

Leonardo Bruno Medeiros Silva

Miniaturização de sensores piezoelétricos para  
medição de pressão elevada com alta resolução em  
ambientes agressivos

Recife

2014

**Universidade Federal de Pernambuco**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Miniaturização de sensores piezoelétricos para  
medição de pressão elevada com alta resolução em  
ambientes agressivos**

**Tese**

submetida à Universidade Federal de Pernambuco  
como parte dos requisitos para obtenção do grau de

**Doutor em Engenharia Elétrica**

Leonardo Bruno Medeiros Silva

Recife, Março de 2014.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor,  
a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

(Albert Einstein)

“Sempre parece impossível  
até que seja feito.”

(Nelson Mandela)

Resumo da Tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para  
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

# Miniaturização de sensores piezoelétricos para medição de pressão elevada com alta resolução em ambientes agressivos

Leonardo Bruno Medeiros Silva

Março/2014

Orientador: Edval José Pinheiro Santos, Ph.D.

Área de Concentração: Eletrônica

Palavras-chaves: miniaturização, sensor piezoelétrico, quartzo, fator de qualidade, pressão, manufatura de dispositivos

Número de páginas: xxii+133

Um sensor inteligente com alta resolução e princípio de transdução baseado no fenômeno da piezoelectricidade é proposto para medições distribuídas de pressão em ambientes agressivos, tais como poços de petróleo e gás. O elemento de transdução é o cristal de quartzo, com ele pode-se medir pressões de 15000 psi em ambientes agressivos com temperaturas até 150 °C. Também se examinou o transdutor a base de fosfato de gálio. Nesse estudo, foi examinado o impacto da miniaturização do transdutor sobre o fator de qualidade, que é uma figura de mérito chave para obter alta resolução. Inicialmente foi elaborado um modelo computacional do transdutor, que foi implementado na ferramenta *COMSOL Multiphysics*®. Em seguida foram implementadas as etapas de microfabricação e usinagem por abrasão ultra-sonora para o desenvolvimento do transdutor. Também foi implementado procedimentos para extração de parâmetros elétricos para caracterização do transdutor fabricado. Assim foi possível avaliar o fator de qualidade dos transdutores fabricados. No sentido de integrar o transdutor fabricado com os circuitos eletrônicos associados, uma proposta de sensor inteligente é elaborada.

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

# **Miniaturization of piezoelectric sensors for high pressure measurement with high resolution in harsh environments**

Leonardo Bruno Medeiros Silva

March/2014

Supervisor: Edval José Pinheiro Santos, Ph.D.

Area of Concentration: Electronics

Keywords: miniaturization, piezoelectric sensor, quartz, quality factor, pressure, manufacturing devices

Number of pages: xxii+133

A high-resolution smart sensor based on the piezoelectricity phenomenon is proposed for distributed pressure measurement in harsh environments, such as oil wells and gas. The transducing element is the quartz crystal, as it can measure pressures as high as 15000 psi in harsh environments with temperatures up to 150 °C. Also a gallium phosphate based transducer was examined. In this study, the impact of miniaturization on the transducer quality factor is examined. This is a key figure of merit for achieving high resolution. Initially, a computational model of the transducer was developed, which was implemented in *COMSOL Multiphysics*® tool. Next, the microfabrication steps and ultra-sound machining were implemented for the development of the transducer. It was also implemented the electrical parameter extraction procedure for characterization of the fabricated transducer. Thus it was possible to evaluate the quality factor of the manufactured transducers. In order to integrate the manufactured transducer with the associated electronic circuitry, a smart sensor design is proposed.

# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Capítulo 1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução geral . . . . .	1
1.2 Tipos de sensores de pressão . . . . .	3
1.2.1 Sensores de pressão baseados em MEMS . . . . .	5
1.2.2 Sensores de pressão com fibra óptica . . . . .	9
1.2.3 Sensores de pressão piezoelétricos . . . . .	10
1.3 Modos de vibração . . . . .	15
1.4 Figuras de mérito para o sensor de pressão . . . . .	17
1.4.1 Definição formal para o fator de qualidade . . . . .	18
1.4.2 Mecanismos de perdas de energia . . . . .	18
1.4.3 Parâmetros elétricos . . . . .	20
1.5 Características do quartzo . . . . .	22
1.6 Características do fosfato de gálio . . . . .	25
1.7 Motivações . . . . .	28
1.8 Objetivos . . . . .	30
1.9 Organização da tese . . . . .	31

<b>Capítulo 2</b>	<b>Modelo computacional do transdutor</b>	<b>33</b>
2.1	Descrição do ambiente COMSOL . . . . .	34
2.1.1	Utilizando a interface física Dispositivos Piezoelétricos . . . . .	34
2.2	Placa ressonadora em 2D - modelo inicial . . . . .	36
2.3	Estruturas ressonantes em 3D . . . . .	41
2.3.1	Geometria . . . . .	41
2.3.2	Materiais . . . . .	42
2.3.3	Malha . . . . .	42
2.3.4	Tratamento das regiões de absorção de energia . . . . .	44
2.3.5	Configuração da física . . . . .	45
2.4	Resultados das simulações 3D . . . . .	46
2.4.1	Comportamento $f \times Q$ . . . . .	47
2.4.2	$Q \times$ diâmetro dos eletrodos . . . . .	49
2.4.3	Concavidade . . . . .	50
2.4.4	Ressonadores miniaturizados . . . . .	53
2.4.5	Perdas nos eletrodos . . . . .	55
2.4.6	Espectroscopia de impedância . . . . .	56
2.4.7	Análise das deformações no ressonador . . . . .	58
2.4.8	Influência da temperatura . . . . .	63
2.5	Estruturas ressonantes em 3D com capas . . . . .	66
2.5.1	Geometrias e malha . . . . .	66
2.5.2	Aplicação de pressão . . . . .	68
2.5.3	Aplicação de pressão e temperatura . . . . .	70
2.6	Considerações finais . . . . .	72
<b>Capítulo 3</b>	<b>Fabricação do transdutor de quartzo</b>	<b>74</b>
3.1	Métodos de fabricação . . . . .	75
3.2	Aquisição e limpeza das lâminas de quartzo . . . . .	76
3.3	Deposição dos eletrodos . . . . .	77
3.3.1	Deposição por pulverização . . . . .	77
3.3.2	Projeto do suporte para as deposições . . . . .	81
3.3.3	Deposições realizadas . . . . .	82

3.4	Etapas dos processos de fotolitografia . . . . .	84
3.4.1	Projeto das máscaras . . . . .	85
3.5	Usinagem por abrasão ultra-sonora . . . . .	87
3.5.1	Aparato experimental para a usinagem . . . . .	89
3.5.2	Usinagens realizadas . . . . .	91
3.6	Contatos elétricos . . . . .	94
3.7	Considerações sobre concavidade . . . . .	95
3.8	Considerações sobre as capas protetoras . . . . .	95
3.9	Considerações finais . . . . .	96
<b>Capítulo 4 Caracterização</b>		<b>98</b>
4.1	Caracterização por difração de raios-X . . . . .	99
4.2	Caracterização por impedância elétrica . . . . .	101
4.2.1	Discos pós-usinados . . . . .	101
4.2.2	Transdutor de pressão da <i>Quartzdyne</i> . . . . .	103
4.3	Caracterização sob elevada pressão . . . . .	104
4.4	Caracterização sob elevada temperatura . . . . .	104
4.5	Caracterização em ambiente de baixo vácuo . . . . .	105
4.6	Considerações finais . . . . .	109
<b>Capítulo 5 Sensor inteligente proposto</b>		<b>111</b>
5.1	Introdução . . . . .	112
5.2	Circuitos de condicionamento . . . . .	114
5.2.1	Osciladores, multiplicadores e amplificadores . . . . .	114
5.2.2	Conversor de frequência para digital . . . . .	115
5.3	Sistema para coleta de energia . . . . .	118
5.4	Testes de bancada . . . . .	120
5.4.1	Validação do circuito de condicionamento . . . . .	120
5.4.2	Testes com aplicação de pressão . . . . .	120
5.5	Encapsulamento . . . . .	121
5.6	Proposta de integração 3D . . . . .	122
5.7	Considerações finais . . . . .	123

<b>Capítulo 6 Conclusões</b>	<b>125</b>
6.1 Contribuições dessa tese . . . . .	127
6.2 Trabalhos futuros . . . . .	127
<b>Apêndice A Piezoeletricidade</b>	<b>129</b>
A.1 Placa ressonante de quartzo ideal . . . . .	135
A.2 Placa ressonante de quartzo com perdas . . . . .	141
A.2.1 Fator de qualidade . . . . .	141
A.2.2 Impedância de movimento . . . . .	142
A.3 Modelo elétrico para o cristal de quartzo . . . . .	145
A.3.1 Fator de qualidade . . . . .	146
A.3.2 Equivalência com sistema mecânico . . . . .	148
<b>Apêndice B Informações complementares sobre o quartzo</b>	<b>150</b>
B.1 Cristalografia . . . . .	150
B.2 Caracterização por difração de raios-X . . . . .	154
B.2.1 Princípio de funcionamento . . . . .	154
B.2.2 Dados de Raio-X para o quartzo . . . . .	157
B.3 Otimização geométrica numa placa ressonante de quartzo . . . . .	158
B.4 Poço de petróleo e instrumentação . . . . .	159
<b>Apêndice C Configuração das simulações 3D no COMSOL</b>	<b>162</b>
C.1 Novo arquivo de simulação . . . . .	162
C.2 Definições globais . . . . .	164
C.3 Configuração do ângulo de corte . . . . .	164
C.4 Geometria . . . . .	167
C.5 Materiais . . . . .	169
C.5.1 Quartzo . . . . .	169
C.5.2 Eletrodos de alumínio . . . . .	170
C.6 Região PML . . . . .	171
C.7 Configuração da física . . . . .	172
C.8 Configuração da malha . . . . .	174
C.9 Configuração do estudo <i>Eigenfrequency</i> . . . . .	175

C.9.1	Visualização dos resultados . . . . .	177
C.10	Configuração do estudo <i>Frequency Domain</i> . . . . .	180
C.10.1	Visualização dos resultados . . . . .	181
C.11	Configuração dos estudos com variação de temperatura e pressão . . . . .	183
C.11.1	Visualização dos resultados . . . . .	184
<b>Apêndice D Operação dos equipamentos</b>		<b>186</b>
D.1	Procedimentos de uso da pulverizadora . . . . .	186
D.2	Procedimentos de uso da máquina de usinagem . . . . .	187
<b>Bibliografia</b>		<b>190</b>

# Lista de Abreviaturas

<b>MEMS</b>	<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>
<b>FBG</b>	<i>Fiber Bragg Grating</i>
<b>PDG</b>	<i>Permanent Downhole Gauge</i>
<b>SiC</b>	carbeto de silício
<b>SOI</b>	<i>Silicon on Insulator</i>
<b>AlN</b>	nitreto de alumínio
<b>ZnO</b>	óxido de zinco
<b>PZT</b>	<i>lead zirconate titanate</i> (titanato zirconato de chumbo)
<b>BAW</b>	<i>Bulk Acoustic Wave</i>
<b>GaPO<sub>4</sub></b>	fosfato de gálio
<b>HP</b>	<i>Hewlett-Packard</i>
<b>HMR</b>	<i>Halliburton Memory Recorder</i>
<b>CQG</b>	<i>Compensated Quartz Gauge</i>
<b>FBAR</b>	<i>Film Bulk Acoustic Resonator</i>
<b>SMR</b>	<i>Solid Mounted Resonator</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<b>LDN</b>	Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas
<b>psi</b>	<i>pounds per square inch</i> (libras por polegada quadrada)
<b>PDEs</b>	<i>Partial Differential Equations</i>
<b>AC/DC</b>	<i>Alternating Current / Direct Current</i>
<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Design</i>
<b>PML</b>	<i>Perfectly Matched Layers</i>
<b>FP</b>	fator de perdas
<b>RF</b>	rádio-frequência
<b>PID</b>	proporcional integral derivativo

<b>RIE</b>	<i>reactive-ion etching</i> (corrosão iônica reativa)
<b>DXR</b>	<i>Digital X-ray radiogrammetry</i>
<b>GPIB</b>	<i>General Purpose Interface Bus</i>
<b>VHDL</b>	<i>VHSIC Hardware Description Language</i>
<b>VHSIC</b>	<i>Very-High-Speed Integrated Circuit</i>
<b>ASIC</b>	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
<b>FPGA</b>	<i>Field Programmable Gate Array</i>

# Lista de Tabelas

1.1	Tipos de transdutores de pressão. . . . .	4
1.2	Parâmetros de dispositivos MEMS. . . . .	8
1.3	Comparação entre sensores de pressão comerciais. . . . .	15
1.4	Espessura das placas de quartzo em função da frequência para o corte-AT. . . . .	17
1.5	Propriedades típicas do quartzo no corte-AT. . . . .	20
1.6	Constantes elásticas, piezoelétricas e dielétricas para o quartzo na orientação direita e o ângulo $\theta$ definido no sentido anti-horário. . . . .	23
1.7	Constantes elásticas, piezoelétricas e dielétricas para o fosfato de gálio. . . . .	27
1.8	Propriedades do quartzo e do fosfato de gálio. . . . .	28
1.9	Especificações para o sensor de pressão miniaturizado. . . . .	30
2.1	Constantes para o quartzo no corte-AT. . . . .	38
2.2	Resultados para simulações 2D. . . . .	39
2.3	Análise do fator de qualidade devido a presença ou ausência da PML e das perdas por viscosidade do quartzo. $l_q = 15$ mm, $l_{elet}/l_q = 0,5$ , $h_{elet} = 0$ e $l_{PML} = 1,2$ mm. . . . .	49
2.4	Frequência e fator de qualidade para o ressonador com concavidade, $h_q = 200$ $\mu$ m, $l_q = 15$ mm, $h_{elet} = 0$ , $l_{PML} = 1,2$ mm e $g = 1,2$ mm. . . . .	52
2.5	Resumo do processo de otimização do fator de qualidade no disco ressonador de quartzo. Parâmetros fixos usados na simulação: $h_q = 200$ $\mu$ m, $l_q = 5$ mm e $g = 0,5$ mm. . . . .	55
2.6	Fator de qualidade em função das perdas nos eletrodos para um disco de quartzo. Parâmetros fixos usados na simulação: $h_q = 200$ $\mu$ m, $l_q = 5$ mm, $l_{elet}/l_q = 0,75$ , $l_{PML} = 1,2$ mm e $g = 0,5$ mm. . . . .	55

