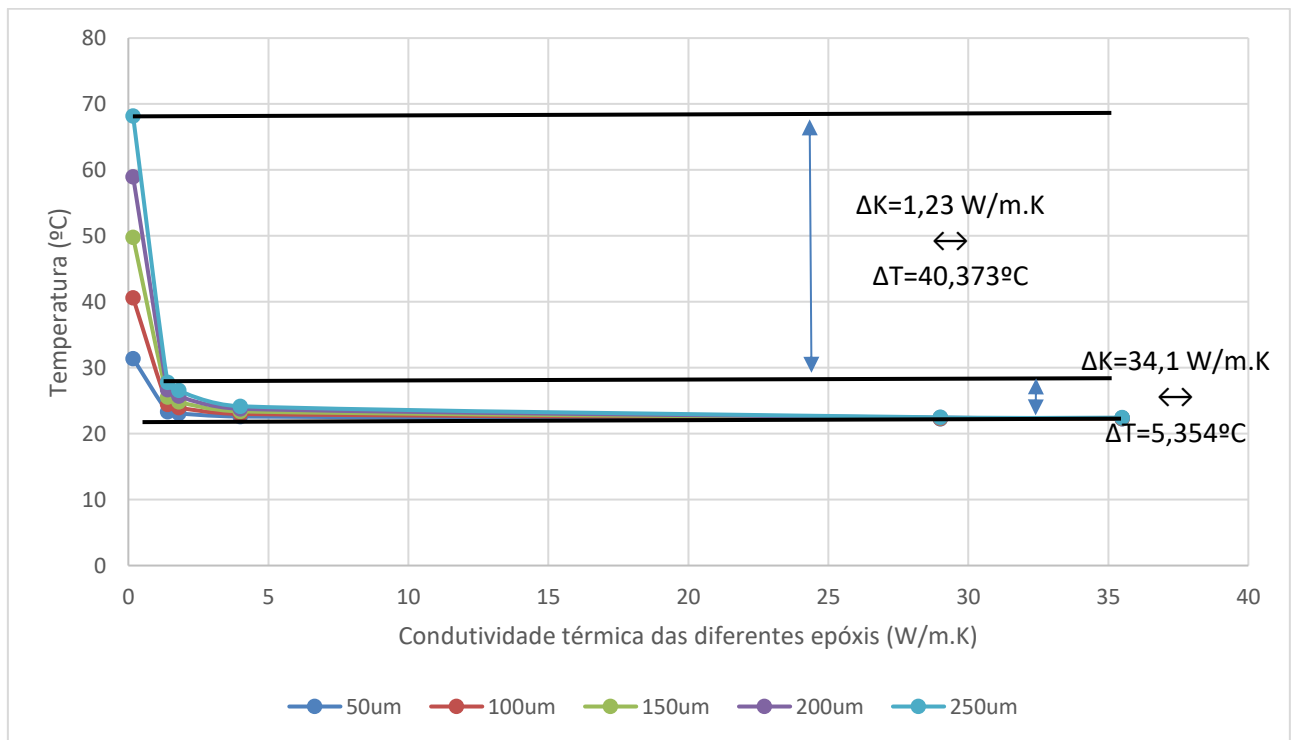


Figura 4.10 Condutividade térmica em função da temperatura, para as 5 espessuras de epóxi simuladas

Pela observação gráfica podemos concluir que ao contrário do que se verifica entre espessura da epóxi e temperatura do PIC, a relação entre condutividade térmica e temperatura do PIC não é nada linear. Como se evidencia no gráfico para o caso de 250um

de camada de epóxi para uma variação de condutividade de 1,23 W/m.K temos uma variação de temperatura de 40,373°C, enquanto que para uma variação de 34,1 W/m.K de condutividade corresponde uma variação de temperatura de 5,354°C. Ou seja, tirando a epóxi NOA60 que tem uma condutividade muito baixa, 0,17 W/m.K. As restantes epóxis com condutividade compreendidas entre 1,4 e 35,5 W/m.K produzem uma variação na temperatura do PIC de 5,4°C. Pode-se considerar ainda que as epóxis H20E e EPO-TEK EK1000, que produzem uma variação inferior a 0,5°C para uma camada de epóxi de 250µm, se assemelham a condição de contacto térmico ideal entre o PIC e o Holder.

4.4 Simulação térmica do conjunto TEC+ Holder + PIC

Em todas as simulações feitas anteriormente, considerou-se contacto térmico ideal entre o Holder e o TEC.

As simulações que se seguem pretendem repetir o estudo da variação da temperatura do PIC em função da epóxi usada e da espessura da mesma, também para a junção entre o Holder e o TEC. Deste modo repetiram-se as simulações anteriores considerando que entre o TEC e o Holder, e entre o Holder e o PIC são usadas as mesmas epóxis com a mesma espessura. Os dados obtidos são apresentados na figura 4.11 em todo semelhante a figura 4.9 agora com um acréscimo em temperatura pois temos mais uma camada de epóxi.

