

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



HENRIQUE MÜLLER VASCONCELOS

IDENTIFICAÇÃO POR  
RADIOFREQUÊNCIA UTILIZANDO  
DISPOSITIVOS A ONDAS ACÚSTICAS  
DE SUPERFÍCIE

RECIFE, FEVEREIRO DE 2011.

HENRIQUE MÜLLER VASCONCELOS

IDENTIFICAÇÃO POR  
RADIOFREQUÊNCIA UTILIZANDO  
DISPOSITIVOS A ONDAS ACÚSTICAS  
DE SUPERFÍCIE

**Dissertação** submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**

ORIENTADOR: PROF. EDVAL J. P. SANTOS, PH.D.

Recife, Fevereiro de 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Henrique Müller Vasconcelos

**Identificação por radiofrequência utilizando  
dispositivos a ondas acústicas de superfície**

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco’.

Prof. Raphael D. Lins, Ph.D.  
Coordenador do Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

Prof. Edval J. P. Santos, Ph.D.  
Orientador  
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Hélio Magalhães de Oliveira, Dr.  
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Antonio Sergio Bezerra Sombra, Dr.  
Universidade Federal do Ceará

25 de Fevereiro de 2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

**V331i Vasconcelos, Henrique Müller.**  
Identificação por radiofrequência utilizando dispositivos a ondas acústicas de superfície / Henrique Müller Vasconcelos. - Recife: O Autor, 2011.  
122f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador : Prof. Edval J. P. Santos, Ph.D.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Apêndices.

**1. Engenharia Elétrica. 2. RFID. 3. Etiquetas Passivas. 4. Ondas Acústicas de Superfície. 5. Radiofrequência. 6. Manufatura de Dispositivos I. Santos, Edval J. P. (Orientador). II. Título.**

**621.3 CDD (22.ed)**

**UFPE/BCTG-142/2011**

Ao meu único irmão,  
**Marcos Müller,**  
que tanto admiro  
e sempre me incentivou.

# AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos aos meus pais, **Armando** e **Ana**, pelo apoio e confiança durante toda esta fase da minha vida. Aos meus colegas de estudo: Filipe Távora, Diego Dias, Gilson Alves, Tallita Sobral, Leonardo Bruno, André Dantas, Diogo Roberto, Fabiano Gabriel, William Guterres e Marco Antônio Diniz. Meus agradecimentos aos professores Geraldo Torres, Marcelo Cavalcanti, Cristiano Araújo, João Paulo Cerquinho, Edval Santos e Antonio Belfort, que lecionaram as disciplinas por mim cursadas durante o mestrado. E ainda aos membros da banca examinadora: Prof. Antonio Sérgio Bezerra Sombra e o Prof. Hélio Magalhães de Oliveira, pelas observações muito pertinentes que me ajudaram a melhorar o manuscrito final.

Obrigado ao professor Edval J. P. Santos por me orientar nesta dissertação e estimular minha vida acadêmica e profissional.

Agradecimento especial à minha namorada, Belinha, que me deu carinho e o equilíbrio necessário, entre trabalho e lazer, quando mais precisei, fazendo-me crescer em todos os sentidos. Muito obrigado, meu Amor.

HENRIQUE MÜLLER VASCONCELOS

*Universidade Federal de Pernambuco*

*25 de Fevereiro de 2011*

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA  
UTILIZANDO DISPOSITIVOS A ONDAS ACÚSTICAS  
DE SUPERFÍCIE**

**Henrique Müller Vasconcelos**

Fevereiro/2011

**Orientador:** Prof. Edval J. P. Santos, Ph.D.

**Área de Concentração:** Eletrônica

**Palavras-chaves:** RFID; etiquetas passivas; ondas acústicas de superfície; radiofrequência, manufatura de dispositivos

**Número de páginas:** 122

Nesta dissertação é apresentado um estudo sobre o projeto dos elementos que compõem a etiqueta a ondas acústicas de superfície (OAS) para identificação por radiofrequência (RFID). Também foram desenvolvidas as etapas de processos de microfabricação necessárias e a metodologia para caracterização utilizando impedancímetro, analisador de rede e analisador de espectro. Identificação por radiofrequência é uma tecnologia baseada na leitura de dispositivos, normalmente chamados de etiquetas, utilizando ondas de radiofrequência. O sistema RFID é constituído basicamente por um conjunto de etiquetas e por uma ou mais unidades de leitura. Cada etiqueta é responsável por carregar um código único de identificação. Por utilizar ondas de rádio, o mecanismo de leitura dispensa a necessidade de um contato visual livre de obstáculos entre o leitor e a etiqueta como ocorre no caso óptico. Essencialmente, a etiqueta RFID OAS funciona como uma linha de retardo, refletindo parcialmente o sinal enviado pelo interrogador. A identidade retorna na forma de um padrão de ecos seguindo um método de codificação baseado na disposição de estruturas metálicas refletoras de ondas acústicas sobre a superfície de um substrato piezoelétrico. Por fim, uma discussão sobre a integração das etiquetas e interrogadores em redes de sensores, seja Internet (TCP/IP) ou rede de celular (GSM) via protocolo *General Packet Radio Service* (GPRS).

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

## **RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION USING SURFACE ACOUSTIC WAVES DEVICES**

**Henrique Müller Vasconcelos**

February/2011

**Supervisor:** Prof. Edval J. P. Santos, Ph.D.

**Area of Concentration:** Electronic

**Keywords:** RFID, passive tags, surface acoustic waves, radio frequency, device manufacturing

**Number of pages:** 122

This dissertation presents the design of surface acoustic waves (SAW) tags for radio frequency identification (RFID). It has also been developed the microfabrication steps required and the characterization methodology using an impedance meter, a network analyzer and a spectrum analyzer. Radio frequency identification is a technology based on the reading of devices, often called tags, by means of radio frequency waves. The RFID system consists basically of a set of tags and in one or more reading units. Each tag is responsible for carrying an unique identification code. Because it uses radio waves, the reading mechanism dismisses an unobstructed line-of-sight contact between the reader and the tag unlike the optical readers. Essentially, the SAW RFID tag works like a delay line partially reflecting the interrogation signal. The identity returns as a pattern of echoes according to an encoding method based on the positions of metallic acoustic wave reflecting structures upon a piezoelectric substrate. Hence, the SAW RFID tag is a truly passive device since it doesn't require any DC power. Finally, a discussion about the integration of tags and readers in a sensor network, by Internet (TCP/IP) or mobile network (GSM) by General Packet Radio Service protocol (GPRS).



# LISTA DE FIGURAS

1.1	Princípio de operação de uma etiqueta RFID utilizando ondas acústicas de superfície. . . . .	3
1.2	Recepção do sinal de resposta da etiqueta no domínio do tempo. . . . .	3
1.3	Etiqueta baseada na disposição de transdutores num mesmo barramento. . . .	6
1.4	Etiqueta multicanal com refletores em ambos os lados do transdutor. . . . .	6
1.5	Transdutor do tipo unidirecional. Os refletores são estrategicamente posicionados de forma a refletir as ondas acústicas que se propagam no sentido indesejado. . . . .	7
1.6	Transdutor do tipo dente duplo. . . . .	7
1.7	Integração de interrogadores com rede celular e/ou Internet. . . . .	8
2.1	Estruturas que compõem a etiqueta RFID OAS. . . . .	10
2.2	Esquemático do transdutor interdigitado padrão. . . . .	11
2.3	Representação série e paralelo para o transdutor interdigitado. . . . .	12
2.4	Estrutura interdigitada gerada para o FASTCAP . . . . .	15
2.5	Dependência de $C_T$ com a valor de $N$ . . . . .	16
2.6	Dependência de $C_T$ com a valor de $L$ . . . . .	17
2.7	Ilustração do efeito da difração das ondas acústicas e o correspondente limite de Fresnel. . . . .	18
2.8	Modos de operação da estrutura refletora. . . . .	20
2.9	Tipos comuns de estruturas refletoras. . . . .	20
2.10	Codificação por amplitude dos pulsos. . . . .	22
2.11	Codificação por posição no tempo dos pulsos. . . . .	23
2.12	Codificação por fase dos pulsos. . . . .	23
2.13	Sinal de interrogação no domínio do tempo e no domínio da frequência. Note que o espectro $X(j\omega)$ corresponde exatamente ao teorema da modulação. . . .	26
2.14	Posicionamento das estruturas refletoras na grade. . . . .	28
2.15	Circuito elétrico equivalente acoplado com uma antena. . . . .	30
2.16	Circuito para casamento de impedâncias. . . . .	30
2.17	Perdas envolvidas na interrogação da etiqueta. . . . .	31
2.18	Perdas por propagação eletromagnética no vácuo. . . . .	33
2.19	Etiquetas com alocação de diferentes faixa de tempo. . . . .	35
2.20	Espectro de frequência com etiquetas alocadas em diferentes bandas. . . . .	36

2.21	Etiquetas OAS operando em frequências diferentes. Esta estratégia implica valores de $\lambda_0$ diferentes para cada etiqueta. . . . .	36
2.22	Estrutura do tipo identidade. . . . .	37
2.23	Estrutura do tipo linha de retardo com eletrodos refletores. . . . .	38
2.24	Etiquetas RFID OAS projetadas. . . . .	40
2.25	Tamanho da grade refletora. . . . .	45
3.1	Fluxograma típico de fabricação de etiquetas RFID OAS. . . . .	48
3.2	Etiqueta RFID desenhada no <i>IC Station</i> da <i>Mentor Graphics</i> . . . . .	49
3.3	Máscara litográfica com estruturas de linha de retardo com dimensão crítica de $10 \mu\text{m}$ . . . . .	49
3.4	Máscara litográfica com etiquetas de identidade com dimensão crítica de $10 \mu\text{m}$ . . . . .	50
3.5	Máscara litográfica com etiquetas de identidade com dimensão crítica de $5 \mu\text{m}$ . . . . .	50
3.6	Arquivo de uma etiqueta projetada importada no COMSOL para simulações multifísicas. . . . .	51
3.7	Simulação do processo de fabricação de uma estrutura de linha de retardo projetada. . . . .	52
3.8	Pressão interna da câmara durante a formação do vácuo em função do tempo. . . . .	55
3.9	Velocidade de rotação para aplicação da fotorresina. . . . .	58
3.10	Sequência de processos da técnica <i>lift-off</i> ideal. . . . .	66
3.11	Técnica <i>lift-off</i> bem sucedida. . . . .	66
3.12	Inspeção visual das estruturas fabricadas. . . . .	67
3.13	Perdas da largura de linha ao longo dos processos. . . . .	68
3.14	Estrutura interdigitada fabricada de dispositivo final. . . . .	69
3.15	Estruturas com níveis de corrosão aceitáveis. . . . .	69
3.16	Perda das definições nas bordas. . . . .	70
3.17	Corrosão exagerada do alumínio. . . . .	70
3.18	Defeitos de fabricação. . . . .	71
4.1	8714ET - <i>RF Network Analyzer</i> usado na caracterização dos dispositivos OAS. . . . .	72
4.2	Transmissão obtida da estrutura de linha de retardo com $N = 80$ e $\lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ . Note que a resposta em frequência é semelhante à de um filtro passa-faixa. . . . .	73
4.3	Reflexão obtida da estrutura de linha de retardo com $N = 80$ e $\lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ . . . . .	74
4.4	Bandas passantes em dispositivos tipo linha de retardo com $\lambda = 40 \mu\text{m}$ para transdutores com número de pares de dentes distintos. Note que a frequência central coincide para os dispositivos fabricados. . . . .	75
4.5	Coeficientes de reflexão para duas etiquetas RFID com transdutor padrão fabricadas com $\lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ . A banda passante, identificada pela queda de refletividade na frequência de operação, é mais estreita para o transdutor com maior número de pares de dentes. . . . .	76

4.6	Captura dos coeficientes de reflexão sem o uso da função de média do analisador de rede. Observando também a Figura 4.5, note que as pequenas variações, no interior da banda passante, não desaparecem com o uso da função de média, pois não são sinais aleatórios de ruído. . . . .	76
4.7	Indícios de reflexões de ondas acústicas causadas pelas estruturas refletoras das etiquetas. . . . .	77
4.8	Coefficiente de reflexão para uma etiqueta RFID com transdutor padrão fabricada com $\lambda_0 = 50 \mu\text{m}$ . . . . .	77
4.9	Coefficiente de reflexão dos sensores do Temptrackr. . . . .	78
4.10	4294A - <i>Precision Impedance Analyzer</i> da <i>Agilent</i> usado na medição das capacitâncias estáticas das estruturas interdigitadas. . . . .	79
4.11	Placa utilizada para as calibrações de circuito aberto, curto e carga do impedancímetro de precisão. . . . .	80
4.12	Medição da capacitância estática de uma estrutura fabricada em substrato de vidro. . . . .	80
4.13	Imagem de um transdutor visto por microscópio óptico <i>Leitz Laborlux 11 POL S</i> com objetiva <i>Leica</i> de 40x. A escala observada possui divisões de $5 \mu\text{m}$ , o que implica uma estrutura com $a/p = 0,375$ , aproximadamente. . . . .	81
4.14	Capacitâncias das estruturas fabricadas sobre o niobato de lítio medidas pelo impedancímetro de precisão. . . . .	82
4.15	FSQ8 - <i>Signal Analyzer</i> utilizado na caracterização do mecanismo de leitura do kit da <i>Sengenuity</i> . . . . .	83
4.16	Pontos experimentais e curvas teóricas da Equação (2.20) com $f_0 = 431,2$ MHz, $G_t G_r = 0,02$ e $n = 2$ . . . . .	84

# LISTA DE TABELAS

1.1	Parâmetros importantes na escolha do material piezoelétrico. . . . .	5
2.1	Palavras-código identificadoras . . . . .	29
2.2	Bandas de frequências ISM . . . . .	31
2.3	Coefficientes de atenuação no vácuo e no ar. . . . .	32
2.4	Etiquetas com palavras-código ortogonais no tempo. . . . .	37
2.5	Resumo das equações de projeto. . . . .	38
2.6	Definição da grade refletora. . . . .	39
2.7	Estruturas da matriz A. . . . .	40
2.8	Estruturas da matriz B. . . . .	41
2.9	Estruturas da matriz C. . . . .	41
2.10	Resultados dos cálculos da largura de banda e do comprimento das estruturas projetadas, utilizando dois refletores de código (NRC = 2) e três faixas de tempo (NFT = 3). . . . .	43
2.11	Resultados dos cálculos da impedância para casamento e do limite de Fresnel correspondente das estruturas projetadas, utilizando 200 nanômetros para a espessura do filme metálico de alumínio ( $h = 200$ nm). . . . .	44
3.1	Procedimento empregado na limpeza das lâminas. . . . .	52
3.2	Parâmetros empregados na evaporação. . . . .	56
3.3	Parâmetros do material a ser evaporado. . . . .	57
3.4	Parâmetros empregados na aplicação da fotorresina. . . . .	59
3.5	Parâmetros empregados no cozimento leve. . . . .	60
3.6	Parâmetros empregados na exposição ultravioleta. . . . .	61
3.7	Parâmetros empregados na revelação. . . . .	62
3.8	Parâmetros empregados no recozimento. . . . .	62
3.9	Parâmetros empregados na corrosão do alumínio. . . . .	65
3.10	Procedimento empregado na remoção da fotorresina restante. . . . .	65
4.1	Cálculos da frequência central e da largura de banda das estruturas. . . . .	74
4.2	Medidas da capacitância estática em transdutores padrão com $L = 5$ mm e $h = 200$ nm. . . . .	81
4.3	Constantes dielétricas dos materiais usados como substrato. . . . .	82

# CONTEÚDO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	<b>Etiquetas RFID a Ondas Acústicas de Superfície</b>	2
1.1.1	Princípio de operação	2
1.1.2	Utilizando etiquetas RFID OAS como sensores	4
1.1.3	Geometrias para as etiquetas	5
1.2	<b>Integração de sistemas RFID em rede GSM e TCP/IP</b>	7
1.3	<b>Organização desta dissertação</b>	8
<b>2</b>	<b>PROJETO DE ETIQUETAS RFID A ONDAS ACÚSTICAS DE SUPERFÍCIE</b>	<b>10</b>
2.1	<b>Projeto do transdutor interdigitado</b>	11
2.1.1	Modelo do circuito elétrico equivalente para o transdutor	11
2.1.2	Cálculo da capacitância estática	14
2.1.3	Perdas ôhmicas nos dentes do transdutor	17
2.2	<b>Projeto da grade refletora</b>	18
2.2.1	Tipos de estruturas refletoras	19
2.2.2	Métodos de codificação da identidade	21
2.2.3	Posicionamento das estruturas na grade	24
2.3	<b>Acoplamento com antenas</b>	29
2.3.1	Casamento de impedâncias	30
2.3.2	Alcance de leitura	31
2.3.3	Estratégias para leitura de múltiplas etiquetas RFID OAS	34
2.4	<b>Estruturas projetadas para esta dissertação</b>	37
2.4.1	Escolha do substrato e frequência de operação	39
2.4.2	Cálculos de projeto das estruturas	42
2.5	<b>Considerações finais</b>	46
<b>3</b>	<b>ETAPAS DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ETIQUETAS RFID OAS</b>	<b>47</b>
3.1	<b>Desenho das máscaras litográficas</b>	49
3.2	<b>Preparação do substrato</b>	51
3.3	<b>Deposição de metal por evaporação</b>	52
3.3.1	Aderência	53
3.3.2	Estresse em filmes finos	53

<b>3.4</b>	<b>Processo fotolitográfico</b>	<b>56</b>
3.4.1	Aplicação da fotorresina	57
3.4.2	Cozimento leve	59
3.4.3	Exposição à luz ultravioleta	60
3.4.4	Revelação	61
3.4.5	Recozimento pós-revelação	62
<b>3.5</b>	<b>Corrosão do metal</b>	<b>62</b>
3.5.1	Corrosão úmida	64
<b>3.6</b>	<b>Remoção da fotorresina restante</b>	<b>65</b>
<b>3.7</b>	<b>A técnica <i>liftoff</i> de metalização</b>	<b>65</b>
<b>3.8</b>	<b>Inspeção visual</b>	<b>67</b>
3.8.1	Estruturas fabricadas	69
<b>3.9</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>70</b>
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS FABRICADAS</b>	<b>72</b>
4.1	O analisador de rede	72
4.2	O impedancímetro	79
4.3	O analisador de espectro	83
4.4	Considerações finais	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>85</b>
5.1	Contribuições	85
5.2	Trabalhos futuros	86
<b>Apêndice A</b>	<b>INTERFACE DE CONTROLE DOS EQUIPAMENTOS VIA GPIB</b>	<b>87</b>
A.1	Programa principal	87
A.2	Arquivo: 8714ET_functions.c	94
A.3	Arquivo: 4294A_functions.c	98
A.4	Arquivo: 8714ET.c	103
A.5	Arquivo: 4294A.c	104
<b>Apêndice B</b>	<b>GERADOR DE ESTRUTURAS INTERDIGITADAS PARA FASTCAP</b>	<b>106</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>		<b>118</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Identificação por radiofrequência (RFID) representa uma tecnologia baseada na leitura de dispositivos, conhecidos como etiquetas, utilizando ondas de radiofrequência para transferir dados. O sistema RFID é constituído basicamente por um conjunto de etiquetas e por uma ou mais unidades de leitura. Cada etiqueta é responsável por carregar um código único de identificação. Elas podem ser incorporadas em pessoas, animais ou objetos, com a finalidade de identificá-los ou monitorá-los automaticamente e são preferivelmente pequenas, robustas e de baixo custo. As unidades de leitura, também referidas como leitores ou interrogadores, são dispositivos mais complexos, maiores e normalmente conectados a uma rede ou um banco de dados. O mecanismo de leitura usando ondas de rádio dispensa a necessidade de um contato visual livre de obstáculos entre o leitor e a etiqueta. De forma geral, o sistema não requer a presença de um operador humano e múltiplas etiquetas podem ser lidas dentro do mesmo raio de alcance do interrogador.

Há uma variedade de frequências e técnicas para implementação de sistemas RFID. As etiquetas são tipicamente confeccionadas em tecnologia CMOS na forma de circuitos integrados. Embora este tipo de etiqueta seja adequado para várias aplicações, outras tecnologias são estudadas principalmente para resolver limitações impostas pela física dos semicondutores. A presente dissertação trata da tecnologia de dispositivos de ondas acústicas de superfície (OAS) para implementação de etiquetas RFID, com interessantes aplicabilidades na indústria.

## 1.1 Etiquetas RFID a Ondas Acústicas de Superfície

Essencialmente, uma etiqueta RFID OAS funciona como uma linha de retardo, refletindo parcialmente o sinal enviado pelo leitor. A identidade retorna na forma de um padrão de ecos devidamente espaçados seguindo um método de codificação. Como nos tradicionais dispositivos de OAS, apenas uma camada de metal sobre a superfície de um material piezoelétrico é geralmente necessária para a confecção da etiqueta. O processo de litografia óptica permite a definição dos padrões de metal de forma que as etiquetas possam ser projetadas para operar em frequências dentro da banda ISM com as devidas limitações requeridas de potência. A manufatura destes dispositivos utiliza equipamentos de tecnologias relativamente simples e de baixo custo para fabricação em massa.

É válido ressaltar que as maiores atrações das etiquetas RFID OAS não são limitadas apenas por serem mais simples e baratas do que aquelas baseadas em semicondutores de silício. Elas são dispositivos verdadeiramente passivos, cuja operação não requer um limiar de tensão para polarização do circuito interno. Além disso, são capazes de operar com boa estabilidade em ambientes severos e demandam menores níveis de potência do sinal irradiado pela unidade de leitura.

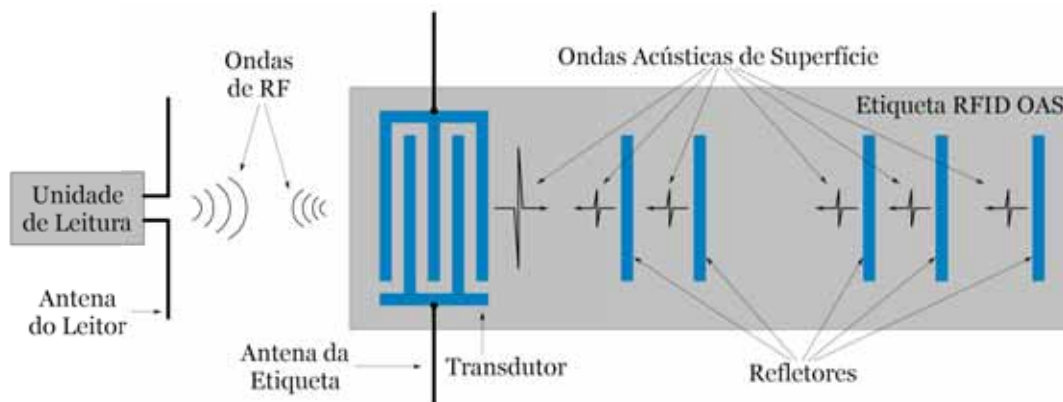
### 1.1.1 Princípio de operação

O fenômeno físico fundamental por trás dos dispositivos OAS é a piezoelectricidade [1]. A transdução entre um sinal elétrico e uma onda acústica é realizada por uma estrutura interdigitada em forma de pentes com dentes intercalados, depositada em uma única camada de metal sobre um substrato piezoelétrico. Uma distribuição de cargas nos terminais do transdutor interdigitado (TID) causa uma deformação no cristal gerando uma onda que se propaga acusticamente ao longo da superfície do material. O efeito reverso também é observado de maneira que uma deformação no material causa o aparecimento de uma distribuição de cargas nos eletrodos do transdutor.

Para fazer uma identificação, a antena da unidade de leitura irradia um pulso de interrogação que estimula a antena da etiqueta RFID acoplada à estrutura interdigitada. A onda acústica de superfície gerada propaga-se ao longo do substrato e interage com estruturas refletoras, como ilustrado na Figura 1.1. O posicionamento dos refletores obedece a um método de codificação e deve gerar um padrão único de ecos para cada etiqueta do sistema. O trem de pulsos de OAS é convertido novamente em um sinal elétrico pelo TID, irradiado pela an-

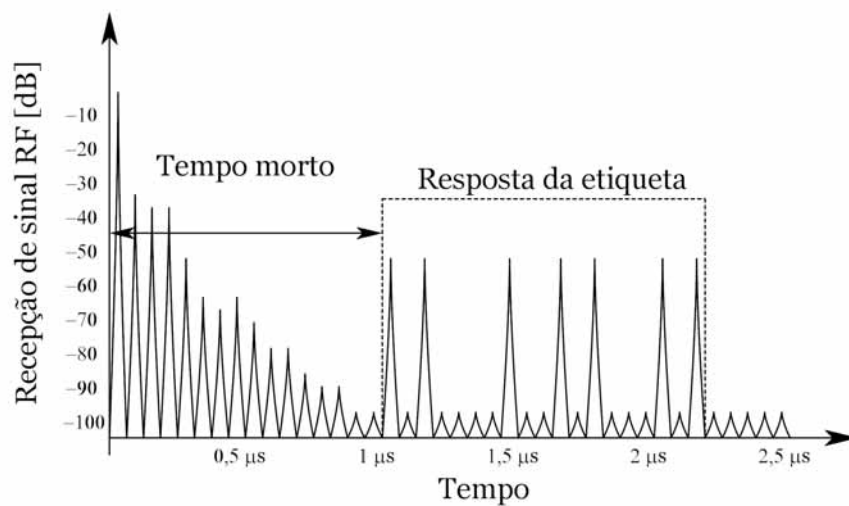


tena como onda eletromagnética para ser capturado pelo leitor. A etiqueta ainda reserva



**Figura 1.1:** Princípio de operação de uma etiqueta RFID utilizando ondas acústicas de superfície.

um tempo de retardo para o envio dos pulsos referido como *tempo morto*. Este retardo deve durar o suficiente para que as reflexões do pulso eletromagnético de interrogação no ambiente tenham decaído a níveis abaixo aos pulsos refletidos pela etiqueta. A recepção do sinal de resposta de uma etiqueta RFID OAS e o *tempo morto* podem ser observados no esboço da Figura 1.2.



**Figura 1.2:** Recepção do sinal de resposta da etiqueta no domínio do tempo.

### 1.1.2 Utilizando etiquetas RFID OAS como sensores

O uso de dispositivos de ondas acústicas de superfície para implementar as etiquetas RFID representa um grande potencial, não apenas para aplicações de identificação, mas também possibilita a medição de grandezas físicas ou químicas. Pela interação da OAS e do substrato com o ambiente é possível construir sensores de temperatura, pressão, viscosidade, fluxo, deslocamento, aceleração [2][3][4] ou de concentração de um elemento químico [5][6]. Desta forma, além de receber o código de identificação, o interrogador pode fazer leituras dos tempos de atrasos relativos dos pulsos de resposta e associá-los à grandeza sob medição. A sensibilidade dos sensores OAS é caracterizada pela forma que a grandeza física de interesse altera a velocidade,  $v$ , de propagação da onda acústica no substrato. Desta forma, o padrão de ecos recebido pela unidade de leitura é mantido o mesmo, porém expandido ou comprimido no tempo de acordo com a grandeza sob medição.

Como já mencionado, a natureza dos dispositivos estudados permite a leitura remota por ondas de rádio sem qualquer outra fonte de energia além da potência do pulso interrogador. Portanto, esses sensores se tornam muito especiais em medições singulares como ocorre em ambientes perigosos, radioativos ou inacessíveis. A habilidade de interrogação sem fio também representa uma importante vantagem sobre outros mecanismos em aplicações nas quais fios são inviáveis para alimentar e transferir dados como em objetos em movimento ou rotativos.

#### Substratos para sensores OAS de temperatura

A sensibilidade térmica dos dispositivos OAS é entendida examinando os coeficientes de temperatura dos materiais [7][8]. O *coeficiente de expansão térmica* (CET) descreve a mudança na distância,  $l$ , entre dois pontos do substrato devido à expansão térmica do material. O *coeficiente de temperatura do retardo* (CTR) indica a mudança no tempo de retardo,  $\tau$ , na propagação da onda acústica entre dois pontos devido à variação de temperatura. O *coeficiente de temperatura da velocidade* (CTV) expressa a mudança na velocidade da onda acústica devido à variação térmica. Os três coeficientes podem ser expressos por

$$\text{CTR} = \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial T} \quad [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}]$$

$$\text{CTV} = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial T} \quad [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}]$$

$$CET = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} \quad [ppm/^\circ C]$$

de forma que são relacionados por  $CTR = CET - CTV$ .

Algumas orientações de cortes de materiais para substrato, como o ST do quartzo, possuem um efeito de cancelamento entre o CET e o CTV tornando o coeficiente de temperatura do retardo nulo. Apesar de ser uma característica boa para realizar a identificação da etiqueta, ela não possibilita seu uso como sensor de temperatura. Já o YZ do niobato de lítio apresenta um CTV negativo, portanto, um alto CTR para realizar medições de temperatura.

Outros parâmetros devem ser considerados na escolha do material e do corte, como o coeficiente de acoplamento eletromecânico,  $k^2$ , a velocidade de propagação da onda,  $v$ , o ângulo de fluxo de potência eletromecânica,  $\gamma_a$ , e a permissividade relativa,  $\epsilon_r$ .

**Tabela 1.1:** *Parâmetros importantes na escolha do material piezoelétrico.*

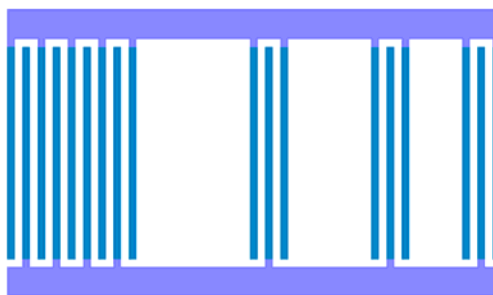
Material	Fórmula	Orientação	$v$ [m/s]	$k^2$	$\epsilon_r$	$\gamma_a$	CTV	CTR
Niobato de lítio	LiNbO <sub>3</sub>	41,5°, X	4000	0,057	67,2	-0,445	-57	72
Niobato de lítio	LiNbO <sub>3</sub>	Y, Z	3488	0,045	50,2	-1,083	-87	94
Tantalato de lítio	LiTaO <sub>3</sub>	Y, Z	3230	0,0074	47,9	-0,211	-31	35
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	Y, X	3159	0,0023	4,52	+0,653	38	-24
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	ST, X	3158	0,0014	4,55	+0,378	14	0

### 1.1.3 Geometrias para as etiquetas

Dois tipos de estruturas fundamentais ocupam a área do substrato piezoelétrico. Para gerar e receber pulsos OAS utiliza-se um transdutor interdigitado apropriadamente projetado. A segunda estrutura é responsável por modificar o pulso de entrada codificando o sinal de resposta da etiqueta antes de retransmiti-lo.

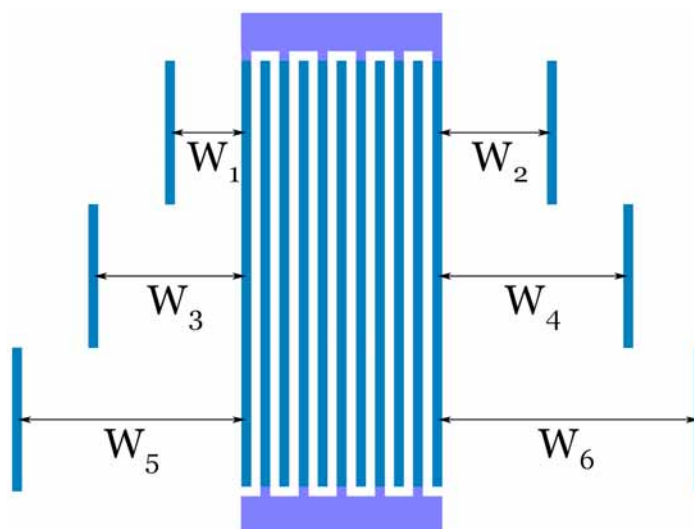
Desde as primeiras ideias para etiquetas RFID OAS, várias geometrias foram propostas e muitas testadas combinando diversos projetos para o TID e estruturas de codificação. Inicialmente, as etiquetas possuíam um TID de entrada e um conjunto de TIDs de saída espacialmente separados e conectados a um único barramento [9][10].

A substituição de TIDs de codificação por estruturas refletoras de ondas acústicas de superfície permitiu um aproveitamento mais eficiente da área de substrato piezoelétrico, diminuindo as perdas por propagação e o tamanho do dispositivo final [11].



**Figura 1.3:** *Etiqueta baseada na disposição de transdutores num mesmo barramento.*

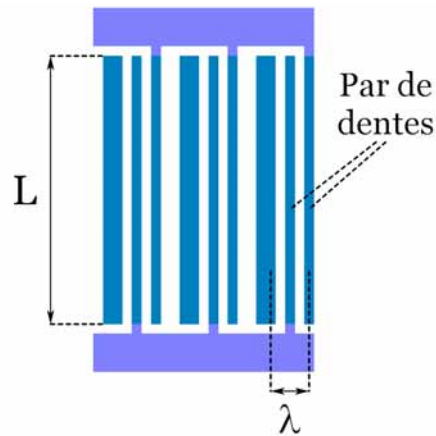
Tradicionalmente, as etiquetas são fabricadas com um ou mais canais de propagação e refletores fabricados em um (Figura 1.3) ou ambos os lados do transdutor (Figura 1.4). O propósito de utilizar os dois lados do transdutor é aproveitar a bidirecionalidade do TID padrão para aumentar a capacidade de dados da etiqueta e evitar o efeito das *reflexões múltiplas* típicas de estruturas com um único canal. Porém, é preciso o *tempo morto* nas duas direções antes de ocupar a área com estruturas de código.