2.7	Extração de parâmetros para o disco ressonador de quartzo plano-plano para o corte $\theta = 32^\circ$ e $\varphi = 0^\circ$ . Dados da simulação: $h_q = 350 \mu\text{m}$ , $h_{elet} = 0$ , $l_q = 10,5 \text{ mm}$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $l_{elet}/l_q = 0,5$ . . . . .	57
2.8	Análise da posição dos suportes. $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $h_{elet} = 0$ . . . . .	60
2.9	Análise da posição dos suportes. Disco plano-plano, $h_q = 400 \mu\text{m}$ , $l_q = 15 \text{ mm}$ , $l_{elet}/l_q = 0,5$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $h_{elet} = 0$ . . . . .	62
2.10	Coeficientes de temperatura para um disco de quartzo no corte-AT. . . . .	63
2.11	Constantes elásticas para o quartzo em função da temperatura. . . . .	65
2.12	Frequências de ressonância para diferentes pressões e temperaturas do ressonador baseado na estrutura da <i>Quartzdyne</i> . $l_q = 15 \text{ mm}$ , $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230 \mu\text{m}$ , $h_{elet} = 100 \text{ nm}$ e $d = e = 800 \mu\text{m}$ . . . . .	70
3.1	Características das lâminas utilizadas. . . . .	76
3.2	Soluções usadas na limpeza das lâminas. . . . .	76
3.3	Parâmetros estabelecidos nas deposições. . . . .	83
3.4	Dimensões dos eletrodos desenhados na máscara. . . . .	87
3.5	Dados da configuração da máquina de usinagem utilizados na primeira série de usinagens. . . . .	93
3.6	Dados das medidas de resistência elétrica entre os eletrodos e os fios. . . . .	94
4.1	Extração de parâmetros dos discos de quartzo pós-usinado. . . . .	102
4.2	Extração de parâmetros do cristal de pressão da <i>Quartzdyne</i> . . . . .	104
4.3	Dados da extração de parâmetros para os cristais comerciais sob diferentes situações. . . . .	108
5.1	Conformidade entre o conversor de frequência e o frequencímetro de precisão HP53181A. . . . .	116
5.2	Comportamento do circuito de condicionamento de sinais. . . . .	120
A.1	Notação de redução de índices de acordo com Voigt. . . . .	134
A.2	Resumo das grandezas equivalentes entre os modelos mecânico e elétrico. . . . .	149
B.1	Cortes para o quartzo no modo de vibração de cisalhamento de espessura. . . . .	153

# Lista de Figuras

1.1	Topologias de sensores num processo de medição. . . . .	5
1.2	Vista em corte das estruturas BAW: (a) FBAR com camada de suporte sacrificada, (b) FBAR com substrato removido e (c) SMR. . . . .	7
1.3	Geometrias dos sensores de pressão a quartzo usados em poços de petróleo. (a) <i>Hewlett-Packard</i> , (b) <i>Quartztronics</i> , (c) <i>Schlumberger</i> e (d) <i>Quartzdyne</i> . . . . .	12
1.4	Formas e tamanhos aproximados em escala dos sensores de pressão. .	15
1.5	Modos de vibração: (a) extensional ou longitudinal, (b) flexão, (c) cisalhamento de espessura (primeiro harmônico) e (d) cisalhamento de face. . . . .	16
1.6	Comportamento típico do fator de qualidade em função da frequência para três diâmetros diferentes de ressonadores em forma de disco. . .	20
1.7	(a) Simbologia do ressonador de quartzo. (b) Circuito equivalente para o ressonador de quartzo operando próximo da frequência de ressonância. Comportamento típico do módulo e da fase da admitância, (c) e (d), respectivamente. . . . .	21
1.8	(a) Sistema de coordenadas adotadas no cristal de quartzo. (b) Placa não rotacionada, corte-Y. (c) Placa de quartzo orientada no corte-AT definida a norma IEEE de 1987: (YXl)-35,25°. . . . .	22
1.9	Comportamento da frequência de ressonância em função do ângulo de corte. Os principais cortes para cristais de quartzo de simples rotação estão indicados. . . . .	24
1.10	Constante piezoelétrica $d_{11}$ versus temperatura para GaPO <sub>4</sub> e quartzo.	25
1.11	Classificação de materiais piezoelétricos. . . . .	26

1.12	Coeficiente de temperatura e coeficiente de acoplamento piezoelétrico para o corte-Y do fosfato de gálio. . . . .	27
1.13	Diagrama de blocos para o sensor inteligente de pressão. . . . .	28
2.1	Fluxograma para a simulação no COMSOL do ressonador de quartzo.	35
2.2	Geometria para a placa ressonadora em 2D, as dimensões são $10115,28 \times 200 \mu\text{m}$ . . . . .	37
2.3	Tipos de malhas disponíveis em simulações 2D: (a) triangular, (b) quadrática e (c) mapeada. . . . .	37
2.4	Comportamento da admitância para a placa de quartzo no corte-AT em 2D. Tempo de simulação: aproximadamente 1 min. . . . .	39
2.5	Deformações obtidas na simulação 2D, o modo de cisalhamento de espessura está presente. (a) Harmônico fundamental, (b) terceiro harmônico e (c) quinto harmônico. . . . .	40
2.6	Seção em corte transversal da geometria do ressonador. . . . .	41
2.7	Malha utilizada nas simulações. A região azul é o domínio PML e as regiões verdes representam os domínios de eletrodos. $l_q = 15 \text{ mm}$ , $h_q = 230 \mu\text{m}$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ e $h_{elet} = 100 \text{ nm}$ . . . . .	42
2.8	Convergência da frequência de ressonância em função do número de camadas da malha ao longo da espessura do quartzo. . . . .	43
2.9	Dados para a criação da malha no disco. . . . .	43
2.10	Fator de qualidade devido as perdas intrínsecas do disco ressonador de quartzo no corte-AT com $l_q = 5, 15, 30$ e $90 \text{ mm}$ , $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ e $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ . . . . .	48
2.11	Análise das contribuições no fator de qualidade devido a presença ou ausência da PML e do FP. $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ e $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ . . . . .	48
2.12	Fator de qualidade em função do diâmetro dos eletrodos, $l_q = 15 \text{ mm}$ , $h_{elet} = 0$ e $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ . . . . .	50
2.13	Detalhe da geometria para o ressonador de quartzo bi-convexo. . . . .	51
2.14	Comportamento do fator de qualidade em relação a concavidade, $l_q = 15 \text{ mm}$ , $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_{elet} = 0$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , e $g = 1,2 \text{ mm}$ . . . . .	52

2.15 Fluxograma para processo de otimização do fator de qualidade em disco ressonadores de quartzo. . . . .	53
2.16 Disco ressonador de quartzo plano-convexo. $h_q = 200 \mu\text{m}$ , $l_q = 5 \text{ mm}$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $g = 0,5 \text{ mm}$ e $l_{elet}/l_q = 0,75$ . . . . .	54
2.17 Comportamento do fator de qualidade para o disco de quartzo plano-convexo com as seguintes dimensões: $h_q = 200 \mu\text{m}$ , $l_q = 5 \text{ mm}$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $g = 0,5 \text{ mm}$ e $l_{elet}/l_q = 0,75$ . . . . .	54
2.18 Comportamento da impedância na região do primeiro harmônico para o disco ressonador de quartzo plano-plano para o corte $\theta = 32^\circ$ e $\varphi = 0^\circ$ . Dados da simulação: $h_q = 350 \mu\text{m}$ , $h_{elet} = 0$ , $l_q = 10,5 \text{ mm}$ , $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ , $l_{elet}/l_q = 0,5$ . . . . .	57
2.19 Deformação do primeiro harmônico do disco ressonador de quartzo operando no modo de cisalhamento de espessura. As cores azul e vermelha correspondem à deslocamentos em sentidos opostos na direção-x. Meio-ciclo completo de vibração é mostrado. Para facilitar a visualização das deformação usou-se um fator de escala bastante exagerado ( $\sim 10^6$ ). . . . .	59
2.20 (a) Típico oscilador comercial de quartzo. (b) Ilustração do disco ressonador com suportes. (c) Desenho dos suportes no COMSOL. . . . .	60
2.21 (a) PML. (b) Superfícies fixas. (c) Malha. . . . .	61
2.22 (a) PML. (b) Alumínio. (c) Quartzo. (d) Superfícies fixas. (e) Malha. . . . .	61
2.23 (a) PML. (b) Eletrodos. (c) Superfícies fixas. (d) Malha. . . . .	62
2.24 (a) Dependência do ângulo de corte nas curvas de frequência $\times$ temperatura em ressonadores de quartzo no corte-AT. (b) Curvas para o comportamento frequência $\times$ temperatura para diversos cortes no quartzo. . . . .	63
2.25 Variação da frequência de ressonância fundamental como função da temperatura para um disco de quartzo no corte-AT. A normalização ocorre para a frequência de ressonância na temperatura de $25^\circ\text{C}$ . Os pontos são os resultados das simulações no COMSOL e as linhas contínuas reproduzem o comportamento da Equação 1.9. $l_q = 15 \text{ mm}$ , $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230 \mu\text{m}$ , $h_{elet} = 100 \text{ nm}$ . . . . .	66

2.26	(a) Modelo em 2D da geometria semelhante ao sensor da <i>Schlumberger</i> . (b) Malha utilizada na modelagem, a tampa frontal foi removida para facilitar a visualização do interior. $l_q = 15$ mm, $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230$ $\mu$ m, $h_{elet} = 100$ nm e $a = b = c = 800$ $\mu$ m. . . . .	67
2.27	(a) Secção em corte transversal da estrutura de disco modelada com as capas protetoras. (b) Malha obtida durante a revolução. $l_q = 15$ mm, $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230$ $\mu$ m, $h_{elet} = 100$ nm e $d = e = 800$ $\mu$ m. . . . .	67
2.28	Aplicação de pressão na estrutura semelhante aos sensores da <i>Quartzdyne</i> (a) e da <i>Schlumberger</i> (b). . . . .	68
2.29	Deformação da estrutura com a aplicação de pressão numa temperatura de 50 °C. O fator de escala está bastante exagerado. Na legenda, a cor azul corresponde a mínima deformação e a cor vermelha a máxima deformação. $l_q = 15$ mm, $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230$ $\mu$ m, $h_{elet} = 100$ nm e $d = e = 800$ $\mu$ m. . . . .	69
2.30	Deformação da estrutura baseada no sensor da <i>Schlumberger</i> com a aplicação de pressão numa temperatura de 50 °C. O fator de escala está bastante exagerado. Na legenda, a cor azul corresponde a mínima deformação e a cor vermelha a máxima deformação. $l_q = 15$ mm, $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230$ $\mu$ m, $h_{elet} = 100$ nm e $a = b = c = 800$ $\mu$ m. . . . .	69
2.31	Variação da frequência em função da pressão para temperaturas constantes de 25, 50, 100 e 200 °C. Estrutura baseada no sensor da <i>Quartzdyne</i> . $l_q = 15$ mm, $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ , $h_q = 230$ $\mu$ m, $h_{elet} = 100$ nm e $d = e = 800$ $\mu$ m. . . . .	71
3.1	Métodos de fabricação para o disco ressonador de quartzo. . . . .	75
3.2	(a) Ilustração do processo de pulverização por RF. (b) Comportamento dos íons e elétrons em cada semi-ciclo num processo de pulverização por RF. . . . .	78
3.3	Sistema de deposição de filmes finos por pulverização utilizado nessa tese. . . . .	81
3.4	Esquema de suporte dos discos de quartzo para deposição dos eletrodos na pulverizadora. . . . .	82

3.5	Fotografia mostrando o interior da câmara durante a deposição, o <i>shutter</i> do alumínio está aberto e a luz decorrente do estado de plasma é visualizada. . . . .	83
3.6	Visualização através do microscópio óptico das deposições de Al nos discos de quartzo. Contatos elétricos feitos com cola epóxi condutora (a) e com tinta prata (b). . . . .	84
3.7	Etapas de fabricação. (a) Limpeza da lâmina de quartzo. (b) Deposição de metal. (c) Aplicação da fotorresina. (d) Posicionamento da máscara fotolitográfica na máquina alinhadora. (e) Exposição de luz ultra-violeta na máquina alinhadora. (f) Revelação da fotorresina sensibilizada pela luz. (g) Corrosão da camada de metal não protegida pela fotorresina. (h) Remoção completa da fotorresina. . . . .	85
3.8	Máscara com os padrões de eletrodos para três diâmetros do disco de quartzo. . . . .	86
3.9	Marcas de alinhamento da máscara (a grade tem 100 $\mu\text{m}$ de largura). . . . .	86
3.10	Esquema do processo de usinagem por abrasão ultrasonora. A ferramenta vibra apenas na direção perpendicular a superfície da peça numa frequência em torno de 20 kHz. . . . .	88
3.11	Máquina de usinagem por abrasão ultrasonora <i>Sonic-Mill AP-1000</i> . . . . .	89
3.12	(a) Ferramenta para usinagem do disco ressonador de quartzo. (b) Base para soldar a casca cilíndrica. . . . .	91
3.13	Lâmina de quartzo pós-usinada e detalhe no microscópio óptico. . . . .	92
3.14	Fotos da placa de metal (a) e da lâmina de quartzo (b) após a primeira série de usinagens. . . . .	92
3.15	Comportamento da usinagem 5 ao longo do tempo. . . . .	93
3.16	Configuração para se determinar a resistência elétrica entre os eletrodos e os fios condutores. . . . .	94
3.17	Simulação do processo de fabricação de ressonador plano-convexo no <i>Intellifab</i> . (a) Definição dos processos. (b) Visualização final da estrutura. . . . .	96

4.1	Amostras usadas no difratômetro: (a) cubo (face vermelha é a frontal), (b) placa, (c) pedaço de lâmina e (d) capa do sensor da <i>Quartzdyne</i> (Cortesia CENPES/PETROBRAS).	99
4.2	Difratogramas das amostras de quartzo.	100
4.3	Placa de circuito impresso para acoplar cristais ao impedancímetro.	101
4.4	Módulo e fase da impedância para os discos de quartzo pós-usinados, o primeiro harmônico é mostrado com mais detalhes nas curvas à direita.	102
4.5	(a) Módulo e fase da impedância para o primeiro harmônico do cristal de pressão da <i>Quartzdyne</i> . (b) Curvas de impedância para o terceiro harmônico do cristal de pressão da <i>Quartzdyne</i> .	103
4.6	Arranjo de resistores em série acoplados ao transdutor de pressão da <i>Quartzdyne</i> .	104
4.7	Muffa disponível no LDN para caracterização térmica dos transdutores.	105
4.8	Aparato experimental para captura das curvas de impedância com o cristal mantido num ambiente de baixo vácuo.	106
4.9	Curvas de impedância para os cristais comerciais sob diferentes situações.	108
5.1	Sensor inteligente proposto para monitoração da pressão e temperatura em poços de petróleo e gás.	112
5.2	Empenhamento de placas com os diversos circuitos para o sensor de pressão (Engenheiro Henrique Müller).	114
5.3	Aparato experimental para obter as frequências de cristais.	115
5.4	<i>Layout</i> do conversor de frequência para digital, dimensões: 2000 × 2200 $\mu\text{m}$ .	117
5.5	(a) Foto do chip do conversor de frequência para digital obtida por meio de um microscópio óptico. (b) Placa de circuito impresso desenvolvida para validação do chip.	117
5.6	Componentes de um sensor inteligente com sistema de coleta de energia.	118
5.7	Esquema de estrutura para a geração de energia a partir de vibração.	119
5.8	Esquema elétrico do circuito integrado LTC3588-1 para coleta de energia por vibração e implementação do sistema de testes (Engenheiro Henrique Müller).	119

5.9	Aparato experimental para validação do transdutor de pressão. O diagrama esquemático do oscilador Pierce para o sensor inteligente está presente. . . . .	121
5.10	Vista em corte transversal do encapsulamento para o sensor inteligente de pressão. . . . .	122
5.11	Integração de transdutores de quartzo e circuitos em lâminas de SOI (Cortesia Prof. Edval Santos). . . . .	123
A.1	O processo de polarização em um cristal piezoeletrico. (a) Molécula não perturbada. (b) Molécula sujeita a uma força externa. (c) Efeito de polarização na superfície do material. . . . .	129
A.2	(a) Movimento de cargas elétricas livres quando o material sofre uma deformação. (b) Após a retirada da deformação o fluxo de corrente cessa. . . . .	130
A.3	Tensões que atuam num ponto do interior de um material piezoeletrico quando sujeito a uma diferença de potencial. . . . .	133
A.4	Indicação dos eixos coordenados num cubo piezoeletrico. Cada eixo tem diferentes tipos de tensões e deformações agindo no material. . . . .	134
A.5	Placa de quartzo de espessura $h$ com comprimento infinito na direção $x_1$ , os potenciais elétricos são aplicados nas posições $h/2$ e $-h/2$ . . . . .	136
A.6	Perfis de deformação de uma placa de quartzo com espessura $h$ . (a) Modo de vibração anti-simétrico (harmônicos ímpares). (b) Modo de vibração simétrico (harmônicos pares). . . . .	140
A.7	Comportamento do módulo e da fase de um cristal de quartzo nas frequências de ressonâncias série e paralela. . . . .	146
A.8	Circuito RLC em série excitado com fonte de tensão alternada senoidal. . . . .	147
A.9	(A) Modelo mecânico do ressonador com oscilações amortecidas. (B) Modelo equivalente elétrico de Butterworth Van-Dyke para frequências próximas a frequência de ressonância. No braço de movimento tem-se a resistência $R$ que representa a perda por viscosidade no quartzo. $L$ e $C$ representam a massa de vibração inercial e a elasticidade mecânica do quartzo, respectivamente. . . . .	149
B.1	Ângulos para dupla rotação numa placa de quartzo. . . . .	153