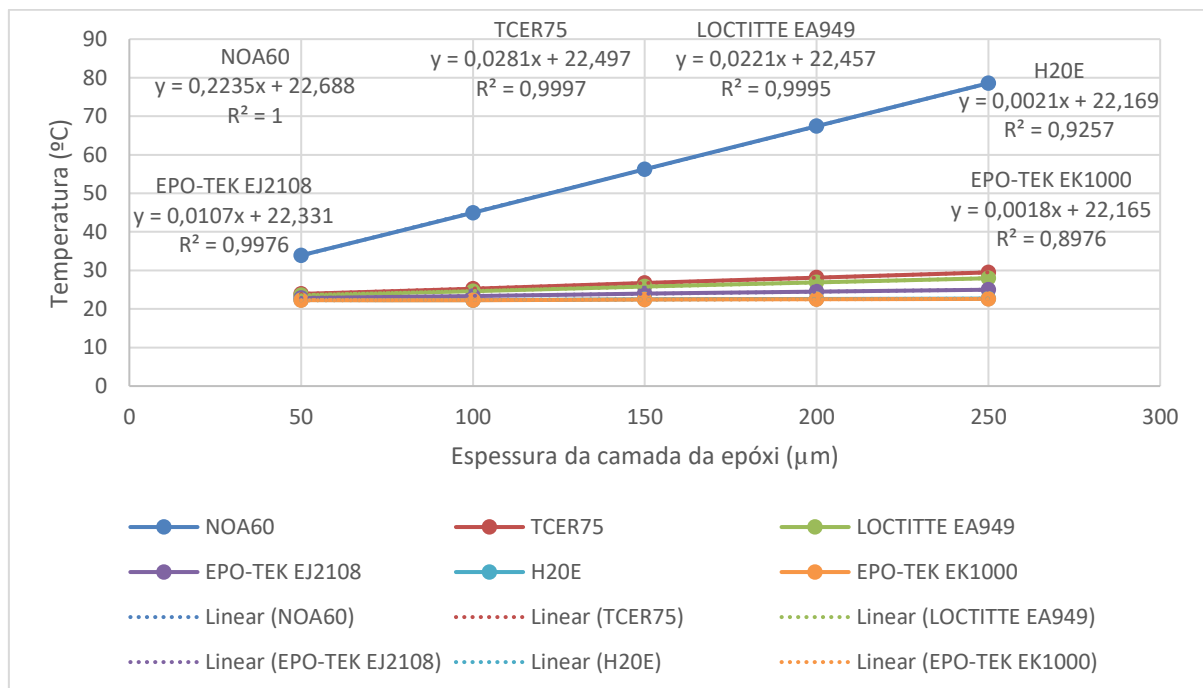


Figura 4.11 Representação gráfica da espessura da epóxi vs a temperatura do PIC

Da equação presente na figura 4.9 para a epóxi NOA60, conclui-se através do declive da reta que a temperatura aumenta aproximadamente 0,18°C por cada micrómetro de espessura da epóxi. Para a mesma epóxi com a mesma espessura também entre a junção TEC + Holder esse valor passa para 0,22°C por cada micrómetro de epóxi adicionado. Apesar da espessura da epóxi ser a mesma a área de contacto passa de 24 mm² para 112mm², portanto não se estava a espera que a temperatura duplica-se uma vez que a superfície da epóxi para conduzir calor entre o TEC e o Holder é cerca de 4,6 vezes maior do que a superfície entre o Holder e o PIC.

Pelas equações da figura 4.11 e visível que ao contrário das equações da figura 4.9, os coeficientes de correlação não são iguais a 1, tirando o caso da epóxi NOA60. No entanto a relação entre espessura e temperatura continua totalmente linear. Isto deve-se ao fato de que no decorrer da simulação houve a necessidade de alterar a Mesh, que estava a ser usada, por uma Mesh mais simples de forma a tornar a simulação mais rápida, pois esta estava a levar várias horas. A consequência da alteração da Mesh fez com que em vez de obter a temperatura com 5 algarismo significativos como se apresenta na figura 4.12, passou-se a obter a obter a temperatura apenas com três algarismo significativos.

Para ter uma noção mais clara da diferença de temperatura que a adição da camada de epóxi entre o TEC e o Holder traz. Realizou-se a diferença entre as temperaturas atingidas em cada caso, que se apresenta na tabela seguinte.

<i>Nome da epóxi</i>	Espessura da Epóxi (µm)					ΔT
	50	100	150	200	250	
<i>NOA60</i>	2,514	4,381	6,472	8,443	10,414	1,971
<i>TCER75</i>	0,595	0,806	1,197	1,457	1,708	0,2555
<i>LOCTITTE EA949</i>	0,506	0,671	1,015	1,224	1,427	0,206
<i>EPO-TEK EJ2108</i>	0,288	0,356	0,611	0,73	0,839	0,114
<i>H20E</i>	0,051	-0,017	0,139	0,176	0,209	0,035
<i>EPO-TEK EK1000</i>	0,041	-0,035	0,116	0,147	0,176	0,03

Tabela 4.4 Diferença de temperaturas das simulações com e sem contacto térmico ideal entre o TEC e o Holder

A coluna com o nome ΔT resulta da medida da diferença entre células adjacentes. Deste modo ΔT é o aumento de temperatura que resulta de colocar também epóxi entre o TEC e o Holder em relação ao caso de contacto térmico ideal.