**Figura 1.4:** *Etiqueta multicanal com refletores em ambos os lados do transdutor.*

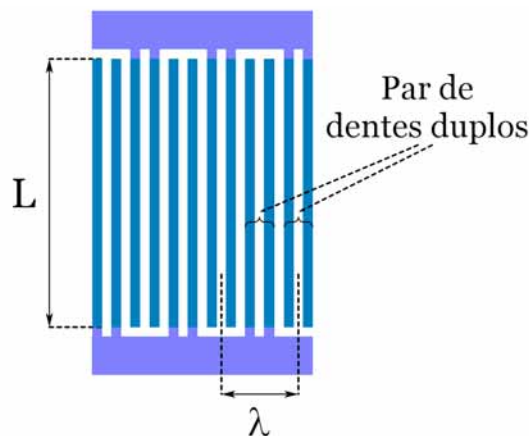
Outros projetos de TID se propõem a reduzir a inerente perda da bidirecionalidade do TID padrão na transdução [12], já que metade da energia convertida em sinal acústico se propaga em um sentido e a outra metade no sentido oposto às estruturas de código. Estes transdutores, tradicionalmente, utilizam refletores acústicos entre os pares de dentes em cada período como mostrado na Figura 1.5.

Outra proposta é a do transdutor *dente duplo* da Figura 1.6. Apesar desta estrutura



**Figura 1.5:** *Transdutor do tipo unidirecional. Os refletores são estrategicamente posicionados de forma a refletir as ondas acústicas que se propagam no sentido indesejado.*

não realizar uma transdução tão eficiente quanto a do TID padrão, ela é caracterizada pela pouca refletividade interna e é muito utilizada em algumas estruturas de caracterização de dispositivos OAS.



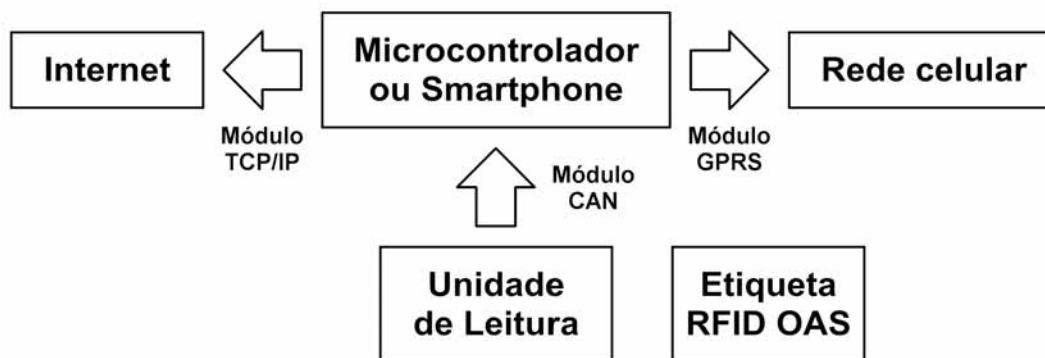
**Figura 1.6:** *Transdutor do tipo dente duplo.*

Esta dissertação é focada na geometria de um único canal e com estruturas refletoras em apenas um dos lados do transdutor interdigitado.

## 1.2 Integração de sistemas RFID em rede GSM e TCP/IP

A integração da unidade de leitura do sistema RFID com a rede de celular ou a Internet potencializa a utilização desta tecnologia em uma ampla faixa de aplicações [13]. No momento da leitura de uma etiqueta RFID, é possível acessar bancos de dados remotos e carregar in-

formações da etiqueta como histórico de um produto, quantidade em estoque, data de envio e últimas notificações quase instantaneamente. Também permite a interligação com outros equipamentos para notificação instantânea de ocorrências ou podem ser usados remotamente para ativar ou desativar um equipamento ou sistema de segurança.



**Figura 1.7:** *Integração de interrogadores com rede celular e/ou Internet.*

Outra possibilidade é o monitoramento remoto de uma rede de sensores sem fio, onde o sistema de gestão é capaz de notificar o supervisor imediatamente por mensagem de texto (SMS), caso uma medição de interesse seja identificada, ou enviar um relatório de supervisão por endereço eletrônico.

Na Figura 1.7, a unidade de leitura refere-se ao dispositivo eletrônico capaz de enviar e receber ondas de rádio para interrogação das etiquetas RFID OAS, converter os dados analógicos recebidos para digital e enviá-los para um microcontrolador. O *Módulo CAN* possibilita a comunicação de microcontroladores e outros dispositivos entre si, sem a necessidade de um computador intermediário. O processamento das informações e banco de dados local por meio de módulos internos ou externos faz a integração com a rede de celular GSM via protocolo GPRS e com a Internet, via TCP/IP.

### 1.3 Organização desta dissertação

Nesta dissertação, etiquetas RFID utilizando a tecnologia de dispositivos de ondas acústicas de superfície são investigadas. Neste capítulo introdutório, foi apresentado o sistema RFID, o princípio de funcionamento da etiqueta OAS, a capacidade de medição de temperatura junto com a informação da identidade e a revisão de algumas geometrias para as etiquetas.

Também foram brevemente discutidas as possibilidades de sistemas RFID integrados em redes de sensores, seja Internet (TCP/IP) ou rede de celular (GSM). A arquitetura do mecanismo de leitura ficou fora do escopo do presente trabalho.

### **Capítulo 2 - Projeto de etiquetas RFID a ondas acústicas de superfície**

Neste capítulo, os principais detalhes do projeto das etiquetas OAS são abordados, tratando do projeto do transdutor interdigitado, o projeto da grade refletora mediante a escolha de um método de codificação da identidade e como fazer o casamento de impedâncias durante o acoplamento com antenas. Por fim, são realizados os cálculos baseados na revisão bibliográfica para as estruturas projetadas para fabricação.

### **Capítulo 3 - Etapas de processo de fabricação de etiquetas RFID OAS**

Os processos envolvidos para fabricação são detalhados neste capítulo. Os parâmetros utilizados em cada processo e os resultados experimentais também são relatados. As estruturas finais foram inteiramente fabricadas no Laboratório de Nanoestruturas (LDN) da UFPE.

### **Capítulo 4 - Caracterização das estruturas fabricadas**

A metodologia para caracterização das estruturas projetadas e fabricadas é descrita neste capítulo. A performance dos dispositivos e a extração de parâmetros das estruturas são verificadas por dados obtidos por um analisador de rede, um analisador de espectro e um impedancímetro.

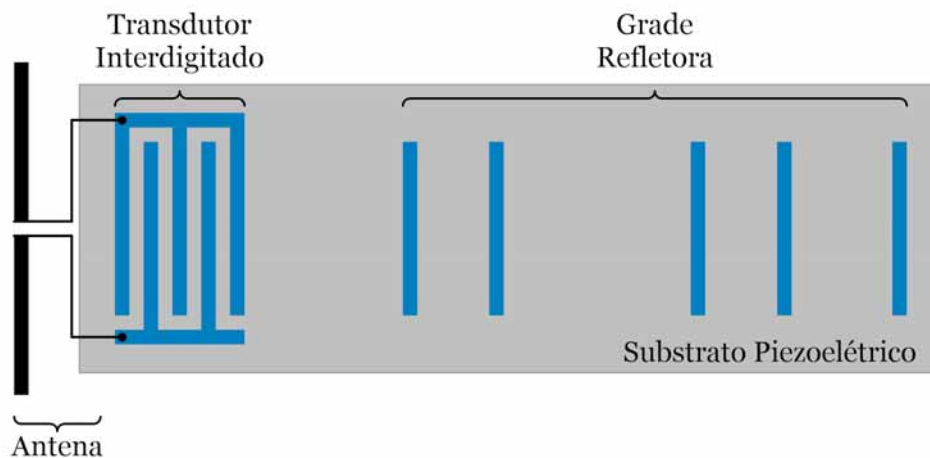
### **Capítulo 6 - Conclusão**

Neste capítulo, as discussões acerca dos resultados do trabalho desenvolvido e outras considerações finais são realizadas. Também são feitas propostas de trabalhos futuros e possíveis correções na metodologia adotada.

## CAPÍTULO 2

# PROJETO DE ETIQUETAS RFID A ONDAS ACÚSTICAS DE SUPERFÍCIE

O projeto de etiquetas RFID OAS envolve o estudo do transdutor interdigitado, da grade refletora mediante um método de codificação da identidade e o acoplamento da estrutura com uma antena. A Figura 2.1 mostra as estruturas que compõem a etiqueta RFID passiva interrogável por um sistema sem fio.

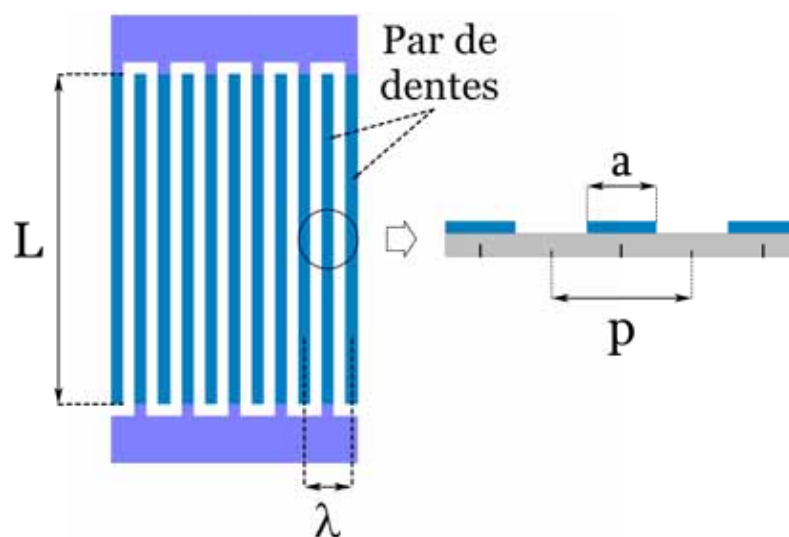


**Figura 2.1:** Estruturas que compõem a etiqueta RFID OAS.



## 2.1 Projeto do transdutor interdigitado

Em dispositivos de ondas acústicas de superfície, a transdução entre um sinal elétrico e uma onda acústica ocorre por intermédio de uma estrutura interdigitada de metal depositada sobre o substrato piezoelétrico. O modelo tradicional deste transdutor consiste de duas estruturas com formato de pente com os dentes intercalados, tal como ilustrado na Figura 2.2. Tipicamente, a largura das trilhas dos dentes,  $a$ , é feita igual ao espaçamento entre eles de forma que  $a/p = 0,5$ . O número de pares de dentes intercalados,  $N$ , e o comprimento de superposição dos eletrodos,  $L$ , devem ser escolhidos apropriadamente em função do projeto.

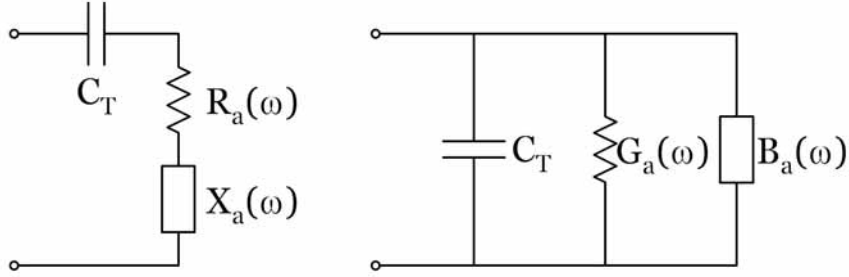


**Figura 2.2:** Esquemático do transdutor interdigitado padrão.

### 2.1.1 Modelo do circuito elétrico equivalente para o transdutor

Visto que o transdutor interdigitado (TID) é fundamental para qualquer dispositivo de ondas acústicas de superfície, um considerável esforço tem sido investido na modelagem de um circuito elétrico equivalente para representá-lo. O comportamento elétrico resultante pode ser representado por um circuito consistindo da capacitância entre os eletrodos do transdutor, desprezando a piezoeletricidade do substrato, em série ou em paralelo com uma imitância representando a excitação acústica [14].

Devido à periodicidade e à simetria do transdutor interdigitado, a maior resposta acústica ocorre próximo à frequência de sincronismo com uma certa largura de banda passante, com



**Figura 2.3:** Representação série e paralelo para o transdutor interdigitado.

resposta em frequência semelhante à de um filtro passa-faixa. Na frequência de sincronismo do transdutor,  $f_0$ , a onda resultante da deformação do substrato que se propaga com velocidade  $v$  percorre uma distância  $\lambda_0$  a cada ciclo. A frequência da onda acústica gerada é dada pela relação  $f_0 = v/\lambda_0$ .

Na Figura 2.3, a representação série expressa o transdutor como uma soma de impedâncias de forma que:

$$Z_s(\omega) = \frac{1}{j\omega C_T} + R_a(\omega) + jX_a(\omega)$$

onde  $R_a(\omega) + jX_a(\omega)$  é a imitância da radiação acústica. Já a representação paralela expressa os elementos do transdutor como admitâncias:

$$Y_p(\omega) = j\omega C_T + G_a(\omega) + jB_a(\omega)$$

onde  $C_T$  é a capacitância estática do transdutor,  $G_a(\omega)$  é a condutância de radiação acústica e  $B_a(\omega)$  é a susceptância à radiação acústica em função da frequência e são dados pelas seguintes expressões [7]:

$$G_a(\omega) = \hat{G}_a \left( \frac{\text{sen } x}{x} \right)^2$$

$$B_a(\omega) = \hat{G}_a \left( \frac{\text{sen } 2x - 2x}{2x^2} \right)$$

com

$$\hat{G}_a = \frac{4}{\pi} k^2 \omega_0 C_T N$$

e

$$x = \pi N \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)$$

onde  $k^2$  é o coeficiente eletromecânico do substrato e  $\omega_0 = 2\pi f_0$  é a frequência de sincronismo em radianos.

A partir da representação de admitâncias em paralelo, é possível calcular a impedância do transdutor no sincronismo. Em frequências próximas de  $\omega_0$ ,  $x$  tende para zero fazendo as expressões de  $G_a(\omega)$  se aproximar de  $\hat{G}_a$  e  $B_a(\omega)$  tender ao valor nulo. Com a reatância  $X_a$  e a susceptância  $B_a$  nulas, a admitância do circuito paralelo, na frequência de sincronismo se reduz a:

$$Y_p(\omega_0) = \hat{G}_a + j\omega_0 C_T$$

É preciso inverter toda admitância  $Y_p(\omega_0)$  para calcular a impedância representada pelo circuito paralelo. Desta forma:

$$Z_p(\omega_0) = 1/Y_p(\omega_0) = \frac{1}{\hat{G}_a + j\omega_0 C_T}$$

$$Z_p(\omega_0) = \frac{\hat{G}_a}{(\hat{G}_a)^2 + (\omega_0 C_T)^2} - j \frac{\omega_0 C_T}{(\hat{G}_a)^2 + (\omega_0 C_T)^2}$$

substituindo  $\hat{G}_a$  na expressão e rearrumando-a, obtém-se a Equação 2.1.

$$Z_p(\omega_0) = \frac{\left(\frac{4}{\pi}k^2 N\right) / \omega_0 C_T}{\left(\frac{4}{\pi}k^2 N\right)^2 + 1} + \frac{1}{j\omega_0 C_T \left[\left(\frac{4}{\pi}k^2 N\right)^2 + 1\right]} \quad (2.1)$$

Desta forma, para transdutores fabricados sobre um piezoelétrico mais ativo, com alto coeficiente de acoplamento eletroacústico  $k^2$ , o termo  $\left(\frac{4}{\pi}k^2 N\right)^2$  pode ser significativo comparado com a unidade e deve ser considerado. Quando verificado que  $\left(\frac{4}{\pi}k^2 N\right)^2$  é muito maior que a unidade, é correto afirmar que:

$$\frac{1}{\hat{G}_a + j\omega_0 C_T} \approx \hat{R}_a + \frac{1}{j\omega_0 C_T}$$

e isto significa que as duas representações se equivalem até um determinado ponto. A generalização alcançada pela expressão (2.1) é que garante a preferência pela representação paralela.

Também é possível estimar a banda passante  $\Delta f$  entre os dois primeiros zeros da expressão de  $G_a(\omega)$  do TID. Para isto, consideremos  $f_{-1}$  e  $f_1$  as frequências onde ocorrem o zero imediatamente antes e o zero imediatamente após a frequência central  $f_0$ , respectivamente.

$$\begin{aligned} \hat{G}_a \left( \frac{\text{sen } x}{x} \right)^2 = 0 & \implies \text{sen} \left( \pi N \left( \frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) = 0 \\ \pi N \left( \frac{f_{-1} - f_0}{f_0} \right) = -\pi & \implies f_{-1} = \frac{N-1}{N} f_0 \\ \pi N \left( \frac{f_1 - f_0}{f_0} \right) = \pi & \implies f_1 = \frac{N+1}{N} f_0 \end{aligned}$$

Portanto,

$$\Delta f = f_1 - f_{-1} = \frac{2f_0}{N} \quad (2.2)$$

é a banda passante estimada entre os dois zeros adjacentes à frequência central  $f_0$  do transdutor. É evidente que a banda passante com corte de 3dB é mais estreita que a estimada pela Equação (2.2).

### 2.1.2 Cálculo da capacitância estática

Com a Equação 2.1, fica claro que o valor da capacitância estática da estrutura interdigitada do transdutor é fundamental para o projeto da etiqueta e deve ser determinada para o cálculo da impedância equivalente  $Z_p$  na frequência de operação.

Para o cálculo de  $C_T$ , primeiro é feito uma estimativa da capacitância por metro de um par de eletrodos adjacentes,  $C_{FF}$ .

$$C_{FF} = 2(1 + \epsilon_r)K \times 10^{-12} \quad [\text{F/m}] \quad (2.3)$$

Onde a expressão empírica para  $K$  é [15]:

$$K = 6,5 \left(\frac{a}{p}\right)^2 + 1,08 \left(\frac{a}{p}\right) + 2,37 \quad , \text{ para } 0,2 \leq \frac{a}{p} \leq 0,8$$

Portanto, a capacitância entre um par de eletrodos,  $C_S$ , com comprimento de superposição  $L$  é obtido por:

$$C_S = C_{FF} \cdot L$$

Finalmente, uma estrutura interdigitada com  $N$  pares de eletrodos apresenta uma capacitância total de:

$$C_T = C_S \cdot N = C_{FF} \cdot L \cdot N \quad (2.4)$$

É observado que para o TID em que a largura dos dentes é igual ao espaçamento entre eles que:

$$\begin{aligned} \frac{a}{p} = 0,5 \quad \implies \quad K &= 4,535 \\ 2 \cdot K \times 10^{-12} &\approx \epsilon_0 \end{aligned}$$

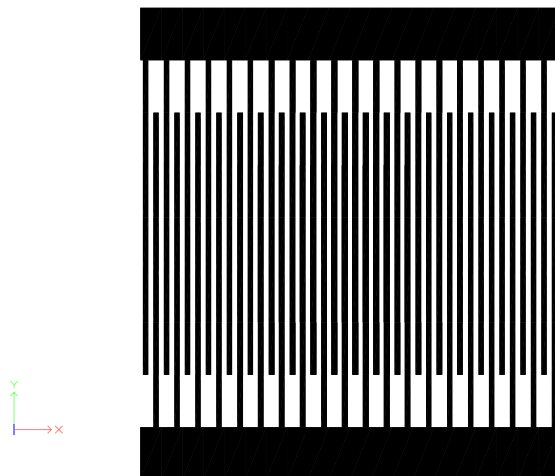
e fazendo a substituição em  $C_{FF}$ , temos:

$$C_{FF} = (1 + \epsilon_r)\epsilon_0$$

Então, o cálculo de  $C_T$  para este caso particular ( $a/p = 0,5$ ) pode ser realizado pela simples expressão:

$$C_T = (1 + \epsilon_r)\epsilon_0 \cdot L \cdot N \quad (2.5)$$

Por meio do FASTCAP ([www.fastfieldsolvers.com](http://www.fastfieldsolvers.com)), uma ferramenta computacional para extração de capacitâncias pelo cálculo das Equações de Maxwell, é possível construir os transdutores e verificar as capacitâncias das estruturas projetadas. A construção é feita especificando as coordenadas dos painéis condutores (quadrangulares ou triangulares) no espaço tridimensional. Um programa para gerar os painéis de estruturas interdigitadas, como na Figura 2.4, foi desenvolvido em linguagem C para esta dissertação e encontra-se no Apêndice B.



**Figura 2.4:** Transdutor com  $L = 500 \mu\text{m}$ ,  $N = 20$ ,  $\lambda = 40 \mu\text{m}$  e espessura de metal  $h = 300 \text{ nm}$ .

A resposta é a matriz de capacitância mostrada em seguida. Intencionalmente, os condutores desenhados são simétricos e resultam em elementos iguais na diagonal principal da matriz. Caso a igualdade não seja verificada, a grade dos painéis pode ser refinada modificando o código fonte. A capacitância entre os condutores da Figura 2.4 retornada pelo FASTCAP foi 0,1772 pF, a calculada pela Equação 2.4 foi 0,1814 pF e pela Equação 2.5 foi 0,1770 pF. Para fins de cálculos, supos-se que a estrutura estava no meio de vácuo ( $\epsilon_r = 1$ ).

#### INPUT SUMMARY

```

Expansion order: 2
Number of partitioning levels: 5
Overall permittivity factor: 1
Total number of panels: 1204
  Number of conductor panels: 1204
  Number of dielectric interface panels: 0
  Number of thin conductor on dielectric interface panels: 0
Number of conductors: 2

```

No expansions at level 5 (lowest)  
 Percentage of multiplies done by multipole: 94.5%

ITERATION DATA

Starting on column 1 (condutor1%GROUP1)

1 2 3 4 5 6 7 8

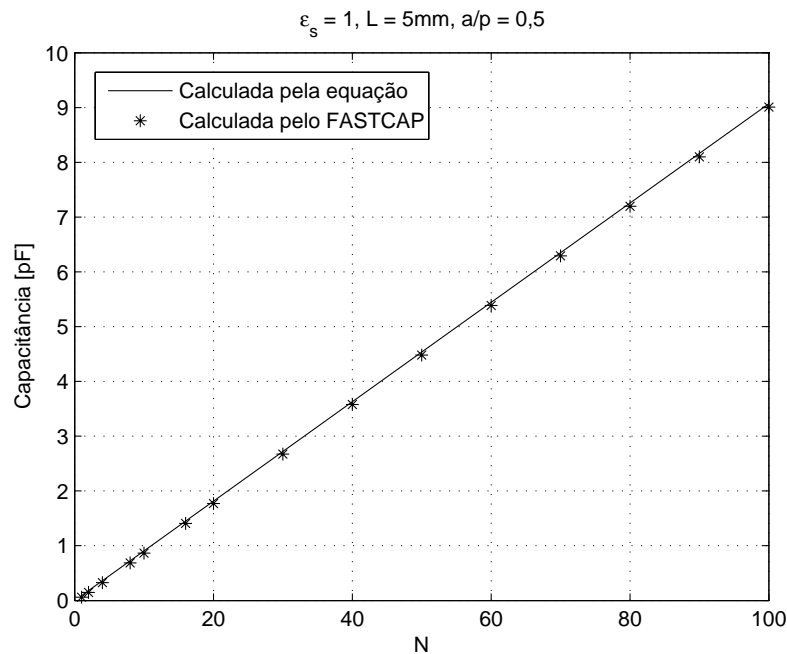
Starting on column 2 (condutor2%GROUP1)

1 2 3 4 5 6 7 8

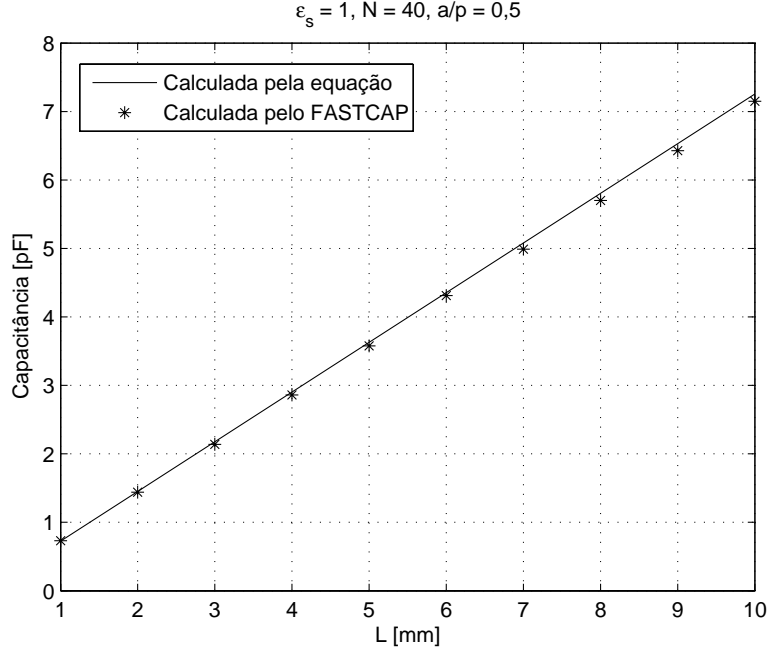
CAPACITANCE MATRIX, picofarads

	1	2
condutor1%GROUP1 1	0.1942	-0.1772
condutor2%GROUP1 2	-0.1772	0.1942

Com a finalidade de validar a Equação 2.4 em conjunto com os resultados obtidos pelo FASTCAP, uma variedade de estruturas foram geradas com o programa. Verificou-se a dependência linear de  $N$  e  $L$  no valor da capacitância das estruturas e a irrelevância na escolha do  $\lambda_0$ .



**Figura 2.5:** Dependência de  $C_T$  com a valor de  $N$ .



**Figura 2.6:** Dependência de  $C_T$  com a valor de  $L$ .

### 2.1.3 Perdas ôhmicas nos dentes do transdutor

Para um modelo mais completo do TID, é necessário considerar a oposição oferecida por cada dente à passagem da corrente elétrica. O cálculo da resistência de filme fino de cada dente pode ser determinado por [16]

$$R_d = \frac{2\rho L}{3a}, \quad (2.6)$$

onde  $\rho$  é a resistência de folha do filme metálico. Para o alumínio com altura  $h$  entre  $0,05 \mu\text{m}$  e  $0,3 \mu\text{m}$ , a resistência de folha pode ser aproximada por

$$\rho = \frac{0,04}{h(\mu\text{m})} \quad [\Omega/\square].$$

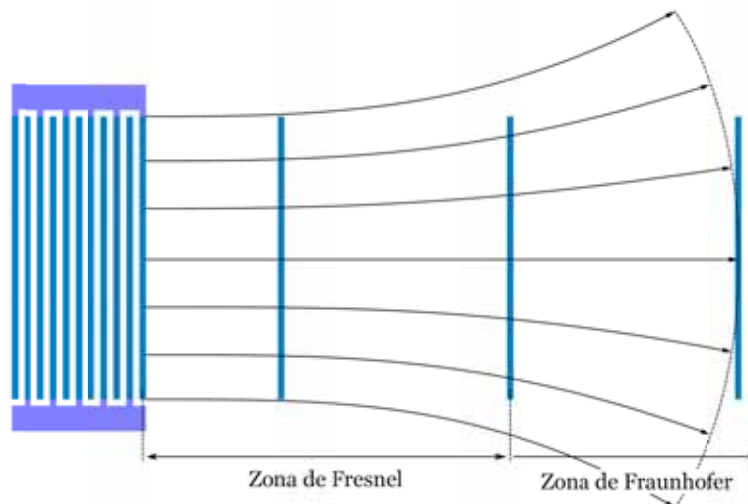
Apesar dos esforços em fazer com que o valor de  $R_d$  seja o menor possível (para maximizar a eficiência da transdução), é preciso lembrar que o aumento da espessura  $h$  dos dentes intensifica as reflexões de ondas acústicas no próprio transdutor, resultando em perdas. Como a superfície do substrato vibra durante a excitação, também aumenta o risco dos eletrodos se desprenderem. Com a mesma finalidade, o valor do comprimento  $L$  dos dentes pode ser ajustado, mas influi diretamente no valor de  $C_T$  e seu mínimo deve ser limitado para evitar problemas de difração no deslocamento das ondas acústicas pelo substrato.

Uma onda excitada por um transdutor plano de comprimento finito irá propagar como

onda plana por uma distância finita. Então, a frente da onda se espalhará gradualmente com a propagação, como ilustrado na Figura 2.7. Este fenômeno é conhecido como *difração*. A região próxima ao transdutor, cuja frente da onda é considerada plana, é chamada de *zona de Fresnel*. A região mais afastada do transdutor, cuja frente da onda tem a forma curvilínea, é chamada de *zona de Fraunhofer*. A distância crítica,  $x_c$ , que distingue estas duas regiões, é dada por [9] [17]:

$$x_c = (1 + \gamma_a) \frac{L^2}{\lambda}, \quad (2.7)$$

onde  $\gamma_a$  é o parâmetro de anisotropia do cristal usado como substrato (também dependente da orientação do corte). Para dispositivos com comprimentos menores que  $x_c$ , a difração ainda se encontra em níveis aceitáveis e o projeto não requer nenhuma correção sofisticada [18].



**Figura 2.7:** Ilustração do efeito da difração das ondas acústicas e o correspondente limite de Fresnel.

## 2.2 Projeto da grade refletora

Um código de identificação é escrito na etiqueta OAS utilizando amplitude, fase, posicionamento temporal, ou outra característica dos ecos gerados pelas estruturas refletoras ao longo do substrato. A disposição destas estruturas numa região específica do dispositivo representa a grade refletora e deve garantir um padrão único de ecos para cada etiqueta.

Cada estrutura refletora é responsável por gerar um eco do pulso interrogador de volta para o transdutor interdigitado. Idealmente, a grade retorna um trem de pulsos que são réplicas



exatas do pulso interrogador, com atrasos relativos entre os ecos. Em geral, a grade possui refletores de código, usados para carregar informação, e de calibração. Estes últimos servem para indicar o começo e o término da grade e são identificados por causarem ecos de maior amplitude que os de código. Visto que o pulso mais fraco determina o alcance máximo de leitura da etiqueta, os refletores de código devem ser cuidadosamente projetados para criarem ecos que cheguem ao transdutor com amplitudes uniformes.

### 2.2.1 Tipos de estruturas refletoras

Para o projeto de etiquetas RFID OAS, refletores com refletividade controlada são de fundamental importância. À medida que o pulso de interrogação percorre o substrato, a potência do sinal sofre atenuação por propagação da onda acústica no material. Além disso, a cada encontro com uma estrutura refletora ao longo do caminho, parte do sinal sofre reflexão mas nem todo resto é transmitido representando perdas por espalhamento no corpo do material. Isto implica que os refletores no início da grade refletora devem ter refletividades bem baixas e aumentadas nos posteriores para suprir as atenuações do sinal interrogador. Lembrando que as reflexões também sofrerão as mesmas perdas no caminho de volta ao transdutor.

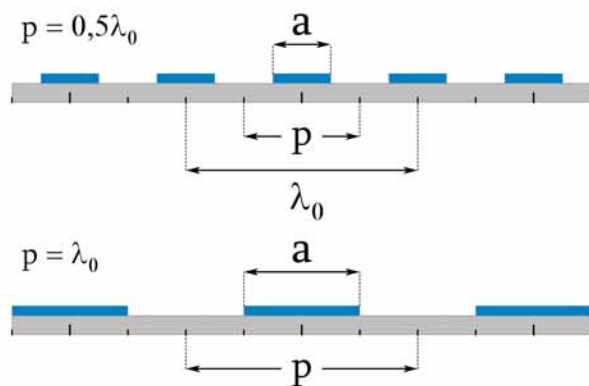
Cada refletor pode ser projetado de forma independente e caracterizado por sua refletividade por comprimento de onda  $|\kappa\lambda_0|$  e atenuação por comprimento de onda  $\gamma\lambda_0$  devido ao espalhamento de energia da onda no substrato [19].

A etiqueta RFID OAS precisa ter algumas estruturas refletoras para armazenar sua identidade. Quanto maior o número de refletores, maior sua capacidade de dados. Existem vários exemplos de refletores propostos na literatura [6][20].

#### Número de eletrodos por refletor

Cada refletor pode ser construído com um ou mais eletrodos em forma de tiras de metal. A onda acústica é parcialmente refletida em cada borda do eletrodo. Quanto maior for o número de eletrodos, maior será a potência do sinal refletido. E mais estreita será a banda de frequências passantes do refletor [21].

A distância  $p$  medida do centro de cada eletrodo até o centro de um eletrodo adjacente define o modo de operação da estrutura. Usualmente, existem dois modos de operação para esses refletores [22]: harmônico fundamental, com  $p = \lambda_0/2$  e em segundo harmônico, com  $p = \lambda_0$ .



**Figura 2.8:** Modos de operação da estrutura refletora: (a) Refletor em modo harmônico fundamental. (b) Refletor em modo segundo harmônico.

### Eletrodos abertos ou em curto-circuito

Quando um refletor possui mais de um eletrodo, diferentes características são obtidas se os eletrodos estiverem flutuantes (em aberto) ou em curto-circuito. A Figura 2.9 mostra exemplos de estruturas consistindo de eletrodos flutuantes (em aberto) ou em curto-circuito [23].



**Figura 2.9:** Tipos comuns de estruturas refletoras: com eletrodos flutuantes (esquerda) e com eletrodos em curto (direita).

### Espessura relativa do metal $h/\lambda\%$ :

A espessura do metal,  $h$ , obtida pela evaporação de alumínio também deve ser controlada. Trabalhos recentes mostram que tanto a refletividade como o espalhamento tendem a aumentar com o aumento da espessura dos eletrodos [24].

### **Largura relativa do eletrodo a/p:**

Uma vez que não é conveniente projetar eletrodos com espessuras diferentes em uma mesma etiqueta, alterar suas larguras é o método de ajuste mais adequado [19].

### **2.2.2 Métodos de codificação da identidade**

Uma etapa crucial do projeto das etiquetas é definir como os dados são armazenados e podem ser lidos por uma unidade interrogadora. É fundamental que a etiqueta e o interrogador estejam de acordo com um método de codificação de dados. Uma identidade pode ser gravada em uma etiqueta RFID OAS utilizando uma codificação específica que pode utilizar uma ou mais das características dos pulsos refletidos como amplitude, fase e tempos de atrasos dos ecos [25][26].