B.2	Esquema da difração na condição de Bragg. . . . .	155
B.3	Difratômetro de raios-X D5000 da Siemens. . . . .	156
B.4	Dados de difração de Raios-X. . . . .	157
B.5	(a) Sensor de pressão utilizado em poços de petróleo desenvolvido pela <i>Quartzdyne</i> . (b) PDGs para medição de pressão e temperatura. (Cortesia CENPES/Petrobras). . . . .	160
B.6	Esquema simplificado de sistema de extração de petróleo. . . . .	160
B.7	Exemplo de cabo utilizado em sensores instalados em poços de petróleo. No centro tem-se uma estrutura coaxial para envio dos dados e nas extremidades cabos de aço para reforço mecânico (Cortesia CENPES/PETROBRAS). . . . .	161
C.1	Tela inicial do programa COMSOL Multiphysics versão 4.4. . . . .	163
C.2	Tela após a inicialização de um novo modelo. . . . .	163
C.3	Lista de parâmetros definidos no modelo. . . . .	164
C.4	Plano de trabalho definido pelos ângulos $\theta$ e $\varphi$ . . . . .	165
C.5	Visualização do plano de trabalho e do disco ressonador criado por extrusão. . . . .	165
C.6	Ângulos de Euler usados no COMSOL. . . . .	166
C.7	Procedimento para se definir uma placa de quartzo no corte-AT no COMSOL com direção normal alinhada ao eixo-Z global ( $Z_g$ ). Segundo a norma IEEE de 1987 o corte-AT é definido como ( $YXl$ )-35,25°. (a) Inicia-se com a componente normal à superfície da placa na direção-Z do cristal ( $Z_c$ ), logo, o sistema de eixos global e do cristal coincidem. (b) Rotaciona-se a placa para que sua espessura, $t$ , fique ao longo do eixo-Y do cristal ( $Y_c$ ) (o ponto de partida para a definição IEEE), o sistema de eixos global é rotacionado com a placa. (c) Rotaciona-se a placa -35,25° sobre o eixo-X global ( $X_g$ ). (d) Por fim, rotaciona-se todo o esquema de modo que o sistema de coordenadas global é orientado tal como aparece no COMSOL. (e) Visualização do sistema de eixo rotacionado no COMSOL. . . . .	167
C.8	Definição do plano de trabalho. . . . .	168

C.9	Entidades da geometria. . . . .	168
C.10	Disco ressonador com eletrodos e envolvido pela região PML. . . . .	168
C.11	Definição do material. . . . .	169
C.12	Definição da matriz elástica. . . . .	170
C.13	Captura de tela das matrizes do quartzo. . . . .	170
C.14	Parâmetros para o alumínio. . . . .	171
C.15	Definição da região PML. . . . .	171
C.16	Determinação do sistema de coordenadas rotacionado. . . . .	172
C.17	Configuração das perdas do quartzo. . . . .	173
C.18	Configuração das perdas eletrodos. . . . .	173
C.19	Configuração do potencial nos eletrodos. . . . .	174
C.20	Construção parcial da malha. . . . .	175
C.21	Malha final no disco. . . . .	176
C.22	Configuração do estudo <i>eigenfrequency</i> . . . . .	176
C.23	Configurando a visualização dos resultados. . . . .	177
C.24	Definindo <i>Player</i> . . . . .	178
C.25	Visualização do resultado para o estudo <i>eigenfrequency</i> . . . . .	178
C.26	Configuração para visualizar o fator de qualidade. . . . .	179
C.27	Valores para o fator de qualidade em cada uma das frequências. . . . .	179
C.28	Inserção de um novo estudo. . . . .	180
C.29	Configuração do estudo <i>Frequency Domain</i> . . . . .	180
C.30	Configuração para se chegar ao gráfico da impedância. . . . .	181
C.31	Gráfico do módulo da impedância. . . . .	182
C.32	Gráfico da fase da impedância. . . . .	182
C.33	Configuração da física para aplicação de pressão. . . . .	183
C.34	Configuração de <i>Boundary Load</i> e <i>Fixed Constraint</i> . . . . .	184
C.35	Configuração para se verificar a frequência de ressonância com pressão aplicada na estrutura. . . . .	185

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Introdução geral

Os processos físicos das mais diversas áreas científicas, industriais, médicas, etc., dependem muito do conhecimento e/ou monitorização das grandezas físicas a eles associados. Nesse contexto estão inseridos os sensores, que são dispositivos que detectam a mudança de uma variável física e a transforma em um sinal elétrico que possa ser medido ou gravado.

O termo pressão é utilizado em diversas áreas da ciência como uma grandeza escalar que mensura a ação de uma ou mais forças sobre um determinado espaço, podendo este ser líquido, gasoso ou mesmo sólido. A conversão da grandeza pressão para um sinal elétrico pode ser dada por intermédio do fenômeno da piezoelectricidade. O efeito piezoelétrico consiste na propriedade que alguns materiais tem de transformar energia mecânica em energia elétrica e vice-versa, o processo de conversão ocorre quando a estrutura sofre uma deformação mecânica o que produz uma tensão elétrica em sua superfície.

O material piezoelétrico mais utilizado nas aplicações de sensores por intermédio do monitoramento da frequência de ressonância é o cristal de quartzo. Como ressonadores, as aplicações do cristal de quartzo são largamente conhecidas, por exemplo, em relógios, computadores, transmissores e receptores de rádio e TV. Assim, sua principal função é controlar a frequência dos circuitos osciladores que geram os sinais eletrônicos de referência ou sincronismo.

A anisotropia presente no quartzo permite que ele seja usado no desenvolvimento de diferentes sensores onde, então, a sensibilidade a uma determinada grandeza como, pressão, temperatura, força, aceleração, massa, espessura de filmes finos, concentração iônica e outras, pode ser otimizada a depender da orientação cristalográfica escolhida. Além do cristal de quartzo outros materiais piezoelétricos podem ser empregados no desenvolvimento de sensores como, por exemplo, fosfato de gálio, niobato de lítio, nitreto de alumínio, óxido de zinco, etc., cada qual com suas vantagens e desvantagens.

A utilização de cristais de quartzo em circuitos osciladores para o desenvolvimento de sensores faz uso da modelagem desenvolvida por Sauerbrey. Nessa modelagem estabelece-se uma relação entre a deposição de massa sobre a superfície de um cristal de quartzo e o deslocamento resultante da frequência de ressonância do cristal, esse efeito caracteriza o princípio da microbalança [1].

Uma microbalança de quartzo é um dispositivo relativamente simples, baseado nas características de um disco fino de quartzo com eletrodos metálicos. A aplicação de um campo elétrico oscilatório nos eletrodos induz uma onda acústica de volume, que se propaga através do cristal, encontrando uma mínima impedância quando a espessura do dispositivo é um múltiplo de meio comprimento de onda da onda acústica propagante. Esse tipo de transdutor é utilizado em aplicações como, por exemplo, sistema de vácuo para determinação de espessuras de filmes finos e caracterização de gases [2, 3].

Na indústria petrolífera, sensores de pressão baseados no fenômeno da piezoelectricidade são largamente usados em aplicações de fundo de poço. Nessa aplicação o cristal de quartzo é projetado para ter uma determinada frequência de ressonância, e ao fazer parte de um circuito oscilador observa-se uma alteração da frequência de oscilação do circuito a depender da intensidade da pressão aplicada no cristal.

As condições físicas num poço de petróleo permitem caracterizá-lo como ambiente agressivo, seja ele em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). Os níveis máximos de pressão e temperatura estão em torno de 15000 psi (1000 atm ou 100 MPa) e 200 °C, respectivamente. Para se alcançar uma boa precisão nas medidas dessas grandezas os sensores devem ser projetados de maneira que o circuito oscilador possa fornecer uma alta resolução na frequência e estrutura ressonante deve apresentar um elevado fator de qualidade,  $Q$ .

A resolução corresponde ao menor valor que se pode medir de uma determinada grandeza com um instrumento de medição. Nos instrumentos digitais é a variação que ocorre no último dígito. Assim, se a frequência de ressonância do ressonador for 1 MHz, então com uma resolução de 1 ppm significa que se pode medir diferenças de frequência de até 1 Hz. Já a precisão está relacionada com a dispersão dos resultados em torno de um valor médio e pode ser quantificada através do desvio padrão das medições.

Nesta tese, o termo transdutor se refere ao elemento que converte um tipo de energia em outra, enquanto que o termo sensor faz relação ao transdutor de entrada, ou seja, aquele que lê a informação do ambiente e a envia para o processamento. Sensor inteligente será o dispositivo que além de obter a informação do ambiente consegue processá-la e transmiti-la.

## 1.2 Tipos de sensores de pressão

A pressão pode ser definida como sendo a relação entre uma força que é aplicada numa determinada área. Os valores de pressão devem ser informados sempre em relação a um nível de referência. Se o nível de referência for o vácuo perfeito, a pressão é caracterizada como pressão absoluta. Além da pressão absoluta, tem-se também a pressão atmosférica que é exercida pelo ar atmosférico, a pressão diferencial que é o resultado da diferença de duas pressões medidas e a pressão manométrica que é um caso particular da pressão diferencial onde tem-se a pressão atmosférica como referência.

O elemento que permite converter a informação de pressão para uma outra forma física, seja um sinal elétrico ou mecânico, a fim de que possa ser mensurável é o transdutor de pressão. Pode-se citar como exemplo de transdutores de pressão que usam o conceito de converter deformação em pressão o cristal de quartzo, uma membrana capacitiva e a fibra óptica. Um resumo desses e outros transdutores de pressão está na Tabela 1.1 [4, 5, 6, 7]. Para uso em poços de petróleo os transdutores de fibra óptica e piezoelétricos são comumente usados, estando eles no estado da arte para tal aplicação. Dispositivos MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) também tem sido investigados, mas encontram limitações no que diz respeito ao fator de qualidade

Tabela 1.1: Tipos de transdutores de pressão.

Tipo de transdutor	Princípio de funcionamento	Pressão máx.	Resolução
Extensômetro ( <i>straining gauge</i> )	A resistência do material é alterada de maneira proporcional a variação de mudança no seu comprimento.	5000 psi (35 MPa)	-
Membrana capacitiva	A pressão aplicada em diafragmas sensoriais resulta numa variação de capacitância.	1000 psi (7 MPa)	-
Piezo-resistivo	Variações de resistência devido a tensão mecânica aplicada numa superfície são detectadas por uma ponte de Wheatstone. Ex. material: silício	10000 psi (70 MPa)	-
Fibra óptica	Deformações na fibra alteram o período óptico das redes de Bragg e conseqüentemente a frequência refletida do sinal de luz.	10000 psi (70 MPa)	0,03 psi (206 Pa)
Piezoelétrico	O transdutor piezoelétrico faz parte de um circuito oscilador, variações de pressão causam variações na frequência do circuito.	16000 psi (110 MPa)	0,01 psi (70 Pa)

e a resolução.

Sensores eletrônicos vem sendo utilizados a mais de 20 anos em PDGs (*Permanent Downhole Gauge*) para medir pressão e temperatura em poços de petróleo, onde a tecnologia com ressonadores de quartzo tem dominado o comércio de sensores pontuais (ver Apêndice B.4). Por outro lado, sensores baseados em fibras ópticas vem sendo estudados desde a metade do século 19, e ganharam um primeiro destaque com o desenvolvimento da tecnologia de redes de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Grating*) onde a fibra sensora começou a ser usada em sistemas de monitoramento de poços devido a sua alta confiabilidade e capacidade de medir uma variedade de grandezas físicas numa única fibra em distâncias de muitos quilômetros além de servir como o próprio canal de comunicação.

Uma FBG é produzida marcando-se retículos lineares periódicos ao longo do eixo de propagação da fibra óptica. A frequência refletida por essa estrutura periódica depende do período óptico da grade, que por sua vez é dependente da temperatura e/ou da deformação da fibra.

Uma grande vantagem da fibra óptica é a capacidade de medição distribuída. A

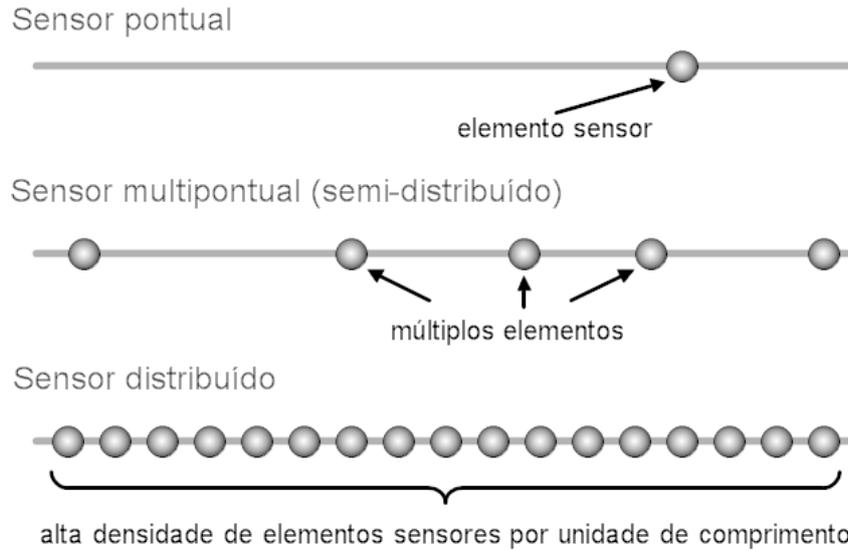


Figura 1.1: Topologias de sensores num processo de medição.

classificação do processo de medição numa rede com apenas um ou muitos sensores pode ser visualizada na Figura 1.1 [7, 8].

A tecnologia de sensores distribuídos tem sido investigada em poços inteligentes. Os poços inteligentes têm o potencial de acrescentar valor à produção de um campo pela adição de flexibilidade operacional. Isto porque estes poços são divididos em segmentos que contêm sensores e válvulas especiais instalados na tubulação de produção capazes de controlar a produção e medir parâmetros como composição e fração dos fluidos produzidos, vazão, pressão e temperatura, em tempo real, de forma a maximizar a produção do reservatório ou otimizar a sua operação. A principal diferença entre poços inteligentes e convencionais está relacionada ao controle da produção e as informações relacionadas. Enquanto nos poços convencionais as informações coletadas e as intervenções são normalmente referentes ao poço como um todo, nos poços inteligentes essas informações e as intervenções são relativas a cada segmento do poço que contém as válvulas e os sensores [9].