Os valores negativos que surgem para 100um para o caso das epóxis H20E e EPO-TEK EK1000, resultam de que a simulação para a situação em que se usa estas epóxis com uma espessura de 100um entre o TEC e o Holder, e o Holder e o PIC. Advém do fato das variações de temperaturas para estes casos ser muito pequenas, aliado ao fato da já explicada alteração de Mesh que ocorreu entre as simulações de 50um das restantes que faz variar as duas últimas casas decimais.

Um exemplo desta variação da temperatura consoante a Mesh usada e mostrado, mas 2 figuras que se seguem.

Na figura 4.12 temos a simulação da epóxi TCER75 com 50um de espessura, de onde se verifica que a temperatura atingida pelo PIC é de 23,918°C.

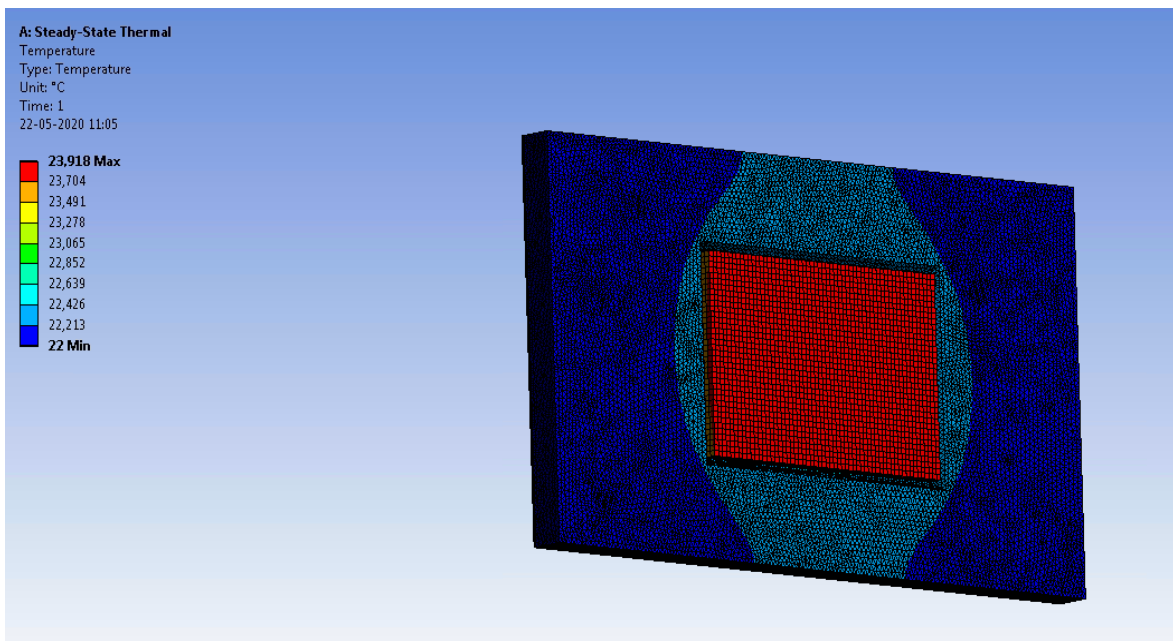


Figura 4.12 Simulação do conjunto com a epóxi TCER75 com uma espessura de 50um

Na figura 4.13 temos a mesma simulação só com a alteração de termos uma Mesh mais “grossa”, ou seja, com um menor número de elementos.

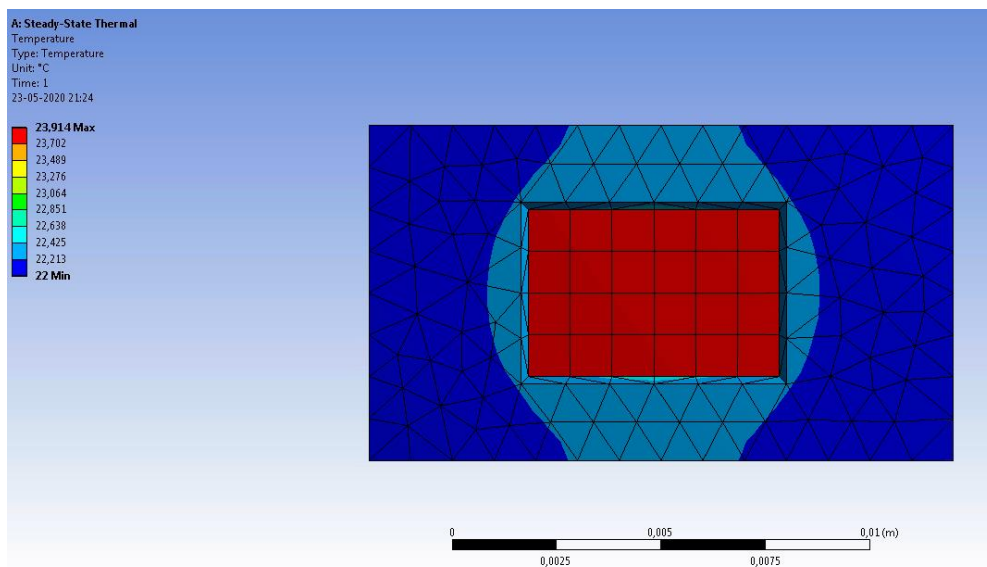


Figura 4.13 Simulação do conjunto com a epóxi TCER75 com uma espessura de 50um com uma Mesh mais “grossa”

Nesta situação a temperatura atingida já foi de 23,914°C, ou seja, existe uma diferença de 4 milésimas. Este valor não tem impacto para aquilo que se pretende estudar, mas faz surgir questões numéricas que não correspondem à situação prática.