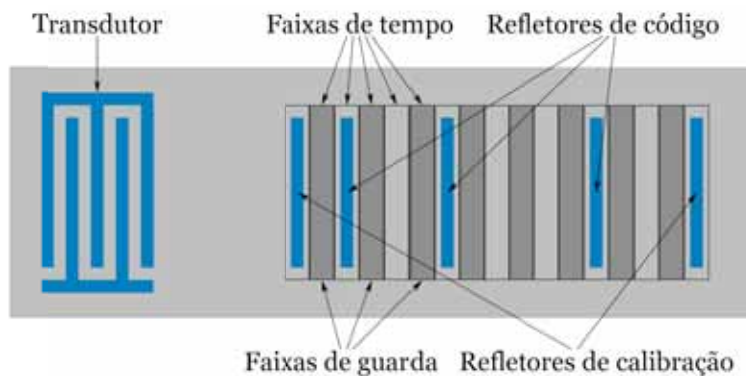
A forma de codificação escolhida influi diretamente na quantidade máxima de palavras-código do sistema de identificação, assim como no tamanho final de cada etiqueta que carrega uma das palavras-código e na complexidade do processamento dos dados na leitura. Os três métodos usuais de codificação de dados na etiqueta são explicados em seguida.

#### **Codificação por amplitude**

No caso mais simples, a codificação é feita pela disposição dos refletores ao longo do caminho percorrido pelo pulso de interrogação. Dois refletores de calibração, um em cada extremo, representam o início e o fim da grade refletora e não são utilizados para carregar informação. O espaço entre eles, no entanto, é dividido em faixas com tempos de propagação iguais. Um estrutura refletora pode ser posicionada dentro de cada faixa, porém uma faixa de guarda deve ser deixada entre duas faixas adjacentes para evitar a superposição de pulsos refletidos como mostrado na Figura 2.10.

Na decodificação, o tempo total de atraso entre os dois pulsos de calibração é medido e dividido pelo número de faixas de tempo. A presença ou ausência de um pulso de resposta em cada faixa de tempo ocupável representa a informação do dígito binário. Utilizando este método e havendo  $n$  faixas ocupáveis por refletores,  $2^n$  etiquetas podem ser fabricadas carregando palavras-código diferentes.

Apesar da aparente simplicidade, este método apresenta dificuldades de implementação. Isto porque o pulso interrogador poderá ser refletido por um ou por  $n$  refletores de código resultando em sinais de resposta com amplitudes muito diferentes implicando projetos indi-



**Figura 2.10:** Codificação por amplitude dos pulsos.

viduais com dependência na palavra-código de cada etiqueta e suas estruturas refletoras.

### Codificação por posição no tempo

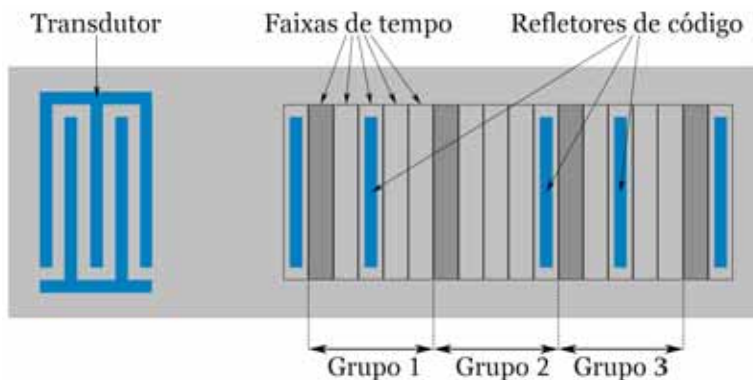
Este método de codificação é atualmente o mais utilizado em etiquetas RFID OAS comerciais. Neste caso, a grade refletora é dividida em grupos com um número fixo de faixas de tempo e um refletor de código deve estar dentro de cada grupo ocupando apenas uma faixa. A primeira faixa de cada grupo é proibida para evitar a superposição de pulsos refletidos por estruturas adjacentes. O tempo total de atraso entre os dois pulsos de calibração é medido e dividido pelo número de faixas de tempo. O resultado desta divisão é utilizado para detetar em que grupo e faixa de tempo cada estrutura refletora está posicionada.

No exemplo ilustrado na Figura 2.11, a grade foi dividida em três grupos de cinco faixas de tempo. Um refletor foi fabricado em cada grupo ocupando apenas uma faixa e as faixas de guarda foram respeitadas. Como cada refletor deve ocupar uma das quatro posições possíveis em cada grupo, uma grade com  $n$  refletores de código possibilita a realização de  $4^n$  diferentes etiquetas.

Este método permite que todas as etiquetas RFID OAS sejam construídas com o mesmo número de refletores. Isto é uma característica importante, pois o projeto de cada etiqueta se torna menos dependente do código que ela carrega.

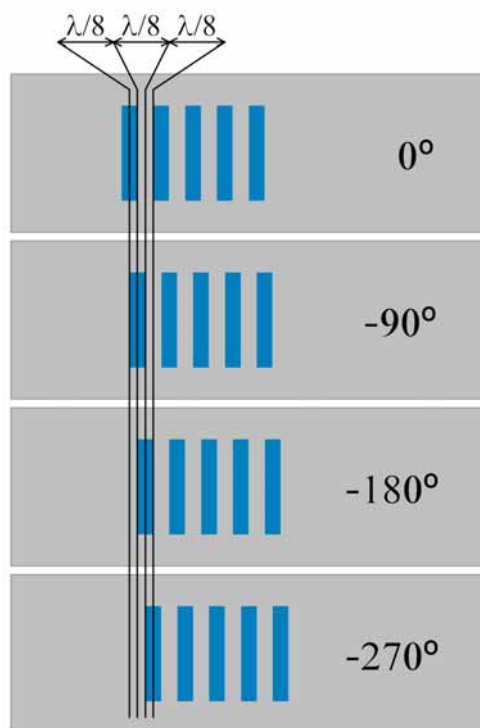
### Codificação por fase

Se as fases dos pulsos refletidos puderem ser medidas com a devida precisão, a codificação por fase pode ser usada. Este tipo de codificação, embora bastante conhecido, ainda não foi implementado em etiquetas comerciais.



**Figura 2.11:** Codificação por posição no tempo dos pulsos.

A ideia desta codificação é bastante simples. Se o refletor estiver a uma distância de valor múltiplo inteiro de  $\lambda_0$  do transdutor, o pulso retorna idealmente com fase  $0^\circ$  para o leitor. É conhecido que construindo-o deslocado de  $\lambda_0/8$ , introduz-se um deslocamento de fase de  $90^\circ$ . Desta forma, cada refletor pode assumir quatro posições com respostas de fases diferentes e utilizando  $n$  refletores poderíamos representar  $4^n$  diferentes palavras-código.



**Figura 2.12:** Codificação por fase dos pulsos.

A utilização da codificação por fase isoladamente permite reduzir o tamanho da grade

de refletores, pois só é necessário a criação de faixas de guarda entre refletores consecutivos. Porém, a utilização da codificação por posição no tempo e por fase simultaneamente resulta em 16 estados diferentes possíveis por refletor, ou seja, uma capacidade de código bastante elevada.

### 2.2.3 Posicionamento das estruturas na grade

Escolhido o método de codificação da identidade, o projeto da etiqueta requer a definição de alguns parâmetros para a realização do cálculo da posição de cada estrutura da grade refletora. O procedimento a seguir trata do posicionamento dos eletrodos para uma etiqueta de um canal em um único lado do transdutor interdigitado e utilizando a codificação por posição no tempo.

O posicionamento da primeira estrutura refletora da grade é determinado pelo tempo de resposta definido para o primeiro eco. A distância  $W_i$  para este primeiro refletor gera um retardo na resposta dos pulsos conhecido como *tempo morto*. Os demais espaçamentos dos refletores são calculados em função do tempo definido para a *faixa de tempo* e da quantidade de estruturas refletoras na etiqueta.

#### Tempo morto

Quando a antena do leitor envia o pulso de interrogação, parte da onda eletromagnética supostamente excita a antena da etiqueta RFID enquanto que o restante se propaga no meio sofrendo reflexões por diversos obstáculos do ambiente. Estas reflexões que não vieram da etiqueta podem levar a uma leitura falsa do dispositivo. Para contornar este problema, o sistema RFID utilizando ondas acústicas de superfície aproveita o fato das ondas acústicas se propagarem com velocidades bem inferiores às das ondas eletromagnéticas no ambiente ( $\approx 10^{-5}c$ ). Com isto, é possível controlar o tempo em que a etiqueta irá retornar o primeiro pulso refletido deixando um espaço inicial livre,  $W_i$ , no substrato entre o transdutor e o primeiro refletor da grade. O retardo inicial para o *tempo morto* é calculado utilizando a velocidade de propagação da onda no material pela Equação 2.8.

$$\Delta t_{\text{morto}} = \frac{2W_i}{v} \quad (2.8)$$

A duração do *tempo morto* deve ser suficientemente grande para que os pulsos eletromagnéticos refletidos pelo ambiente tenham atenuado a níveis inferiores aos pulsos gerados pela

etiqueta ao alcançarem a antena no leitor. Assim, o mecanismo de leitura deve ignorar todos os sinais que chegaram neste intervalo de tempo e a resposta desejada não sofrerá esta interferência.

Apesar de fundamental para a leitura da etiqueta a OAS, o espaço reservado para esta finalidade é também indesejado. O *tempo morto* representa uma subutilização de área do substrato por não ser aproveitada para estruturas de código e aumentam substancialmente o tamanho final da etiqueta. Algumas propostas para o aproveitamento deste espaço e redução do comprimento utilizado do substrato são abordadas em [17][27].

### Definindo o tempo do pulso interrogador

O sinal interrogador é um pulso de duração  $T_p$  contendo  $M$  períodos da senoide de frequência  $f_0$ . Assim sendo, pode-se expressar sinal  $x(t)$  enviado pelo interrogador como o produto do pulso  $p(t)$  de duração  $2T_1$  com um cosseno  $s(t)$  de frequência  $f_0$ .

$$p(t) = \begin{cases} A & , |t| \leq T_1 \\ 0 & , |t| > T_1 \end{cases}$$

$$s(t) = B \cdot \cos(\omega_0 t)$$

$$x(t) = p(t) \cdot s(t) \tag{2.9}$$

A Equação 2.9 corresponde a uma modulação clássica por portadora. A análise no domínio da frequência destas expressões é obtida pela transformada de Fourier de tempo contínuo. De forma que

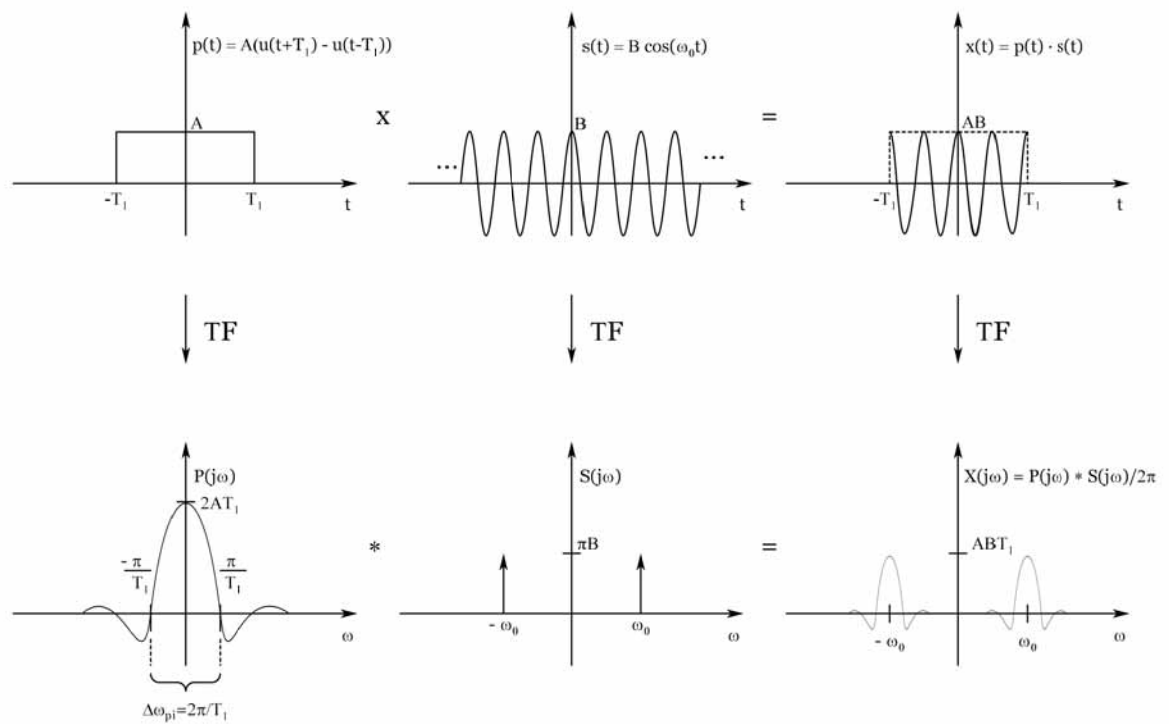
$$p(t) \quad \longleftrightarrow \quad P(j\omega)$$

$$s(t) \quad \longleftrightarrow \quad S(j\omega)$$

$$x(t) \quad \longleftrightarrow \quad X(j\omega)$$

Logo, verifica-se que definir o tempo  $T_p$  (ou  $2T_1$ ) implica definir a largura de banda do pulso interrogador dada pela Equação 2.10. Então é preciso determinar a relação entre o tamanho do pulso interrogador e o número de pares de dentes do transdutor interdigitado.

$$\Delta f_p = \frac{\Delta \omega_p}{2\pi} = \frac{1}{T_1} = \frac{2}{T_p} \tag{2.10}$$



**Figura 2.13:** Sinal de interrogação no domínio do tempo e no domínio da frequência. Note que o espectro  $X(j\omega)$  corresponde exatamente ao teorema da modulação.



Para o TID realizar a transdução do sinal, sua largura de banda passante estimada pela Equação 2.2,  $\Delta f_{TID}$ , deve ser maior ou igual à largura de banda do pulso interrogador,  $\Delta f_p$ , enviado pela unidade de leitura. Desta forma,

$$\begin{aligned} \Delta f_p \leq \Delta f_{TID} &\implies \frac{2}{T_p} \leq \frac{2f_0}{N} \\ M \cdot T_0 \geq \frac{N}{f_0} &\implies M \geq N \end{aligned}$$

Portanto, o número mínimo de períodos da senoide contidos no pulso interrogador ( $M$ ) é limitado ao número de pares de dentes do TID ( $N$ ) para que a banda de frequências do pulso interrogador esteja inteiramente contida na banda passante do transdutor interdigitado.

$$T_p = \frac{M}{f_0} = M \cdot T_0 \quad , \text{ onde } M \geq N \quad (2.11)$$

### Cálculo da posição dos refletores

Estabelecidos os valores para o intervalo de *tempo morto* e para o tempo do pulso interrogador, é possível calcular onde cada refletor deve estar posicionado na grade para formar a palavra-código desejada. Do ponto de vista da leitura do dispositivo, é feita a detecção dos ecos de calibração e do tempo decorrido entre os dois. Este tempo é dividido pelo número de faixas de tempo total da etiqueta.

O tempo de cada *faixa de tempo* é feito estritamente igual ao tempo do pulso interrogador para garantir que não haja sobreposição dos pulsos refletidos.

$$t_s = T_p \quad (2.12)$$

Para uma etiqueta com 2 refletores de código (2 grupos) e três *faixas de tempo* por grupo, o número de faixas de tempo total,  $NFT_{total}$ , é calculado por

$$NFT_{total} = NRC \times NFT + 3 \quad (2.13)$$

onde NRC é o número de refletores de código, NFT é o número de faixas de tempo por grupo e o fator 3 é referente às faixas de tempo dos refletores de calibração. Portanto,  $NFT_{total}$  para esta etiqueta, ilustrada na Figura 2.14, é igual a 9.

Mesmo que as estruturas refletoras possam ser fabricadas em qualquer lugar dentro da faixa de código, estabeleceu-se que os refletores de código devem estar posicionados no centro da faixa e os refletores de calibração nas partes mais internas de suas faixas para economizar espaço. Desta forma, os tempos possíveis para cada *faixa de tempo* são calculados em seguida.

$$t_i = \Delta t_{\text{morto}}/2$$

$$t_0 = t_i + \frac{t_s}{2}$$

$$t_1 = t_0 + t_s$$

$$t_2 = t_1 + t_s$$

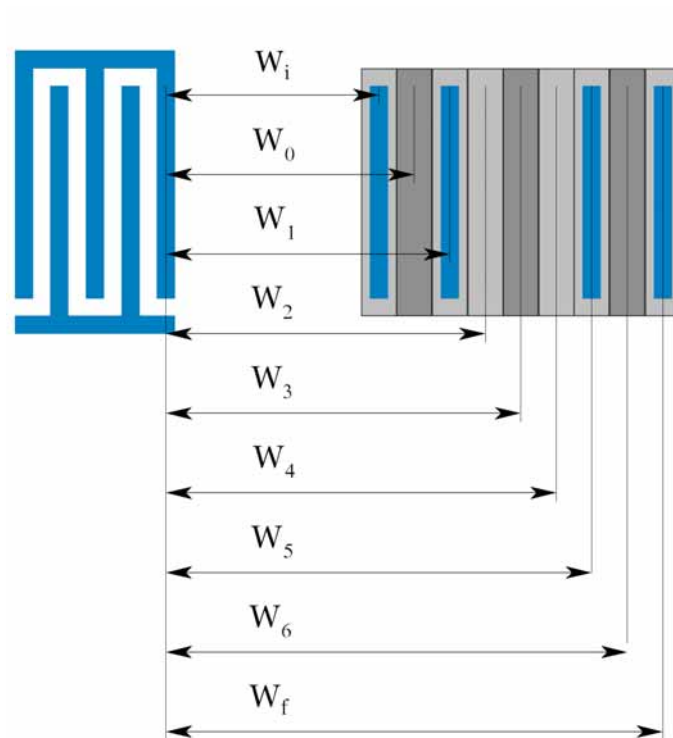
$$t_3 = t_2 + t_s$$

$$t_4 = t_3 + t_s$$

$$t_5 = t_4 + t_s$$

$$t_6 = t_5 + t_s$$

$$t_f = t_6 + \frac{t_s}{2}$$



**Figura 2.14:** Posicionamento das estruturas refletoras na grade.

E, conseqüentemente, as distâncias são calculadas por:

$$\begin{aligned}
 W_i &= t_i \cdot v \\
 W_0 &= W_i + \frac{t_s}{2} \cdot v \\
 W_1 &= W_0 + t_s \cdot v \\
 W_2 &= W_1 + t_s \cdot v \\
 W_3 &= W_2 + t_s \cdot v \\
 W_4 &= W_3 + t_s \cdot v \\
 W_5 &= W_4 + t_s \cdot v \\
 W_6 &= W_5 + t_s \cdot v \\
 W_f &= W_6 + \frac{t_s}{2} \cdot v
 \end{aligned}$$

**Tabela 2.1:** *Palavras-código identificadoras*

Etiqueta	$W_i$	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_f$
Identidade A	1	0	1	0	0	1	0	0	1
Identidade B	1	0	0	1	0	1	0	0	1
Identidade C	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Identidade D	1	0	0	1	0	0	1	0	1

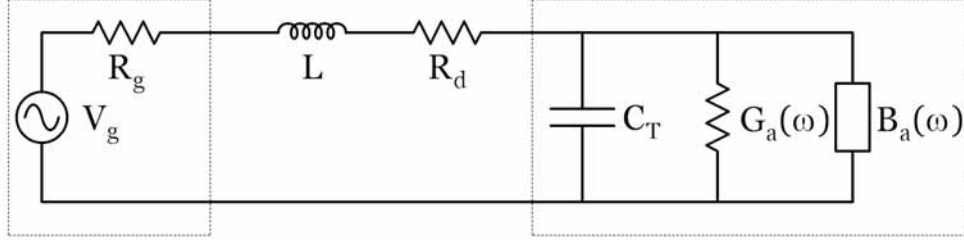
A etiqueta com identidade *C* tem estruturas refletoras posicionadas em  $W_i$ ,  $W_1$ ,  $W_5$  e  $W_f$ . Portanto, para um substrato com velocidade  $v = 4000$  m/s, usando faixas de tempo  $t_s = 400$  ns e definindo o tempo morto  $\Delta t_{\text{morto}} = 1$   $\mu$ s, os refletores da etiqueta com identidade *C* estarão posicionados em  $W_i = 2$  mm,  $W_1 = 4,4$  mm,  $W_5 = 10,8$  mm e  $W_f = 13,2$  mm.

### 2.3 Acoplamento com antenas

O sistema RFID se baseia na comunicação entre leitor e etiqueta por ondas de rádio. Para isto, o elemento fundamental para ocorrer a transmissão e recepção de dados é a antena. Nesta seção, serão discutidos os detalhes de acoplamento com antenas e as implicações no processo de leitura e projeto da etiqueta.

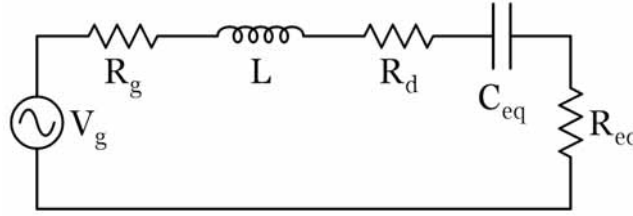
### 2.3.1 Casamento de impedâncias

O circuito elétrico equivalente da etiqueta acoplada a uma antena está mostrado na Figura 2.15. Visto que a impedância de entrada da etiqueta na frequência de sincronismo, obtida



**Figura 2.15:** Circuito elétrico equivalente acoplado com uma antena.

na seção anterior, pode ser representada como uma resistência em série com uma reatância capacitiva, a Figura 2.16 mostra o acoplamento das impedâncias de uma antena (ou equipamento de medição) com a etiqueta OAS: onde  $V_g$  e  $R_g$  representam os elementos do circuito



**Figura 2.16:** Circuito para casamento de impedâncias.

equivalente do gerador,  $L_{sint}$  é um indutor de ajuste e  $R_d$  representa as perdas ôhmicas nos dentes do TID. Da equação (2.1), os valores de  $R_{eq}$  e  $C_{eq}$  foram obtidos.

$$R_{eq} = \frac{\left(\frac{4}{\pi}k^2N\right) / \omega_0 C_T}{\left(\frac{4}{\pi}k^2N\right)^2 + 1} \quad (2.14)$$

$$C_{eq} = C_T \left[ \left(\frac{4}{\pi}k^2N\right)^2 + 1 \right] \quad (2.15)$$

O indutor de sintonia  $L_{sint}$  deve ser ajustado para gerar uma ressonância na frequência de sincronismo  $f_0$  de modo a otimizar a entrega de potência à  $R_{eq}$ , que representa a excitação acústica. Na ressonância, a associação das reatâncias de  $L$  e  $C_{eq}$  tende a um valor de impedância nulo. Então, o valor de  $L$  pode ser calculado por:

$$j\omega_0 L_{sint} + \frac{1}{j\omega C_{eq}} = 0 \quad \longrightarrow \quad L_{sint} = 1/(4\pi^2 f_0^2 C_{eq}). \quad (2.16)$$

Sabe-se também que a máxima transferência de potência à etiqueta ocorre quando as impedâncias estão casadas com o gerador. Portanto,

$$R_g = R_d + R_{eq} \quad (2.17)$$

com o  $R_d$  da Equação 2.6.

### 2.3.2 Alcance de leitura

A detecção do sinal de uma etiqueta OAS passiva é similar à recepção de qualquer sinal de radar. A equação que governa o alcance de interrogação é obtida calculando o caminho de perdas eletromagnéticas do leitor à etiqueta, da etiqueta ao leitor e as *perdas de inserção*.

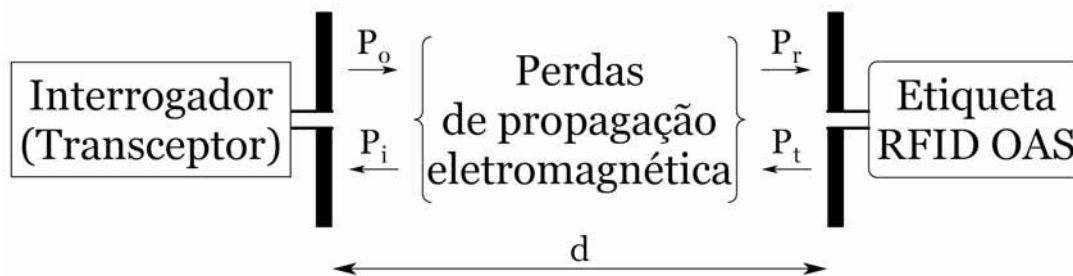


Figura 2.17: Perdas envolvidas na interrogação da etiqueta.

### Bandas de frequências ISM

As bandas de frequências ISM são faixas reservadas para aplicações médicas, industriais e científicas não licenciadas para dispositivos de baixa potência até 25 mW.

Tabela 2.2: Bandas de frequências ISM

Frequência central	Faixa	Banda
433,92MHz	433,07 a 434,77MHz	1,7MHz
915MHz	902 a 928MHz	26MHz
2,45GHz	2,4 a 2,5GHz	100MHz

### Perdas de inserção

A relação entre as potências do sinal recebido e retransmitido pela etiqueta é definida como a *perda de inserção*,  $PI$ , do dispositivo.

$$PI = 10 \times \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) \quad [dB] \quad (2.18)$$

A *perda de inserção* da etiqueta está associada principalmente às perdas na transdução, atenuação da onda acústica durante a propagação acústica, refletividade da grade refletora e difração pela anisotropia do substrato.

A perda do transdutor está relacionada à capacidade de transformar a energia elétrica aplicada em seus eletrodos em energia acústica propagando no substrato na direção desejada e vice-versa.

A atenuação durante a propagação da onda acústica no substrato é a superposição de três fenômenos: interação com ondas excitadas termicamente, espalhamento por defeitos no cristal ou superfícies arranhadas e perdas pelo meio adjacente à superfície. A expressão empírica para a atenuação na propagação é dada por [7]:

$$\text{Atenuação na propagação acústica (dB}/\mu\text{s)} = (\text{VAC})f^2 + (\text{AIR})f$$

onde  $f$  é a frequência em GHz, VAC é o coeficiente de atenuação com o substrato imerso em vácuo e AIR é o coeficiente de atenuação devido ao contato da superfície com o ar, tabelados para alguns materiais.

**Tabela 2.3:** Coeficientes de atenuação no vácuo e no ar.

Material	Fórmula	Orientação	VAC [dB/ $\mu$ s]	AIR [dB/ $\mu$ s]
Niobato de lítio	LiNbO <sub>3</sub>	41,5°, X	0,75	0,30
Niobato de lítio	LiNbO <sub>3</sub>	Y, Z	0,88	0,19
Tantalato de lítio	LiTaO <sub>3</sub>	Y, Z	0,94	0,20
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	Y, X	2,15	0,45
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	ST, X	2,62	0,47

### Caminho de perdas eletromagnéticas

A previsão do caminho de perdas é muito importante para especificar o desempenho de sistemas de comunicação entre os dispositivos. A base para estimar a distância alcançável em uma interrogação:

$$P_r(d, f) = P_o \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^n \quad (2.19)$$

em que,  $P_r$  é potência recebida pela etiqueta,  $P_o$  é potência transmitida pelo leitor,  $G_r$  e  $G_t$  são os ganhos das antenas usadas para receptor e transmitir, respectivamente,  $c$  é a velocidade da luz,  $f$  é a frequência da onda de rádio,  $d$  é a distância entre as antenas e  $n$  descreve a

influência de obstáculos do meio de transmissão com valor teoricamente dois para o vácuo. Para  $n < 2$ , o meio interfere convergindo o campo eletromagnético para a antena receptora. Um meio atenuador é caracterizado por  $n > 2$ . Pela relação entre as potências recebida e transmitida para uma dada frequência e fixando os ganhos das respectivas antenas, é possível calcular o caminho de perdas em função da distância  $d$  por

$$PL(d) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_r}{P_o} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{c\sqrt{G_t G_r}}{4\pi f_0} \right) - 10n \cdot \log(d) \quad (2.20)$$

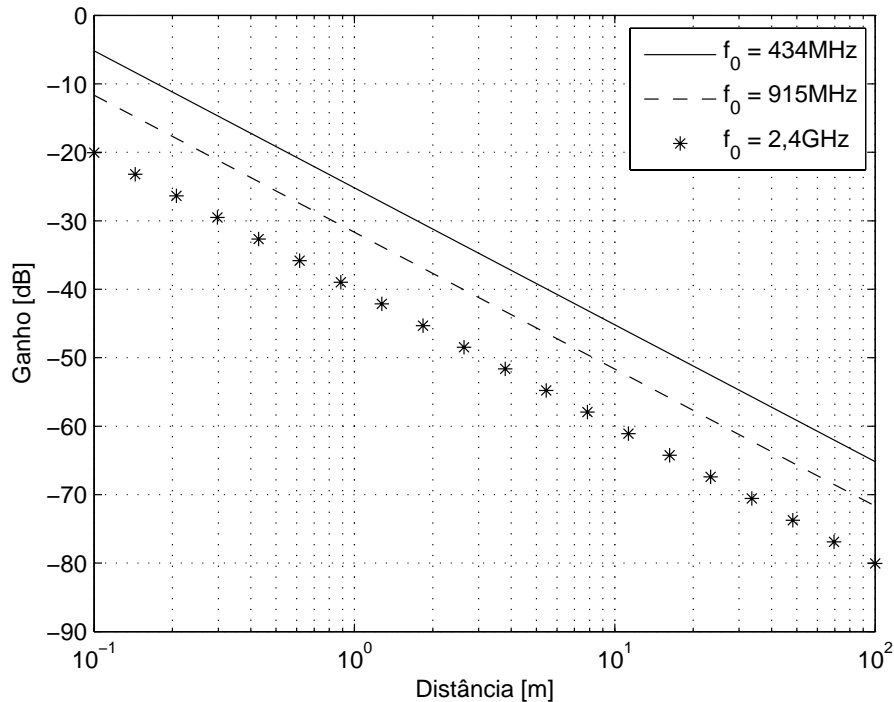
e fazendo

$$x = \log d$$

$$A = -10n$$

$$B = 20 \cdot \log \left( \frac{c\sqrt{G_t G_r}}{4\pi f_0} \right)$$

tem-se a equação da reta  $PL = B + A \cdot d$  na escala logarítmica traçada na Figura 2.18 para algumas frequências.



**Figura 2.18:** Perdas por propagação eletromagnética no vácuo.

Em condições de propagação no vácuo ( $n = 2$ ), a equação 2.21 prevê a distância máxima em que a leitura da etiqueta é realizável [28]. Como a onda eletromagnética percorre duas

vezes o caminho de perdas, verifica-se que a potência recebida pelo leitor decresce com a quarta potência da distância para a etiqueta.

$$d_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_o \cdot G_t^2 \cdot G_r^2}{PI \cdot k_B T \cdot B \cdot F \cdot RSR}} \quad (2.21)$$

Na equação anterior,  $PI$  é o valor da *perda de inserção* da etiqueta,  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura na escala Kelvin,  $B$  é a largura de banda do interrogador,  $F$  é a figura de ruído do interrogador e  $RSR$  é a relação sinal-ruído mínima para realizar a detecção dos pulsos.

### 2.3.3 Estratégias para leitura de múltiplas etiquetas RFID OAS

A etiqueta OAS é um dispositivo totalmente passivo que, além de dispensar o uso de baterias de alimentação, não precisa sequer de um limiar de tensão contínua para o seu funcionamento. Desta forma, é correto afirmar que a etiqueta estará sempre ativa até que seu material seja degradado ao ponto de inviabilizá-la.

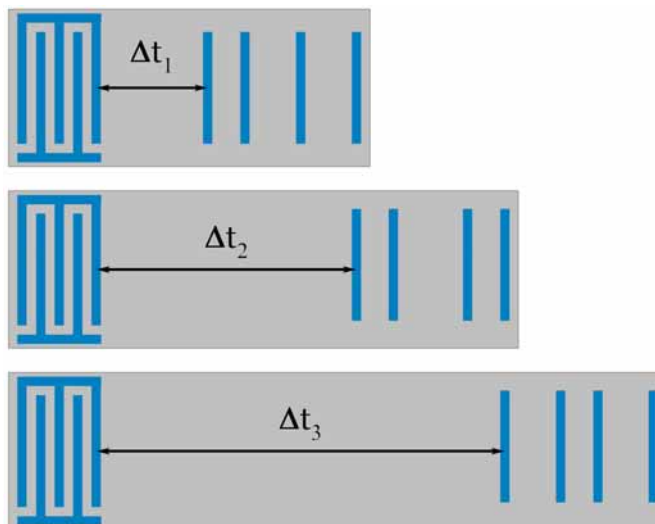
Para a maioria das aplicações, o mecanismo de leitura deve ser capaz de interrogar várias etiquetas com um único pulso ou, pelo menos, com uma única varredura do espectro. Porém, seu princípio de operação não permite que possamos endereçar o pulso para a leitura de cada etiqueta individualmente. Assim, quando duas ou mais etiquetas encontram-se ao alcance do interrogador ao mesmo tempo, elas produzem sinais de resposta praticamente simultâneos. Visto que o leitor utiliza o mesmo meio para se comunicar com as etiquetas, é preciso fazer uso de uma estratégia para garantir que uma transmissão não seja interferida por outra transmissão. Estas estratégias são baseadas em métodos de transmissão livres de conflito típicos em sistemas de comunicação [29][30].

#### Estratégia de alocação de faixa de tempo

Em sistemas de comunicação que utilizam divisão de tempo para realizar a multiplexação, os dispositivos aguardam sua faixa de tempo para enviarem seus dados. No caso do RFID OAS, cada etiqueta é projetada com um *tempo morto* de resposta dos pulsos diferente das demais para evitar a colisão das identidades, como ilustrado na Figura 2.19.

No entanto, este método é limitado em aplicações práticas, pois exige dispositivos com longos tempos de atraso. Isto implica etiquetas maiores e grandes perdas de inserção.