### 1.2.1 Sensores de pressão baseados em MEMS

Dispositivos em microescala tem-se tornado bastante atrativos e tem grandes tendências no mercado eletrônico. Em especial na área de sensores tem-se observado o grande interesse em estruturas cada vez menores e com a possibilidade de integração

de sistemas (sensores e circuitos) em um único *chip*. As aplicações de MEMS como sensores de pressão podem ser encontradas em áreas médicas, automotivas, aeronáuticas, etc. [10, 11]. Seu tamanho compacto leva a muitas vantagens, tais como baixo consumo de energia e rápida estabilização devido a transitórios térmicos. Além disso, o pequeno tamanho dos dispositivos MEMS muitas vezes leva ao seu uso em ambientes agressivos [12]. Porém, quando se trata de aplicação de medição de alta pressão em ambiente de alta temperatura, como ocorre em poços de petróleo, sensores MEMS têm mostrado limitações sobretudo no que diz respeito ao fator de qualidade.

Sensores de pressão MEMS vem sendo desenvolvidas sob diferentes arquiteturas, substratos, faixa de pressão, etc. Mas em geral os problemas que mais afetam o fator de qualidade estão relacionados as perdas de energia para o ambiente de gás no qual o elemento sensor está inserido e para os contatos mecânicos que suportam o elemento sensor. Sensores de pressão MEMS do tipo capacitivo contém um fino diafragma que é utilizado como elemento sensor de pressão modificando a capacitância quando sujeito a uma compressão, tais dispositivos são capazes de ter uma alta sensibilidade a pressão mas operam em geral em pressões limitadas a pressão atmosférica [10, 13, 14].

Ressonadores MEMS em forma de barra também tem sido investigados na medição de pressão. Em [15], os autores analisam o comportamento do fator de qualidade em relação a pressão no ressonador em 11,8 MHz desde a pressão absoluta (0,1 Pa) até a pressão atmosférica sob três ambientes de gases diferentes, em ordem crescente de massa molecular: He, N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, e verifica-se que quanto menor a massa molecular do gás maior é o fator de qualidade, mas ainda assim  $Q$  é limitado a 10000. Esse resultado sugere que no processo de encapsulamento do sensor seja usado um gás de baixo peso molecular. Também utilizando ressonador em forma de barra de AlN e SiC conseguiu-se obter  $Q$  com valor de 60000 em pressão de alto vácuo ajustando-se parâmetros geométricos. Já na pressão atmosférica conseguiu-se baixos valores para o fator de qualidade, em torno de 300 [16].

Quanto ao substrato utilizado em dispositivos MEMS o silício é comumente o material utilizado. Além do substrato, sensores de pressão MEMS do tipo piezoresistivo em geral utilizam o silício como meio de transdução (diafragma), porém para operação em ambientes hostis com altas temperaturas (acima de 125 °C) o silício deixa de atender [17, 18]. Quanto ao substrato uma solução é o uso da tecnologia SOI (*Silicon*

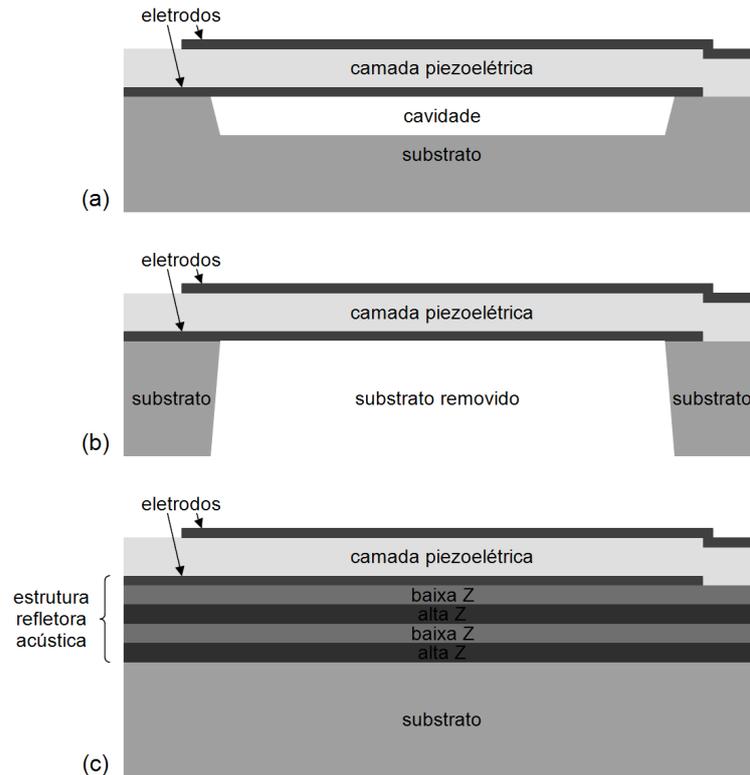


Figura 1.2: Vista em corte das estruturas BAW: (a) FBAR com camada de suporte sacrificada, (b) FBAR com substrato removido e (c) SMR.

on Insulator) [7].

Materiais piezoelétricos (AlN, ZnO, PZT) também são usados na fabricação de dispositivos MEMS. Um ressonador piezoelétrico em que uma onda acústica é gerada dentro da própria camada de material piezoelétrico é chamado de *Bulk Acoustic Wave resonator* (BAW). Em ressoadores BAW a frequência de ressonância é determinada pela espessura da camada piezoelétrica. Assim, o elemento base do dispositivo BAW é o ressonador piezoelétrico em forma de filme fino que está posicionado entre duas superfícies metálicas com função de eletrodos. Para que o dispositivo alcance altos valores de fator de qualidade deve armazenar o máximo de energia acústica na estrutura ressonante. Para tanto as condições de contorno exterior devem manter um nível muito elevado de reflexão acústica onde o vácuo é a interface ideal. Uma vez que a estrutura ressonante não está idealmente flutuando existem duas configurações comuns de arquiteturas BAW, *Film Bulk Acoustic Resonator* (FBAR) e *Solidly Mounted Resonator* (SMR), ver Figura 1.2 [19].

A configuração FBAR permanece fiel ao conceito fundamental de ter superfícies livres de ambos os lados do ressonador BAW. Os dois métodos comuns para a criação

de um filme ressonador FBAR consistem em uma camada de suporte sacrificado abaixo do ressonador formando uma cavidade que é removida no final do processo para desprender o filme e a outra em remover o substrato por aquecimento.

A estrutura SMR tem em sua composição, além da camada piezoelétrica, camadas alternadas formadas por materiais de alta e baixa impedância acústica com espessuras de  $1/4$  de comprimento de onda da frequência de ressonância formando uma espécie de espelho acústico (refletor de Bragg) que impede a passagem de energia até o substrato, confinando a energia de vibração do ressonador nas camadas mais superiores [20]. A estrutura SMR oferece vantagens na fabricação e encapsulamento, por outro lado pode não apresentar alto fator de qualidade pois o espelho acústico não está ausente de perdas e a estrutura ressonante não está com uma das superfícies livre para oscilar [19].

Tabela 1.2: Parâmetros de dispositivos MEMS.

Tipo de transdutor	Material	Faixa de pressão	$Q$	Referência
Sensor de pressão capacitivo	poli-Si	até 200 kPa	300	[10]
Ressonador em forma de barra	Si	0,1 Pa até pressão atmosférica	10000	[15]
Ressonador em forma de barra	AlN e SiC	alto vácuo até pressão atmosférica	60000 (alto vácuo) 300 (1 atm)	[16]
Microressonador de RF	AlN	pressão atmosférica	2000	[21]
Ressonador SMR (WiMAX)	ZnO	-	< 8214	[22]

Um desafio na implementação da tecnologia de filmes finos em estruturas BAW tem sido a fabricação de dispositivos de maneira que alcancem condições de interface satisfatórias para sustentar um fator de qualidade elevado em uma estrutura cuja razão entre as dimensões laterais e de espessura seja maior do que 50:1 [20, 23]. Além disso, para aplicações como sensor de alta pressão o encapsulamento é também uma questão crítica uma vez que ele deve permitir que estes microdispositivos estejam em contato com um meio de alta pressão. Um resumo de parâmetros importantes, em especial o fator de qualidade, de dispositivos MEMS são comparados na Tabela 1.2.

### 1.2.2 Sensores de pressão com fibra óptica

Sensores de instrumentação por fibra óptica são dispositivos que permitem medir determinadas grandezas físicas por alterações nas propriedades da luz que se propaga na fibra. Tais sensores são aplicados em diversos segmentos como: petróleo e gás, biomédica, construção civil, aeronáutica, automóveis, controle ambiental e de processos.

Além da tecnologia de redes de Bragg que permite o uso de sensores distribuídos de temperatura e pressão outros fenômenos são usados também, como o espalhamento Raman que permite sensores distribuídos de temperatura, o espalhamento Brillouin que permite sensores distribuídos de temperatura e deformação, e o espalhamento Rayleigh coerente que permite verificar vibração ao longo de toda a fibra [7].

Em sistemas de medição distribuída a fibra óptica é o próprio transdutor das medidas. São aplicadas nas áreas em que se deseja um grande número de sensores operando simultaneamente, e têm seu funcionamento baseado nos princípios de espalhamento não-lineares Raman e Brillouin. Na prática esses efeitos são usados juntos devido a independência linear entre eles, servindo para identificar se a perturbação é devido a temperatura ou deformação. Podem apresentar resolução espacial de 1 m em 30 km de fibra e resolução de temperatura de 0,2 °C [7].

O espalhamento Brillouin é um efeito proveniente da interação entre o campo eletromagnético incidente e os modos de vibração da rede que constitui o material. O comprimento de onda da luz espalhada é diferente do comprimento de onda da luz incidente, tal desvio é sensível a deformação e a temperatura aplicada à fibra. Caso esse monitoramento fosse feito com sensores convencionais haveria a necessidade da instalação de milhares de sensores. Nas áreas em que seja necessário um grande número de sensores de fibra óptica operando simultaneamente, é necessário a utilização de técnicas de multiplexação de sensores como a multiplexação por comprimento de onda ou a multiplexação por divisão de tempo [8].

Quando comparadas com os sistemas sensores eletrônicos tradicionais o uso de fibras ópticas apresentam vantagens e desvantagens, como vantagens pode-se citar a capacidade de multiplexação (vários sensores numa mesma fibra), imunidade a interferência de ondas eletromagnéticas externas, medidas remotas (acima de 10 km),

operação em temperaturas elevadas (1000 °C), baixo peso e diâmetro compacto. Por outro lado pode-se citar como desvantagens: em especial para aplicações em mar um ponto muito crítico diz respeito à trechos de conexão molhada no qual a fibra não recebe proteção mecânica ao mesmo tempo que fica exposta a água e então pode ocorrer sua contaminação, além de outros tipos de contaminação por gases no interior do poço como, por exemplo, hidrogênio e gás sulfídrico, devido a contaminação ocorre o escurecimento da fibra onde ela perde suas propriedades de transmitir a luz (fibras geralmente são usadas em poços de injeção onde se tem a injeção de vapor de água e não se tem a presença do petróleo e gases contaminantes como ocorre em poços de produção); problemas de seletividade (a fibra é sensível a várias grandezas) e fragilidade mecânica. Da mesma forma que acontece em sensores tradicionais de pressão, para a fibra também é necessário descer um cabo de alimentação até o poço, ou seja, não há economia de cabos ao se usar fibra.

### 1.2.3 Sensores de pressão piezoelétricos

Materiais piezoelétricos como o quartzo e fosfato de gálio ( $\text{GaPO}_4$ ) despertam bastante interesse no desenvolvimento de sensores de pressão, onde o quartzo já vem sendo aplicado em poços de petróleo desde a década de 60 enquanto que o interesse pelo  $\text{GaPO}_4$  é bem mais recente, esse cristal tem sido utilizado em aplicações técnicas como sensores de pressão desde 1994 [24, 25], maiores detalhes sobre suas características piezoelétricas serão tratados na Seção 1.6.

O cristal de quartzo é o material piezoelétrico mais utilizado na área das medidas de grandezas físicas através do monitoramento da frequência de ressonância. As principais razões que permitem seu surpreendente uso comercial se deve ao alto fator de qualidade, o que reflete na alta resolução alcançada na medida de grandezas físicas como pressão, temperatura e massa. Além disso, possui uma excelente estabilidade na frequência de ressonância ao longo do tempo, mantendo assim a calibração do sensor.

Uma vez que o quartzo é um meio anisotrópico, a frequência de ressonância é altamente dependente da orientação cristalográfica (ângulo de corte) do elemento vibrante. Dependendo do ângulo de corte selecionado a lâmina de quartzo pode

ser mais ou menos sensível a uma determinada grandeza física específica, como a temperatura ou a pressão, ou ainda pode-se usinar a peça de tal forma que o elemento vibrante opere em modos de vibração diferentes, cada um sensível a uma grandeza.

Sensores de pressão piezoelétricos baseados na propagação de ondas acústicas de volume vem sendo usados há mais de quatro décadas em poços de petróleo. Nessa aplicação, busca-se no material piezoelétrico um espectro de ressonância puro, sem a presença de modos indesejados de vibração e, ao mesmo tempo, uma função de transferência simples entre a frequência de ressonância e a resposta de pressão. Porém, como a pressão não pode ser transmitida no vácuo, é necessário um caminho de transferência o que implica que o ressonador deve estar apoiado (ou suspenso) e isso pode prejudicar o fator de qualidade do dispositivo.

O ressonador de quartzo a ondas de volume opera em modo vibracional de cisalhamento de espessura. A variação na frequência de ressonância é devido a efeitos não-lineares em que as constantes elásticas sofrem suaves alterações com a aplicação de tensão mecânica no sólido. As mudança na frequência em cristais de quartzo no modo de cisalhamento de espessura devido a aplicação de forças externas tem sido investigada em [26]. As deformações elásticas e as variações na densidade são consideradas desprezíveis sobre a variação de frequência [3].

### **Sensores de pressão comerciais**

A primeira aplicação de sensor de pressão para uso em poços de petróleo foi oferecida comercialmente pela *Hewlett-Packard* (HP) por volta de 1960-1970. O dispositivo é um ressonador em corte-BT bi-convexo rodeado por uma casca monolítica de quartzo que isola a região ativa do ressonador do meio de pressão (geralmente um fluido ou óleo) e evita tensões relacionadas à diferença de expansão térmica e concentradores de tensão que podem levar à fratura do ressonador. A estrutura é cilíndrica, o que resulta em uma força radial uniformemente distribuída, ver Figura 1.3(a). O controle preciso da espessura e da concavidade do ressonador, em uma ou nas duas faces, permitiu concentrar as vibrações no centro do disco. A pressão do fluido é distribuída hidrostáticamente nas paredes da casca cilíndrica que servem como um diafragma através do qual as vibrações mecânicas são transferidas ao disco ressonante interno que vibra no modo de cisalhamento de espessura. Nesse sensor, apenas a orientação

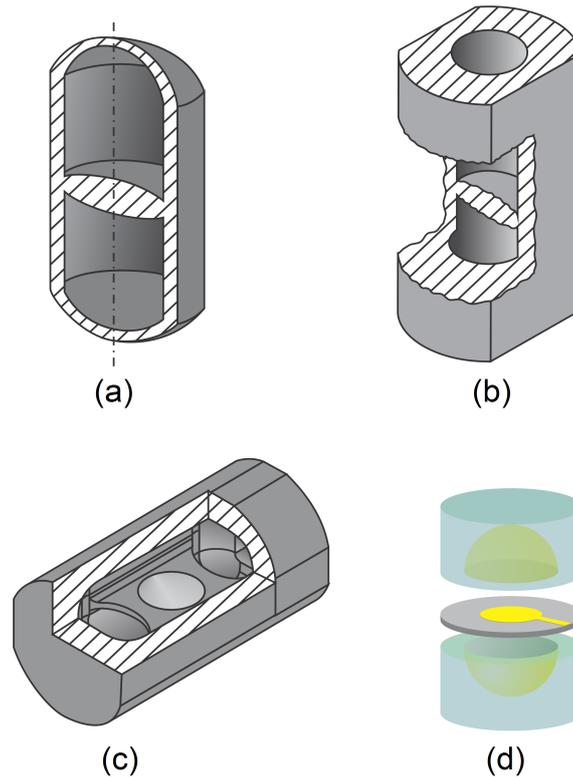


Figura 1.3: Geometrias dos sensores de pressão a quartzo usados em poços de petróleo. (a) *Hewlett-Packard*, (b) *Quartztronics*, (c) *Schlumberger* e (d) *Quartzdyne*.

cristalográfica da unidade ressonadora pôde ser otimizada, outras características como frequência  $\times$  temperatura, fator de escala (frequência  $\times$  pressão), dependência do fator de escala com a temperatura, efeitos transitórios relacionados à variação de temperatura, tamanho e custo foram aceitas sem modificações para uma dada orientação [27, 28]. A faixa de operação deste dispositivo varia de 1 MPa a 80 MPa, com precisão de  $\pm 5 \times 10^{-3}$  MPa e resolução de  $70 \times 10^{-6}$  MPa. A estrutura monolítica em quartzo, fabricada pela usinagem por abrasão ultra-sônica, mostrou-se superior às tentativas de transferência da pressão hidrostática através de interfaces de contato pontuais [28, 29]. O sensor tem 2,54 cm de diâmetro e 8,51 cm de comprimento, sendo considerado grande quando comparado com os próximos sensores e tornando o custo de fabricação mais elevado. Além de demandar muitos minutos para que mudanças de temperatura se estabilizassem [30].