4.5 Montagem laboratorial dos testes térmicos realizados

De forma a obter dados experimentais da temperatura atingida pelo conjunto TEC+Holder+PIC simulado, e verificar o impacto que a temperatura tem, nas condições de funcionamento, realizou-se a montagem laboratorial que se apresenta na figura 4.15 e cujo diagrama de blocos, representativo da montagem realizada se apresenta na figura 4.14.

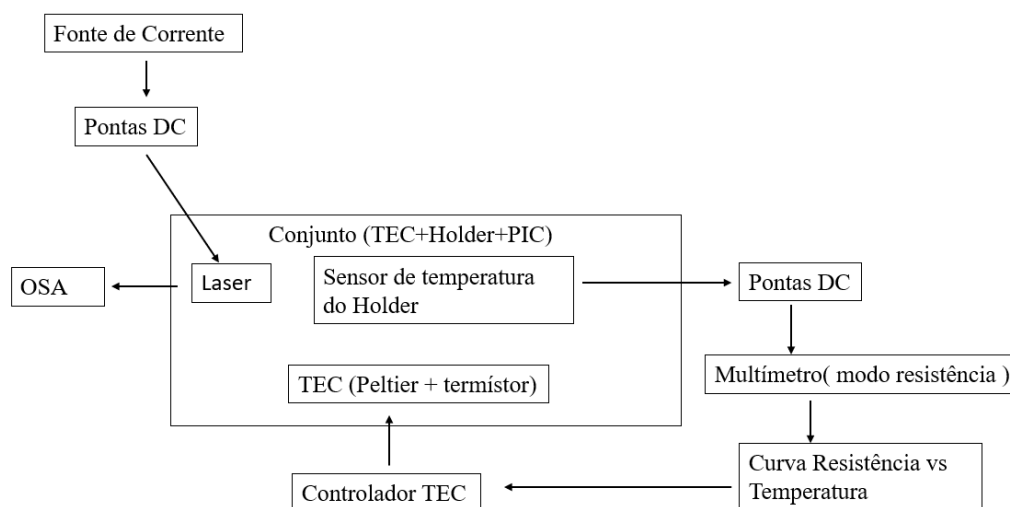


Figura 4.14 Diagrama de blocos da montagem implementada

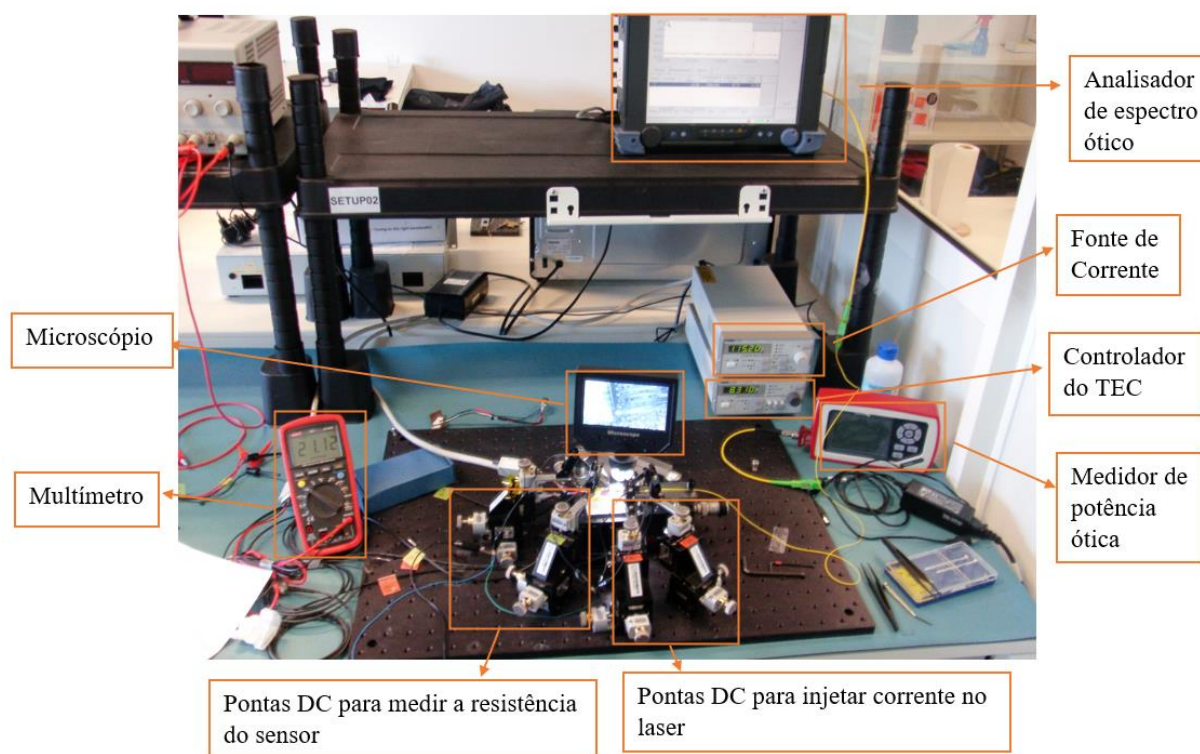


Figura 4.15 Montagem laboratorial

4.5.1 Descrição dos testes, resultados e análise de resultados

4.5.1.1 Caracterização do sensor de temperatura

O primeiro teste passou pela caracterização do sensor de temperatura presente na superfície do Holder. Estes sensores apresentam uma resistência diferente, dependente da temperatura a que se encontram. Assim para obter a temperatura a que se encontra o conjunto Holder+PIC. Nesta situação considera-se que a temperatura do Holder é igual a temperatura do PIC uma vez que o Holder é um excelente condutor térmico. É necessário obter a curva Resistência em função da Temperatura. Para isso variou-se a temperatura de 5 em 5 graus desde 15°C até 75°C e registou-se a variação da resistência apresentada pelo sensor.