**Figura 2.19:** *Etiquetas com alocação de diferentes faixa de tempo.*

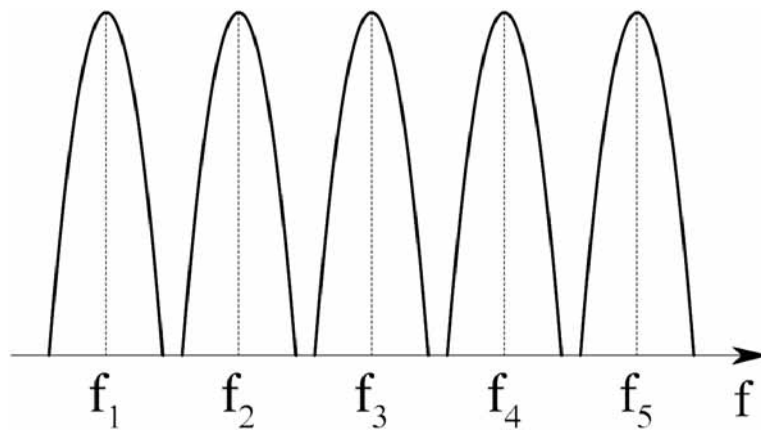
### **Estratégia de alocação de bandas de frequência**

Esta estratégia aproveita o fato de que as etiquetas OAS operam em bandas estreitas de frequência. Para implementá-la, é necessário que cada etiqueta opere em uma frequência central diferente ocupando um espaço do espectro suficiente para a largura de banda utilizada pelo dispositivo, como esboçado na Figura 2.20. A unidade de leitura deve realizar uma varredura do espectro interrogando em cada frequência central por vez. Como as faixas do espectro de frequências ISM possuem larguras limitadas e específicas, há um número máximo de etiquetas que podem ser alocadas dentro da faixa escolhida. Deve-se observar que cada etiqueta requer um projeto individual com comprimentos de onda diferentes.

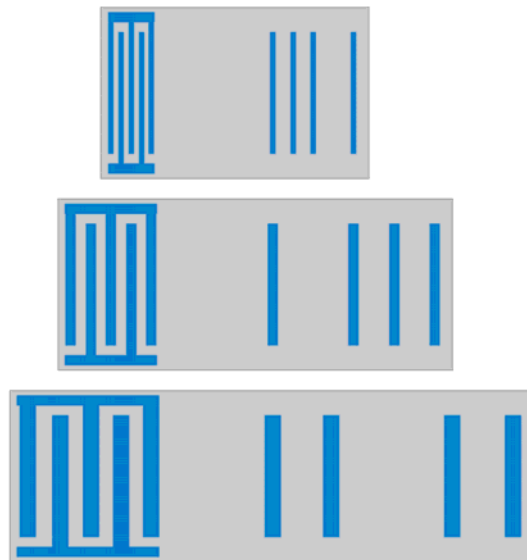
Como as faixas do espectro de frequências ISM possuem larguras limitadas e específicas, há um número máximo de etiquetas que podem ser alocadas dentro da faixa escolhida. Deve-se observar que cada etiqueta requer um projeto individual com comprimentos de onda diferentes, como ilustrado na Figura 2.21.

### **Estratégia de ortogonalidade no tempo**

Outra alternativa para realizar a leitura de múltiplas etiquetas é limitar as identidades possíveis codificando as etiquetas com palavras-código ortogonais entre si. Neste método, todas as etiquetas têm o mesmo *tempo morto* e operam na mesma frequência central, porém, o padrão de ecos gerado pelas múltiplas respostas simultâneas é único para cada subconjunto



**Figura 2.20:** *Espectro de frequência com etiquetas alocadas em diferentes bandas.*



**Figura 2.21:** *Etiquetas OAS operando em frequências diferentes. Esta estratégia implica valores de  $\lambda_0$  diferentes para cada etiqueta.*

de etiquetas. Assim, é possível separar e identificar quais delas compõem o sinal de resposta recebido.

**Tabela 2.4:** *Etiquetas com palavras-código ortogonais no tempo.*

Dispositivo	bit inicial	Código	bit final
Etiqueta 1	1	1 0 0 0	1
Etiqueta 2	1	0 1 0 0	1
Etiqueta 3	1	0 0 1 0	1
Etiqueta 4	1	0 0 0 1	1

Para realizar a leitura simultânea de até quatro etiquetas realizadas com as identidades da Tabela 2.4, a unidade de leitura irradia um pulso de interrogação e analisa o padrão de retorno. Considerando que os ecos de calibração retornaram ao mesmo tempo e que o padrão de ecos de código foi 1010, é possível dizer que as etiquetas 1 e 3 foram identificadas.

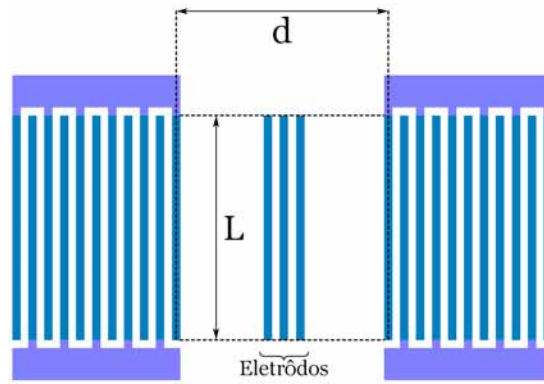
## 2.4 Estruturas projetadas para esta dissertação

As estruturas projetadas podem ser classificadas como sendo de dois tipos distintos: estruturas de *identidade* (Figura 2.22) e de *linha de retardo* (Figura 2.23).



**Figura 2.22:** *Estrutura do tipo identidade.*

As equações básicas descritas até aqui para o projeto das etiquetas RFID OAS estão apresentadas na Tabela 2.5 e serão utilizadas para o cálculo das estruturas projetadas nesta seção, mediante a escolha do substrato e a frequência de operação dos dispositivos.



**Figura 2.23:** Estrutura do tipo linha de retardo com eletrodos refletivos.

**Tabela 2.5:** Resumo das equações de projeto.

Frequência central	$f_0 = v/\lambda_0$
Tempo do pulso interrogador	$T_p = M \cdot f_0$
Largura de banda do transdutor	$\Delta f_{TID} = 2f_0/N$
Largura de banda no pulso interrogador	$\Delta f_p = 2/T_p$
Resistência equivalente de entrada	$R_{eq} = \frac{\left(\frac{4}{\pi}k^2N\right)/\omega_0C_T}{\left(\frac{4}{\pi}k^2N\right)^2 + 1}$
Capacitância equivalente de entrada	$C_{eq} = C_T \left[ \left(\frac{4}{\pi}k^2N\right)^2 + 1 \right]$
Capacitância estática	$C_T = (1 + \epsilon_r)\epsilon_0 \cdot L \cdot N$
Indutor de casamento	$L = 1/(4\pi^2 f_0^2 C_{eq})$
Resistência dos dentes	$R_d = 2\rho L/(3a)$
Limite de Fresnel	$x_c = (1 + \gamma_a)L^2/\lambda$
Tempo morto	$\Delta t_{morto} = 2W_i/v$

### 2.4.1 Escolha do substrato e frequência de operação

O primeiro passo para iniciar o projeto é definir o material piezoelétrico que será utilizado como substrato [7]. Diversos parâmetros devem ser analisados para tal escolha. Embora os mais importantes até aqui já tenham sido considerados como a velocidade de fase  $v$  e a constante de acoplamento  $k^2$ , outros parâmetros são imprescindíveis para o sucesso na aplicação escolhida. O niobato de lítio foi escolhido por possuir boas características para uso em dispositivos em ondas acústicas de superfície com alto coeficiente de acoplamento eletromecânico.

A frequência de operação dos dispositivos deve ser escolhida de forma a satisfazer às exigências impostas pelos equipamentos de medição disponíveis e a dimensão crítica das estruturas deve ser maior que a largura de linha (resolução) alcançada pelo processo fotolitográfico na fabricação. Como os eletrodos devem ter largura  $\lambda_0/4$  e a velocidade de propagação das OAS no niobato de lítio é aproximadamente 4000 m/s, as frequências escolhidas para o projeto das estruturas devem estar entre 50 MHz e 200 MHz para atender a todos os requisitos de fabricação e caracterização.

Escolhidos o substrato piezoelétrico e a frequência de operação, o número de pares de dentes,  $N$ , e o comprimento da abertura do transdutor,  $L$ , se tornam os principais parâmetros de ajuste do projeto.

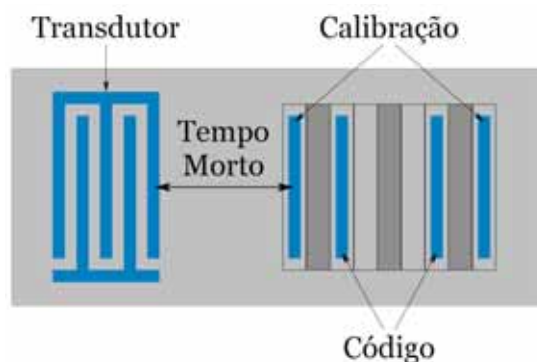
**Tabela 2.6:** *Definição da grade refletora.*

Método de codificação	Codificação por posição no tempo
Número de faixas de tempo	NFT = 3
Número de refletores de código	NRC = 2
Tipo de estrutura refletora	Eletrodos flutuantes em modo fundamental ( $p = \lambda_0/2$ )

Com este método, o número de diferentes identidades que esta etiqueta é capaz de carregar, como mostrado anteriormente, é:

$$(\text{NFT} - 1)^{\text{NRC}} = (3 - 1)^2 = 4 \quad (2.22)$$

Foram projetadas estruturas para três máscaras. A máscara *A* foi reservada para estruturas de teste e linhas de retardo. A máscara *B* contém as etiquetas RFID OAS com larguras de linha de 10  $\mu\text{m}$  e a máscara *C* com as etiquetas com larguras de linha de até 5  $\mu\text{m}$ . As Tabelas 2.7, 2.8 e 2.9 resumem as estruturas projetadas.



**Figura 2.24:** *Etiquetas RFID OAS projetadas.*

**Tabela 2.7:** *Estruturas da matriz A*

Referência	Transdutor	Tipo	$\lambda_0$	N	Eletrodos	d
STD_DL_40_20_1	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	1	3,6 mm
STD_DL_40_20_3	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	3	3,6 mm
STD_DL_40_20_5	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	5	3,6 mm
STD_DL_40_20_7	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	7	3,6 mm
STD_DL_40_20_9	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	9	3,6 mm
STD_DL_40_20_0	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	-	2 mm
STD_DL_40_40_0	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	40	-	2 mm
STD_DL_40_80_0	Padrão	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	80	-	2 mm
UDT_DL_40_10_0	Unidirecional	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	10	-	2 mm
UDT_DL_40_20_0	Unidirecional	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	20	-	2 mm
UDT_DL_40_40_0	Unidirecional	Linha de retardo	40 $\mu\text{m}$	40	-	2 mm
SPF_DL_80_10_0	Dente duplo	Linha de retardo	80 $\mu\text{m}$	10	-	2 mm

**Tabela 2.8:** *Estruturas da matriz B*

Referência	Transdutor	Tipo	$\lambda_0$	N	M	Eletrodos/refletor
STD_ID_40_24_20_1234	Padrão	Identidade	40 $\mu\text{m}$	24	20	1-2-3-4
STD_ID_40_24_20_2249	Padrão	Identidade	40 $\mu\text{m}$	24	20	2-2-4-9
STD_ID_40_40_28_2236	Padrão	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	28	2-2-3-6
STD_ID_40_40_28_23510	Padrão	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	28	2-3-5-10
STD_ID_40_40_40_2238	Padrão	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	40	2-2-3-8
STD_ID_40_40_40_23510	Padrão	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	40	2-3-5-10
STD_ID_50_24_20_2123	Padrão	Identidade	50 $\mu\text{m}$	24	20	2-1-2-3
STD_ID_50_24_20_2125	Padrão	Identidade	50 $\mu\text{m}$	24	20	2-1-2-5
UDT_ID_40_40_28_2236	Unidirecional	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	28	2-2-3-6
UDT_ID_40_40_28_23510	Unidirecional	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	28	2-3-5-10
UDT_ID_40_40_40_2238	Unidirecional	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	40	2-2-3-8
UDT_ID_40_40_40_22510	Unidirecional	Identidade	40 $\mu\text{m}$	40	40	2-2-5-10

**Tabela 2.9:** *Estruturas da matriz C.*

Referência	Transdutor	Tipo	$\lambda_0$	N	M	Eletrodos/refletor
STD_ID_20_20_20_2235	Padrão	Identidade	20 $\mu\text{m}$	20	20	2-2-3-5
STD_ID_20_20_20_2125	Padrão	Identidade	20 $\mu\text{m}$	20	20	2-1-2-5
STD_ID_20_60_60_2247	Padrão	Identidade	20 $\mu\text{m}$	60	60	2-2-4-7
STD_ID_20_60_60_23510	Padrão	Identidade	20 $\mu\text{m}$	60	60	2-3-5-10
STD_ID_20_80_60_12410	Padrão	Identidade	20 $\mu\text{m}$	80	60	1-2-4-10
STD_ID_20_80_60_2237	Padrão	Identidade	20 $\mu\text{m}$	80	60	2-2-3-7
STD_ID_30_24_20_2123	Padrão	Identidade	30 $\mu\text{m}$	24	20	2-1-2-3
STD_ID_30_24_20_2125	Padrão	Identidade	30 $\mu\text{m}$	24	20	2-1-2-5

### 2.4.2 Cálculos de projeto das estruturas

Além de realizar o cálculo das equações da Tabela 2.5, também é de fundamental importância o controle do comprimento longitudinal das estruturas projetadas.

#### Comprimento do transdutor padrão

O comprimento do transdutor padrão desenhado é a soma entre o comprimento ocupado pela estrutura interdigitada e o espaço ocupado pelos *pads* para as ponteiros dos equipamentos de caracterização. Todas as estruturas possuem o mesmo padrão para os *pads* medindo 2,2 mm.

$$W_{TID} = N \cdot \lambda_0 + 2,2 \text{ mm} \quad (2.23)$$

#### Comprimento de superfície livre

O comprimento de superfície livre é referente ao espaço do substrato reservado para o *tempo morto*. Todas as etiquetas foram projetadas para um *tempo morto* de 1  $\mu\text{s}$  quando fabricadas em um substrato com velocidade de propagação  $v = 4000 \text{ m/s}$ , resultando em um mesmo comprimento de 2 mm para todas as etiquetas.

$$W_{sl} = \frac{\Delta t_{\text{morto}}}{2} \cdot v = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4000 = 2 \text{ mm} \quad (2.24)$$

#### Comprimento da grade refletora

O comprimento do substrato que contém as estruturas refletoras da etiqueta é calculado pela equação seguinte.

$$W_{gr} = \text{NFT}_{\text{total}} \cdot t_s \cdot v = (\text{NRC} \cdot \text{NFT} + 1) \cdot M \cdot \lambda_0 \quad (2.25)$$

Nota-se que o  $\text{NFT}_{\text{total}}$  utilizado difere da Equação 2.13 devido à escolha de fabricar os refletores de calibração nas partes mais internas de suas faixas, como já mencionado na Seção 2.2.3.

#### Comprimento total das estruturas

O comprimento total da estrutura tipo linha de retardo com transdutores padrão é calculado pela soma de dois TIDs e a distância  $d$  entre eles como mostrado na Figura 2.23.

$$W_{\text{total},1} = 2 \cdot W_{TID} + d \quad (2.26)$$



Já a etiqueta de identidade possui o comprimento total calculado pela soma a seguir:

$$W_{total,2} = W_{TID} + W_{sl} + W_{gr} \quad (2.27)$$

### Largura total das estruturas

A largura de todas as estruturas é o comprimento de superposição dos eletrodos,  $L$ , acrescido de 0,4 mm para as hastes laterais do transdutor. Todos os transdutores foram feitos com  $L = 5$  mm.

$$H_{total} = L + 0,4 \text{ mm} = 5,4 \text{ mm} \quad (2.28)$$

A Tabela 2.10 mostra os resultados do cálculo das larguras das bandas passantes do transdutor padrão e do pulso interrogador para cada etiqueta fabricada em niobato de lítio com velocidade de propagação  $v = 4000$  m/s. Também contém os comprimentos obtidos pelas Equações 2.23, 2.25 e 2.27.

A Tabela 2.11 contém os resultados do cálculo dos componentes do circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 2.16 e os limites para a zona de Fresnel correspondente para cada estrutura, utilizando os parâmetros do niobato de lítio 41,5°,X da Tabela 1.1.

**Tabela 2.10:** Resultados dos cálculos da largura de banda e do comprimento das estruturas projetadas, utilizando dois refletores de código ( $NRC = 2$ ) e três faixas de tempo ( $NFT = 3$ ).

$\lambda_0$	N	M	$T_p$	$f_0$	$\Delta f_p$	$\Delta f_{TID}$	$W_{TID}$	$W_{gr}$	$W_{total}$
50 $\mu\text{m}$	24	20	250 ns	80 MHz	8 MHz	6,7 MHz	3,45 mm	7 mm	12,45 mm
40 $\mu\text{m}$	24	20	200 ns	100 MHz	10 MHz	8,4 MHz	3,16 mm	5,6 mm	10,76 mm
	40	28	280 ns	100 MHz	7,2 MHz	5 MHz	3,8 mm	7,84 mm	13,64 mm
30 $\mu\text{m}$	40	40	400 ns	100 MHz	5 MHz	5 MHz	3,8 mm	11,2 mm	17 mm
	24	20	100 ns	133 MHz	13,4 MHz	11,1 MHz	2,87 mm	4,2 mm	9,07 mm
20 $\mu\text{m}$	20	20	100 ns	200 MHz	20 MHz	20 MHz	2,6 mm	2,8 mm	7,4 mm
	60	60	300 ns	200 MHz	6,7 MHz	6,7 MHz	3,4 mm	8,4 mm	13,8 mm
	80	60	300 ns	200 MHz	6,7 MHz	5 MHz	3,8 mm	8,4 mm	14,2 mm

Lembrando que o valor em  $W_{TID}$  inclui o comprimento dos *pads* e que podem ser retirados das etiquetas comerciais, pode-se observar que o comprimento do transdutor representa uma pequena parte do tamanho total da estrutura. O comprimento de superfície livre é necessário para introduzir o tempo morto de retardo das etiquetas e ocupa um espaço fixo no substrato independente da frequência de operação. Com o aumento da frequência, este comprimento

fixo começa a representar um espaço, não utilizado por refletores de código, significativo. No entanto, o comprimento da grade refletora depende de parâmetros de projeto como  $M$  e  $\lambda_0$ .

**Tabela 2.11:** Resultados dos cálculos da impedância para casamento e do limite de Fresnel correspondente das estruturas projetadas, utilizando 200 nanômetros para a espessura do filme metálico de alumínio ( $h = 200$  nm).

$f_0$	N	L	h	$R_{en}$	$R_{eq}$	$C_{eq}$	$L_{sint}$	$x_c$
80 MHz	24 pares	5 mm	200 nm	64,9 $\Omega$	11,6 $\Omega$	300 pF	13,2 nH	27,8 cm
100 MHz	24 pares	5 mm	200 nm	75,9 $\Omega$	9,2 $\Omega$	300 pF	8,5 nH	34,7 cm
	40 pares	5 mm	200 nm	70,6 $\Omega$	4 $\Omega$	1,1 nF	2,2 nH	34,7 cm
133 MHz	24 pares	5 mm	200 nm	95,6 $\Omega$	7 $\Omega$	300 pF	4,8 nH	46,1 cm
200 MHz	20 pares	5 mm	200 nm	139 $\Omega$	6 $\Omega$	192 pF	3,3 nH	69,3 cm
	60 pares	5 mm	200 nm	134 $\Omega$	1 $\Omega$	3,7 nF	0,2 nH	69,3 cm
	80 pares	5 mm	200 nm	134 $\Omega$	0,5 $\Omega$	8,6 nF	0,07 nH	69,3 cm
100 MHz	24 pares	1 mm	200 nm	59,6 $\Omega$	46,3 $\Omega$	60 pF	42,3 nH	13,9 mm
200 MHz	20 pares	0,65 mm	200 nm	63,6 $\Omega$	46,2 $\Omega$	25 pF	25,3 nH	11,7 mm
434 MHz	20 pares	0,3 mm	200 nm	63,5 $\Omega$	46,2 $\Omega$	11,5 pF	11,7 nH	5,4 mm

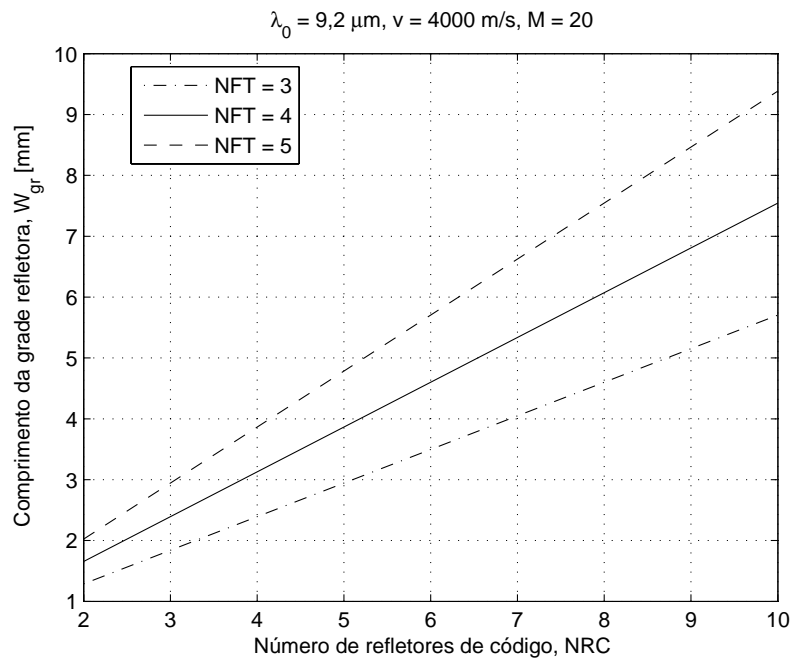
Como pode ser observado, o comprimento de superposição dos eletrodos,  $L$ , está superdimensionado, causando perdas ôhmicas no transdutor e gerando uma zona de Fresnel desnecessária visto que  $W_{sl} + W_{gr} \approx 1$  cm. A redução para um valor mais apropriado tem impacto direto no valor da capacitância estática,  $C_T$ , que altera a resistência e a capacitância equivalente do circuito de impedância modelado. A parte inferior da Tabela 2.11, mostra um melhor dimensionamento de  $L$  nas frequências de operação de 100 MHz e 200 MHz visando obter um comprimento para a zona de Fresnel apropriado para as etiquetas da Tabela 2.10.

Como destacado anteriormente, o número de pares de dentes do transdutor é um dos principais parâmetros de ajuste do projeto. Neste ajuste, deve-se tentar obter uma resistência de entrada,  $R_{en}$ , o mais próximo possível da impedância do equipamento de medição (normalmente 50  $\Omega$ ) ou da antena a ser acoplada, para maximizar a transferência de potência. A diferença entre o  $R_{en}$  e o  $R_{eq}$  é devido à resistência elétrica no dente do transdutor,  $R_d$ , que é diretamente proporcional ao valor de  $L$  e inversamente proporcional ao valor da largura do dente,  $a$ . O valor da relação  $R_{eq}/R_{en}$  deve ser próximo da unidade. Ou seja, é preciso manter  $R_d$  o menor possível para diminuir as perdas de potência que não são aproveitadas para gerar ondas acústicas.

A capacitância equivalente,  $C_{eq}$ , e a frequência de operação determinam o valor da indu-

tância de sintonia,  $L_{sint}$ . Para a concepção do dispositivo integrado, foi estipulada uma faixa de valores razoáveis de indutância de 10 nH a 50 nH para o indutor planar.

Por fim, uma etiqueta projetada para operar em  $f_0 = 434$  MHz neste mesmo substrato, com os parâmetros apropriadamente dimensionados sob as considerações citadas, é mostrada no fim da Tabela 2.11. O valor obtido para o comprimento da zona de Fresnel nesta etiqueta subtraído do comprimento de superfície livre ( $x_c - W_{sl} = 5,4 - 2 = 3,4$  mm) é o espaço útil para a grade refletora. O gráfico da Figura 2.25 possibilita determinar a melhor escolha entre o número de refletores de código e o número de faixas de tempo para maximizar o número de identidades distintas possíveis para um mesmo comprimento de grade refletora,  $W_{gr}$ .



**Figura 2.25:** Tamanho da grade refletora de uma etiqueta projetada para  $f_0 = 434$  MHz em função do número de refletores de código (NRC) e do número de faixas de tempo (NFT).

Para uma grade de 3 milímetros, aproximadamente, o gráfico apresenta três opções de escolha. O cálculo do número de etiquetas foi realizado pela Equação 2.22. A opção que melhor aproveita a grade possibilita a realização de até 81 etiquetas diferentes.

NFT = 5, NRC = 3	⇒	Número de identidades = 64
NFT = 4, NRC = 4	⇒	Número de identidades = 81
NFT = 3, NRC = 5	⇒	Número de identidades = 32

## 2.5 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se um modelo de circuito elétrico equivalente para representar o transdutor interdigitado padrão da Figura 2.2. A partir do circuito equivalente, a impedância de entrada foi obtida e uma estimativa para a largura de banda passante do dispositivo foi feita. O valor da capacitância estática pode ser determinada pelo cálculo das Equações de Maxwell com ajuda do FASTCAP ou outra ferramenta computacional similar. Um modelo mais completo deve considerar as perdas ôhmicas nos eletrodos do transdutor.

Os dois tipos de estruturas refletoras mais comuns para compor a grade refletora foram apresentados em seguida. A disposição das estruturas refletoras deve seguir um método de codificação e, pela característica dos pulsos refletidos, garantir um padrão de ecos único para cada etiqueta.

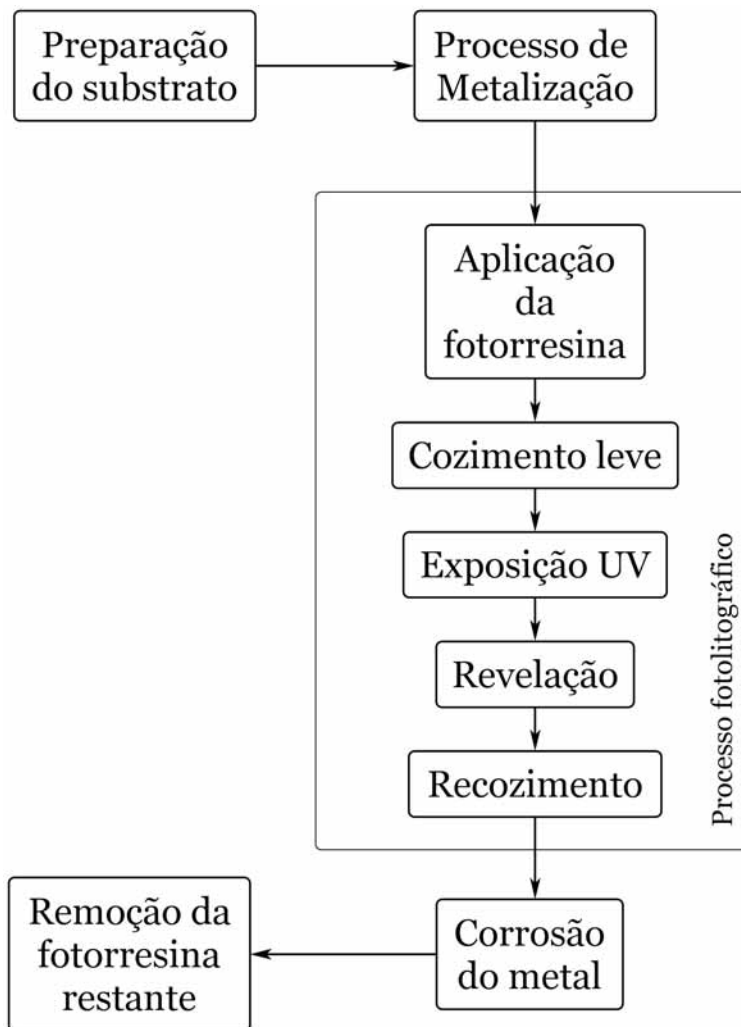
Com posse da impedância de entrada do TID é possível calcular os elementos de acoplamento da antena para maximizar a transferência de potência para o dispositivo sem fio. Uma expressão para prever a distância máxima de leitura da etiqueta OAS foi dada baseada na equação de radar e as estratégias de interrogação de múltiplas etiquetas foram discutidas. E, por fim, foi mostrado um exemplo de projeto de etiquetas operando em 434 MHz da banda ISM com possível potencial comercial.

## CAPÍTULO 3

# ETAPAS DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ETIQUETAS RFID OAS

Uma das grandes vantagens da etiqueta RFID OAS perante a etiqueta baseada em semicondutores é a simplicidade de manufatura do dispositivo. Estruturas OAS são geralmente obtidas utilizando processos corriqueiros de microfabricação. Nesta dissertação, as estruturas foram fabricadas com apenas um processo fotolitográfico como ilustrado na Figura 3.1. Uma sequência alternativa de processos para a realização das etiquetas utiliza a técnica *liftoff* de transferência de padrões metálicos. Esta técnica, na qual a metalização somente é feita após o recozimento no final do processo litográfico ao invés de antes da aplicação da fotorresina e dispensa o processo de corrosão do metal, está descrita na Seção 3.7 e é a mais usada para fabricar padrões de metal em dispositivos de ondas acústicas de superfície [35]. Porém, a sequência de processos dita *tradicional* foi escolhida em virtude da disponibilidade dos materiais necessários e por estar caracterizada no *Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas*.

Visto que o processo de fabricação adotado faz uso de uma etapa de litografia óptica (processamento da fotorresina), são necessárias as máscaras litográficas contendo os padrões das estruturas projetadas. O desenho do *layout* foi realizado com o uso da ferramenta *IC Station* da *Mentor Graphics* e a *CTI - SP*, em Campinas, foi contratada para a confecção das três máscaras.



**Figura 3.1:** Fluxograma típico de fabricação de etiquetas RFID OAS.

### 3.1 Desenho das máscaras litográficas

As estruturas projetadas descritas no Capítulo 2 foram desenhadas na ferramenta *IC Station*, como mostrado na Figura 3.2. Estas células foram instanciadas para formar três matrizes e extraiu-se os arquivos GDS. Os desenhos das máscaras litográficas são mostrados nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5.

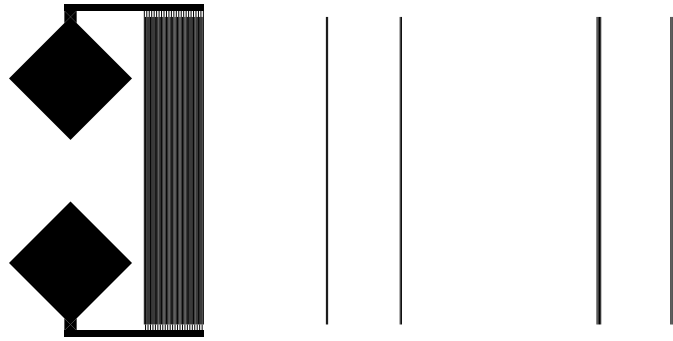


Figura 3.2: *Etiqueta RFID desenhada no IC Station da Mentor Graphics.*

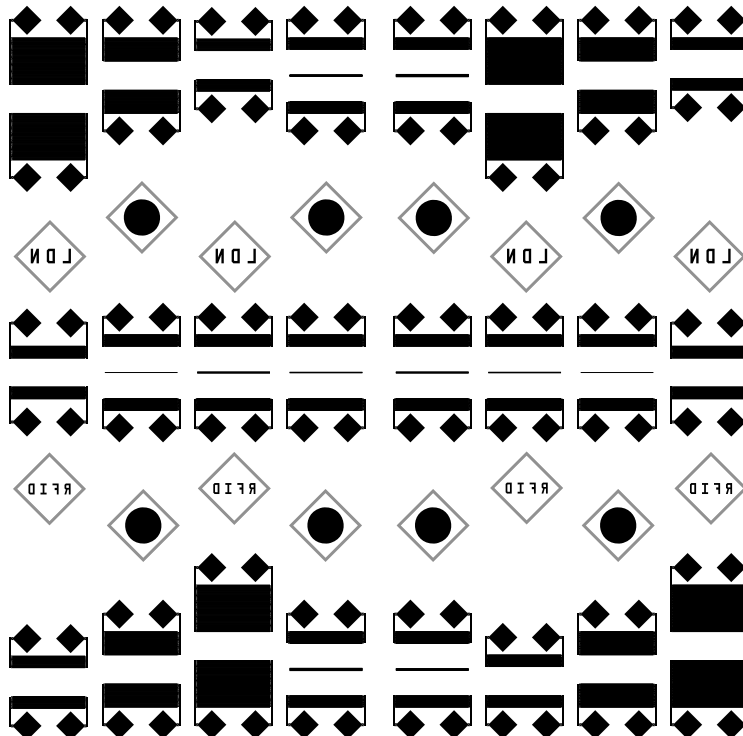


Figura 3.3: *Máscara litográfica com estruturas de linha de retardo com dimensão crítica de 10  $\mu\text{m}$ .*

Os arquivos GDS das estruturas projetadas podem ser importadas no COMSOL Mul-

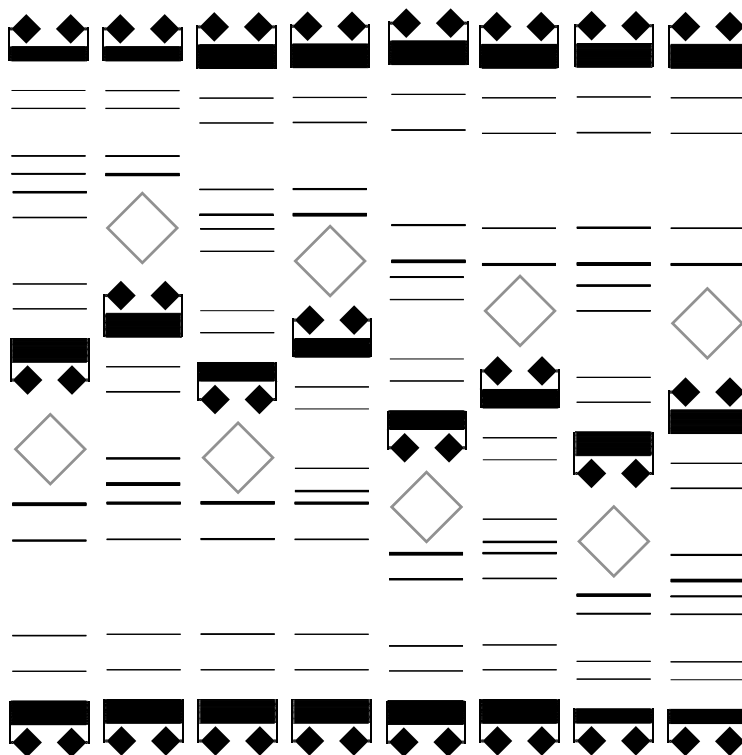


Figura 3.4: Máscara litográfica com etiquetas de identidade com dimensão crítica de 10  $\mu\text{m}$ .