O desempenho do modelo da HP foi melhorado de várias formas pela *Quartztronic*. Utilizando um ressonador em quartzo no corte-AT e uma simetria não-circular no invólucro externo com planos na parede externa do cilindro, como se pode ver na

Figura 1.3(b). A fabricação em corte-AT resultou num dispositivo menor, permitindo uma resposta mais rápida à transitórios de temperatura, um aumento no limite de operação de pressão, e também um menor custo de fabricação. Uma vez que o corte-AT é menos sensível à temperatura do que o corte-BT, eliminou-se a necessidade de fazer o casamento preciso das curvas de temperatura  $\times$  frequência para os cristais de pressão e referência, necessário no modelo da HP. A *Quartztronic* parou a fabricação desse sensor em 1993 [27, 30].

A temperatura pode contribuir fortemente na mudança da frequência nos sensores acima mencionados, acarretando um resultado ambíguo na leitura da pressão. A solução adotada para esse problema é o uso de um cristal como sensor de temperatura, onde a referência para este provém de um terceiro cristal pouquíssimo sensível a temperatura. O modelo da *Halliburton* usa um cristal do tipo diapasão sensível à temperatura operando no modo de torção e um cristal de referência no corte-SC incorporados com o sensor de pressão. Esses dois cristais adicionais são projetados para terem a mesma resposta térmica do cristal de pressão, assim, o sistema consegue uma melhor resposta em transitórios térmicos quando comparado com o da HP. Erros devido a temperatura podem ser compensados com precisão pelo acoplamento do cristal de referência com os cristais de pressão e temperatura. O sistema *Halliburton Memory Recorder* (HMR) utiliza como sensor de pressão o dispositivo da *Quartztronic*, logo, também é menor do que o sistema da HP, resultando numa resposta térmica mais rápida e com maior resistência a impactos. Conseqüentemente, ele tem uma rápida resposta à transitórios de pressão e temperatura [30].

A *Schlumberger* propôs uma concepção diferente para essa questão da influência da temperatura na pressão. Essencialmente, o sensor de pressão proposto consiste de um único cristal de quartzo operando simultaneamente em dois modos, um sensível à pressão e pouco sensível à temperatura, e o outro sensível à temperatura e pouco sensível à pressão. Este foi denominado de *Compensated Quartz Gauge* (CQG) ou *Crystal Quartz Gauge* [30, 31].

Em materiais piezoelétricos como o quartzo, a vibração de uma placa acontece em três modos: modo *a* ou quasi-longitudinal, e dois modos de cisalhamento de espessura ou quasi-transversal, modos *b* e *c*. Os modos são diferenciados pelas frequências de ressonância, o modo *a* é o mais rápido dos três, e o modo *b* mais rápido que o

*c.* Apesar dos três modos estarem sempre presentes é possível favorecer um modo mais do que outro através do corte escolhido, das dimensões da placa (comprimento, largura, espessura e curvatura) e da forma de metalização dos eletrodos. Assim, o ressonador consiste de uma placa de dupla rotação (corte-SC), onde o modo *b* mede a temperatura e o modo *c* a pressão. O CQG é formado por uma placa envolvida por uma casca cilíndrica que recebe a pressão externa, tal estrutura é fabricada a partir de um bloco único de quartzo. Como a placa está na mesma direção longitudinal da casca cilíndrica a fabricação é facilitada. Na Figura 1.3(c) é apresentada uma representação esquemática deste sensor [32]. O fato do CQG medir sua própria temperatura minimiza os efeitos de transitório térmico. Entretanto, seu tamanho, diâmetro de 2,54 cm e comprimento de 3,81 cm, exige de um a dois minutos para alcançar o equilíbrio térmico [28, 30].

O sensor da *Schlumberger* opera em 5 MHz e é projetado para limites de 103 MPa e 175 °C, com precisão de  $6,89 \times 10^{-3}$  MPa e resolução de  $20,7 \times 10^{-6}$  MPa. A grande vantagem do sensor bi-modal sobre os demais está no seu desempenho dinâmico: a medida *in-situ* da temperatura permite a implementação de um algoritmo de compensação efetiva nas leituras de pressão [28, 30].

O modelo da *Quartzdyne* é o candidato mais recente de sensor de pressão a entrar no mercado, ainda que tenha sido proposto em 1987. Trata-se de um ressonador plano-convexo de corte-AT operando no modo de cisalhamento de espessura, e é consideravelmente menor do que os modelos HP, HMR ou CQG. A estrutura ressonante em forma de disco é protegida por duas capas também de quartzo, conforme Figura 1.3(d), que recebe a pressão do meio externo hidrosticamente. O corte-AT permitiu não apenas a fabricação de um dispositivo menor, mas também acelerou a resposta de transitórios em relação a temperatura, permitiu a operação em pressões mais elevadas (167 MPa) e também reduziu os custos de fabricação [29, 33].

No sensor da *Quartzdyne* dois outros cristais de quartzo podem ser incorporados no encapsulamento, um destinado a medição da temperatura, de preferência com corte-AC ou BC, e o outro destinado a referência, com corte-SC. Esses são colocados muito próximos ao compartimento de alta pressão resultando em um excelente acoplamento térmico entre os três cristais [30].

Na Figura 1.4 mostra-se numa mesma escala o processo evolutivo de miniaturiza-

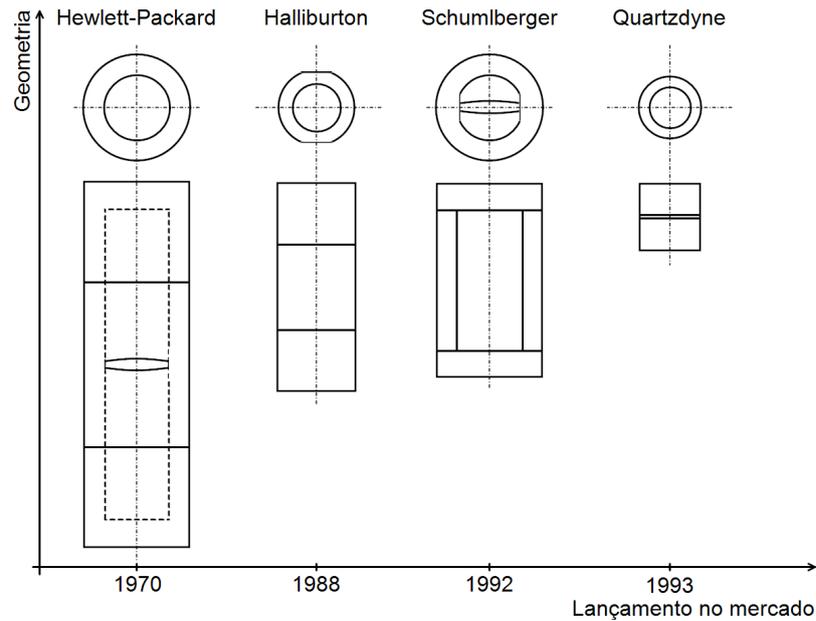


Figura 1.4: Formas e tamanhos aproximados em escala dos sensores de pressão.

Tabela 1.3: Comparação entre sensores de pressão comerciais.

Fabricante	Dimensões (mm) [diâm. × comp.]	Corte	Pressão máx. (MPa)	Resolução pressão (Pa)	Temp. máx. (°C)	Compensação na temperatura
<i>Hewlett-Packard</i>	25,4 × 86,4	BT	75	7	177	Não
<i>Halliburton</i>	18,3 × 48,3	AT	110	< 70	180	Sim
<i>Schlumberger</i>	25,4 × 38,1	SC	103	27	175	Sim
<i>Quartzdyne</i>	14,7 × 15,2	AT	167	< 41	177	Sim

ção dos sensores de pressão para o modo de cisalhamento de espessura ao longo do tempo, enquanto que uma comparação entre as principais características entre eles está na Tabela 1.3 [30, 34].

Após o encapsulamento metálico destes sensores eles são encaixados na tubulação de produção de petróleo. Vale destacar que ao longo de cada poço de petróleo apenas um único sensor de pressão é instalado, ou seja, não se tem uma medição distribuída dessa grandeza.

### 1.3 Modos de vibração

Uma placa de quartzo, como todas as placas, tem muitos modos de vibração, os modos básicos são ilustrado na Figura 1.5. Em geral, os modos de vibração longitudinal

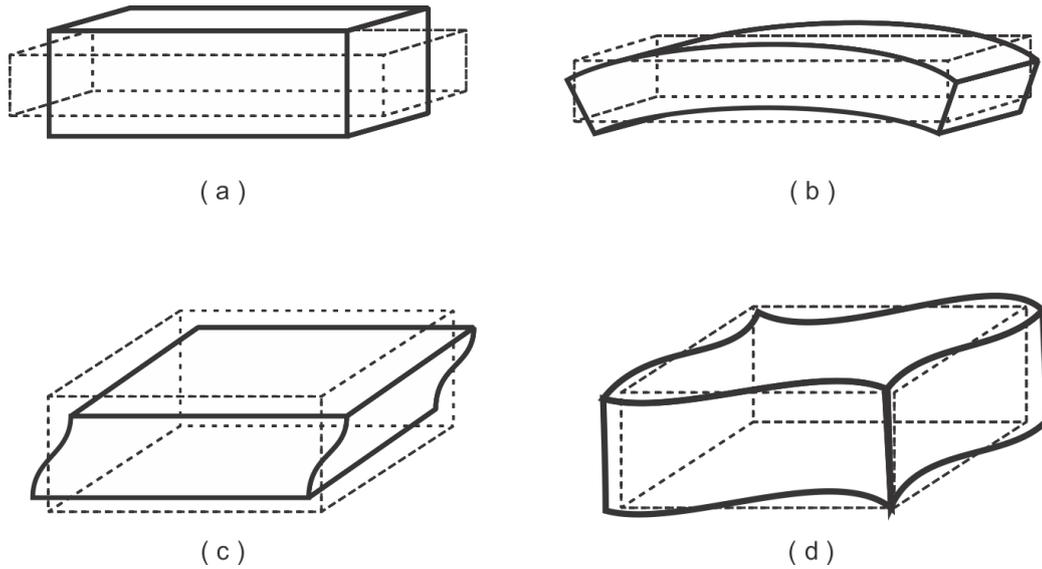


Figura 1.5: Modos de vibração: (a) extensional ou longitudinal, (b) flexão, (c) cisalhamento de espessura (primeiro harmônico) e (d) cisalhamento de face.

e de flexão tem ressonâncias em frequências da ordem de kHz, já os modos de cisalhamento passam a ter ressonâncias em frequências mais altas, na ordem de MHz. Observa-se que as duas maiores superfícies no modo de cisalhamento de espessura são antinodais. Uma mesma placa pode apresentar mais de um modo de vibração sendo o comportamento final uma resultante das combinações.

O ressonador do sensor de pressão é constituído por uma fina placa ou disco de quartzo que trabalha vibrando no modo de cisalhamento de espessura. Essa vibração é denominada de ondas de volume, pois, todo o corpo do cristal acompanha esse movimento. Diferentemente das ondas de superfície, em que apenas a superfície vibra.

Uma análise matemática a cerca do comportamento ressonante para uma placa de quartzo está descrita no Apêndice A. Verifica-se que a espessura do ressonador determina a frequência de ressonância do modo de cisalhamento de espessura, essa relação é dada pela Equação 1.1:

$$f_n = n \frac{v}{2h}, \quad v = \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}} \quad (1.1)$$

onde  $f_n$  representa a frequência do  $n$ -ésimo harmônico,  $v$  é a velocidade da onda propagante e  $h$  é a espessura da placa. Uma vez que o transdutor é simétrico em relação a inversão de polaridade apenas valores ímpares de  $n$  implicam em acoplamento pie-

Tabela 1.4: Espessura das placas de quartzo em função da frequência para o corte-AT.

Frequência fundamental (MHz)	$h$ ( $\mu\text{m}$ )
1,00	1661
5,00	332
10,00	166
100,00	16,6
200,00	8,3

zoelétrico. A velocidade da onda é função da densidade do material,  $\rho$ , e da constante elástica efetiva,  $\bar{c}_{66} = c_{66} (1 + k_{26}^2)$ , onde  $k_{26}^2 = \frac{e_{26}^2}{c_{66}\epsilon_{22}}$  é a constante de acoplamento eletromecânico ou piezoelétrico.

Cortes-AT são comumente manufaturados na faixa de frequência de 1 MHz a 250 MHz. Para frequências abaixo de 1 MHz, ressonadores no modo de espessura geralmente se tornam impraticáveis devido ao aumento de seu tamanho, pois, a frequência fundamental do ressonador no modo de cisalhamento é inversamente proporcional a sua espessura. Para a aplicação em sensores de pressão e temperatura, preferencialmente utiliza-se frequências limitadas em 10 MHz, permitindo assim simplicidade e robustez no projeto dos circuitos eletrônicos envolvidos. Uma relação entre a espessura na qual deve-se cortar a placa de quartzo em função da frequência de operação desejada é encontrada na Tabela 1.4.

## 1.4 Figuras de mérito para o sensor de pressão

Para facilitar a avaliação de desempenho de um dispositivo e compará-lo com outros similares, emprega-se um conjunto de figuras de mérito. Para o sensor de pressão estas figuras envolvem a medida de diversos parâmetros tais como, a faixa de temperatura de operação, a pressão máxima que se pode medir e a resolução. A figura de mérito que afeta resolução é o fator de qualidade. Para aplicações de petróleo o transdutor deve apresentar um fator de qualidade da ordem de  $10^6$ , o que é alcançado com cristais piezoelétricos de quartzo.