Estes resultados são apresentados na figura 4.16. A temperatura foi variada com recurso ao TEC que possui um sensor de temperatura do tipo NTC na sua superfície onde se encontra assente o Holder e permite fazer a realimentação para o controlador do TEC, onde se define

a temperatura desejada. No Controlador do TEC define-se a temperatura, inserindo o valor de uma resistência, que por sua vez equivale a uma temperatura.

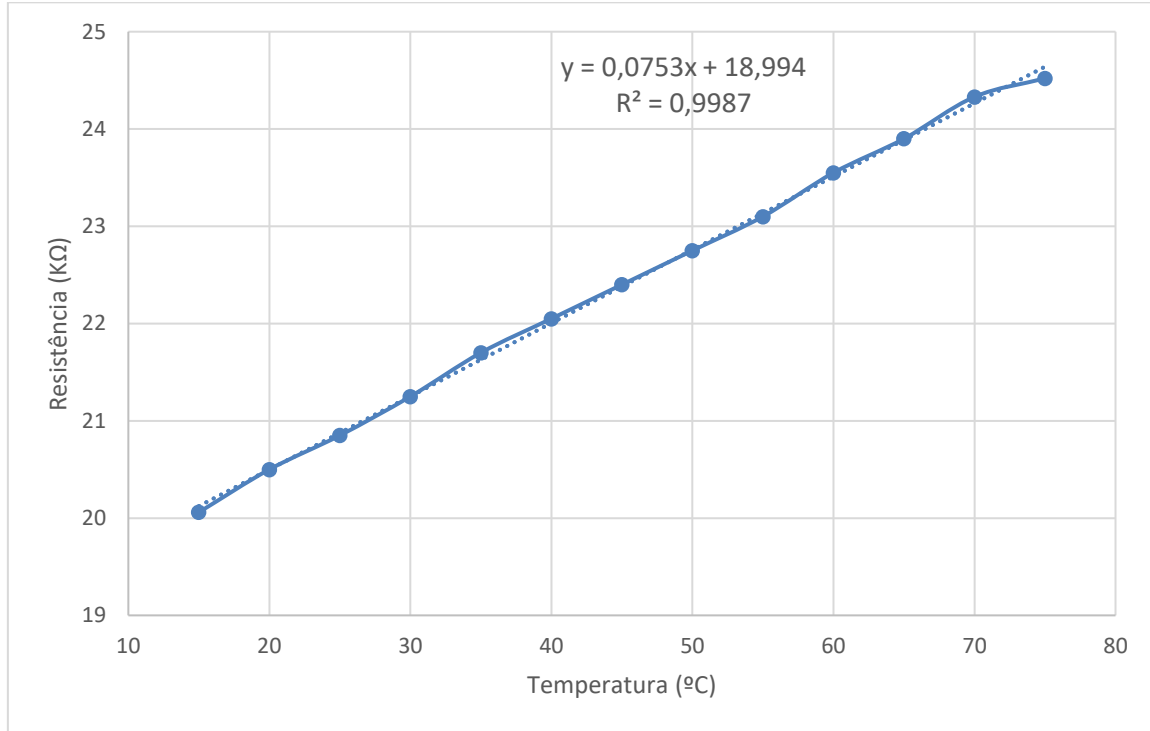


Figura 4.16 Linearização da relação Temperatura vs Resistência

Com um coeficiente de correlação de 0,9987 conclui-se que existe uma relação muito próxima da linear entre Temperatura e Resistência. O declive da reta apresentada na figura 3.16, representa a sensibilidade, que é de aproximadamente $75\Omega/^{\circ}\text{C}$. Deste modo pode-se obter a temperatura a que está o PIC, sabendo a resistência lida no multímetro. Para isso calcula-se a função inversa, da função apresentada no gráfico, isto é, a Temperatura em função da Resistência, que é dada pela seguinte equação:

$$T = \frac{18,994 - R}{0,0753} \quad (4.2)$$

Sendo R a o valor da resistência obtida através do multímetro e T a temperatura a que se encontra o conjunto Holder+PIC. Na figura 4.17 é visível através do microscópio o sensor de temperatura do tipo RTD, isto é, uma termoresistência. Na figura 4.17 à direita é possível observar o mesmo sensor na presença de condensação, que ocorre sempre que definimos no controlador do TEC uma temperatura abaixo da temperatura ambiente.