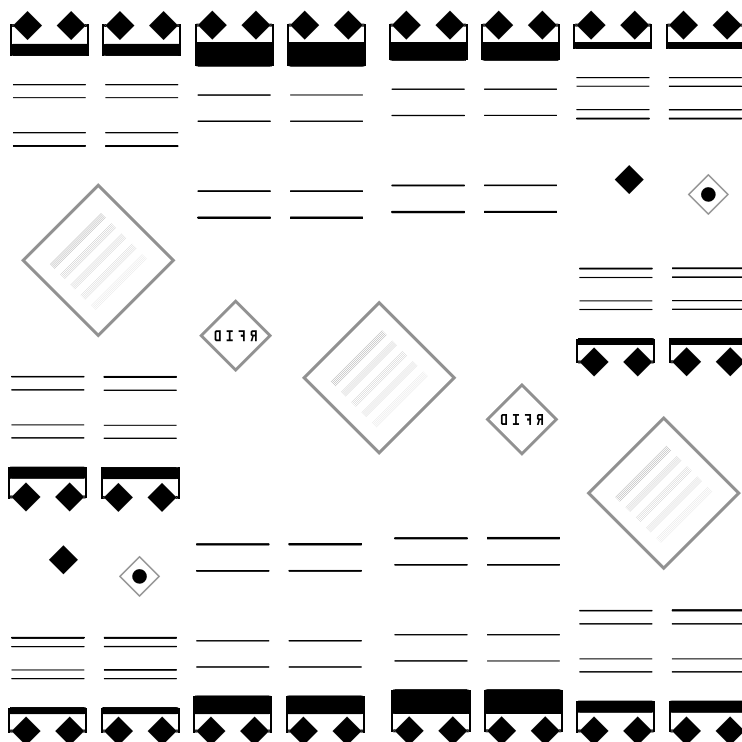
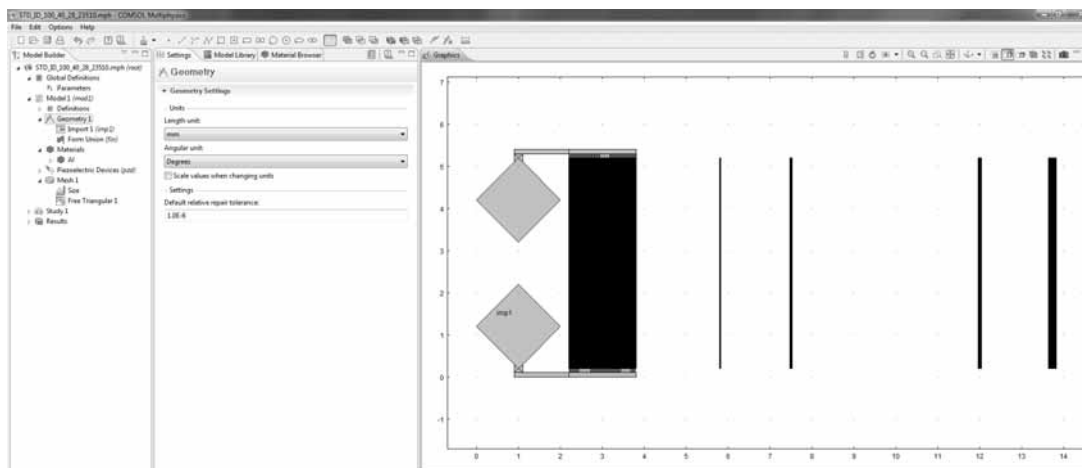


Figura 3.5: Máscara litográfica com etiquetas de identidade com dimensão crítica de 5  $\mu\text{m}$ .



tipphysics ([www.comsol.com](http://www.comsol.com)) para simulação multifísica. Com esta ferramenta, pode-se, por exemplo, simular as deformações no substrato piezoelétrico, o efeito da difração durante a propagação das ondas acústicas e as respostas em frequência e no domínio do tempo das estruturas para comparação com os resultados obtidos na caracterização e, posteriormente, auxiliar o projeto dos dispositivos.



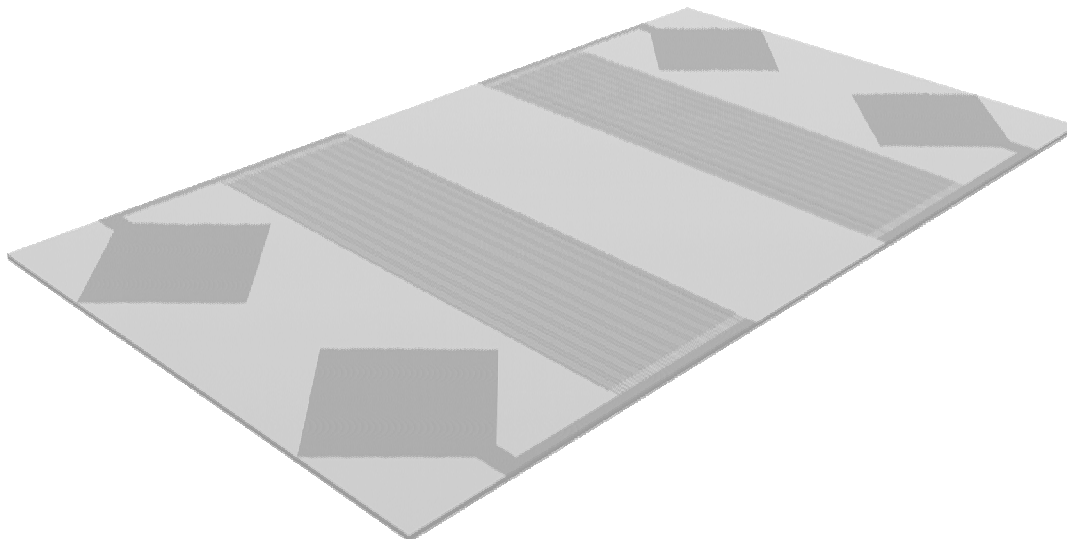
**Figura 3.6:** Arquivo de uma etiqueta projetada importada no COMSOL para simulações multifísicas.

O uso da ferramenta computacional IntelliFab ([www.intellisense.com](http://www.intellisense.com)) permite a simulação de processos de fabricação, como descritos neste capítulo. Os arquivos GDS foram devidamente importados na ferramenta, como mostrado na Figura 3.7. Uma sequência de processos foi simulada e pode-se ajustar os parâmetros de cada processo para a comparação com os resultados obtidos em sala limpa.

## 3.2 Preparação do substrato

A limpeza das lâminas é um procedimento crucial para a obtenção de altos índices de produtividade. Se uma fonte de contaminação é identificada, pode ser mais efetivo eliminar a fonte em vez de remover o contaminante pelo uso de processos de limpeza. Enquanto esses procedimentos se propõem a resolver um problema imediato, eles representam etapas adicionais que podem levar a outras contaminações.

De uma maneira geral, há duas categorias de contaminação: partículas e filmes. Como há duas classes de contaminação, duas etapas ou técnicas precisam ser empregadas para realizar uma limpeza completa. Visto que uma técnica segue a outra, a última não pode recontaminar



**Figura 3.7:** Simulação do processo de fabricação de uma estrutura de linha de retardo projetada.

a superfície e degradar a eficiência do procedimento de limpeza.

Para remoção química de óxidos, fotorresinas e outros contaminantes orgânicos, foi preparada uma sequência de quatro béqueres, como mostra a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Procedimento empregado na limpeza das lâminas.

Recipiente	Solução	Propósito	Duração
Béquer 1	Acetona	Retirar resíduos orgânicos	1 minuto
Béquer 2	Água deionizada	Remoção da acetona	1 minuto
Béquer 3	Álcool	Remoção da acetona restante	1 minuto
Béquer 4	Água deionizada	Remoção do álcool	1 minuto

Cada lâmina deve ser imersa individualmente em cada béquer seguindo a sequência especificada. O tempo de duração foi fixado em 1 minuto por béquer, porém, este tempo não é crítico para este tipo de solução de limpeza. Por fim, a secagem de cada lâmina foi feita aplicando um jato de gás nitrogênio de uma extremidade à outra da superfície.

### 3.3 Deposição de metal por evaporação

Metais podem ser fisicamente depositados sobre a superfície da lâmina por evaporação das espécies e condensação em forma de filme fino. O filme fino formado deve satisfazer uma série de condições estruturais, químicas e elétricas. A composição química e espessura do filme

devem ser estritamente controladas para que o processo de corrosão seja satisfatório. Propriedades mecânicas como excelente aderência e baixo estresse são requeridos na fabricação.

### 3.3.1 Aderência

A aderência dos filmes depositados deve ser excelente para evitar problemas nos processos de fabricação seguintes e falhas no dispositivo final por desprendimento dos eletrodos. A aderência é altamente afetada pela limpeza da lâmina. Contaminação na superfície do substrato gera redução da aderência. Etapas de limpeza antecedendo a deposição são essenciais para uma boa aderência filme-substrato. Também é importante verificar a rugosidade da lâmina. Aumentar a rugosidade pode melhorar a aderência do filme. Porém, em excesso, defeitos de revestimento podem aparecer prejudicando a aderência.

### 3.3.2 Estresse em filmes finos

Quase todo filme encontra-se em um estado de estresse interno. O estresse de um filme pode ser de compressão ou de tração. Filmes com estresse de compressão tendem a expandir paralelamente à superfície do substrato, tornando-o convexo. Filmes com estresse de tração tendem a contrair paralelamente ao substrato, tornando-o côncavo. O estresse total em um filme é a soma:

$$\sigma = \sigma_{ext} + \sigma_{th} + \sigma_{int},$$

onde  $\sigma_{ext}$  é o estresse causado por forças externas,  $\sigma_{th}$  é o estresse térmico e  $\sigma_{int}$  é o estresse intrínseco. O estresse térmico resulta da diferença entre os coeficientes de expansão térmica do filme e do substrato. O estresse intrínseco depende de parâmetros como espessura do filme, taxa de deposição, temperatura de deposição, pressão, método do processo, tipo de substrato, entre outros. Altos valores de estresse podem ser a causa de rachaduras no filme depositado.

Um método de deposição de filmes finos metálicos por evaporação é realizado por aquecimento resistivo. Neste método, o metal a ser evaporado é colocado em contato com um filamento de alto ponto de fusão que é aquecido. O metal primeiro derrete e envolve o filamento para ser então evaporado. Este tipo de equipamento exige uma câmara de alto vácuo para aumentar o *caminho livre médio* das moléculas.

O processo de deposição de filme metálico foi realizado utilizando a evaporadora *Edwards AUTO 306*. Esta metalizadora utiliza o método de evaporação por aquecimento resistivo em uma câmara de alto vácuo. Os substratos são montados sobre um suporte giratório no topo da

câmara com as faces voltadas para baixo. A rotação possibilita uma deposição mais uniforme sobre a superfície das lâminas. O monitoramento da espessura do filme depositado e da taxa de deposição é feito por medidas das variações de frequência em um oscilador de cristal a quartzo posicionado próximo às amostras. Ambas com uma resolução de 0,1 nm.

O sistema possui quatro pontos para carregamento dos materiais a serem evaporados, porém apenas um é aquecido por vez. Uma tensão é aplicada na estrutura de suporte utilizada (cadinho ou filamento com alto ponto de fusão) provocando a passagem de uma corrente que derrete e evapora o material. No equipamento, o controle da tensão aplicada ao suporte é feito pelo ajuste de um *variac* e a corrente é medida por um amperímetro. Uma lâmpada incandescente pode ser usada para aumentar a temperatura do substrato para promover melhor aderência e uniformidade do filme metálico.

### **Formação de alto vácuo na câmara interna**

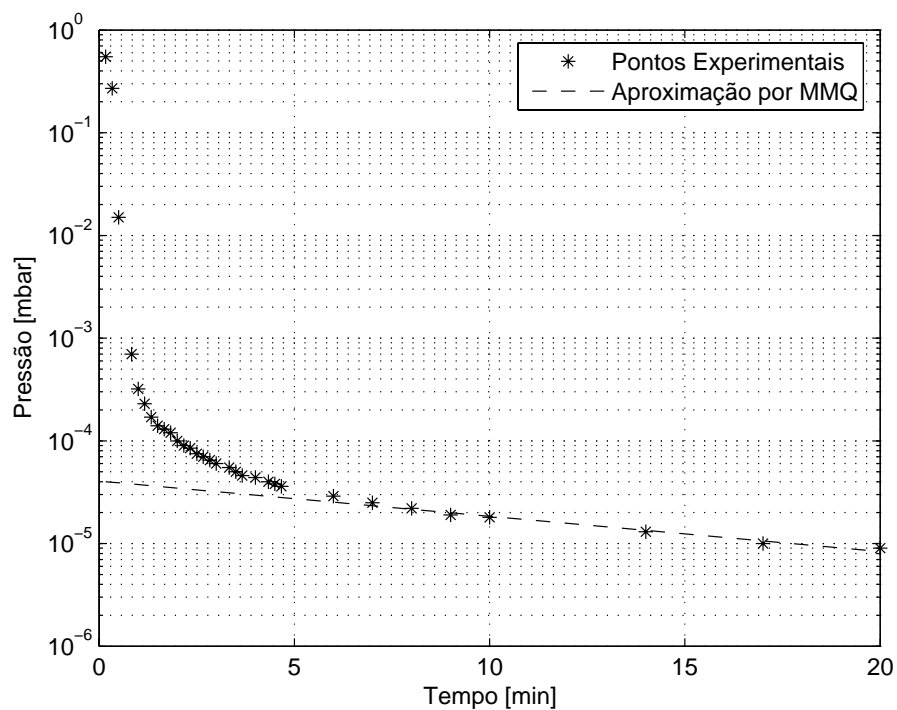
Para extrair uma curva de caracterização do processo de evaporação, a pressão interna da câmara durante a formação de alto vácuo em função do tempo foi monitorada. Como o equipamento possui duas bombas para evacuar a câmara, o primeiro comportamento da curva é determinado pela primeira bomba e posteriormente pela segunda. Os valores dos últimos pontos obtidos, com a coordenada referente à pressão interna em escala logarítmica, podem ser aproximados pela equação da reta  $\log P = C_1 t + C_2$ . Os coeficientes desta equação podem ser determinados por aproximação pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

Os coeficientes da equação da reta aproximada podem ser usados para calcular o tempo que levaria para a evaporadora alcançar uma dada pressão. O tempo necessário para atingir a pressão de  $2,2 \times 10^{-6}$  mbar calculado é de 37 minutos, pela aproximação da reta no gráfico da Figura 3.8. Porém, em um terceiro instante, o comportamento pode ser aproximado por uma reta paralela ao eixo do tempo, representando uma saturação do sistema de vácuo e resultando em uma pressão constante. Neste momento, moléculas pequenas, como a do hidrogênio, passam a infiltrar pelas paredes da câmara, estabilizando a pressão.

### **Processos de evaporação realizados**

O processo de evaporação foi realizado seguindo os passos a seguir:

1. Ligar a circuladora de água.
2. Ligar a evaporadora (mover a chave principal para a posição 1).



**Figura 3.8:** Pressão interna da câmara durante a formação do vácuo em função do tempo. A reta aproximada foi obtida pelo método dos mínimos quadrados. A reta pontilhada representa o comportamento regido pela segunda bomba, com os coeficientes  $C_1 = -0,034$  e  $C_2 = -4,4$ .

3. Pressionar o botão RESET (o botão START acende).
4. Pressionar START.
5. Pressionar CYCLE para evacuar a câmara.
6. Carregar o metal para evaporação no cadinho apropriado.
7. Carregar as lâminas nos suportes.
8. Ajustar os parâmetros do material a ser evaporado na máquina para calibração.
9. Iniciar a rotação do carrossel.
10. Pressionar RUN para zerar o medidor de espessura.
11. Mover a chave da posição 0 para a posição LT.
12. Aumentar a corrente aos poucos.
13. Desbloquear mecanicamente o material evaporando.
14. Registrar a pressão base, a corrente e a taxa de deposição.
15. Atingida a espessura desejada, bloquear mecanicamente o material evaporando.
16. Diminuir a corrente lentamente.
17. Mover a chave da posição LT para a posição 0.
18. Parar a rotação.
19. Pressionar SEAL.
20. Pressionar STOP e aguardar o STANDBY no display.
21. Desligar a evaporadora (mover a chave principal para a posição 0).
22. Desligar a circuladora de água.

No decorrer deste trabalho, as evaporações realizadas na fabricação das estruturas projetadas estiveram dentro das faixas apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** *Parâmetros empregados na evaporação.*

Equipamento	Edwards AUTO 306
Material	Alumínio
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Pressão base	$1,6 - 4,2 \times 10^{-6}$ mbar
Taxa	0,5 - 0,7 nm/s
Corrente	3,6 - 6 A
Espessura final	200 nm

### 3.4 Processo fotolitográfico

Os padrões que definem regiões de interesse na lâmina são transferidos por processos litográficos. A *fotolitografia*, ou *litografia óptica*, faz uso de resinas fotossensíveis que reagem quando expostas a uma intensidade de luz. A definição das regiões onde a fotorresina será sensibilizada é feita com o uso de máscaras litográficas. O processo consiste das seguintes

**Tabela 3.3:** *Parâmetros do material a ser evaporado.*

Material	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Impedância acústica
Alumínio	2,7	8,17
Ouro	19,3	23,17
Níquel	8,91	26,7
Platina	21,4	36,06

etapas básicas: aplicação da fotorresina, cozimento leve, exposição à luz ultravioleta, revelação e recozimento pós-revelação. As áreas cobertas pela fotorresina remanescente do processo de revelação (imagem da máscara litográfica) são regiões protegidas durante os processos de manufatura subsequentes. A resina é enfim removida totalmente ao final do processo.

### **Resolução**

A resolução de um processo litográfico é definida em termos da função de transferência de modulação do equipamento de exposição em combinação com a resina sendo utilizada. De uma forma menos formal, a resolução especifica a habilidade de imprimir tamanhos mínimos de imagens sob condições de variações de usuais de manufatura com consistência.

Para uma fotorresina negativa, o contraste está relacionado com a taxa de formação de cadeias poliméricas a uma dose constante de iluminação. Já para uma fotorresina positiva, o contraste está relacionado com a taxa de quebra das cadeias poliméricas a uma dose constante de iluminação.

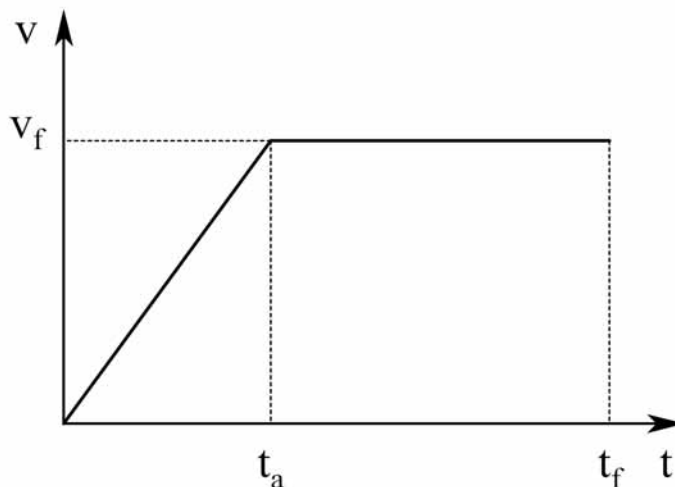
#### **3.4.1 Aplicação da fotorresina**

A fotorresina é convencionalmente constituída por uma resina acrescida de um agente fotossensibilizador e solvente. A resina é o material matriz responsável pela resistência à corrosão, aderência e pelas propriedades do filme como espessura e flexibilidade. No entanto, é inerte à radiação. A adição de substâncias que reagem com a resina quando expostas à luz torna a solução fotossensível. O solvente permite que a resina esteja no estado líquido para aplicação.

A composição destes três itens com grau de pureza eletrônico é comercializada de forma que a fotorresina pode ser tipo positiva ou tipo negativa. No caso em que as regiões expostas ficam solúveis, a fotorresina é dita positiva. Quando a área iluminada fica insolúvel pelo solvente revelador, a fotorresina é do tipo negativa. A capacidade de maiores resoluções

litográficas ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) é a principal vantagem das fotorresinas positivas.

O objetivo desta etapa é produzir um filme polimérico aderente, livre de defeitos com uma espessura controlada e uniforme por toda a área da lâmina. Para o sucesso de uma boa reprodutibilidade da largura de linha, é desejável que a variação da espessura do filme por toda a lâmina esteja dentro de um intervalo de  $\pm 10 \text{ nm}$ . A técnica mais usada para aplicação de fotorresina utiliza um equipamento com prato giratório (*spinner*). O procedimento é feito aplicando em quantidade adequada a resina no centro da lâmina e acionando a rotação do prato para espalhá-la.



**Figura 3.9:** Gráfico da velocidade de rotação do prato para aplicação da fotorresina na lâmina.

O despejamento da fotorresina com a lâmina estática resulta em melhor uniformidade que em uma aplicação dinâmica. Uma vez que o solvente evapora rapidamente, a viscosidade também aumenta. Portanto, quanto mais rápida a aceleração até a velocidade final, menores os níveis de não uniformidade na espessura do polímero. A rotação permanece com velocidade constante e consiste na evaporação de solvente para produzir um filme sólido determinando a espessura final.

Algumas propriedades materiais da resina que causam impacto na resolução são: contraste, inchamento e fluxo térmico. O contraste e o inchamento se manifestam em resposta às etapas de exposição e revelação enquanto que o fluxo térmico é considerado durante o recozimento pós-revelação.

### Processos de aplicação da fotorresina realizados

O processo de aplicação da fotorresina foi realizado através dos seguintes passos:



1. Conectar e abrir o cilindro de nitrogênio à máquina.
2. Inicializar a máquina de rotação.
3. Selecionar uma receita para o processo.
4. Montar a suporte apropriado para a lâmina.
5. Posicionar a lâmina no suporte de rotação.
6. Fechar a tampa da máquina.
7. Aplicar a fotorresina pela abertura da tampa no centro da lâmina cobrindo 2/3 de uma única vez. Múltiplos pingos podem causar bolhas e prejudicam a qualidade do filme.
8. Iniciar a rotação imediatamente.
9. Aguardar o fim da receita de rotação até parar.
10. Retirar a lâmina revestida.
11. Desligar a máquina e fechar o cilindro de nitrogênio.

No decorrer deste trabalho, os processos de aplicação de fotorresina para a fabricação das estruturas projetadas utilizaram os parâmetros listados na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4:** *Parâmetros empregados na aplicação da fotorresina.*

Equipamento	SCS   G3P-12 Spincoat
Fotorresina	Shipley S1813 positive resist
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Rotação final	3000 rpm
Duração total	1 minuto

### 3.4.2 Cozimento leve

Após a lâmina ser revestida pela fotorresina, ela precisa passar por uma etapa de cozimento leve. O propósito desta etapa é promover a evaporação residual de solvente da resina, melhorar a adesão e reduzir a tensão no filme causada pelo processo giratório. As condições nas quais o cozimento da lâmina é processado influencia vários parâmetros das etapas de processos subsequentes. Consequentemente, o cozimento deve ser cuidadosamente otimizado e controlado.

Como resultado da evaporação de solvente durante este processo, a espessura do filme também é reduzida. A taxa de ataque à resina pelo revelador depende significativamente da concentração de solvente residual. Quanto maior a quantidade de solvente maior é a ação de dissolução do revelador. Porém, uma resina com muito solvente é atacada pelo revelador em ambas as regiões sensibilizadas ou não pela exposição.

Por outro lado, um cozimento excessivo pode causar reações no componente fotoativo prejudicando a sensibilidade durante a etapa de exposição.

### Processos de cozimento leve realizados

O processo de cozimento leve foi realizado através dos seguintes passos:

1. Ligar e aquecer a chapa quente.
2. Ajustar a temperatura da chapa para o processo.
3. Monitorar a temperatura até estabilizar.
4. Colocar a lâmina no centro da chapa e iniciar o cronômetro.
5. Aguardar a duração especificada para o processo.
6. Retirar a lâmina e armazená-la.
7. Registrar a temperatura e o tempo de duração do processo.
8. Desligar a chapa.

No decorrer deste trabalho, os processos de cozimento leve utilizaram os parâmetros listados na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5:** *Parâmetros empregados no cozimento leve.*

Equipamento	Corning hotplate
Medição	Multímetro Minipa ET-2053 com termopar
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Temperatura	90°C
Duração	1 minuto

### 3.4.3 Exposição à luz ultravioleta

Durante a exposição, transformações fotoquímicas ocorrem na resina criando a imagem da máscara. O grau de exposição é ajustado controlando a intensidade da fonte e o tempo de exposição. Neste processo, as lâminas são expostas uma de cada vez e deve-se escolher finalmente quais máscaras serão utilizadas em cada lâmina.

### Processos de exposição ultravioleta realizados

O processo de exposição UV foi realizado através dos seguintes passos:

1. Ligar a fonte de luz UV e deixar a lâmpada aquecer.
2. Selecionar a lâmina e a máscara litográfica.
3. Medir e registrar a intensidade da fonte.
4. Determinar e ajustar o tempo de duração do processo de exposição.

5. Posicionar a máscara sobre a lâmina e realizar o alinhamento (manual).
6. Mover o conjunto para baixo da fonte de luz UV.
7. Pressionar EXPOSE e iniciar a exposição.
8. Aguardar o fim do processo e registrar os parâmetros.
9. Retirar o conjunto, guardar a máscara e a lâmina.

Nos processos de exposição para fabricação das estruturas projetadas realizados, os parâmetros utilizados estão mostrados na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6:** *Parâmetros empregados na exposição ultravioleta.*

Equipamento	LS30/5 OAI
Medição	<i>Minipa MLM - 1332 Digital Lux Meter</i>
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Intensidade	1216 - 1242 lux
Tempo de exposição	230 segundos

Observa-se que a intensidade da fonte de luz UV decai com o tempo de uso da lâmpada. Pode-se compensar aumentando a duração do tempo de exposição mas o impacto dessa compensação no processo ainda não foi caracterizada.

#### 3.4.4 Revelação

A revelação se traduz na remoção da fotorresina solúvel após a exposição UV deixando a imagem da máscara que servirá para os processos seguintes. A lâmina precisa ser enxaguada e secada logo após a aplicação do revelador pois sua ação é contínua até que seja totalmente removido da superfície.

Os parâmetros de processo que precisam ser cuidadosamente avaliados são: tempo de exposição, temperatura de cozimento leve, espessura da fotorresina, concentração do revelador, temperatura do revelador e o método de agitação mecânica na solução.

#### Processos de revelação realizados

O processo de revelação foi realizado através dos seguintes passos:

1. Colocar a quantidade suficiente de revelador em um béquer.
2. Colocar água DI em outro béquer.
3. Determinar o tempo de revelação para o processo.
4. Imergir a lâmina delicadamente no revelador e iniciar o cronômetro.
5. Aguardar o tempo de revelação realizando leve agitação da lâmina com a pinça.

6. Retirar a lâmina e mergulhá-la em água DI para cessar a ação do revelador.
7. Aguardar o tempo especificado realizando leve agitação do béquer.
8. Retirar a lâmina e secá-la com gás nitrogênio.
9. Realizar inspeção visual dos padrões de fotorresina na lâmina.

Na Tabela 3.7 constam os parâmetros utilizados na revelação.

**Tabela 3.7:** *Parâmetros empregados na revelação.*

Revelador	Shipley MF-319
Temperatura	Ambiente (sala)
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Tempo no revelador	40 segundos
Tempo na água DI	2 minutos

### 3.4.5 Recozimento pós-revelação

Após a revelação da fotorresina, ela precisa passar por uma etapa de recozimento. O propósito desta etapa é promover a evaporação residual de solvente da resina, melhorar ainda mais a aderência e aumentar a resistência da resina para o processo de corrosão.

#### Processos de recozimento realizados

O procedimento é igual ao descrito no processo de *cozimento leve*. Porém, os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 3.8

**Tabela 3.8:** *Parâmetros empregados no recozimento.*

Equipamento	Ceramag Midi
Medição	Multímetro Minipa ET-2053 com termopar
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Temperatura	110°C
Duração	1 minuto

## 3.5 Corrosão do metal

O objetivo é remover o material não coberto pela máscara. Processos de corrosão não são capazes de transferir precisamente os padrões estabelecidos pela máscara de proteção para o

material subposicionado devido ao fato de que a remoção do material pode ocorrer na direção vertical e na horizontal. O grau em que o processo falha em satisfazer o ideal é especificado por dois parâmetros: *tendência* e *tolerância*. A *tendência* do processo é a diferença nas dimensões laterais da imagem corroída e da imagem da máscara. A *tolerância* do processo é uma medida da distribuição estatística dos valores da tendência que caracteriza a uniformidade da corrosão.

A taxa com que o material-alvo é removido do filme pela ação da corrosão é conhecido como *taxa de corrosão*. O grau com que as taxas de corrosão vertical e horizontal diferem caracteriza a *anisotropia da corrosão*. Definindo a taxa de corrosão lateral  $L_R$  como a relação entre as taxas de corrosão horizontal e vertical,

$$L_R = \frac{\text{taxa de corrosão horizontal}}{\text{taxa de corrosão vertical}}$$

então o grau de anisotropia da corrosão,  $A$ , pode ser definido como:

$$A = 1 - L_R$$

Num processo de corrosão ideal, os padrões da máscara de fotorresina são transferidos para o material abaixo com tendência zero. Ou seja, com uma taxa de corrosão horizontal nula, o perfil do material corroído coincide com a borda da máscara resultando em  $L_R$  também nulo e maximizando  $A$ . A corrosão que ocorre em somente uma direção é dita *completamente anisotrópica*. Quando o processo ocorre em todas as direções com taxas iguais,  $L_R = 1$ , a corrosão é dita isotrópica e  $A$  é nulo. Em geral, o processo é situado entre estas duas condições extremas. O conhecimento do grau de anisotropia do processo tem impacto direto no controle do tamanho dos padrões transferidos. Na fabricação de dispositivos, pode ser necessário especificar uma compensação apropriada nas dimensões dos padrões na máscara.

Outro parâmetro importante é a seletividade do processo. Tanto o material da máscara como outros materiais de camadas inferiores podem ser corroídos pela solução. A seletividade com respeito ao material da máscara,  $S_{fm}$ , tem grande influência na satisfatoriedade dos padrões corroídos. A seletividade com respeito ao material do substrato,  $S_{fs}$ , tem impacto na produção e na performance do dispositivo. A razão entre as taxas de corrosão de diferentes materiais é conhecida como a *seletividade do processo de corrosão*.

O processo de corrosão deve durar o tempo suficiente para que a espessura do filme seja totalmente corroída. A partir daí, todo tempo adicional é referido como *corrosão exagerada*.

### 3.5.1 Corrosão úmida

Processos úmidos são aqueles em que as lâminas são colocadas em reagentes líquidos para ocorrer o efeito de fabricação esperado. A corrosão realizada por meio de reagentes químicos é chamada de corrosão úmida. O processo abrange três etapas: difusão do reagente para a superfície do filme, reação química e difusão dos produtos da reação embora da lâmina.

Processos de corrosão úmida são geralmente isotrópicos. Por isso, não são indicados para padrões com linhas muito estreitas. No entanto, para larguras maiores que  $3 \mu\text{m}$ , estes processos são bem interessantes por serem mais baratos, permitirem boa repetibilidade e excelente seletividade com respeito à resina da máscara e ao material do substrato.

Corrosões úmidas podem provocar problemas como perda de aderência nas bordas da máscara com o filme e falhas na área com resina. Ataques de borda podem ser combatidos com o uso de um promotor de aderência como o hexametildissilazana (HMDS). Reações químicas que produzirem bolhas também poderão levar a uma má definição dos padrões. As bolhas agarradas ao filme são indesejadas por evitar o acesso local de reagentes, perturbando a taxa de corrosão. Por este motivo, a agitação mecânica da lâmina durante o processo de corrosão úmida é uma medida para desalojar as bolhas da superfície da lâmina.

#### Processos de corrosão úmida realizados

O processo de corrosão foi realizado através dos seguintes passos:

1. Ligar e aquecer a chapa quente.
2. Ajustar a temperatura da chapa para o processo.
3. Preparar a solução de corrosão em um béquer.
4. Monitorar a temperatura da chapa até estabilizar.
5. Monitorar a temperatura da solução até estabilizar.
6. Colocar água DI corrente em outro béquer.
7. Determinar o tempo de corrosão para o processo.
8. Imergir a lâmina delicadamente na solução e iniciar o cronômetro.
9. Aguardar realizando leve agitação do béquer.
10. Retirar a lâmina e mergulhá-la em água DI corrente para cessar a corrosão.
11. Aguardar o tempo especificado.
12. Retirar a lâmina e secá-la com gás nitrogênio.
13. Registrar o tempo de corrosão.
14. Realizar inspeção visual dos padrões de metal na lâmina.

Para a fabricação das estruturas projetadas, os parâmetros de processo utilizados estão listados na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9:** *Parâmetros empregados na corrosão do alumínio.*

Equipamento	Corning hotplate
Medição	Multímetro Minipa ET-2053 com termopar e termômetro
Solução de corrosão	HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O (1:1:1) 40 ml
Substratos	Vidro, silício, niobato de lítio
Temperatura no prato	60°C
Temperatura no béquer	50°C
Tempo de corrosão	50 - 98 segundos
Tempo na água DI	2 minutos

### 3.6 Remoção da fotorresina restante

Por último, a fotorresina remanescente do processo de revelação e usada para proteger as regiões de metal durante o processo de corrosão pode enfim ser removida.