### 1.4.1 Definição formal para o fator de qualidade

O fator de qualidade,  $Q$ , é uma medida da energia armazenada em um meio que vibra. Considerando que a propagação num meio sólido se comporta de forma elástica, com ciclos de compressão e distensão, em cada ciclo há uma energia máxima armazenada,  $E_{arm}$ . Conhecendo as propriedades inelásticas do meio, haverá uma perda ou dissipação de energia igual a  $E_{dis}$  por ciclo, isso pode ser escrito segundo a Equação 1.2.

$$Q = 2\pi \frac{E_{arm}}{E_{dis}} = 2\pi f_0 \frac{E_{arm}}{P_{dis}} \quad (1.2)$$

Essa é a definição comumente usada na maioria dos sistemas de ressonância para ondas senoidais, sejam eles elétricos ou mecânicos. Desta forma, o fator de qualidade é diretamente proporcional à razão entre a energia armazenada e a energia perdida num período de um ciclo completo. Observa-se também que o fator de qualidade define a eficiência de um meio transmitir uma onda sem deformá-la. Um valor de fator de qualidade alto representa um sistema vibrando com baixas perdas e vice-versa.

### 1.4.2 Mecanismos de perdas de energia

Quando se considera um projeto real de ressonador de quartzo muitos mecanismos são responsáveis por perdas de energia. A presença de perdas limita o desempenho do ressonador e conseqüentemente sua sensibilidade afetando a resolução da medida desejada. Algumas perdas são inevitáveis e outras podem ser minimizadas. As perdas podem ser caracterizadas como intrínsecas e extrínsecas [35, 36].

Mecanismos intrínsecos incluem:

- Dissipação termoelástica;
- Dissipação devido as interações fônon-fônon;
- Dissipação devido a defeitos na rede cristalina.

Mecanismos extrínsecos incluem:

- Perdas por fricção com o gás do ambiente;

- Perdas devido a resistência elétrica dos eletrodos;
- Perdas por fricção nas interfaces quartzo-eletrodos;
- Perdas devido a rugosidade das superfícies;
- Perda de energia acústica para os suportes da montagem;
- Excitação em modos indesejáveis.

A análise de vários mecanismos de perda resulta em um problema matemático extremamente complexo. No entanto, um modelo matemático simples pode ser obtido considerando os mecanismos de perdas como um fenômeno viscoso [35, 37]. Assim, as relações constitutivas da piezoelectricidade são modificadas e estão presentes nas Equações 1.3-1.5.

$$T_{ij} = c_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k + (\eta_{ijkl}\dot{S}_{kl}) \quad (1.3)$$

$$D_i = e_{ijk}S_{jk} + \varepsilon_{ij}E_j \quad (1.4)$$

$$J_i = \sigma_{ik}E_k \quad (1.5)$$

onde  $D_i$  é o vetor deslocamento elétrico,  $S_{kl}$  é o tensor de deformação,  $T_{ij}$  é o tensor de tensão,  $E_j$  é o vetor campo elétrico,  $c_{ijkl}$  é matriz de elasticidade ou rigidez elástica,  $e_{ijk}$  é a matriz de acoplamento piezoelétrico,  $\varepsilon_{ij}$  é a matriz da permissividade elétrica,  $J_i$  é o vetor densidade de corrente elétrica,  $\sigma_{ik}$  é a condutividade elétrica. Então, a Equação 1.5 está relacionada as perdas atribuídas a resistividade do quartzo e, na Equação 1.3,  $\eta_{ijkl}$  é o coeficiente que representa a viscosidade do quartzo, portanto, o último termo em parênteses corresponde à fricção interna no material piezoelétrico.

Analisando as vibrações no modo de cisalhamento de espessura para um modelo de ressonador de quartzo no corte-AT obtém-se a Equação 1.6 para o fator de qualidade devido a viscosidade,  $Q_v$ , maiores detalhes dessa descrição matemática podem ser encontrados no Apêndice A. Essa equação limita o valor do fator de qualidade devido as perdas intrínsecas do material como se vê no comportamento típico apresentado na Figura 1.6.

$$Q_v = \frac{\bar{c}_{66}}{\omega\eta_{66}} \quad (1.6)$$

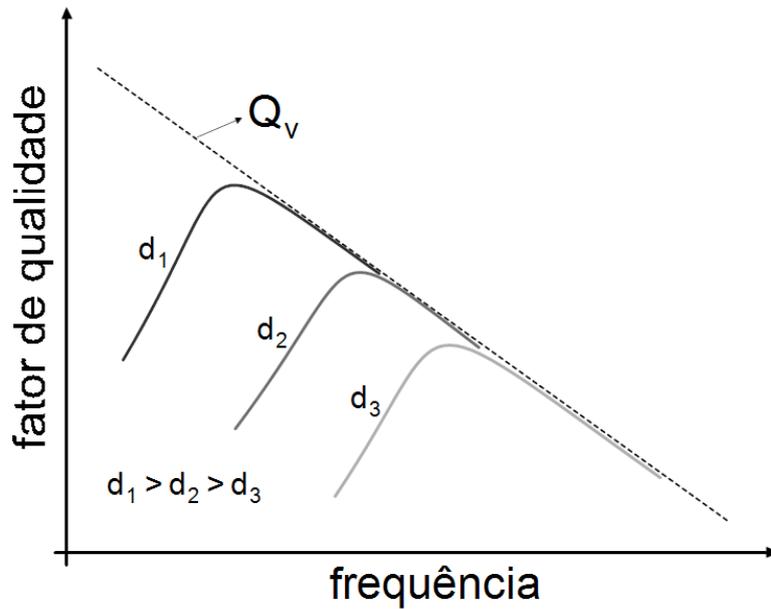


Figura 1.6: Comportamento típico do fator de qualidade em função da frequência para três diâmetros diferentes de ressonadores em forma de disco.

Tabela 1.5: Propriedades típicas do quartzo no corte-AT.

Parâmetro	Valor
$c_{66}$	$29,01 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
$e_{26}$	$-0,095 \text{ C/m}^2$
$\varepsilon_{22}$	$39,82 \times 10^{-12} \text{ C/Vm}$
$\eta_{66}$	$0,32 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
$\sigma_{22}$	$0,005 \times 10^{-12} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
$\rho$	$2649 \text{ kg/m}^3$

As propriedades do quartzo no corte-AT são mostradas na Tabela 1.5, a partir desses dados pode-se verificar que

$$Q_v^{AT} = 14,54 \times 10^{12} \times f^{-1} \quad (1.7)$$

### 1.4.3 Parâmetros elétricos

Um ressonador de quartzo cujo símbolo é apresentado na Figura 1.7(a) consiste de um sistema vibrando mecanicamente que é conectado via o efeito piezoelétrico ao mundo elétrico. Ao operar perto da frequência de ressonância o cristal pode ser representado por um circuito elétrico equivalente, conforme Figura 1.7(b).

Uma vez que a estrutura é tridimensional para cada modo de vibração espera-

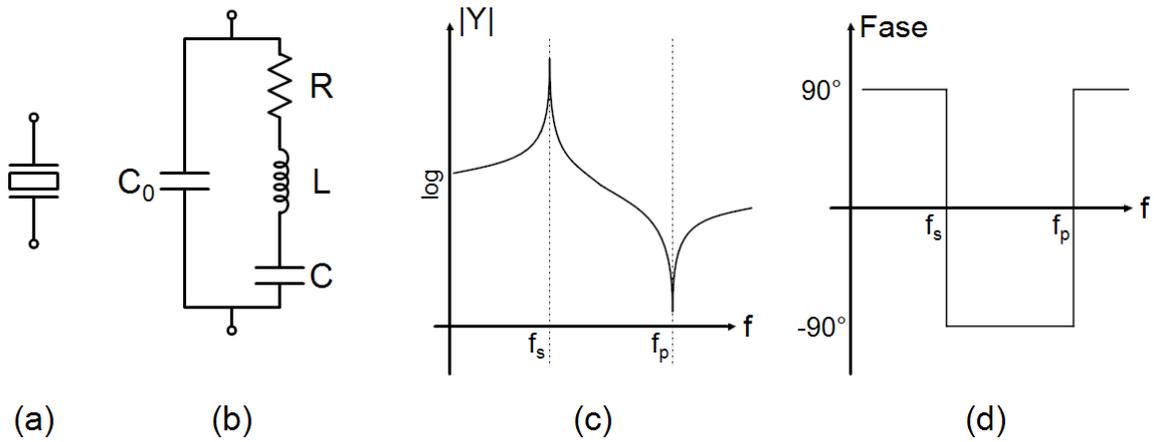


Figura 1.7: (a) Simbologia do ressonador de quartzo. (b) Circuito equivalente para o ressonador de quartzo operando próximo da frequência de ressonância. Comportamento típico do módulo e da fase da admitância, (c) e (d), respectivamente.

se três frequências de ressonância, uma longitudinal e duas transversais. O modelo considera apenas uma dessas, porém modos adicionais podem ser incorporados por mais braços de circuito RLC em paralelo.

A capacitância  $C_0$  representa a capacitância estática devido os eletrodos e está presente se o cristal está oscilando ou não. Em analogia ao sistema mecânico massa-mola com amortecimento a capacitância  $C$  representa a elasticidade mecânica do corpo vibrante (forças de restauração do cristal), a indutância  $L$  é uma medida da massa vibrando e a resistência  $R$  corresponde às perdas totais da energia mecânica devido às fricções internas e à energia dissipada no meio circundante e nas estruturas de suporte. A resposta elétrica típica para o módulo e a fase da admitância está presente nas Figuras 1.7(c) e (d), respectivamente. Detalhes adicionais sobre o modelo elétrico para o cristal de quartzo podem ser encontrados no Apêndice A.3.

Deseja-se otimizar a estrutura ressonante de tal forma a se conseguir o maior fator de qualidade possível garantindo assim maior resolução da grandeza que se pretende conhecer com o sensor a quartzo. Para isso faz-se a extração de parâmetros das curvas de admitância ou impedância e, então, pode-se calcular o fator de qualidade,  $Q_e$ , pela extração de parâmetros elétricos através da Equação 1.8 (ver Apêndice A.3).

$$Q_e = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.8)$$

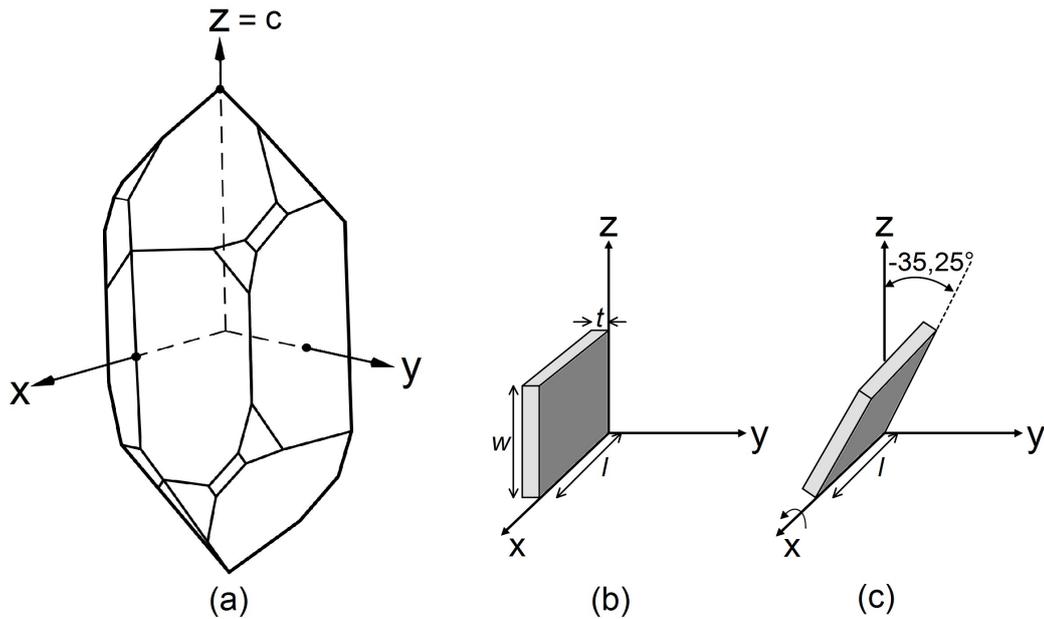


Figura 1.8: (a) Sistema de coordenadas adotadas no cristal de quartzo. (b) Placa não rotacionada, corte-Y. (c) Placa de quartzo orientada no corte-AT segundo a norma IEEE de 1987:  $(YXl)$ -35,25°.

## 1.5 Características do quartzo

Em aplicações de sensores a piezeletricidade do quartzo é a mais importante de suas propriedades. Outras propriedades importantes do quartzo estão relacionadas a orientações com baixíssimo coeficiente de temperatura, alto fator de qualidade, histerese mínima sob carga e descarga, facilidade de produção em larga escala com baixos custos e elevado grau de pureza.

O quartzo é um monocristal formado por dois elementos, silício e oxigênio, de fórmula química  $\text{SiO}_2$  e geralmente chamado de sílica. Pertence ao sistema trigonal com simetria de rotação de  $120^\circ$  em torno do eixo-z (ou eixo-c na notação cristalográfica), isso significa que suas propriedades e sua arrumação cristalográfica se repetem a cada  $120^\circ$ . O sentido adotado no eixo-z é arbitrário pois se trata de uma direção não polar. Assim, em um plano normal ao eixo-z existem três eixos polares equivalentes:  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ . O eixo-x coincide com um desses eixos polares. O eixo-y é normal ao plano formado pelos eixos-x e z [38]. O sistema de eixos coordenados num cristal de quartzo genérico é ilustrado na Figura 1.8(a).

O estudo de cristalografia define um total de 32 classes diferentes de cristais. Algumas dessas classes têm ausências de planos e centros de simetrias, quando isso

Tabela 1.6: Constantes elásticas, piezoelétricas e dielétricas para o quartzo na orientação direita e o ângulo  $\theta$  definido no sentido anti-horário.

$[c] = \begin{bmatrix} 86,74 & 6,99 & 11,91 & 17,91 & 0 & 0 \\ 6,99 & 86,74 & 11,91 & -17,91 & 0 & 0 \\ 11,91 & 11,91 & 107,2 & 0 & 0 & 0 \\ 17,91 & -17,91 & 0 & 57,94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 57,94 & 17,91 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17,91 & 39,88 \end{bmatrix}$ $\times 10^9 N/m^2$
$[e] = \begin{bmatrix} -17,1 & 17,1 & 0 & 4,06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4,06 & 17,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $\times 10^{-2} C/m^2$
$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} 39,21 & 0 & 0 \\ 0 & 39,21 & 0 \\ 0 & 0 & 41,03 \end{bmatrix} \times 10^{-12} C/Vm$

acontece materiais pertencentes a essas classes apresentam características piezoelétricas, como ocorre com o quartzo que pertence a classe de simetria cristalina 32.

Devido à assimetria, encontram-se cristais de quartzo ditos direito e esquerdo. Eles diferem tanto em relação à morfologia externa quanto no que diz respeito ao sentido de rotação das moléculas e da luz polarizada em torno do eixo-c [38]. Do ponto de vista elétrico observa-se a inversão no sentido da polarização elétrica nas faces da placa quando o cristal é pressionado.

O quartzo tem uma matriz de rigidez elástica simétrica  $6 \times 6$  com seis constantes elásticas independentes<sup>1</sup>. Os valores dessas constantes assim como as constantes da matriz de acoplamento piezoelétrico,  $e$ , e a matriz da permissividade elétrica,  $\varepsilon$ , estão relacionados na Tabela 1.6 [39].

Devido a anisotropia do cristal de quartzo diversos ângulo de corte são explorados no sentido de obter seu comportamento sob diferentes características como, por exemplo, a influência da temperatura e da pressão. A orientação do cristal piezo-

<sup>1</sup> $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{33}$  e  $c_{44}$ . Calcula-se  $c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$ .

létrico é comumente definida conforme a norma introduzida pelo *Institute of Radio Engineers* (IRE) de 1949 [40]. Porém, com o passar do tempo diversas revisões foram feitas, além disso o IRE tornou-se o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) chegando a definir um versão final para a norma em 1987 [41], para maiores detalhes sobre essas normas ver Apêndice B. Na indústria, a orientação dos cortes é feita partindo-se de uma placa perpendicular no corte-Y (ver Figura 1.8(b)). Para o corte-AT, apenas uma rotação é exigida sobre o eixo-x, de  $-35,25^\circ$ , como está ilustrado na Figura 1.8(c).