Figura 4.17 Sensor RTD sem condensação (à esquerda) e com condensação (à direita)

4.5.1.2 Evolução da temperatura com e sem TEC

Com o TEC desligado e com o conjunto TEC+Holder+PIC à temperatura ambiente, polarizou-se um laser do PIC com uma corrente de 115 mA. Através do sensor caracterizado no ponto anterior, registou-se a temperatura em intervalos de 10 segundos. Após a temperatura estabilizar ligou-se o controlador do TEC e definiu-se a temperatura para 15°C, e registou-se novamente a evolução da temperatura até esta estabilizar novamente. A evolução da temperatura ao longo do intervalo de observação é apresentada na figura seguinte.

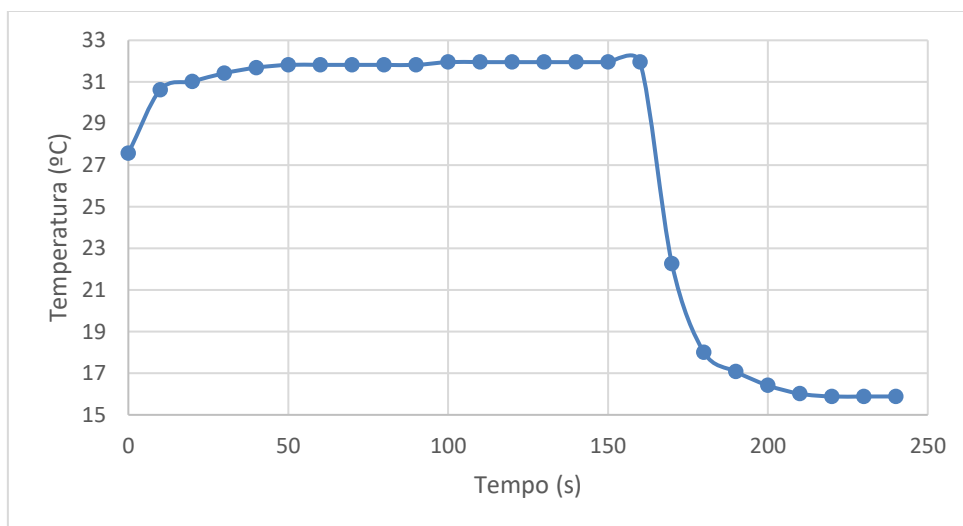


Figura 4.18 Evolução da temperatura ao longo de 4 minutos

No instante 0 segundos o PIC encontra-se a temperatura de 27,5°C. Neste mesmo instante a fonte de corrente foi ligada e observa-se um aumento de temperatura até esta estabilizar em 31,9°C ao fim de 100 segundos. A potência dissipada pelo laser provoca uma variação

de temperatura de 4,4°C. A partir do instante 160 segundos o controlador do TEC é ligado é verifica-se uma queda abrupta da temperatura até esta estabilizar em 15,8°C ao fim 50 segundos. Apesar de no gráfico só estar a evolução da temperatura até 4 minutos o PIC não desce dos 15,8°C lidos indiretamente pelo sensor presente no Holder. Isto deve-se a dois fatos primeiro o termístor que fornece a realimentação e o sensor do qual estamos a ler a temperatura estarem separados pela camada de silício do Holder, que apesar de ser um excelente condutor de temperatura, também representa uma resistência térmica. E em segundo o controlador do TEC que implementa um controlador do tipo PID estar constantemente a tentar minimizar o erro sugere que o TEC não esta exatamente a 15°C.

4.5.1.3 Impacto da temperatura no comprimento de onda

A importância da utilização de um TEC para controlar a temperatura do conjunto Holder+PIC deve-se ao fato, já mencionado, que os componentes óticos são suscetíveis à variação de temperatura. Para estudar o efeito que a variação da temperatura provoca no comprimento de onda de um laser, realizaram-se dois testes.

Para efetuar os testes alinhou-se uma fibra à saída do guia de onda do mesmo laser usado no ponto anterior. Primeiramente polarizou-se o laser com uma corrente de 80 mA, e atuando no TEC variou-se a temperatura entre 20 e 50°C, em intervalos de 5°C e registou-se através do analisador de espectro o comprimento de onda emitido pelo laser. De seguida alterou-se a corrente de polarização para 115mA e fez-se a mesma variação de temperatura. Os resultados obtidos são apresentados na figura seguinte.