Em uma bancada foram colocados 4 béqueres na seguinte ordem: acetona, água deionizada, álcool e água deionizada. Todos com 200 ml de solução em temperatura ambiente (sala). Cada lâmina foi colocada em cada solução por 1 minuto na ordem especificada.

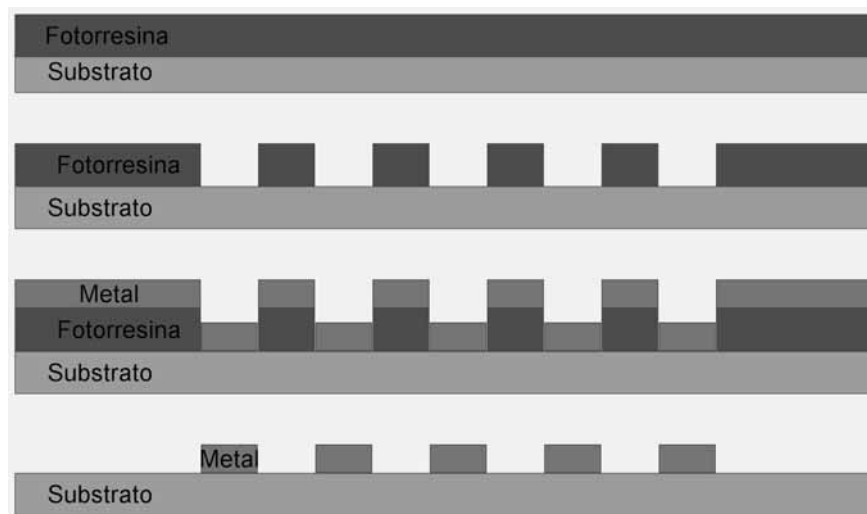
**Tabela 3.10:** *Procedimento empregado na remoção da fotorresina restante.*

-	min 1	min 2	min 3	min 4	min 5	min 6	min 7	min 8
Lamina a	acetona	água DI	álcool	água DI	N <sub>2</sub>	-	-	-
Lamina b	-	acetona	água DI	álcool	água DI	N <sub>2</sub>	-	-
Lamina c	-	-	acetona	água DI	álcool	água DI	N <sub>2</sub>	-
Lamina d	-	-	-	acetona	água DI	álcool	água DI	N <sub>2</sub>

### 3.7 A técnica *lift-off* de metalização

O método tradicional até aqui descrito para definição de trilhas de metal sobre o substrato é um processo dito subtrativo. Isto porque é realizada uma deposição de filme fino metálico e posteriormente as regiões indesejadas do material são removidas pelo processo de corrosão. A técnica *lift-off* é conhecida por permitir a formação de padrões de metal por um processo aditivo. Neste caso, uma camada polimérica é aplicada sobre o substrato e, por um processo litográfico, as regiões onde se quer metalizar são removidas. A evaporação do metal é feita em seguida e, por último, a fotorresina é retirada levando também o metal da camada superior.

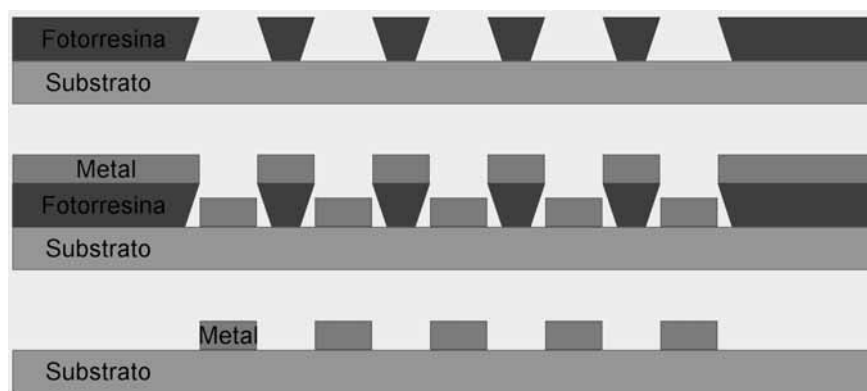
A seqüência da técnica *liftoff* ideal está ilustrada na Figura 3.10.



**Figura 3.10:** *Seqüência de processos da técnica liftoff ideal.*

O metal evaporado que se deposita sobre a fotorresina é dito *indesejado*. Ele deve ser todo removido junto com a remoção da fotorresina deixando apenas o metal *desejado* sobre o substrato. Para isso acontecer com êxito, o metal não pode estar contínuo. Se não houver uma separação entre o metal desejado e o indesejado, resultados imprevisíveis irão ocorrer depois da remoção da resina.

A chave para um processo de *liftoff* bem sucedido está em enrijecer a parte superior da fotorresina para reduzir a taxa de revelação no topo em relação às partes inferiores. Isto visa criar um perfil inclinado da fotorresina revelada tornando possível evaporar uma camada descontínua de metal como na Figura 3.11.



**Figura 3.11:** *Técnica liftoff bem sucedida.*



A principal vantagem da técnica *liftoff* é dispensar o processo de corrosão de metal. Inclusive multicamadas metálicas podem ser sequencialmente depositadas e os padrões definidos removendo a fotorresina de uma só vez, ao invés da realização de múltiplos processos de corrosão.

Por outro lado, esta técnica requer que outros processos, como evaporação e fotolitografia, sejam muito bem caracterizados e compatíveis para geração satisfatória dos padrões.

### 3.8 Inspeção visual

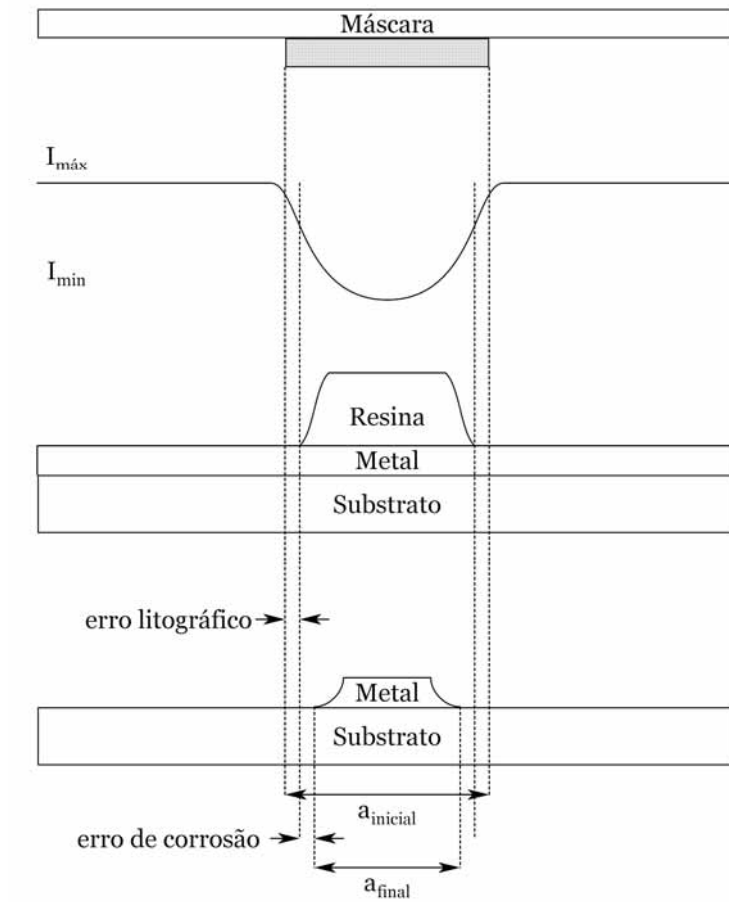
A inspeção visual ao final da fabricação foi feita utilizando um microscópio óptico e pôde-se verificar os resultados.



**Figura 3.12:** *Inspeção visual das estruturas fabricadas.*

A fabricação foi realizada utilizando uma fotolitografia de contato e uma corrosão úmida do alumínio. Tanto na revelação da fotorresina como na corrosão do metal é observada uma redução na *largura de linha inicial* como ilustrado na Figura 3.13. No processo fotolitográfico, isto ocorre porque a luz sofre difração nas bordas dos padrões da máscara, tornando parte da resina abaixo dela solúvel ao revelador. Já o processo de corrosão úmida é conhecido por atacar o material de forma isotrópica. Por isso, uma parte do material por baixo da resina é também corroída.

A diferença entre a *largura de linha* na máscara e a *largura de linha* fabricada é chamada de *viés* e pode ser compensada no arquivo de tecnologia da máscara. O uso de um perfilômetro para medição da *largura de linha* para caracterização do processo é capaz de determinar o

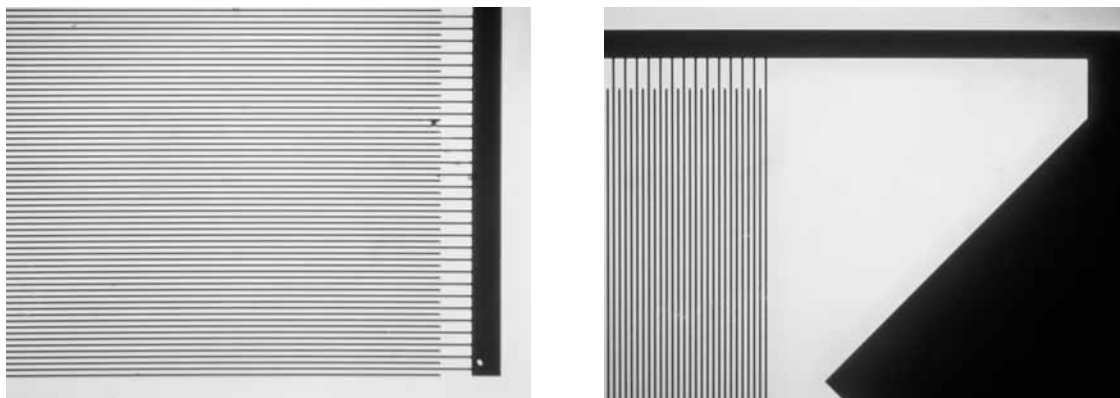


**Figura 3.13:** Perdas da largura de linha ao longo dos processos.

quanto de compensação é necessário para resultar na *largura de linha* desejada.

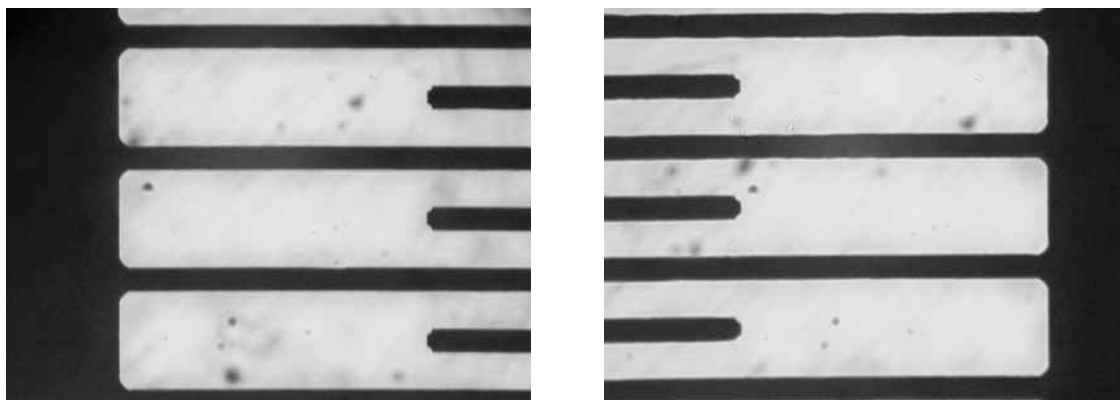
### 3.8.1 Estruturas fabricadas

A Figura 3.14 mostra o TID de uma etiqueta de RFID OAS fabricada com *dimensão crítica* de  $10\ \mu\text{m}$ . Pode-se observar nas Figuras 3.15 e 3.16 que as trilhas sofreram um estreitamento



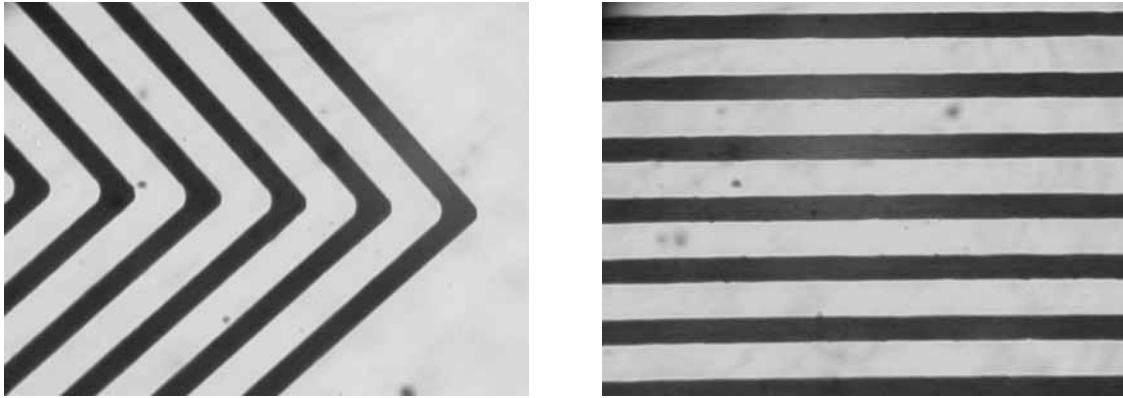
**Figura 3.14:** *Estrutura interdigitada fabricada de dispositivo final.*

já que foram projetadas para terem uma largura igual ao espaçamento entre elas e o efeito na fabricação de bordas ou pontas.



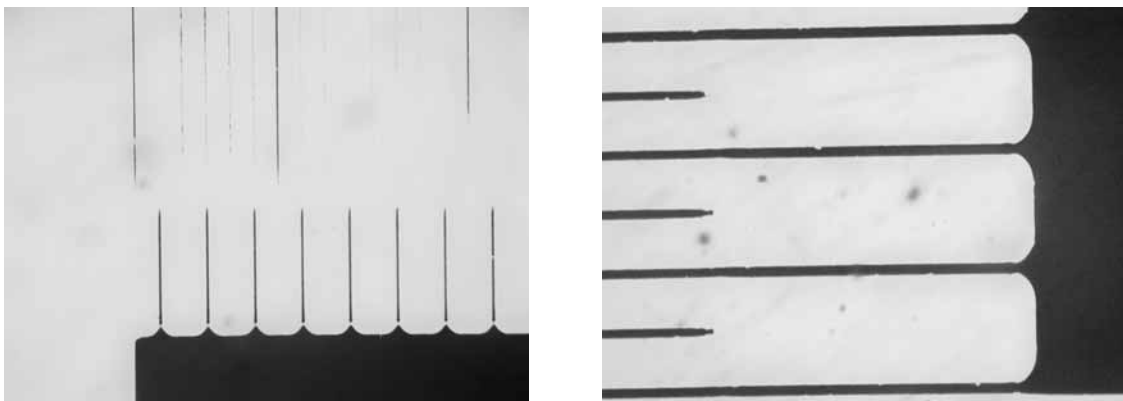
**Figura 3.15:** *Estruturas com níveis de corrosão aceitáveis.*

Os defeitos na fabricação podem ocorrer devido a erros operacionais durante algum processo ou devido a impurezas externas como poeira e outras partículas sobre a lâmina. A Figura 3.17 mostra perdas dos larguras de linha devido a uma corrosão exagerada do alumínio. No caso da Figura 3.18, a foto da esquerda mostra um defeito causando a abertura das trilhas



**Figura 3.16:** *Perda das definições nas bordas.*

enquanto que a foto da direita mostra uma estrutura em que a solução de corrosão encontrou problemas de acesso em alguns pontos causando trilhas em curto circuito.

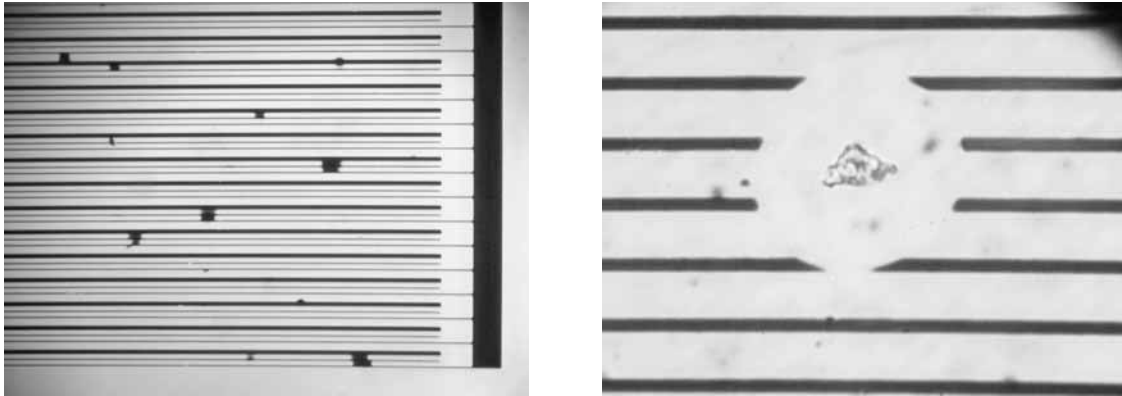


**Figura 3.17:** *Corrosão exagerada do alumínio.*

### 3.9 Considerações finais

Neste capítulo, mostrou-se que os dispositivos OAS projetados podem ser fabricados com apenas uma etapa de processo fotolitográfico, o que traduz a simplicidade de manufatura desta tecnologia. Os processos necessários para a microfabricação das etiquetas foram revisados com base na literatura. Os procedimentos adotados e os equipamentos utilizados em sala limpa foram tabelados para referência posterior.

A técnica *liftoff* de transferência de padrões em metal foi sucintamente descrita por sua grande utilização na fabricação deste tipo de dispositivo, mas não foi realizada por indispo-



**Figura 3.18:** *Defeitos de fabricação.*

nibilidade dos materiais necessários.

Alguns resultados observados por um microscópio óptico foram expostos no final do capítulo. Os padrões de  $10\ \mu\text{m}$  da máscara, em geral, resultaram em larguras de linha de  $7,5\ \mu\text{m}$  em metal. Poucos dos padrões de  $5\ \mu\text{m}$  da máscara *C* resultaram em estruturas caracterizáveis. Isto pode ser melhorado controlando a taxa de corrosão com a diminuição da temperatura do processo.

## CAPÍTULO 4

# CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS FABRICADAS

### 4.1 O analisador de rede

Os dispositivos OAS utilizados para a construção de sensores são projetados tipicamente para operar na faixa de 100 MHz a 500 MHz. Para caracterizar dispositivos nessa faixa de frequência pode-se utilizar o analisador de rede vetorial. Este equipamento é utilizado para medir os parâmetros  $S$  que formam a matriz de espalhamento do dispositivo.

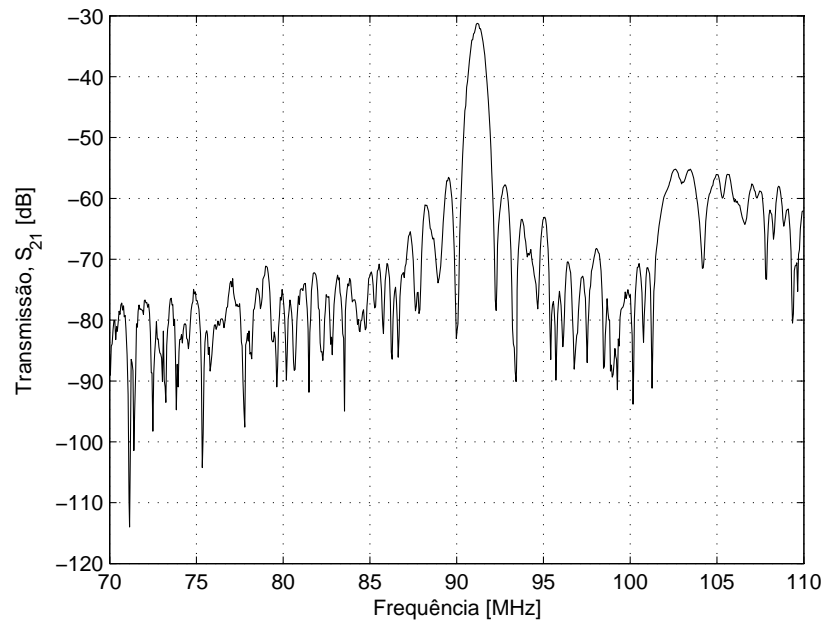


**Figura 4.1:** 8714ET - RF Network Analyzer usado na caracterização dos dispositivos OAS.

O processo de medição consiste em aplicar um sinal de amplitude ajustável constante, cuja frequência é variada na faixa de interesse. À medida em que a frequência é variada, mede-se

a amplitude do sinal refletido e transmitido (no caso de dispositivos com duas portas, como em linhas de retardo) e compara-se com o sinal original injetado. O parâmetro  $S_{11}$  representa o coeficiente de reflexão e o parâmetro  $S_{21}$  representa o coeficiente de transmissão. Esses valores podem ser medidos para construir o comportamento das estruturas sob caracterização em função da frequência de excitação.

A estrutura de linha de retardo foi usada para determinar a velocidade de propagação da onda acústica, que varia com a orientação do cristal piezoelétrico e com a direção do eixo de propagação das ondas. O gráfico da Figura 4.2, mostra o coeficiente de transmissão,  $S_{21}$ , obtido em uma das estruturas de linha de retardo com 80 pares de dentes no transdutor padrão com  $\lambda_0 = 40$ . Deste gráfico, pode-se observar que a frequência central de operação,  $f_0$ , ficou próximo a 91 MHz. Da mesma maneira, o coeficiente de reflexão,  $S_{11}$ , pode ser observado na Figura 4.3, referente à mesma estrutura.

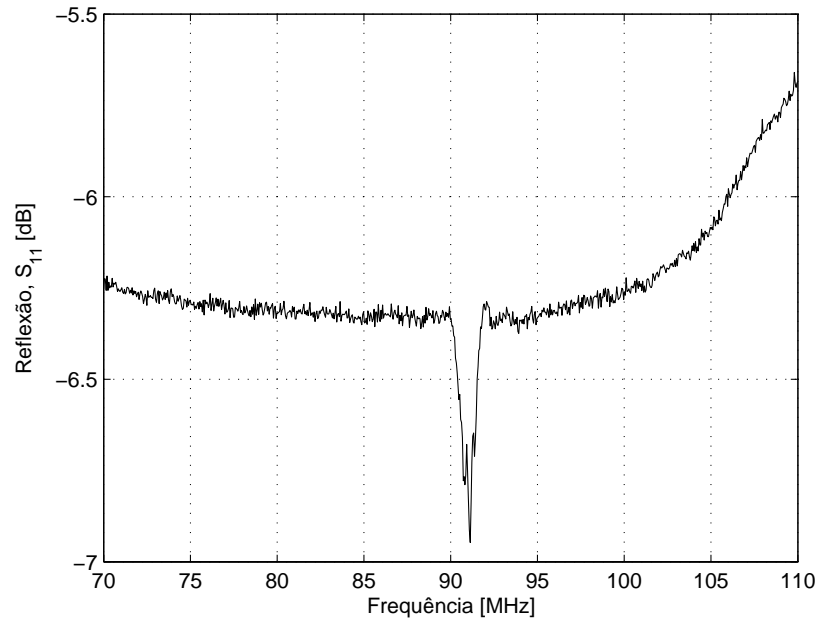


**Figura 4.2:** Transmissão obtida da estrutura de linha de retardo com  $N = 80$  e  $\lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ . Note que a resposta em frequência é semelhante à de um filtro passa-faixa.

Portanto, a velocidade de propagação na direção em que os dispositivos foram fabricados deve ser recalculada, como mostrado em seguida.

$$v = \lambda_0 f_0 = 40 \times 10^{-6} \times 91 \times 10^6 = 3640 \text{ m/s}$$

Com posse deste valor para a velocidade, a Tabela 4.1 mostra a frequência central e a largura



**Figura 4.3:** Reflexão obtida da estrutura de linha de retardo com  $N = 80$  e  $\lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ .

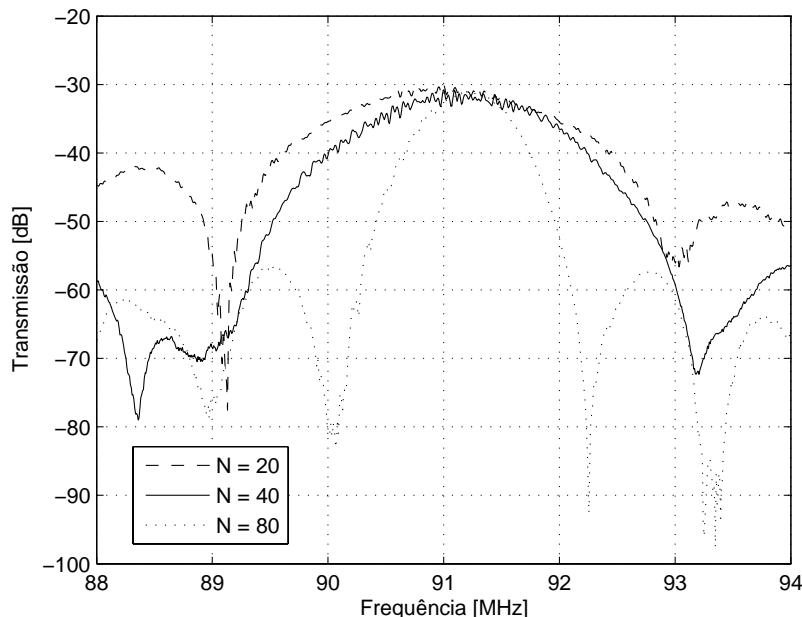
de banda dos transdutores recalculados para cada dispositivo fabricado.

**Tabela 4.1:** Cálculos da frequência central e da largura de banda das estruturas.

$\lambda_0$	N	$f_0$	$\Delta f_{TID}$
40 $\mu\text{m}$	20	91 MHz	9,1 MHz
	24	91 MHz	7,6 MHz
	40	91 MHz	4,6 MHz
	80	91 MHz	2,3 MHz
50 $\mu\text{m}$	24	72,8 MHz	6,1 MHz

Nos dispositivos fabricados da máscara A, pôde-se verificar a dependência da largura de banda com o número de pares de dentes das estruturas interdigitadas. O gráfico da Figura 4.4 mostra o coeficiente de transmissão em função da frequência para linhas de retardo com distintos valores de  $N$ . Além de estarem seguramente operando com a mesma frequência central, é verificado que a banda passante torna-se mais estreita com o aumento do número de pares de dentes da estrutura interdigitada. Ao realizar uma comparação entre os valores estimados para as larguras das bandas da Tabela 4.1 e os obtidos experimentalmente, verificou-se uma boa aproximação para os transdutores com 40 e 80 pares de dentes.



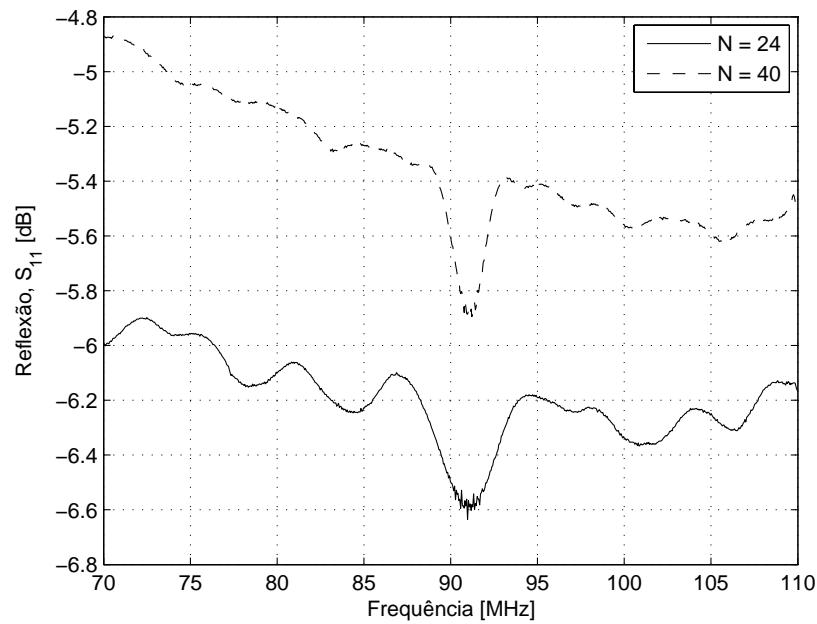


**Figura 4.4:** *Bandas passantes em dispositivos tipo linha de retardo com  $\lambda = 40 \mu\text{m}$  para transdutores com número de pares de dentes distintos. Note que a frequência central coincide para os dispositivos fabricados.*

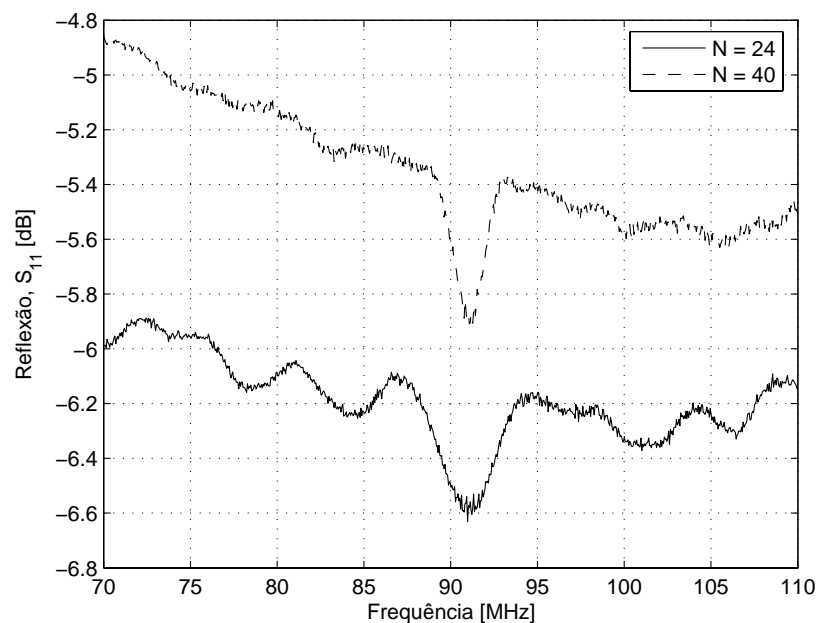
Para realizar a análise do coeficiente de reflexão,  $S_{11}$ , foram utilizados os dispositivos da máscara B com as etiquetas RFID. Como observado na Figura 4.5, há uma queda na refletividade na frequência de 91 MHz devido à transdução do sinal elétrico em ondas acústicas que se propagam pelo substrato. Para a captura deste resultado, foi necessário o uso da função de média do analisador. Sem o uso desta função, pequenas variações de centésimos de decibéis na reflexão, causadas por interferências aleatórias ou ruídos, resultam em gráficos como mostrado na Figura 4.6.

No interior da banda passante do transdutor, com maior intensidade na frequência central, pequenas variações na refletividade podem ser observadas como na Figura 4.7. Este resultado deve estar associado a reflexões devido à grade refletora da etiqueta pois só ocorrem na frequência de operação dos dispositivos. O mesmo ocorreu em etiquetas projetadas para operarem em outra frequência central. O coeficiente de reflexão de uma etiqueta operando em 72,8 MHz ( $\lambda_0 = 50 \mu\text{m}$ ) está mostrado na Figura 4.8.

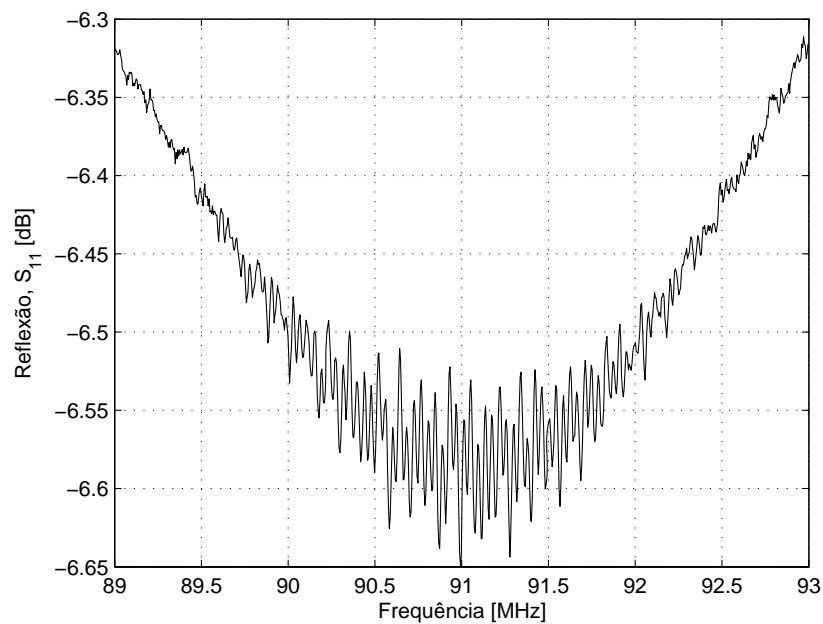
Para efeito de comparação, o gráfico da Figura 4.9 mostra os coeficientes de reflexão de três sensores OAS de temperatura comerciais. Esses sensores *TempTrackr* da *Sengenuity* são dispositivos ressonadores de ondas acústicas de superfície. As frequências de operação dos



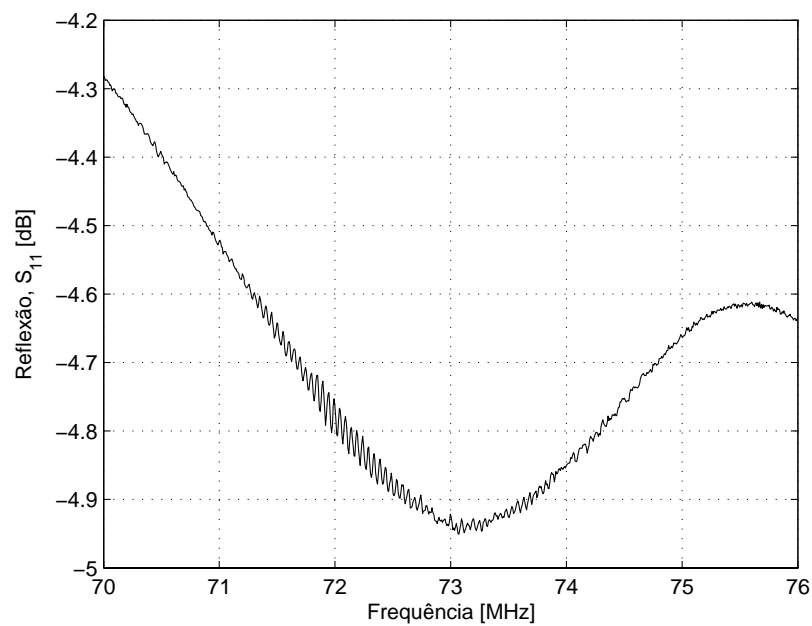
**Figura 4.5:** Coeficientes de reflexão para duas etiquetas RFID com transdutor padrão fabricadas com  $\lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ . A banda passante, identificada pela queda de refletividade na frequência de operação, é mais estreita para o transdutor com maior número de pares de dentes.