A depender do ângulo de corte desejado a placa de quartzo irá vibrar em diferentes frequências de ressonância. A Equação 1.9 relaciona a frequência com o ângulo de corte [42]. Para uma espessura  $h = 200 \mu\text{m}$  esse comportamento é mostrado na Figura 1.9. Observa-se que a maioria dos cortes conhecidos na literatura se concentram em torno dos pontos de maior ou menor frequência de ressonância, ou seja, estão próximos do máximo ou do mínimo da curva. Do ponto de vista prático de execução do corte isso minimiza as consequências de um eventual erro na frequência de ressonância almejada para o ressonador caso o processo de orientação do cristal de quartzo não fique tão próximo do especificado, ou seja, ter-se-á pouca variação na frequência.

$$f(\theta) = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{c_{66} \cos^2 \theta + c_{44} \sin^2 \theta - 2c_{14} \sin \theta \cos \theta}{\rho}} \quad (1.9)$$

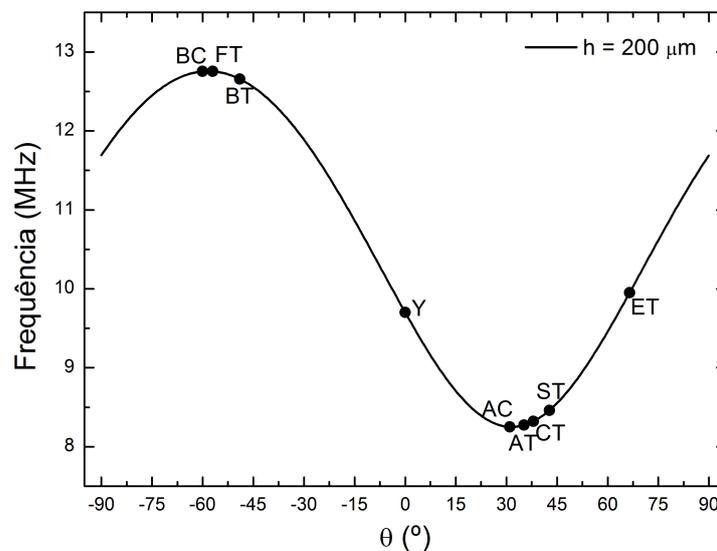


Figura 1.9: Comportamento da frequência de ressonância em função do ângulo de corte. Os principais cortes para cristais de quartzo de simples rotação estão indicados.

## 1.6 Características do fosfato de gálio

O material piezoelétrico fosfato de gálio, ( $\text{GaPO}_4$ ), pertence a mesma classe cristalográfica do quartzo, classe 32, e possui propriedades físicas similares. Mas, devido a ausência da transição de fase  $\alpha - \beta$  muitas propriedades do fosfato de gálio são estáveis até  $970^\circ\text{C}$ , o que o faz muito favorável para aplicações de sensores em altas temperaturas. A esta temperatura ocorre uma transição de fase para uma estrutura semelhante a cristobalita<sup>2</sup>. Ainda em relação ao quartzo o fosfato de gálio apresenta as seguintes vantagens [25, 44]:

- coeficiente de deformação piezoelétrico  $d_{11}$  duas vezes maior, o que implica num coeficiente de acoplamento eletromecânico mais elevado;
- maior densidade,  $\rho = 3570 \text{ kg/m}^3$ , o que corresponde a uma velocidade acústica menor e portanto uma espessura menor do ressonador para uma mesma frequência.

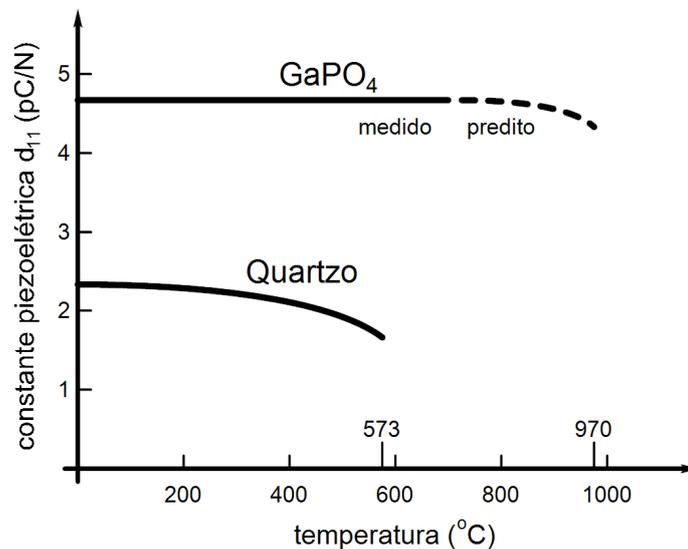


Figura 1.10: Constante piezoelétrica  $d_{11}$  versus temperatura para  $\text{GaPO}_4$  e quartzo.

Apesar do fosfato de gálio ser um material recente, cujas as primeiras medidas em ressonadores foram publicadas em 1989 com resultados poucos satisfatórios devido a baixa qualidade dos materiais utilizados, muito esforço tem sido aplicado para

<sup>2</sup>Cristobalita é um polimorfismo do quartzo, encontrado em pedras ígneas localizadas em áreas de atividade vulcânica, usado em estudos científicos. Seus cristais provêm informação fundamental para como cristais se formam e como eles mudam em ambientes diferentes [43].

aumentar a qualidade desses materiais e dos processos de manufatura em ressonadores. Tal esforço tem tornado-o um cristal piezoelétrico disponível comercialmente com grande potencial para sensores de alta temperatura e alta pressão envolvendo aplicações de ambientes agressivos em diversas áreas: automotiva, aeroespacial e indústrias de petróleo e gás [25, 45, 46].

O comportamento para o coeficiente de deformação piezoelétrico  $d_{11}$  é apresentado na Figura 1.10 [44], onde nenhum desvio mensurável a partir da temperatura ambiente é observado e seu valor é cerca de duas vezes o do quartzo. Assim como o quartzo o fosfato de gálio também não apresenta piroeletricidade, ou seja, quando submetidos a elevadas temperaturas não geram nenhum potencial elétrico temporário decorrente de seu aquecimento, diferentemente de materiais como a turmalina e PZT, ver Figura 1.11.

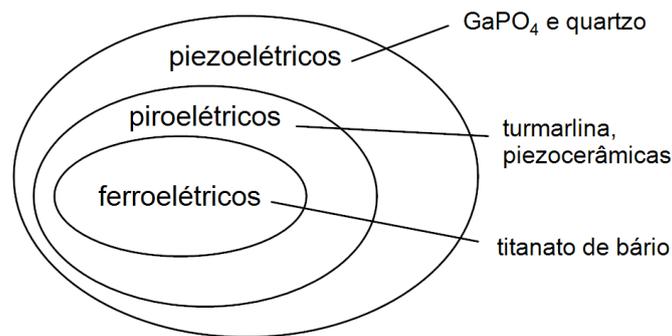


Figura 1.11: Classificação de materiais piezoelétricos.

A matriz elástica para o fosfato de gálio é apresentada na Tabela 1.7. A matriz dos coeficientes de deformação piezoelétrica e a matriz para a permissividade elétrica também estão presentes [24]. As constantes de acoplamento piezoelétricas são  $e_{11} = 0,209 \text{ C/m}^2$  e  $e_{14} = -0,107 \text{ C/m}^2$  [45].

Assim como no quartzo para o  $\text{GaPO}_4$  também é possível ter o controle da sensibilidade à variações de temperatura pela escolha do corte do cristal. O comportamento teórico esperado para o coeficiente de temperatura e o desvio calculado da dependência da temperatura (primeiro desvio de frequência na temperatura,  $TCF1$ ) sobre a frequência de ressonância são mostrados na Figura 1.12 para a temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , onde o ângulo  $\theta$  corresponde as rotações em torno do eixo-x de uma placa de  $\text{GaPO}_4$  orientada no corte-Y. Observa-se que o coeficiente de acoplamento piezoelétrico, tem uma grande dependência com  $\theta$  e é nulo para  $\theta = 90^\circ$  (corte-Z). O coeficiente de tem-

peratura  $TCF1$  tem valor nulo nas posições denominadas de Hi-Q e Hi-k. O ângulo de corte da posição Hi-k está próximo de  $Y-16,5^\circ$  e apresenta o dobro de acoplamento piezoelétrico em relação ao quartzo no corte-AT, enquanto que o corte para a posição Hi-Q,  $Y-78,5^\circ$ , mostra um fator de acoplamento muito baixo [25].

Tabela 1.7: Constantes elásticas, piezoelétricas e dielétricas para o fosfato de gálio.

$[c] =$	$\begin{bmatrix} 66,58 & 21,81 & 24,87 & 3,91 & 0 & 0 \\ 21,81 & 66,58 & 24,87 & -3,91 & 0 & 0 \\ 24,87 & 24,87 & 102,13 & 0 & 0 & 0 \\ 3,91 & -3,91 & 0 & 37,66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 37,66 & 3,91 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,91 & 22,38 \end{bmatrix}$ $\times 10^9 N/m^2$
$[d] =$	$\begin{bmatrix} 4,5 & -4,5 & 0 & 1,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1,9 & -9,0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $\times 10^{-12} C/N$
$[\varepsilon] =$	$\begin{bmatrix} 53,98 & 0 & 0 \\ 0 & 53,98 & 0 \\ 0 & 0 & 58,41 \end{bmatrix} \times 10^{-12} C/Vm$

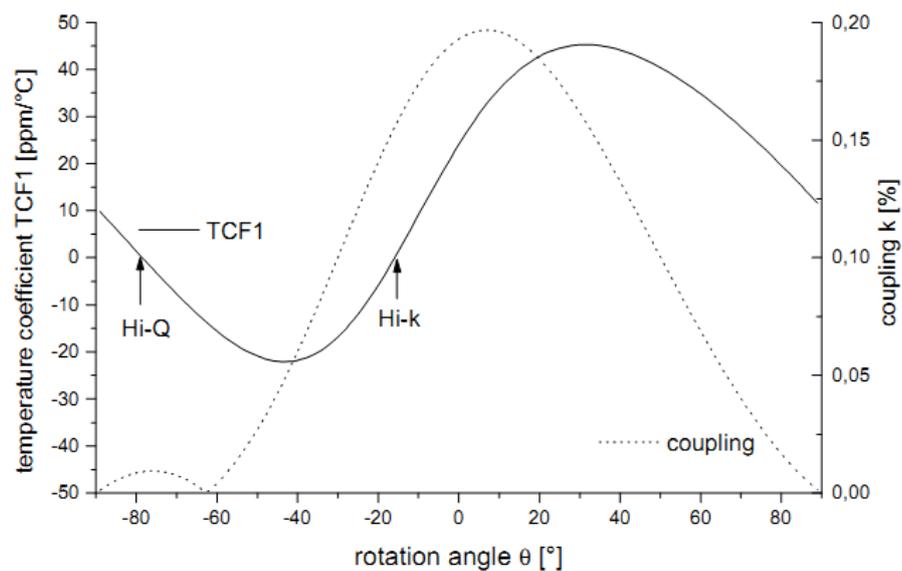


Figura 1.12: Coeficiente de temperatura e coeficiente de acoplamento piezoelétrico para o corte-Y do fosfato de gálio.

Aplicações de  $\text{GaPO}_4$  como sensores de temperatura exigem uma alta dependência da temperatura na frequência de ressonância, assim, observa-se que dois cortes são possíveis:  $Y-45^\circ$  e  $Y+45^\circ$ , esses estão localizados nos valores extremos de  $TCF1$ .

Algumas propriedades para aplicações de ressonadores de quartzo e  $\text{GaPO}_4$  são comparadas e podem ser visualizadas na Tabela 1.8 [25].

Tabela 1.8: Propriedades do quartzo e do fosfato de gálio.

Material	Quartzo	$\text{GaPO}_4$
Transição de fase ( $^\circ\text{C}$ )	573	970
Coefficiente de deformação piezoelétrico $d_{11}$ (pC/N)	2,3	4,5
Principal corte de compensação de temperatura	AT	Hi-k, $Y-16,5^\circ$
Coefficiente de acoplamento piezoelétrico (%)	0,8	16

## 1.7 Motivações

Observa-se na Figura 1.4 uma redução significativa das dimensões dos ressonadores de pressão ao passar dos tempos, ou seja, existe uma tendência em miniaturizar essas estruturas. Com estruturas menores abre-se também a possibilidade de se inserir mais de um elemento sensor ao longo do poço, ou seja, vislumbra-se uma topologia de sensores distribuídos. E além disso, a redução das dimensões favorece uma melhor resposta térmica do dispositivo e torna o processo de fabricação menos oneroso.

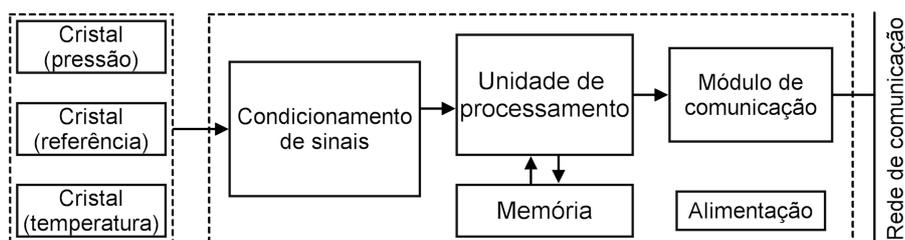


Figura 1.13: Diagrama de blocos para o sensor inteligente de pressão.

Na Figura 1.13 propõe-se um sensor inteligente de pressão para aplicação em poço de petróleo. Esta tese está focada no desenvolvimento do cristal de pressão. Devido ao baixo fator de qualidade em transdutores MEMS esses não são aconselháveis para essa aplicação. Sensores de pressão comerciais a quartzo são fabricados através de técnicas de usinagem. Após a usinagem o transdutor de quartzo recebe os eletrodos

e pode ser conectado ao circuito eletrônico. Sensores inteligentes podem transmitir dados para outros dispositivos (sensores e atuadores) ou um supervisor através de uma rede de comunicação. O tamanho final do sensor de pressão, considerando seu encapsulamento, depende muito das dimensões do ressonador, mas o processo de miniaturização também envolve circuitos eletrônicos cada vez mais compactos.

Hoje (2014) existe uma exigência por materiais e sistemas confiáveis para operação em ambientes hostis, por exemplo, alta pressão e alta temperatura, ou ambientes quimicamente agressivos, como ocorre para certas situações na indústria petrolífera. Tradicionalmente, dispositivos integrados são fabricados em substratos de silício, mas o mesmo não é aconselhável para ambientes de altas temperaturas. Nesse caso a tecnologia SOI mostra-se mais indicada devido a sua capacidade de suportar temperaturas mais elevadas [47].

Um outro ponto muito importante que deve ser analisado nesse tipo de aplicação é que tais sensores não deveriam, idealmente, estar sujeitos a mudanças quanto a sua referência de medida, pois, caso contrário, uma vez que eles fossem instalados fazer uma manutenção ou recalibração seria impossível ou custaria muito caro [48]. Outra dificuldade que existe ainda a nível de projeto diz respeito a duas exigências contraditórias: o ressonador deve possuir o mais alto fator de qualidade e estar em contato com o meio de medida, porém hermeticamente protegido. Como altos valores de fator de qualidade são apenas obtidos no vácuo e a pressão não se transmite no vácuo, os ressonadores a ondas de volume devem ser projetados com uma estrutura monolítica rígida que permita a transferência da pressão ao elemento vibrante, protegendo-o do meio externo. Avaliar como essas características se comportam num processo de miniaturização é essencial e podem ser auxiliadas por simulações computacionais com múltiplas físicas (mecânica estrutural, elétrica, piezoelétrica, mecânica de fluidos, termodinâmica, acústica, etc.).