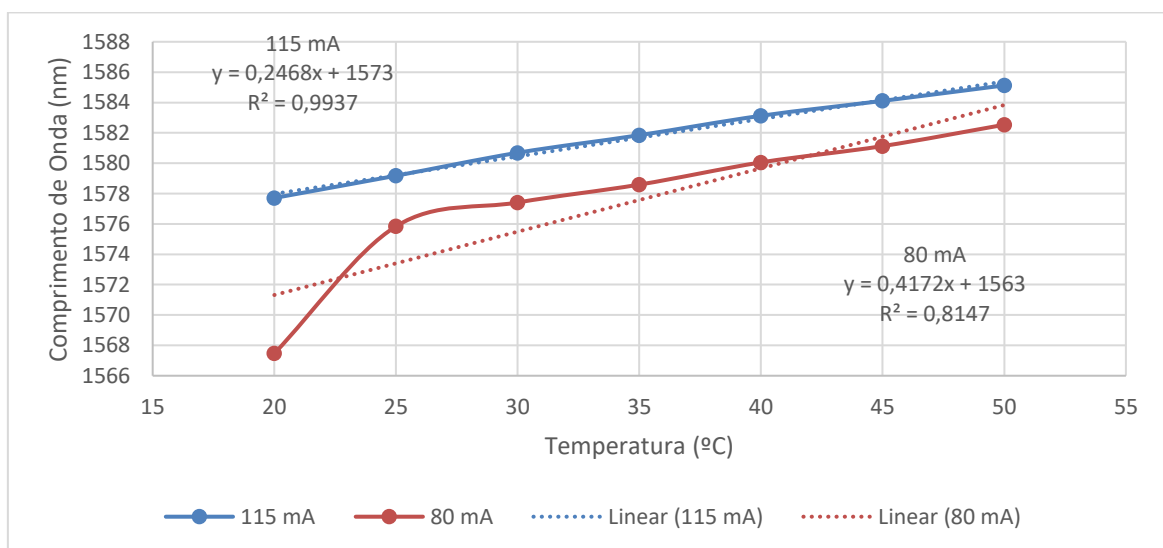


Figura 4.19 Comprimento de onda vs Temperatura

A primeira observação é que o comprimento de onda tende a aumentar, com o aumento da temperatura. Para uma temperatura de 20°C e uma corrente de polarização de 80mA, temos o laser a emitir à 1567nm, que é o comprimento de onda para o qual este foi desenhado. Com um aumento de temperatura de 5°C, o comprimento de onda do laser sofre um deslocamento de 8.3nm. A partir deste ponto a variação entre temperatura e comprimento de onda, apresenta uma relação aproximadamente linear com o comprimento de onda a aumentar cerca de 1.3nm por cada 5°C de aumento de temperatura.

Com o laser polarizado para 115mA este apresenta um comprimento de onda à 20°C, diferente daquele para o qual este foi desenhado. O que significa que a corrente de polarização também faz variar o comprimento de onda. Deste modo, um laser é desenhado para operar a uma determinada temperatura, com um uma dada corrente de polarização. Neste caso também se observa um aumento linear entre temperatura e comprimento de onda de 1.2nm por cada 5°C de aumento de temperatura.

4.6 Conclusão

No presente capítulo foi simulado o modelo de um PIC, apenas com os componentes ativos, que nos permitiu verificar que as regras de desenho térmicas foram seguidas, uma vez que não se verificou interferência térmica entre componentes. Simulou-se e foi apresentado a relação entre espessura da epóxi e temperatura do PIC, para várias epóxis. Por fim, verificou-se em laboratório a influência da temperatura no comportamento de um laser.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalho Futuro

Este capítulo constitui o último da dissertação, e consiste em dois pontos. No primeiro ponto são tiradas as conclusões do trabalho apresentado. No segundo ponto é proposto trabalho a desenvolver no seguimento do trabalho descrito neste documento.

5.1 Conclusão

O constante crescimento das comunicações óticas, veio acelerar a necessidade de ter ótica integrada, com as vantagens de redução de custo, espaço ocupado e potência consumida, que daí advém. Neste momento um dos maiores problemas da ótica integrada é o seu encapsulamento. Nesta dissertação foram estudadas duas vertentes do encapsulamento, o encapsulamento elétrico e térmico. No capítulo 2 foi apresentado o estado da arte das três vertentes de encapsulamento de um circuito ótico integrado.

Assim, o capítulo terceiro deste documento foca-se no encapsulamento elétrico e tem como objetivo chegar às regras de desenho de linhas coplanares e diferenciais num substrato de silício. Estas linhas desempenham a função de ligar o PIC à eletrónica externa a este. Das simulações realizadas conclui-se que as variáveis comprimento e largura são as que mais influenciam o comportamento das linhas coplanares e diferenciais. Enquanto que outras variáveis como largura da linha de massa e distância entre linhas pouco impacto têm na transmissão e reflexão das linhas coplanares. O mesmo impacto pouco significativo também se verifica no caso no espaçamento entre linhas e pares de linhas para as linhas diferenciais.

Das linhas impressas e testadas pode-se corroborar, apesar da diferença entre resultados simulados e medidos, tudo o que foi concluído através de simulação para as linhas coplanares. O mesmo não se pode dizer quanto aos resultados das linhas diferenciais, uma vez que apenas para seis linhas e apesar da discrepância com os resultados simulados temos valores aceitáveis. Destas seis linhas constatou-se que o impacto na transmissão e reflexão é muito pequeno quando se altera a distância entre linhas em 30 μm .

O quarto capítulo foca-se no encapsulamento térmico, e começa por mostrar através da simulação térmica de um modelo de um PIC, que as regras de desenho térmico foram cumpridas, pois não se verifica interferência térmica entre componentes ativos. O objetivo

com este capítulo é estudar o impacto da espessura da camada de epóxi usada para a montagem entre o TEC e o Holder e entre o Holder e o PIC, na temperatura final do PIC. Para além do estudo da espessura da epóxi também é estudado o uso de diferentes epóxis no conjunto descrito. Das simulações realizadas pode-se concluir que a relação entre espessura da epóxi e temperatura do PIC é linear, e se pretendermos a máxima dissipação de potência devemos usar uma epóxi com elevada condutividade térmica de forma a garantir contacto térmico ideal.