**Figura 4.6:** Captura dos coeficientes de reflexão sem o uso da função de média do analisador de rede. Observando também a Figura 4.5, note que as pequenas variações, no interior da banda passante, não desaparecem com o uso da função de média, pois não são sinais aleatórios de ruído.

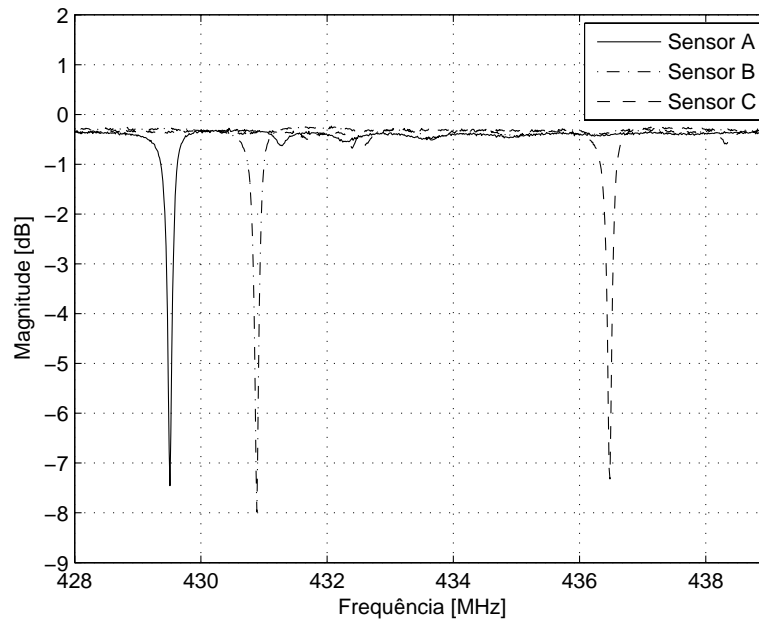


**Figura 4.7:** Índícios de reflexões de ondas acústicas causadas pelas estruturas refletoras das etiquetas. Esta captura de pontos é do interior da banda da mesma etiqueta com 24 pares de dentes da Figura 4.5.



**Figura 4.8:** Coeficiente de reflexão para uma etiqueta RFID com transdutor padrão fabricada com  $\lambda_0 = 50 \mu m$ .

sensores puderam ser verificadas pelas quedas da reflexão devido à transdução do sinal elétrico em onda acústica. Pode-se observar que este *kit* faz a leitura dos sensores interrogando em cada faixa de frequência separadamente realizando a varredura, como revisado no Capítulo 2.



**Figura 4.9:** *Coefficiente de reflexão dos sensores do Temptrackr.*

## 4.2 O impedancímetro

Como foi visto no Capítulo 2, o projeto das estruturas envolve o acoplamento de antenas e é preciso fazer o casamento das impedâncias para maximizar a transferência de potência. A impedância equivalente de entrada do transdutor é função do valor da capacitância estática  $C_T$  da estrutura interdigitada. Esta capacitância pode ser medida por um impedancímetro de precisão. O impedancímetro utilizado está mostrado na Figura 4.10.

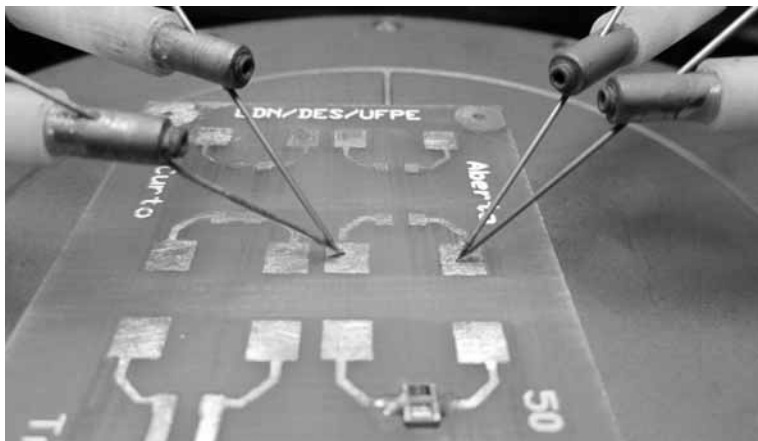


**Figura 4.10:** 4294A - Precision Impedance Analyzer da Agilent usado na medição das capacitâncias estáticas das estruturas interdigitadas.

O equipamento precisa ser devidamente calibrado com os cabos de extensão e as ponteiros para realizar medições com a precisão necessária. Uma placa com as estruturas para calibração de circuito aberto, fechado e com carga de  $50 \Omega$  foi utilizada nas pontas de prova da estação, como mostrado na Figura 4.11. A sequência de passos a seguir deve ser realizada para calibrar o impedancímetro.

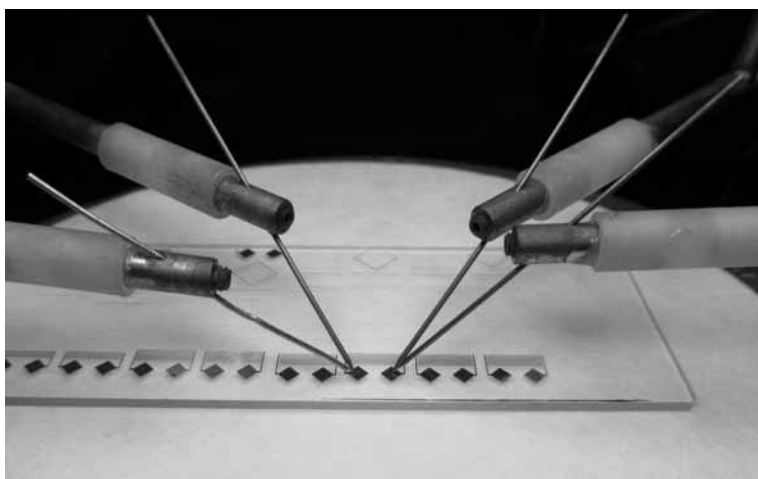
1. Conectar os cabos de extensão 16048G no impedancímetro.
2. Conectar os cabos extras necessários.
3. Conectar as pontas de prova da estação.
4. Conectar todos os condutores externos dos cabos.
5. Realizar a compensação de fase com o comprimento total dos cabos.
6. Realizar as calibrações OPEN/SHORT/LOAD nas pontas de prova.

A medição foi feita diretamente sobre a lâmina com as estruturas, como mostrado na Figura 4.12. Foram realizadas medições sobre substratos de vidro e de niobato de lítio. A



**Figura 4.11:** Placa utilizada para as calibrações de circuito aberto, curto e carga do impedancímetro de precisão.

faixa de frequências utilizada foi de 1 kHz a 10 kHz, muito abaixo da frequência de ressonância das estruturas no niobato de lítio. Portanto, o efeito piezoelétrico não teve influência no valor da capacitância.



**Figura 4.12:** Medição da capacitância estática de uma estrutura fabricada em substrato de vidro.

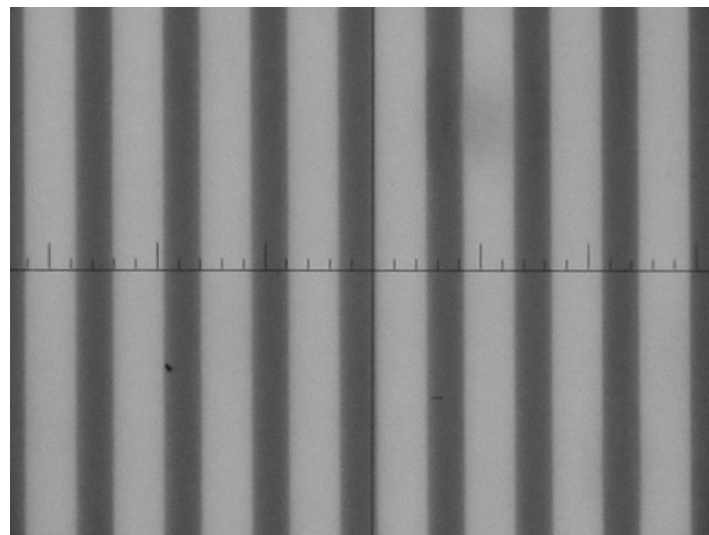
Como as estruturas sob medição consistem de dois condutores com eletrodos interdigitados, defeitos de fabricação que causam curto circuito entre dois eletrodos adjacentes, inviabilizam a medição desta capacitância. Isto é verificado com leituras de capacitâncias bem mais altas do que o esperado. Os substratos de vidro foram lâminas reaproveitadas inúmeras vezes anteriores e resultaram em diversos padrões com defeitos. Por isso, apenas uma das capacitâncias das estruturas em vidro pôde ser determinada. Como as lâminas de niobato de

lítio eram novas, e polidas pelo fabricante, o número de estruturas livres de defeitos foi bem maior e muitas capacitâncias foram medidas. A tabela 4.2 mostra a faixa dos valores obtidos na medição.

**Tabela 4.2:** *Medidas da capacitância estática em transdutores padrão com  $L = 5 \text{ mm}$  e  $h = 200 \text{ nm}$ .*

N	Vidro	Niobato de lítio
20 pares	5,1 pF	44,5 - 51 pF
24 pares	-	54,2 - 59,4 pF
40 pares	-	79,2 - 94,4 pF
80 pares	-	188,7 pF

Como visto anteriormente, o valor da capacitância estática é dada em função de  $L$ ,  $N$ ,  $a/p$  e  $\epsilon_r$ . O comprimento de superposição projetado e fabricado não diferem de forma significativa. Porém, a relação  $a/p$  (projetada para 0,5), sofre uma redução resultante da fabricação, como é mostrado na imagem da Figura 4.13, observada por microscópio óptico. O número de pares de dentes que efetivamente compõem o transdutor também pode ser reduzido por defeitos de circuito aberto dos eletrodos.



**Figura 4.13:** *Imagem de um transdutor visto por microscópio óptico Leitz Laborlux 11 POL S com objetiva Leica de 40x. A escala observada possui divisões de  $5 \mu\text{m}$ , o que implica uma estrutura com  $a/p = 0,375$ , aproximadamente.*

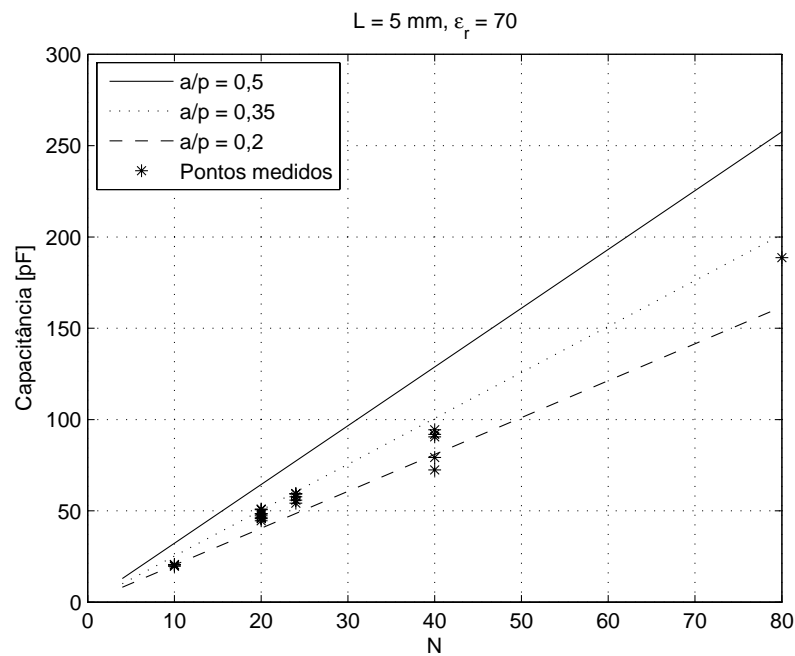
Para o substrato de vidro, utilizando  $\epsilon_r = 6$ ,  $N = 20$  e  $a/p = 0,35$ , é razoável um valor de capacitância de 5 pF. Para fazer a comparação com os valores esperados para as capacitâncias

no niobato de lítio, foi plotado o gráfico da Figura 4.14. As retas, calculadas pela Equação 2.4, indicam as faixas de capacitância esperadas para diferentes  $a/p$  em função de  $N$ . O valor de  $\epsilon_r$  para o niobato de lítio depende da orientação do cristal e da direção de propagação utilizada e está entre os valores de  $\epsilon_{11}$  e  $\epsilon_{33}$  da Tabela 4.3.

**Tabela 4.3:** Constantes dielétricas dos materiais usados como substrato.

Material	$\epsilon_r$
Vidro	6
Niobato de lítio	$\epsilon_{11} = 85,2$ $\epsilon_{33} = 28,7$

Utilizando  $\epsilon_r = 70$  para o substrato de niobato de lítio, o gráfico mostra que as capacitâncias medidas encontram-se em regiões de valor esperado.



**Figura 4.14:** Capacitâncias das estruturas fabricadas sobre o niobato de lítio medidas pelo impedímetro de precisão.



### 4.3 O analisador de espectro

Este equipamento funciona como um receptor fazendo uma varredura na faixa de frequência especificada e medindo a potência do sinal de entrada captado por uma antena. O analisador de espectro utilizado foi o *FSQ8 - Signal Analyzer* da *ROHDE & SCHWARZ* e é mostrado na Figura 4.15.



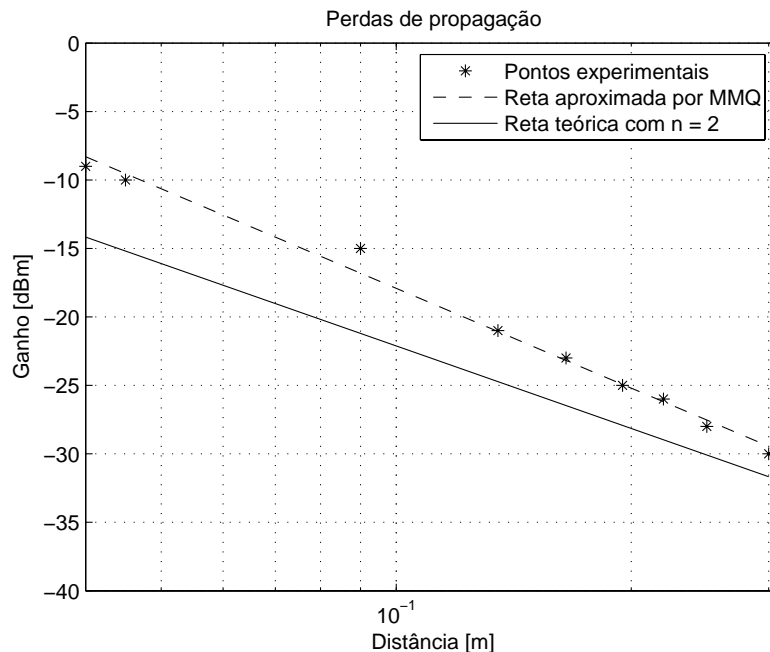
**Figura 4.15:** *FSQ8 - Signal Analyzer* utilizado na caracterização do mecanismo de leitura do kit da *Sengenuity*.

Por este equipamento, foi realizada a caracterização do mecanismo de leitura do kit de sensores de temperatura *TempTracker* da *Sengenuity*. A antena foi posicionada na mesma altura da antena receptora acoplada ao equipamento com uma distância  $d$ . Para cada distância, a potência do pico foi registrada para plotar o gráfico da Figura 4.16. A reta pontilhada do gráfico é a aproximação, pelo método dos mínimos quadrados, dos pontos colhidos experimentalmente.

É observado que a inclinação da reta teórica, com  $n = 2$ , é menor que a da reta experimental aproximada. Isto indica que o ambiente de caracterização teve influência atenuante na medição, assim como a metodologia. É importante ressaltar que a reta teórica está em decibéis (dB) e um fator irá deslocá-la verticalmente no gráfico (dBm).

### 4.4 Considerações finais

Neste capítulo, os dispositivos fabricados passaram por um processo de caracterização. Os equipamentos utilizados foram estudados e, para realizar a coleta dos dados, foi desenvolvida



**Figura 4.16:** Pontos experimentais e curvas teóricas da Equação (2.20) com  $f_0 = 431,2$  MHz,  $G_t G_r = 0,02$  e  $n = 2$ .

uma interface com comunicação via barramento GPIB (código fonte no Apêndice A). Na caracterização, pôde-se observar alguns comportamentos esperados das estruturas fabricadas, dos dispositivos comerciais e do mecanismo de leitura. Os equipamentos de medição foram deixados em estado operacional para futuras caracterizações. Porém, algumas melhorias na metodologia das medições devem ser feitas, como blindagens eletromagnéticas.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

Este capítulo descreve brevemente as contribuições desta dissertação, apresenta algumas conclusões e propõe alguns trabalhos futuros.

### 5.1 Contribuições

Nesta dissertação, etiquetas RFID de ondas acústicas de superfície foram projetadas, fabricadas e algumas curvas de caracterização das estruturas finais foram extraídas. Todos estes procedimentos, salvo a confecção das máscaras litográficas, foram realizados no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Primeiramente, foi apresentada uma revisão do princípio de funcionamento das etiquetas RFID OAS, mostrando sua capacidade de operar como sensor e explorando as possibilidades de aplicação desta tecnologia quando integrada a uma rede de celular ou Internet.

No Capítulo 2, as equações retiradas da literatura para o projeto das etiquetas foram resumidas. Apresentaram-se os principais métodos de codificação de identidade em etiquetas OAS, foi mostrada uma expressão para a estimativa do alcance de leitura, algumas estratégias de identificação para leitura em ambientes com múltiplas etiquetas e, por fim, foi dada a relação das estruturas projetadas com base nos cálculos das equações do capítulo.

O Capítulo 3 representa o aprendizado adquirido nas etapas de processo de fabricação de dispositivos no ambiente de *sala limpa*. O contato e o manuseio dos equipamentos de manufatura são fundamentais para formação de um engenheiro de processos.

O processo de caracterização dos dispositivos foi tratado em seguida no Capítulo 4.

Foi desenvolvido, em linguagem C, um programa de interface com comunicação via GPIB (*General Purpose Interface Bus*) para coleta dos pontos extraídos dos equipamentos de medição. Os resultados obtidos indicam que os dispositivos possuem comportamentos parecidos com os esperados. Porém, nem todos os cálculos na etapa de projeto foram realizados antes de desenhar as estruturas. Por isso, elas não estão devidamente otimizadas.

## 5.2 Trabalhos futuros

A continuação do presente trabalho deve reservar maior esforço na caracterização das estruturas fabricadas em laboratório. É necessário desenvolver uma metodologia para analisar o comportamento das etiquetas no domínio do tempo e verificar as reflexões dos dados gravados. É possível que algumas medições sejam melhoradas do ponto de vista do arranjo experimental. Como várias estruturas são caracterizadas numa mesma lâmina, há muita interferência das estruturas adjacentes à estrutura de interesse, podendo levar a dados duvidosos. Uma espécie de gaiola precisa ser desenvolvida para reduzir as interferências externas.

A extração da capacitância estática é fundamental para determinação da impedância de entrada do transdutor interdigitado e permite o cálculo aproximado para o casamento com antenas para interrogação sem fio do dispositivo.

O uso da ferramenta COMSOL ([www.comsol.com](http://www.comsol.com)) de simulação multifísica pode ser explorada para ajudar na otimização do projeto das estruturas e ajudar na comparação com os resultados obtidos. Da mesma maneira, a ferramenta IntelliFab ([www.intellisense.com](http://www.intellisense.com)) pode ajudar na otimização do processo de fabricação e simulação do dispositivo fabricado.

# APÊNDICE A

## INTERFACE DE CONTROLE DOS EQUIPAMENTOS VIA GPIB

### A.1 Programa principal

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "DECL-32.h"
#define default_ctrl_add 0
#define limit 31
#define tam 50

Addr4882_t addresslist[limit], resultlist[limit];
int equipment;
int qnt_dispositivos = 0;
int indice;

void header ()
{
    printf("\n-----");
    printf("\n\n Universidade Federal de Pernambuco\n");
    printf("\n Version: 3.0 - Last Updated: 12/07/2011\n");
    printf("\n-----\n");
}

/*****/
```

```

/***** Fila *****/
/*****/

struct queue
{
    double data_1;
    double data_2;
    struct queue *next;
};

typedef struct queue Queue;

Queue* create_queue(void);
Queue* insert(Queue *rear, double x, double y);
Queue* remove_item(Queue *rear);
void print_queue(Queue *rear);
int empty_queue(Queue *rear);
void print_queue_file(Queue *rear, FILE *p);

/***** Funções de Fila *****/
/*****/

Queue* create_queue(void)
{
    return NULL;
}

Queue* insert(Queue *rear, double x, double y)
{
    Queue *q;
    q=(Queue*)malloc(sizeof(Queue));
    if (!q){
        printf("\n Sorry. Not Enough Memory!\n\n");
        return rear;
    }
    q->next=rear;
    q->data_1 = x;
    q->data_2 = y;
    rear=q;
    return rear;
}

Queue* remove_item(Queue *rear)
{
    if (rear->next!=NULL){

```

```

Queue *tmp, *ant;
ant=tmp=rear;
if (tmp==NULL){
    printf("\n\n\n Queue already Empty!\n\n\n");
    return rear;
}
while (tmp->next!=NULL){
    ant=tmp;
    tmp=tmp->next;
}
free(tmp);
ant->next=NULL;
return rear;
}
free(rear);
return(NULL);
}

int  empty_queue(Queue *rear)
{
return (rear==NULL);
}

void print_queue(Queue *rear)
{
indice = 1;
if (rear!=NULL) {
    print_queue(rear->next);
    printf("  \t%d\t\t\t%lf",indice, rear->data_1);
    printf("\t\t\t%lf", rear->data_2);
    printf(" \n");
    indice = indice+1;
}
}

void print_queue_file(Queue *rear, FILE *p)
{
if (rear!=NULL) {
    print_queue_file(rear->next, p);
    fprintf(p,"%lf %lf;\n", rear->data_1, rear->data_2);
}
}

/*****
/***** Identificar Instrumentos *****/
/*****/

```

```

void identificar_dispositivos (int board)
{
    Addr4882_t aux;
    char data[100];

    for (aux=0 ; aux<qnt_dispositivos ; aux++)
    {
        Send(board,resultlist[aux],"*IDN?",5L,NLend);
    }

    printf(" \n----- Instruments Identification ----- \n");

    for (aux=0 ; aux <qnt_dispositivos ; aux++)
    {
        Receive(board,resultlist[aux],data,101L,STOPend);
        data[ibcnt]='\0';

        if (strchr (data, '\n'))
            *strchr (data, '\n') = '\0';
        printf("\n <%d> %s\n", resultlist[aux], data);
    }
}

/*****
/***** Inicializando Controlador *****/
/*****/

void modo_local (int board)
{
    EnableLocal(board,&addresslist[0]);
    printf("\n Instruments in Local Mode\n");
}

int modo_remoto (int board)
{
    int k, add;
    char ck;

    EnableRemote(board,&addresslist[0]); // put devices into remote mode. (listeners)
    printf("\n Instruments in Remote Mode\n");
    DevClearList(board,&resultlist[0]); // clear multiple devices
    identificar_dispositivos(board);

    printf("\n Equipment address selection: ");
    scanf("%d",&add);
}

```



```

    return(add);
}

char string (char data[22])
{
    FILE* q;
    char arquivo[20] = "temp_file.txt";
    char c;
    char input_1[22]="";

    q = fopen(arquivo, "w");
    fprintf(q, "%s\n", data);
    fclose(q);

    q = fopen(arquivo, "r");
    fscanf(q, "%c", &c);
    fclose(q);
    return(c);
}

double value (char data[22])
{
    FILE* q;
    char arquivo[20] = "temp_file.txt";
    char c;
    double input_1;

    q = fopen(arquivo, "w");
    fprintf(q, "%s\n", data);
    fclose(q);

    q = fopen(arquivo, "r");
    fscanf(q, "%c", &c);
    while(!feof(q))
    {
        fscanf(q,"%lf\n",&input_1);
    }
    fclose(q);
    return(input_1);
}

int inicializando_controlador(int board)
{
    SendIFC(board); // perform interface clear
    if ((ibsta & ERR) == 1)
    {

```

```

    printf("\n Erro no Comando SendIFC.\n");
    return 0;
}
else
{
    ibsre(board,1); // set remote enable (board)
    if ((ibsta & ERR) == 1)
    {
        printf("\n Erro no Comando ibsre.\n");
        return 0;
    }
}
else
{
    ibtmo(board,T3s); // adjust io timeout (board or device)
    if ((ibsta & ERR) == 1)
    {
        printf("\n Erro no Comando ibtmo.\n");
        return 0;
    }
    else
        return 1;
}
}
}

/*****
/***** Procurar Dispositivos *****/
/*****/

int procurar_dispositivos(int board, Addr4882_t *addresslist, Addr4882_t *resultlist, int limite)
{
    Addr4882_t aux;

    for (aux=0 ; aux < 30 ; aux++)
    {
        addresslist[aux] = aux+1;
    }
    addresslist[30]= NOADDR;

    FindLstn(board, &addresslist[0], &resultlist[0], limite);
    qnt_dispositivos = ibcnt;
    resultlist[qnt_dispositivos+1] = NOADDR;

    if (qnt_dispositivos == 0)
    {
        printf("\n No instruments found.\n");
    }
}

```

```

        return 0;
    }
else
    {
printf("\n Total of %d instrument(s) found.\n", qnt_dispositivos);
printf("\n Detected Addresses:\n");
for (aux=0 ; aux < qnt_dispositivos ; aux++)
    {
    printf("\n <%d> %d\n", addresslist[aux], resultlist[aux]);
    }
    return 1;
    }
}

/*****
/***** Opções de Comandos *****/
/*****/

int auxiliar(){
    Addr4882_t aux;
    for (aux=0 ; aux<qnt_dispositivos ; aux++)
    {
        if (resultlist[aux]== equipment)
            return aux;
    }
}

#include "4294A_functions.c"
#include "8714ET_functions.c"

/*****
/***** Programa principal *****/
/*****/

int main()
{
int board,limite;
    int ctrl_ok = 0, proc_ok = 0;
    int k, h;
    char ch, x;

    board = default_ctrl_add;
    limite = limit;

    header();

```

```

ctrl_ok = inicializando_controlador(board);
if (ctrl_ok == 0 )
    goto FORCEQUIT;

printf("\n GPIB Controller Initialized.\n");
printf("\n Controller Address: %d\n", board);

proc_ok = procurar_dispositivos(board, &addresslist[0], &resultlist[0], limite);
if (proc_ok == 0 )
    goto FORCEQUIT;

equipment = modo_remoto(board);

while(1){
    #include "4294A.c"
    #include "8714ET.c"
}
FORCEQUIT:
    modo_local(board);
printf("\n-----\n");
printf("\n----- Have a nice day!!! -----\n");
printf("\n-----\n\n");
system("pause");
return;
}

```

## A.2 Arquivo: 8714ET\_functions.c

```

void menu_16()
{
    printf(" \n----- Main Menu -----\n");
    printf("\n <1> Save and Print \t\t <a> Not Implemented\n");
    printf("\n <2> Auto Scale \t\t <b> Not Implemented\n");
    printf("\n <3> Split Display \t\t <r> Remote Mode\n");
    printf("\n <4> Not Implemented \t\t <1> Local Mode\n");
    printf("\n <5> Set Sweep Points \t\t <m> Menu\n");
    printf("\n <6> Not Implementedd \t\t <Q> Quit \n");
    printf("\n <7> Not Implemented\n");
    printf("\n <8> Range Setup\n");
    printf("\n <9> Not Implemented\n");
    printf("\n <0> Not Implemented\n");
    printf(" \n-----\n");
}

```

```

void save_and_print_16 (int board)
{
    int aux = auxiliar();
    FILE *p;
    FILE *q;
    FILE *saida;
    Queue *pontos;

    char temp_file_1[20] = "temp_file_1.txt";
    char temp_file_2[20] = "temp_file_2.txt";
    char arquivo[20] = " ";
    char points[4]="XXXX";
    char cq, cp;
    double input_1, input_2;

    Send(board,resultlist[aux],"SENS:SWE:POIN?",strlen("SENS:SWE:POIN?"),NLend);
    Receive(board,resultlist[aux],points,6L,STOPend);
    int number=value(points);

    int buffer_size = 13*number;
    char data_1[buffer_size];
    char data_2[buffer_size];

    printf("\n Number of Sweep Points = %d\n", number);

    Send(board,resultlist[aux],"FORM:DATA ASCII,5",strlen("FORM:DATA ASCII,5"),NLend);
    Send(board,resultlist[aux],"TRACE:DATA? CH1FDATA",strlen("TRACE:DATA? CH1FDATA"),NLend);
    Receive(board,resultlist[aux],data_1,10413L,STOPend);
    Send(board,resultlist[aux],"TRACE:DATA? CH2FDATA",strlen("TRACE:DATA? CH2FDATA"),NLend);
    Receive(board,resultlist[aux],data_2,10413L,STOPend);

    printf("\n Save and Print:\n");
    printf("\n Save as (.txt): ");
    scanf("%s", &arquivo);
    strcat (arquivo , ".txt");

    q = fopen(temp_file_1, "w");
    fprintf(q, "\n");
    fprintf(q, "%s\n", data_1);
    fclose(q);

    q = fopen(temp_file_2, "w");
    fprintf(q, "\n");
    fprintf(q, "%s\n", data_2);
    fclose(q);
}

```

```

pontos = create_queue();
q = fopen(temp_file_1, "r");
p = fopen(temp_file_2, "r");
fscanf(q, "%c", &cq);
fscanf(p, "%c", &cp);
while(!feof(q) || !feof(p))
    {
        fscanf(q,"%lf,\n",&input_1);
        fscanf(p,"%lf,\n",&input_2);
        pontos = insert(pontos,input_1, input_2);
    }
fclose(q);
fclose(p);

printf("\n");
printf("\tindex\t\tdata 1\t\t\tdata 2\n\n");
print_queue(pontos);

saida = fopen(arquivo, "w");
print_queue_file(pontos, saida);
fclose(saida);

printf("\n Data Length: %d\n",strlen(data_1));
printf("\n Data Length: %d\n",strlen(data_2));
printf("\n Save and Print: Done.\n");
}

int nop_16 (int board)
{
    int aux = auxiliar();
    char command1[25]="SENS1:SWE:POIN ";
    char command2[25]="SENS2:SWE:POIN ";
    char points[4]="XXXX";

    printf("\n Set Sweep Points: ");
    scanf("%s", &points);

    strcat(command1, points);
    strcat(command2, points);
    strcat(command1, ";*WAI");
    strcat(command2, ";*WAI");

    Send(board,resultlist[aux],command1,strlen(command1),NLend);
    Send(board,resultlist[aux],command2,strlen(command2),NLend);
    Send(board,resultlist[aux],"SENS:SWE:POIN?",strlen("SENS:SWE:POIN?"),NLend);
    Receive(board,resultlist[aux],points,5L,STOPend);
}

```

```

printf("\n Set Sweep Points: Done\n");
}

void range_16 (int board)
{
int aux = auxiliar();
char command1[26]="DISP:ANN:FREQ1:MODE SSTOP";
char command2[26]="DISP:ANN:FREQ2:MODE SSTOP";

char start1[26]="SENS1:FREQ:STAR ";
char stop1[26]="SENS1:FREQ:STOP ";

char start2[26]="SENS2:FREQ:STAR ";
char stop2[26]="SENS2:FREQ:STOP ";

char freq_start[10]="300";
char freq_stop[10]="3000000";

printf("\n Range Setup:\n");

printf("\n Start Frequency [kHz]: ");
scanf("%s", &freq_start);
printf("\n Stop Frequency [kHz]: ");
scanf("%s", &freq_stop);
printf("\n");

strcat(freq_start, "000");
strcat(freq_stop, "000");

strcat(start1, freq_start);
strcat(stop1, freq_stop);

strcat(start2, freq_start);
strcat(stop2, freq_stop);

Send(board,resultlist[aux],command1,strlen(command1),NLend);
Send(board,resultlist[aux],start1,strlen(start1),NLend);
Send(board,resultlist[aux],stop1,strlen(stop1),NLend);

Send(board,resultlist[aux],command2,strlen(command2),NLend);
Send(board,resultlist[aux],start2,strlen(start2),NLend);
Send(board,resultlist[aux],stop2,strlen(stop2),NLend);

printf("\n Range Setup: Done.\n");
}

```

```

void auto_scale_16 (int board)
{
    int aux = auxiliar();
    char command1[26]="DISP:WIND1:TRAC:Y:AUTO ONCE";
    char command2[26]="DISP:WIND2:TRAC:Y:AUTO ONCE";
    Send(board, resultlist[aux],command1, strlen(command1), NLEnd);
    Send(board, resultlist[aux],command2, strlen(command2), NLEnd);
    printf("\n Auto Scale: Done.\n");
}

void split_16 (int board)
{
    int aux = auxiliar();
    Send(board,resultlist[aux],"DISP:FORM ULOW",strlen("DISP:FORM ULOW"),NLEnd);
    printf("\n Split Display: Done.\n");
}

void error_message_16(int board)
{
    int aux = auxiliar();
    char erro[10000]="NONE";
    Send(board,resultlist[aux],"SYST:ERR?",strlen("SYST:ERR?"),NLEnd);
    Receive(board,resultlist[aux],erro,10000L,STOPend);
    printf("\n Error Message: %s", erro);
}

```

### A.3 Arquivo: 4294A\_functions.c

```

void menu_17()
{
    printf(" \n----- Main Menu ----- \n");
    printf("\n <1> Save and Print \t\t <a> Set Active Trace A\n");
    printf("\n <2> Auto Scale \t\t <b> Set Active Trace B\n");
    printf("\n <3> Split Display \t\t <r> Remote Mode\n");
    printf("\n <4> Not Implemented \t\t <1> Local Mode\n");
    printf("\n <5> Number Of Points \t\t <m> Menu\n");
    printf("\n <6> Not Implemented \t\t <Q> Quit \n");
    printf("\n <7> Sweep Parameters\n");
    printf("\n <8> Range Setup\n");
    printf("\n <9> Set Marker\n");
    printf("\n <0> Last Error Message\n");
    printf(" \n----- \n");
}

```



```

void save_and_print_17 (int board)
{
    int aux = auxiliar();
    char data[6432];
    FILE *entrada;
    FILE *saida;
    Queue *pontos;
    char arquivo[20] = " ";
    char c;
    double input_1, input_2;

    printf("\n Save and Print:\n");
    printf("\n Save as (.txt): ");
    scanf("%s", &arquivo);
    strcat (arquivo , ".txt");

    Send(board,resultlist[aux],"OUTPDTRC?; *WAI",strlen("OUTPMTRC?; *WAI"),NLend);
    Receive(board,resultlist[aux],data,6432L,STOPend);

    entrada = fopen(arquivo, "w");
    fprintf(entrada, "%s\n", data);
    fclose(entrada);

    pontos = create_queue();
    entrada = fopen(arquivo, "r");
    fscanf(entrada, "%c", &c);
    while(!feof(entrada))
    {
        fscanf(entrada,"%lf,%lf,\n",&input_1,&input_2);
        pontos = insert(pontos,input_1,input_2);
    }
    fclose(entrada);

    printf("\n");
    printf("\tdata 1\t\t\t\data 2\n\n");
    print_queue(pontos);

    saida = fopen(arquivo, "w");
    print_queue_file(pontos, saida);
    fclose(saida);

    printf("\n Data Length: %d\n",strlen(data));
    printf("\n Save and Print: Done.\n");
}

void auto_scale_17 (int board)

```

```

{
  int aux = auxiliar();
  Send(board, resultlist[aux],"AUTO; *WAI", strlen("AUTO; *WAI"), NLEnd);
  if (ibsta == 32768)
    {
  printf("\n Auto Scale: Failed. Equipamento: %d - Erro: %d \n", aux, iberr);
    return;
    }
  else
    printf("\n Auto Scale: Done.\n");
}

void split_17 (int board)
{
  int aux = auxiliar();
  char sw[1]="X";
  Send(board,resultlist[aux],"SPLD 1",strlen("SPLD 1"),NLEnd);
  printf("\n Split Display: Done.\n");
}

void marker_17 (int board)
{
  int aux = auxiliar();
  char command[5]="MKRP ";
  char position[9]="50";
  char measurement[15]=" ";

  strcat(command, position);

  Send(board,resultlist[aux],"MKR 1",strlen("MKR 1"),NLEnd);
  Send(board,resultlist[aux],command,strlen(command),NLEnd);
  Send(board,resultlist[aux],"MKRVAL?",strlen("MKRVAL?"),NLEnd);
  Receive(board,resultlist[aux],measurement,16L,STOPend);
  printf("\n Measurement: %s", measurement);
  printf("\n Marker: Done.\n");
}

void active_a_17 (int board)
{
  int aux = auxiliar();
  char active[1]= "Y";
  char phrase;
  Send(board,resultlist[aux],"TRAC A",strlen("TRAC A"),NLEnd);
  Send(board,resultlist[aux],"TRAC?",strlen("TRAC?"),NLEnd);
  Receive(board,resultlist[aux],active,2L,STOPend);
  phrase = string(active);
}

```

```

printf("\n Active Trace: %c\n", phrase);
}

void active_b_17 (int board)
{
int aux = auxiliar();
char active[1]= "Y";
char phrase;
Send(board,resultlist[aux],"TRAC B",strlen("TRAC B"),NLend);
Send(board,resultlist[aux],"TRAC?",strlen("TRAC?"),NLend);
Receive(board,resultlist[aux],active,2L,STOPend);
phrase = string(active);
printf("\n Active Trace: %c\n", phrase);
}

int nop_17 (int board)
{
int aux = auxiliar();
char points[4]="XXXX";
Send(board,resultlist[aux],"POIN?",strlen("POIN?"),NLend);
Receive(board,resultlist[aux],points,5L,STOPend);
int number=value(points);
printf("\n Number of Sweep Points = %d\n", number);
}

void sweep_17 (int board)
{
int aux = auxiliar();
char start[22]="XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX";
char stop[22]="XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX";
char center[22]="XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX";
char span[22]="XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX";
int number;

printf("\n Sweep Parameters: \n");

Send(board,resultlist[aux],"STAR?",strlen("STAR?"),NLend);
Receive(board,resultlist[aux],start,23L,STOPend);
number = value(start);
printf("\n Start: \t%d\t[Hz]\n", number);

Send(board,resultlist[aux],"STOP?",strlen("STOP?"),NLend);
Receive(board,resultlist[aux],stop,23L,STOPend);
number = value(stop);
printf("\n Stop: \t%d\t[Hz]\n", number);
}

```

```

Send(board,resultlist[aux],"CENT?",strlen("CENT?"),NLEnd);
Receive(board,resultlist[aux],center,23L,STOPend);
number = value(center);
printf("\n Center:\t%d\t[Hz]\n", number);

Send(board,resultlist[aux],"SPAN?",strlen("SPAN?"),NLEnd);
Receive(board,resultlist[aux],span,23L,STOPend);
number = value(span);
printf("\n Span: \t%d\t[Hz]\n", number);
}

void range_17 (int board)
{
int aux = auxiliar();
char start[15]="STAR ";
char stop[15]="STOP ";

char freq_start[15]="40";
char freq_stop[15]="110000000";

printf("\n Range Setup:\n");
printf("\n Start Frequency [Hz]: ");
scanf("%s", &freq_start);
printf("\n Stop Frequency [Hz]: ");
scanf("%s", &freq_stop);
printf("\n");
strcat(start, freq_start);
strcat(stop, freq_stop);

Send(board,resultlist[aux],start,strlen(start),NLEnd);
Send(board,resultlist[aux],stop,strlen(stop),NLEnd);
printf("\n Range Setup: Done.\n");
}

void error_message_17 (int board)
{
int aux = auxiliar();
char erro[10000]="NONE";
Send(board,resultlist[aux],"OUTPERRO?",strlen("OUTPERRO?"),NLEnd);
Receive(board,resultlist[aux],erro,10000L,STOPend);
printf("\n Error Message: %s", erro);
}

```

## A.4 Arquivo: 8714ET.c

```

/***** Equipment 016 *****/
if (equipment == 16)
{
    menu_16();

    for (k=1; k<10; k++)
    {
        if (ch == '1')
            save_and_print_16(board);

        if (ch == '2')
            auto_scale_16(board);

        if (ch == '3')
            split_16(board);

        if (ch == '4')
            printf("\n Not implemented!!\n");

        if (ch == '5')
            nop_16(board);

        if (ch == '6')
            printf("\n Not implemented!!\n");

        if (ch == '7')
            printf("\n Not implemented!!\n");

        if (ch == '8')
            range_16(board);

        if (ch == '9')
            printf("\n Not implemented!!\n");

        if (ch == '0')
            error_message_16(board);

        if (ch == 'a')
            printf("\n Not implemented!!\n");;

        if (ch == 'b')
            printf("\n Not implemented!!\n");

        if (ch == '1')

```

```

        modo_local(board);

if (ch == 'r')
{
    equipment = modo_remoto(board);
    ch = 'z';
    break;
}

if (ch == 'm')
    menu_16();

if (ch == 'Q')
    goto FORCEQUIT;

ch = getch();
while (ch != '1' && ch != '2' && ch != '3' && ch != '4' && ch != '5' && ch != '6' &&
        ch != '7' && ch != '8' && ch != '9' && ch != '0' && ch != 'Q' && ch != '1' &&
        ch != 'r' && ch != 'm' && ch != 'a' && ch != 'b')
    ch = getch();
k = 1;
}
}

/***** End loop 016 *****/

```

## A.5 Arquivo: 4294A.c

```

/***** Equipment 017 *****/
if (equipment == 17)
{
    menu_17();
    for (k=1; k<10; k++)
    {
        if (ch == 'Q')
            goto FORCEQUIT;

if (ch == '1')
    modo_local(board);

if (ch == 'r'){
    equipment = modo_remoto(board);
    ch = 'z';
    break;
}
if (ch == '1')

```

```

    save_and_print_17(board);

if (ch == '2')
    auto_scale_17(board);

if (ch == '3')
    split_17(board);

if (ch == '4')
    printf("\n Not implemented!!\n");

if (ch == '5')
    nop_17(board);

if (ch == '6')
    printf("\n Not implemented!!\n");

if (ch == '7')
    sweep_17(board);

if (ch == '8')
    range_17(board);

if (ch == '9')
    marker_17(board);

if (ch == '0')
    error_message_17(board);

if (ch == 'a')
    active_a_17(board);

if (ch == 'b')
    active_b_17(board);

if (ch == 'm')
    menu_17();
ch = getch();
while (ch != '1' && ch != '2' && ch != '3' && ch != '4' && ch != '5' && ch != '6' &&
    ch != '7' && ch != '8' && ch != '9' && ch != '0' && ch != 'Q' && ch != '1' &&
    ch != 'r' && ch != 'm' && ch != 'a' && ch != 'b')
    ch = getch();
k = 1;
}
}

/***** End loop 017 *****/

```

# APÊNDICE B

## GERADOR DE ESTRUTURAS INTERDIGITADAS PARA FASTCAP

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#define pi 3.14159265
#define EO 8.8542e-12

int main(){

    FILE *q, *b;
    char str[20], ch;
    double C, lbd, t, p, w, h, g, d, l, x[6], y[6], z[2];
    double Area, Comprimento, Largura, CFF, Cx, Cy, Cz, Czi;
    double dw, dCx, dCy, dCz;
    int n, i, k, j, v, mesh, meshx, meshy, meshz, panels=0;

    printf(" \n-----");
    printf("\n\n Interdigital Transducer Code Generator For FastCap\n");
    printf("\n Written by Henrique M. Vasconcelos\n");
    printf("\n Version: 2.2 - Updated: 05/08/2010\n");
    printf("\n All rights reserved\n");

    for (k=1; k<10; k++)
    {
        if (ch == 'c')
```



```

{

printf("\n <p> Parametros default\n\n <n> Parametros especificos\n ");
ch = getch();
while (ch != 'p' && ch != 'n')
ch = getch();

if (ch == 'n')
{
printf(" \n----- Capacitor -----");
printf("\n\n Salvar arquivo como: ");
scanf("%s", &str);
strcat (str , ".qui");

printf("\n\n Insira os parametros: \n");

printf("\n Comprimento de superposicao [um]: ");
scanf("%lf", &w);
printf("\n Distancia entre os dentes [um]: ");
scanf("%lf", &g);
printf("\n Distancia entre as estruturas [um]: ");
scanf("%lf", &d);
printf("\n Largura da trilha [um]: ");
scanf("%lf", &t);
printf("\n Largura do condutor [um]: ");
scanf("%lf", &l);
printf("\n Altura planar [um]: ");
scanf("%lf", &h);
printf("\n Numero de pares de dentes [unidades]: ");
scanf("%d", &n);
}

if (ch == 'p')
{
printf(" \n----- Capacitor -----");
printf("\n\n Salvar arquivo como: ");
scanf("%s", &str);
strcat (str , ".qui");

printf("\n\n Insira os parametros: \n");

printf("\n Comprimento de superposicao L[um]: ");
scanf("%lf", &w);
printf("\n Valor de Lambda [um]: ");
scanf("%lf", &lbd);
printf("\n Numero de pares de dentes [unidades]: ");

```

```

scanf("%d", &n);

t = lbd/4;
g = t;
d = 2.5*lbd;
l = d;
h = 7.5E-3*lbd;
}

p = 2 * (g + t);

t = t * 1E-6;
p = p * 1E-6;
w = w * 1E-6;
l = l * 1E-6;
h = h * 1E-6;
g = g * 1E-6;
d = d * 1E-6;

Comprimento = p*n*1E2;
Largura = (2*l+2*d+w)*1E2;
Area = Comprimento * Largura;

x[0] = 0 - 1E-2 * Comprimento/2;
x[1] = g/2 - 1E-2 * Comprimento/2;
x[2] = (p-g)/2 - 1E-2 * Comprimento/2;
x[3] = (p+g)/2 - 1E-2 * Comprimento/2;
x[4] = p-g/2 - 1E-2 * Comprimento/2;
x[5] = p - 1E-2 * Comprimento/2;

y[0] = 0 - 1E-2 * Largura/2;
y[1] = 1 - 1E-2 * Largura/2;
y[2] = l+d - 1E-2 * Largura/2;
y[3] = w+l+d - 1E-2 * Largura/2;
y[4] = w+l+2*d - 1E-2 * Largura/2;
y[5] = w+2*l+2*d - 1E-2 * Largura/2;

z[0] = 0;
z[1] = h;

meshx = 80;
meshy = 80;
meshz = 4;

mesh = (y[3]-y[1])/d;
dw = (y[3]-y[1])/mesh;

```



```

for (i=1; i<=n; i++)
{
    fprintf(q, "\n");
    fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
        x[0]+p*(i-1), y[0], z[1],
        x[5]+p*(i-1), y[0], z[1],
        x[5]+p*(i-1), y[1], z[1],
        x[0]+p*(i-1), y[1], z[1]);
    panels = panels + 1;
    for (j=1; j<=mesh; j++)
    {
        fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
            x[3]+p*(i-1), y[1]+dw*(j-1), z[1],
            x[4]+p*(i-1), y[1]+dw*(j-1), z[1],
            x[4]+p*(i-1), y[1]+dw*(j), z[1],
            x[3]+p*(i-1), y[1]+dw*(j), z[1]);
        panels = panels + 1;
    }
    fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
        x[0]+p*(i-1), y[4], z[1],
        x[5]+p*(i-1), y[4], z[1],
        x[5]+p*(i-1), y[5], z[1],
        x[0]+p*(i-1), y[5], z[1]);
    panels = panels + 1;
    for (j=1; j<=mesh; j++)
    {
        fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
            x[1]+p*(i-1), y[2]+dw*(j-1), z[1],
            x[2]+p*(i-1), y[2]+dw*(j-1), z[1],
            x[2]+p*(i-1), y[2]+dw*(j), z[1],
            x[1]+p*(i-1), y[2]+dw*(j), z[1]);
        panels = panels + 1;
    }
}

fprintf(q, "\n\n*===== Gera os painéis com y constante =====\n\n");
for (i=1; i<=n; i++)
{
    fprintf(q, "\n");
    fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
        x[0]+p*(i-1), y[1], z[0],
        x[0]+p*(i-1), y[1], z[1],
        x[3]+p*(i-1), y[1], z[1],
        x[3]+p*(i-1), y[1], z[0]);
    panels = panels + 1;
}

```

```

fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[3]+p*(i-1), y[3], z[0],
x[3]+p*(i-1), y[3], z[1],
x[4]+p*(i-1), y[3], z[1],
x[4]+p*(i-1), y[3], z[0]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[4]+p*(i-1), y[1], z[0],
x[4]+p*(i-1), y[1], z[1],
x[5]+p*(i-1), y[1], z[1],
x[5]+p*(i-1), y[1], z[0]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[0]+p*(i-1), y[0], z[0],
x[0]+p*(i), y[0], z[0],
x[0]+p*(i), y[0], z[1],
x[0]+p*(i-1), y[0], z[1]);
panels = panels + 1;

```

```

fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[0]+p*(i-1), y[4], z[0],
x[1]+p*(i-1), y[4], z[0],
x[1]+p*(i-1), y[4], z[1],
x[0]+p*(i-1), y[4], z[1]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[1]+p*(i-1), y[2], z[0],
x[2]+p*(i-1), y[2], z[0],
x[2]+p*(i-1), y[2], z[1],
x[1]+p*(i-1), y[2], z[1]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[2]+p*(i-1), y[4], z[0],
x[5]+p*(i-1), y[4], z[0],
x[5]+p*(i-1), y[4], z[1],
x[2]+p*(i-1), y[4], z[1]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
x[0]+p*(i-1), y[5], z[0],
x[0]+p*(i-1), y[5], z[1],
x[0]+p*(i), y[5], z[1],
x[0]+p*(i), y[5], z[0]);
panels = panels + 1;
}

```

```

fprintf(q, "\n\n*===== Gera os painéis com x constante =====\n\n");

```

```

for (i=1; i<=n; i++)
{
  fprintf(q, "\n");
  for (j=1; j<=mesh; j++)
  {
    fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      x[3]+p*(i-1), y[1]+dw*(j-1), z[0],
      x[3]+p*(i-1), y[1]+dw*(j-1), z[1],
      x[3]+p*(i-1), y[1]+dw*(j), z[1],
      x[3]+p*(i-1), y[1]+dw*(j), z[0]);
    panels = panels + 1;
    fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      x[4]+p*(i-1), y[1]+dw*(j-1), z[0],
      x[4]+p*(i-1), y[1]+dw*(j), z[0],
      x[4]+p*(i-1), y[1]+dw*(j), z[1],
      x[4]+p*(i-1), y[1]+dw*(j-1), z[1]);
    panels = panels + 1;

    fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      x[1]+p*(i-1), y[2]+dw*(j-1), z[0],
      x[1]+p*(i-1), y[2]+dw*(j-1), z[1],
      x[1]+p*(i-1), y[2]+dw*(j), z[1],
      x[1]+p*(i-1), y[2]+dw*(j), z[0]);
    panels = panels + 1;
    fprintf(q, "Q condutor2\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      x[2]+p*(i-1), y[2]+dw*(j-1), z[0],
      x[2]+p*(i-1), y[2]+dw*(j), z[0],
      x[2]+p*(i-1), y[2]+dw*(j), z[1],
      x[2]+p*(i-1), y[2]+dw*(j-1), z[1]);
    panels = panels + 1;
  }
}

fprintf(q, "\n\n*===== Gera os painéis de fechamento =====\n\n");
fprintf(q, "\n");
fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
  x[0], y[0], z[0],
  x[0], y[0], z[1],
  x[0], y[1], z[1],
  x[0], y[1], z[0]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor1\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
  x[5]+p*(n-1), y[0], z[0],
  x[5]+p*(n-1), y[1], z[0],
  x[5]+p*(n-1), y[1], z[1],
  x[5]+p*(n-1), y[0], z[1]);

```

```

panels = panels + 1;

fprintf(q, "Q condutor2\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\n",
x[0], y[4], z[0],
x[0], y[4], z[1],
x[0], y[5], z[1],
x[0], y[5], z[0]);
panels = panels + 1;
fprintf(q, "Q condutor2\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\t\E\n",
x[5]+p*(n-1), y[4], z[0],
x[5]+p*(n-1), y[5], z[0],
x[5]+p*(n-1), y[5], z[1],
x[5]+p*(n-1), y[4], z[1]);
panels = panels + 1;
}

fclose(q);

printf(" \n-----\n");

CFF = 2*(1+1)*(6.5*(0.25)+1.08*(0.5)+2.37)*1E-12;
C = CFF*w*n;

printf("\n Mesh: %i \n", mesh);

printf("\n Paineis: %d \n", panels);

printf("\n Capacitancia pela teoria = %E F\n", C);

printf("\n Dimensoes da estrutura: %lf cm x %lf cm\n", Comprimento, Largura);

printf("\n Codigo da estrutura gerado com sucesso.\n\n");
}

if (ch == 'l')
{
printf(" \n----- Arquivo .lst -----");
printf("\n\n Salvar arquivo como: ");
scanf("%s", &str);
strcat (str , ".lst");
q = fopen(str, "w");
fprintf(q, "* Arquivo: %s\n", str);

for (j=1; j<10; j++)
{
printf("\n\n <a> Adicionar arquivo\n\n <z> Concluir\n\n");
}
}

```

```

ch = getch();
while (ch != 'a' && ch != 'z')
    ch = getch();
if (ch == 'a')
{
printf("\n\n Adicionar arquivo: ");
scanf("%s", &str);
strcat (str , ".qui");
b = fopen(str, "r");
if (!b)
{
printf("\n\t\tArquivo inexistente.");
}
else
{
fclose(b);
printf("\n\n <c> Adicionar como Condutor");
printf("\n\n <d> Adicionar como Dieletrico\n\n");
for (v=1; v<10; v++)
{
ch = getch();
while (ch != 'c' && ch != 'd')
    ch = getch();
if (ch == 'c')
{
fprintf(q, "C %s 1\t0 0 0\n", str);
printf("\n\t\tArquivo adicionado com sucesso.");
v = 100;
}
if (ch == 'd')
{
fprintf(q, "D %s 1 55\t0 0 0\t1 1 1\n", str);
printf("\n\t\tArquivo adicionado com sucesso.");
v = 100;
}
v = v - 1;
}
}
}
if (ch == 'z')
{
j = 100;
}
j = j - 1;
}
fclose(q);

```



```

}

if (ch == 'd')
{
printf(" \n----- Dieletrico -----");
printf("\n\n Salvar arquivo como: ");
scanf("%s", &str);
strcat (str , ".qui");
q = fopen(str, "w");
fprintf(q, "0 Arquivo: %s\n\n", str);

printf("\n\n <x> Dimensoes do capacitor mais recente");
printf("\n\n <s> Especificar dimensoes\n\n");
for (v=1; v<10; v++)
{
ch = getch();
while (ch != 'x' && ch != 's')
ch = getch();
if (ch == 'x')
{
Cy = Largura * 1E-2 * 1.2;
Cx = Comprimento * 1E-2 * 1.2;
Cz = 50 * 1E-6;
v = 100;
}
if (ch == 's')
{
printf("\n\n Dimensoes do dieletrico: ");
printf("\n\n Comprimento em x [um]: ");
scanf("%lf", &Cx);
printf("\n\n Comprimento em y [um]: ");
scanf("%lf", &Cy);
printf("\n\n Comprimento em z [um]: ");
scanf("%lf", &Cz);

Cx = Cx * 1E-6;
Cy = Cy * 1E-6;
Cz = Cz * 1E-6;
Czi = 0;
v = 100;
}
v = v - 1;
}

dCx = (Cx)/meshx;
dCy = (Cy)/meshy;

```

```

dCz = (Cz)/meshz;

for (j=1; j<=meshx; j++)
{
  for (i=1; i<=meshy; i++)
  {
    fprintf(q, "Q placa\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      -Cx/2+dCx*(j-1), -Cy/2+dCy*(i-1), Czi,
      -Cx/2+dCx*(j-1), -Cy/2+dCy*(i), Czi,
      -Cx/2+dCx*(j), -Cy/2+dCy*(i), Czi,
      -Cx/2+dCx*(j), -Cy/2+dCy*(i-1), Czi);
    fprintf(q, "Q placa\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      -Cx/2+dCx*(j-1), -Cy/2+dCy*(i-1), Cz,
      -Cx/2+dCx*(j), -Cy/2+dCy*(i-1), Cz,
      -Cx/2+dCx*(j), -Cy/2+dCy*(i), Cz,
      -Cx/2+dCx*(j-1), -Cy/2+dCy*(i), Cz);
  }
}

for (j=1; j<=meshz; j++)
{
  for (i=1; i<=meshy; i++)
  {
    fprintf(q, "Q placa\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      -Cx/2, -Cy/2+dCy*(i-1), Czi+dCz*(j-1),
      -Cx/2, -Cy/2+dCy*(i-1), Czi+dCz*(j),
      -Cx/2, -Cy/2+dCy*(i), Czi+dCz*(j),
      -Cx/2, -Cy/2+dCy*(i), Czi+dCz*(j-1));
    fprintf(q, "Q placa\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      Cx/2, -Cy/2+dCy*(i-1), Czi+dCz*(j-1),
      Cx/2, -Cy/2+dCy*(i), Czi+dCz*(j-1),
      Cx/2, -Cy/2+dCy*(i), Czi+dCz*(j),
      Cx/2, -Cy/2+dCy*(i-1), Czi+dCz*(j));
  }
}

for (j=1; j<=meshx; j++)
{
  for (i=1; i<=meshz; i++)
  {
    fprintf(q, "Q placa\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",
      -Cx/2+dCx*(j-1), -Cy/2, Czi+dCz*(i-1),
      -Cx/2+dCx*(j), -Cy/2, Czi+dCz*(i-1),
      -Cx/2+dCx*(j), -Cy/2, Czi+dCz*(i),
      -Cx/2+dCx*(j-1), -Cy/2, Czi+dCz*(i));
    fprintf(q, "Q placa\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\t%E\n",

```

```

        -Cx/2+dCx*(j-1), Cy/2, Czi+dCz*(i-1),
        -Cx/2+dCx*(j-1), Cy/2, Czi+dCz*(i),
        -Cx/2+dCx*(j), Cy/2, Czi+dCz*(i),
        -Cx/2+dCx*(j), Cy/2, Czi+dCz*(i-1));
    }
}
fclose(q);
}

if (ch == 'f')
{
    printf("\n\n Sistema finalizado!\n\n");
    printf("\n ");
    system ("pause");
    return(0);
}

printf(" \n----- Menu Principal -----\n");
printf("\n Seleccione uma opcao:\n");
printf("\n <c> Criar novo capacitor\n");
printf("\n <d> Criar novo dieletrico\n");
printf("\n <l> Criar arquivo .lst\n");
printf("\n <f> Finalizar\n\n");
ch = getch();
while (ch != 'f' && ch != 'c' && ch != 'd' && ch != 'l')
    ch = getch();
k = 1;
}
}

```

## REFERÊNCIAS

- [1] DAVID P. MORGAN, “**History of SAW devices**”, IEEE International Frequency Control Symposium, 1998.
- [2] V. K. VARADAN, P. T. TEO, K. A. JOSE, V. V. VARADAN, “**Design and development of a smart wireless system for passive temperature sensors**”, Struct. 9 (2000) 379-388.
- [3] G. BRUCKNER, R. HAUSER, L. MAURER, L. REINDL, R. TEICHMANN, J. BINIASCH, “**High temperature stable SAW based tagging system for identifying a pressure sensor**”, IEEE Proceedinds of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, May 2003, pp. 943-947.
- [4] W. D. SUH, K. A. JOSE, P. B. XAVIER, V. V. VARADAN, V. K. VARADAN, “**Design optimization and experimental verification of wireless IDT based micro temperature sensor**”, Struct. 9 (2000) 890-897.
- [5] F. SCHMIDT, O. SCZESNY, L. REINDL, V. MÁGORI, “**Remote sensing of physical parameters by means of passive surface acoustic wave devices (ID-tag)**”, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 589-592, Cannes, France, November 1994.
- [6] M. BENETTI, D. CANNATÀ, F. DI PIETRANTONIO, E. VERONA, “**A review of RFID and wireless sensors based on surface acoustic wave devices**”, Emerging Technologies for Radio Frequency Identification, G. Marrocco Editor, Research Report RR-08-69, Dipartimento di Infomatica Sistemi e Produzione, Università di Roma Tor Vergata, June 2008, pp. 15-20.

- [7] A. J. SLOBODNIK, JR., “**Surface acoustic waves and SAW materials**”, Proc. IEEE, vol. 64, pp. 724-748, May 1976.
- [8] R. -D. WANG, Y. -Y. CHEN, T. -T. WU, “**A surface acoustic wave impedance loaded sensor for wireless humidity measurement**”, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, pp. 4969-4973.
- [9] S. HÄRMÄ, “**Surface acoustic wave RFID tags: ideas, developments, and experiments**”, PhD Thesis, 2009.
- [10] V. P. PLESSKY, “**Review on SAW RFID tags**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 57, No. 3, March 2010, pp. 654-668.
- [11] S. HÄRMÄ, C. -U. KIM, S. M. BALASHOV, V. P. PLESSKY, “**Narrow electrodes on YZ-LiNbO<sub>3</sub> as an alternative to etched grooves for dispersive delay lines**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 2, February 2008, pp. 494-498.
- [12] S. LEHTONEN, V. P. PLESSKY, C. S. HARTMANN, M. M. SALOMAA, “**Unidirectional SAW transducer for gigahertz frequencies**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 50, No. 11, November 2003, pp. 1404-1406.
- [13] U. BIADER CEIPIDOR, C. M. MEDAGLIA, A. MORONI, G. ORLANDI, S. SPOSATO, “**NFC: Integration between RFID and mobile, state of art and future developments**”, Emerging Technologies for Radio Frequency Identification, G. Marrocco Editor, Research Report RR-08-69, Dipartimento di Infomatica Sistemi e Produzione, Università di Roma Tor Vergata, June 2008, pp. 78-81.

- [14] W. R. SMITH, H. M. GERARD, J. R. COLLINS, T. M. REEDER, H. J. SHAW, “**Analysis of interdigital surface wave transducers by use of an equivalent circuit model**”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-17, pp. 856-864, November 1969.
- [15] FARNELL G. W., CERMAK I. A., SILVESTER P., WONG S. K., “**Capacitance and field distributions for interdigital surface-wave transducer**”, IEEE Transactions on sonics and ultrasonics, vol. SU-17, No. 3, pp. 188-195, July 1970.
- [16] YUNG-YU CHEN, TSUNG-TSONG WU, TSUNG-TAI CHOU, “**Analysis of the frequency response of a dispersive IDT/ZnO/sapphire SAW filter using effective permittivity and the coupling of modes model**”, Institute of Physics Publishing, Journal of Physics D: Applied Physics No. 37, pp. 120-127, 2004.
- [17] S. HÄRMÄ, V. P. PLESSKY, C. S. HARTMANN, W. STEICHEN, “**Z-path SAW RFID tag**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 1, January 2008, pp. 208-213.
- [18] C. S. HARTMANN, P. BROWN, J. BELLAMY, “**Design of global SAW RFID tag devices**”, Proceedings of the Second International Symposium on Acoustic Wave Devices For Future Mobile Communication Systems, pp. 15-19, Chiba University, Japan, March 2004.
- [19] S. HÄRMÄ, V. P. PLESSKY, “**Extraction of frequency-dependent reflection, transmission, and scattering parameters for short metal reflectors from FEM-BEM simulations**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 4, April 2008, pp. 883-889.
- [20] L. REINDL, W. RUILE, “**Programmable reflectors for SAW-ID-tags**”, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 125-130, Baltimore, MD, USA, November 1993.

- [21] S. LEHTONEN, V. P. PLESSKY, J. KOSKELA, M. M. SALOMAA, “**Second harmonic reflectors on  $128^\circ$  LiNbO<sub>3</sub>**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 50, No. 8, August 2003, pp. 972-978.
- [22] S. LEHTONEN, V. P. PLESSKY, M. M. SALOMAA, “**Short reflectors operating at the fundamental and second harmonics on  $128^\circ$  LiNbO<sub>3</sub>**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, No. 3, March 2004, pp. 343-351.
- [23] S. LEHTONEN, V. P. PLESSKY, N. BÉREUX, M. M. SALOMAA, “**Minimum-loss short reflectors on  $128^\circ$  LiNbO<sub>3</sub>**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, No. 10, October 2004, pp. 1203-1205.
- [24] S. LEHTONEN, V. P. PLESSKY, M. M. SALOMAA, “**Extraction of the SAW attenuation parameter in periodic reflecting gratings**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 52, pp. 111-119 (2005).
- [25] S. HÄRMÄ, W. G. ARTHUR, C. S. HARTMANN, R. G. MAEV, V. P. PLESSKY, “**Inline SAW RFID tag using position and phase encoding**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 8, August 2008, pp. 1840-1846.
- [26] C. S. HARTMANN, P. BROWN, J. BELLAMY, “**A global SAW ID tag with large data capacity**”, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 65-69, Munich, Germany, October 2002.
- [27] S. HÄRMÄ, V. P. PLESSKY, X. LI, P. HARTOGH, “**Feasibility of ultra-wideband SAW RFID tags meeting FCC rules**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, accepted for publication.
- [28] ROBERT W. BROCATO, “**Passive wireless sensing tags NASA inflatable structures**”, SABD2006-1288 Unlimited Release, March 2006.

- [29] A. POHL, G. OSTERMAYER, L. REINDL, F. SEIFERT, “**Spread spectrum techniques for wirelessly interrogable passive SAW sensors**”, IEEE Fourth International Symposium on Sprectrum Techniques And Applications.
- [30] C. HARTMANN, P. HARTMANN, P. BROWN, J. BELLAMY, L. CLAIBORNE, W. BONNER, “**Anti-Collision Methods global SAW RFID tag devices**”, IEEE Ultrasonics Symposium, Vol. 2, pp. 805-808 (2004).
- [31] S. LEHTONEN, “**Optimization of reflector and transducer properties for surface acoustic wave devices on  $128^\circ$  LiNbO<sub>3</sub>**”, PhD Thesis, 2004.
- [32] LEONHARD REINDL, GERD SCHOLL, THOMAS OSTERTAG, HOLGER SCHERR, ULRICH WOLK, AND FRANK SCHMIDT, “**Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors**”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No. 5, September 1998, pp. 1281-1292.
- [33] EDVAL J. P. SANTOS, **Sensores a ondas acústicas de superfície**, Capítulo 5.
- [34] A. M. BARBOSA, **Modelo SPICE compacto para dispositivos e sensores a onda acústica de superfície**, Tese de mestrado, PPGEE, UFPE, Recife (2002).
- [35] STANLEY WOLF, RICHARD N. TAUBER, “**Silicon processing for the VLSI era**”, Vol. 1: Process Technology, Lattice Press, Sunset Beach, California (1986).