5.2 Trabalho Futuro

Na sequência do trabalho apresentado, os seguintes tópicos podem ter interesse em ser seguidos:

- Obter as regras de desenho para outro tipo de linhas no mesmo substrato de silício;
- Desenhar uma PCB específica para a realização de testes térmicos no PIC, de modo a que seja possível testar todos os componentes;
- Desenvolver software específico que permita recolher automaticamente os dados de temperatura, obtidos a partir da leitura da resistência de um multímetro.

Bibliografia

- [1] “Wire Bonding & Die Attachment.” [Online]. Available: <https://micropt.com/wire-bonding.htm>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [2] N. Pavarelli, J. S. Lee, and P. A. O’Brien, “Packaging challenges for integrated silicon photonic circuits,” *Silicon Photonics Photonic Integr. Circuits IV*, vol. 9133, p. 91330F, 2014, doi: 10.1117/12.2058559.
- [3] L. Carroll *et al.*, “Photonic packaging: Transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices,” *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 12, pp. 1–21, 2016, doi: 10.3390/app6120426.
- [4] A. Teixeira, M. Lima, and F. Rodrigues, “Encapsulamento de circuitos óticos integrados - aproximação agnóstica,” Aveiro, 2019.
- [5] “Packaging-Design-Rules-EPIC-DRAFT-March-2015.” .
- [6] M. Azadeh, *Fiber optics engineering*, vol. 47, no. 07. 2010.
- [7] U. H. P. Fischer, “Opto-Electronic Packaging,” *Optoelectron. - Adv. Mater. Devices*, 2013, doi: 10.5772/51626.
- [8] U. H. P. Fischer-Hirchert, *Photonic packaging sourcebook: Fiber-chip coupling for optical components, basic calculations, modules*. 2015.
- [9] P. Karioja, J. Ollila, V. P. Putila, K. Keranen, J. Hakkila, and H. Kopola, “Comparison of active and passive fiber alignment techniques for multimode laser pigtailling,” *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, pp. 244–249, 2000, doi: 10.1109/ECTC.2000.853157.
- [10] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, and I. P. Address, “Lickbased flexible,” vol. 167, pp. 1–5.
- [11] “Flip-Chip Assembly.” [Online]. Available: <https://www.eesemi.com/flipchipassy.htm>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [12] Z. Zhang, S. Luo, and C. P. Wong, “Flip chip underfill: Materials, process, and reliability,” *Adv. Flip Chip Packag.*, vol. 9781441957, no. 3, pp. 155–199, 2013, doi:

10.1007/978-1-4419-5768-9_5.

- [13] J. S. Lee *et al.*, “Meeting the Electrical, Optical, and Thermal Design Challenges of Photonic-Packaging,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 6, pp. 409–417, 2016, doi: 10.1109/JSTQE.2016.2543150.
- [14] I. Rosu, R. R. Waveguide, R. R. Waveguide, C. Line, R. M. Barrett, and A. F. Cambridge, “Microstrip , Stripline , and CPW Design,” 1952, doi: 11.
- [15] R. N. Simons, *Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems*, vol. 7. 2001.
- [16] “Substrate.” [Online]. Available: <https://whatis.techtarget.com/definition/substrate> [Accessed: 30-Mar-2020].
- [17] “DIELECTRIC MATERIALS.” [Online]. Available: <http://www.capacitorguide.com/dielectric-materials/> [Accessed: 29-Mar-2020].
- [18] T. Brief, “Tech Brief Selecting the Right Substrate Materials for High Power Electronics.”
- [19] P. McNeil, “Introduction to RF & Microwave Substrates & Base Materials,” 2019.
- [20] “FR-4.” [Online]. Available: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/fr-4> [Accessed: 30-Mar-2020].
- [21] D. Sheet, “RO3000 ® Series High Frequency Circuit Materials Features and Benefits : Typical Applications :”
- [22] “Differential Pairs” [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/differential-pairs-what-advantages-design-ritesh-kanjee> [Accessed: 16-Mar-2020].
- [23] “Advantages of differential signaling” [Online] Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-differential-signaling.html> [Accessed: 10-Mar-2020].
- [24] “What IS Differential Signaling.” [Online] Available: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/what-is-differential-signaling/> [Accessed: 10-Mar-2020].
- [25] P. Chauhan, Z. W. Zhong, and M. Pecht, “Copper wire bonding concerns and best practices,” *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 8, pp. 2415–2434, 2013, doi:

10.1007/s11664-013-2576-1.

- [26] E. Spaan, E. Ooms, W. D. Van Driel, C. A. Yuan, D. G. Yang, and G. Q. Zhang, “Wire bonding the future: A combined experimental and numerical approach to improve the Cu-wire bonding quality,” *2010 11th Int. Conf. Therm. Mech. Multi-Physics Simulation, Exp. Microelectron. Microsystems, EuroSimE 2010*, pp. 1–4, 2010, doi: 10.1109/ESIME.2010.5464572.
- [27] S. Sharma, V. K. Dwivedi, and S. N. Pandit, “A review of thermoelectric devices for cooling applications,” *Int. J. Green Energy*, vol. 11, no. 9, pp. 899–909, 2014, doi: 10.1080/15435075.2013.829778.
- [28] A. A. Systems, “Advanced {Design} {System},” 2015. [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-3326EN.pdf>.