Dispositivos piezoelétricos a quartzo tem a vantagem de não precisarem de uma fonte de alimentação externa para ativar as propriedades do transdutor diferentemente do que ocorre com materiais cerâmicos ou piezoresistivos, isso já representa um projeto com baixo consumo de energia se comparado com esses materiais.

Diante das condições físicas do poço petróleo e tomando como base a revisão bibliográfica feita dos sensores de pressão comerciais chega-se nas especificações do

Tabela 1.9: Especificações para o sensor de pressão miniaturizado.

Parâmetro	Descrição
Material piezoelétrico	Quartzo (corte-AT)
Dimensões do ressonador	placa: $5 \times 5 \times 0,23$ mm
	disco: $5$ (diâm) $\times 0,23$ mm
Dimensões com encapsulamento (diâm. x comp.)	$0,95 \times 5$ cm
Local de instalação	Tela do reservatório
Pressão máxima	15000 psi (100 MPa)
Fator de qualidade	$> 10^6$
Resolução na pressão	$< 1$ psi
Temperatura máxima	150 °C
Frequência de ressonância	$< 10$ MHz
Resolução na frequência	1 ppm
Fabricação do ressonador	Usinagem por ultrassom
Material do encapsulamento	Aço inox

sensor de pressão proposto nessa tese e apresentadas na Tabela 1.9.

Por fim, vale ressaltar que a legislação brasileira impõe a empresas nacionais, dentre elas a Petrobras, a adquirirem produtos de fabricação nacional, o que faz com que tais empresas invistam em projetos tecnológicos acadêmicos na área de sensores, não apenas de pressão, mas também temperatura e vazão.

## 1.8 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um sensor de pressão a quartzo em tamanho miniaturizado como parte do sensor inteligente proposto na Figura 1.13 para aplicação em medições distribuídas em poços de petróleo e gás.

Para se chegar na fabricação do sensor e validar seu funcionamento os seguintes objetivos secundários são listados:

- Miniaturização da geometria do transdutor de quartzo por meio de simulações computacionais;
- Controle dos parâmetros de perdas e do fator de qualidade também por meio de simulações computacionais;
- Controle das etapas de fabricação e caracterização nos mais diversos equipamentos utilizados para o processo de miniaturização;

- Desenvolvimento dos circuitos de condicionamento de sinais para testes em bancada.

## 1.9 Organização da tese

### Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo tem-se uma visão global sobre aspectos importantes de sensores de pressão a quartzo usados em poços de petróleo. Viu-se que uma figura de mérito importante no projeto de ressonadores é o fator de qualidade. Os modos de vibração e características do quartzo relevantes para o projeto também são apresentados. Por fim, uma proposta em diagrama de blocos para o sensor inteligente de pressão é apresentada assim como as suas especificações.

### Capítulo 2 - Modelo computacional do transdutor

Este capítulo é dedicado as simulações no programa COMSOL Multiphysics. Discute-se sobre o tratamento das regiões de absorção de energia e diversos outros parâmetros da modelagem. O comportamento do fator de qualidade para uma estrutura miniaturizada é avaliada em diferentes configurações geométricas. Estima-se também o comportamento da frequência de ressonância nas estruturas ressonantes envolvidas por capas protetoras em situações de elevada pressão e temperatura.

### Capítulo 3 - Fabricação do transdutor de quartzo

Neste capítulo discute-se o processo de fabricação do sensor. A partir de lâminas de quartzo já orientadas duas metodologias de fabricação de ressonadores são apresentadas, em uma delas ocorre um processo fotolitográfico e em ambas tem-se processos de usinagem e deposição de metal por pulverização para crescimento dos eletrodos.

### Capítulo 4 - Caracterização

Neste capítulo as etapas de caracterização são apresentadas. Inicialmente cristais de quartzo são caracterizados através de difração por raios-X. Uma vez fabricados, os cristais são caracterizados eletricamente num analisador de impedância.

### Capítulo 5 - Sensor inteligente proposto

Este capítulo é dedicado aos teste das estruturas fabricadas em circuitos eletrônicos visando a integração de todas as partes num mesmo encapsulamento formando assim

o sensor inteligente de pressão.

## **Capítulo 6 - Conclusões**

Este capítulo trás as conclusões do trabalho realizado, além de listar as principais contribuições do mesmo e as possíveis atividades futuras para dar continuidade ao trabalho já desenvolvido.

## Capítulo 2

# Modelo computacional do transdutor

Sensores de pressão comerciais a quartzo utilizados em fundo de poço vem passando por um processo de redução de tamanho ao longo do tempo, neste sentido um modelo computacional é desenvolvido para analisar o comportamento do fator de qualidade num processo de miniaturização e será tratado neste capítulo.

Para avaliar o impacto de vários mecanismos de perdas na otimização do fator de qualidade do ressonador orientado no corte-AT simulações com vários diâmetros de discos de quartzo são realizadas e se observa que com um diâmetro de 5 mm é possível obter um fator de qualidade superior a  $10^6$ .

Os mecanismos intrínsecos de perdas são modelados como perdas de viscosidade. Considera-se também fatores geométricos tais como, espessura e concavidade nas superfícies do quartzo para aumentar o fator de qualidade. As simulações referente ao produto  $f \times Q$  reproduzem o comportamento descrito na literatura. O modelo construído também é utilizado para avaliar o comportamento do ressonador em função da temperatura e da pressão na faixa de 0 até 200 °C e de 0,1 MPa (14,5 psi) até 140 MPa (20000 psi), respectivamente, onde o ressonador opera no modo cisalhamento de espessura. Usou-se constantes elásticas em função da temperatura e condições de contorno de carga mecânica para simular a pressão no ressonador. Características geométricas dos eletrodos como diâmetro e espessura também são investigadas no modelo. Aqui, as geometrias usadas nos sensores de pressão e temperatura para poços de petróleo da *Schlumberger* e da *Quartzdyne* são usadas como referência. A modelagem é realizada no programa COMSOL Multiphysics® versão 4.4.

## 2.1 Descrição do ambiente COMSOL

As ferramentas de simulação computacional são frequentemente utilizadas para explorar diversos parâmetros importantes do problema estudado permitindo mais conhecimento sob diferentes configurações. Através de simulações pode-se chegar mais perto do produto final desejado sem a necessidade de ter um sistema real, evitando a realização de experimentos às cegas e também economizando tempo e dinheiro. Existem diversos programas empregados para simulações computacionais nas diversas áreas da física e da engenharia, dentre eles o COMSOL Multiphysics.

O COMSOL Multiphysics é um programa de simulação desenvolvido para resolver problemas escritos na forma de PDEs (*Partial Differential Equations*) através de modelos numéricos baseados em métodos de elementos finitos para diferentes geometrias em uma, duas ou três dimensões. Ele é composto por um conjunto de módulos especiais que abrange praticamente todas as áreas de aplicação de equações diferenciais parciais não-lineares.

Um único modelo desenvolvido no COMSOL pode ser formado por vários módulos ou interfaces físicas acoplados de modo a permitir as interações que ocorrem no mundo real. Os módulos de grande interesse nesse trabalho são o de Mecânica Estrutural e AC/DC. Dentro do módulo de Mecânica Estrutural pode-se fazer simulações piezoelétricas utilizando a interface física de Dispositivos Piezoelétricos. Esse aplicativo vem sendo utilizado para estudar o efeito piezoelétrico em vários trabalhos encontrados na literatura [49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59].

### 2.1.1 Utilizando a interface física Dispositivos Piezoelétricos

Os passos a seguir descrevem sucintamente as configurações que devem ser feitas no COMSOL para construção de um modelo envolvendo análise piezoelétrica (ver Apêndice C), um fluxograma desses passos foi elaborado e é mostrado na Figura 2.1.

1. Ao se iniciar um novo trabalho no COMSOL o modelo de assistente é apresentado. Nele deve-se determinar o espaço dimensional, seguido da escolha de uma ou mais interfaces físicas e do tipo de estudo. Nessa tese as simulações foram conduzidas usando-se modelos de duas e três dimensões. A interface física Dis-

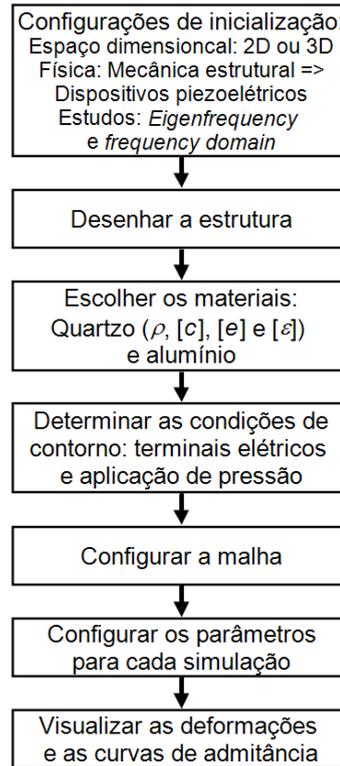


Figura 2.1: Fluxograma para a simulação no COMSOL do ressonador de quartzo.

positivos Piezoelétricos e estudos no domínio da frequência, *eigenfrequency* e estacionário foram os mais usados.

2. A geometria pode ser desenhada no próprio ambiente do programa ou a depender de sua complexidade importada de programas CAD (*Computer Aided Design*).
3. Uma vez que materiais piezoelétricos apresentam características diferentes sob diferentes orientações é necessário determinar o posicionamento da estrutura diante do eixo de coordenadas do COMSOL.
4. Adicionar um ou mais materiais aos domínios. Pode-se utilizar materiais previamente definidos na biblioteca do COMSOL, bem como construí-los através de parâmetros próprios relacionados a uma determinada física.
5. Determinar como os domínios serão governados dentro da interface física selecionada. Observa-se que um único domínio pode ser governado por mais de uma interface física numa modelagem que envolva diferentes áreas da física.

6. Aplicar as condições de contorno corretas para cada um dos domínios. O COMSOL implementa automaticamente uma configuração padrão para cada interface física selecionada, o que não impede que uma série de modificações sejam feitas manualmente pelo usuário.
7. Definição da malha. O programa discretiza a estrutura a ser modelada, ou seja, gera uma malha composta por elementos finitos. Diferentes tipos e refinamentos de malhas podem ser explorados. No entanto, quanto maior o refinamento maior será a exigência computacional.
8. Configurar os estudos. É necessário estabelecer, por exemplo, a faixa de frequência de interesse ou os níveis de aplicação de pressão.
9. Solucionar e mostrar resultados. Uma vez que o problema de interesse foi resolvido, pode-se ir para o modo de pós-processamento para visualizar e analisar o sistema resultante.

Para realizar as simulações foi utilizado um computador com placa-mãe ASUS P6T7 *Supercomputer*, processador i7 com oito núcleos e 24 GB de memória RAM.

## 2.2 Placa ressonadora em 2D - modelo inicial

Para simular a estrutura piezoelétrica ressonadora fez-se inicialmente uma abordagem em 2D e explorou-se o comportamento da admitância em função da frequência e também da deformação da estrutura em diferentes harmônicos para o modo de vibração de cisalhamento de espessura.

A placa ressonadora é construída a partir da seleção de formas geométricas simples, como retângulos, utilizando a própria ferramenta CAD do COMSOL, ver Figura 2.2. Simulações iniciais são feitas considerando apenas a camada piezoelétrica sem eletrodos. Desta forma, pode-se verificar os componentes básicos do modelo e avaliar a solução antes de modelar uma estrutura mais complexa.

A ferramenta oferece ao usuário diversas opções de operações para desenhos. Apesar da simplicidade geométrica dessa primeira aplicação vale deixar claro que todos os passos no processo de desenho são feitos numa sequência, o que permite alterações posteriores de maneira fácil e rápida.

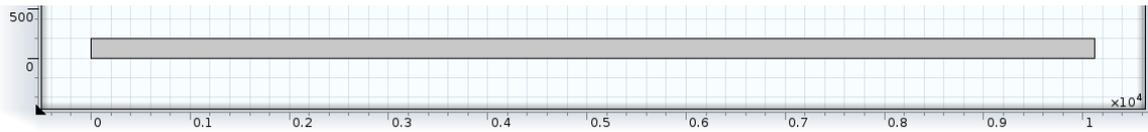


Figura 2.2: Geometria para a placa ressonadora em 2D, as dimensões são  $10115,28 \times 200 \mu\text{m}$

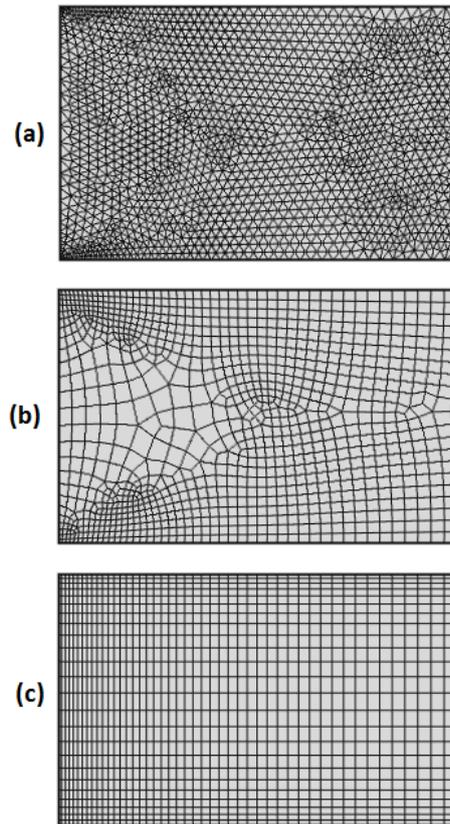


Figura 2.3: Tipos de malhas disponíveis em simulações 2D: (a) triangular, (b) quadrática e (c) mapeada.

A estrutura a ser simulada tem apenas um único domínio, onde os quatro contornos estão mecanicamente livres. Vale lembrar que um único domínio pode ser governado por muitas interfaces físicas em simulações multifísica suportadas pelo COMSOL. Sem a presença de eletrodos a única condição de contorno diz respeito ao potencial elétrico. Uma diferença de potencial alternada foi aplicada da seguinte maneira: o contorno superior foi determinado como *terminal* com um valor de pico de 5 V e o contorno inferior é determinado como *ground*. Para as simulações em 2D não foram consideradas as perdas no quartzo.

Para uma simulação em 2D três tipos de malha podem ser construídas: triangular, quadrática e mapeada (ver Figura 2.3). Pode-se perceber que existe uma maior con-

Tabela 2.1: Constantes para o quartzo no corte-AT.

$[c] = \begin{bmatrix} 86,74 & -8,25 & 27,15 & -3,66 & 0 & 0 \\ -8,25 & 129,77 & -7,42 & 5,7 & 0 & 0 \\ 27,15 & -7,42 & 102,83 & 9,92 & 0 & 0 \\ -3,66 & 5,7 & 9,92 & 38,61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 68,81 & 2,53 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,53 & 29,01 \end{bmatrix}$ $\times 10^9 N/m^2$
$[e] = \begin{bmatrix} 17,1 & -15,2 & -1,87 & 6,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10,8 & -9,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -7,61 & 6,7 \end{bmatrix}$ $\times 10^{-2} C/m^2$
$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} 39,21 & 0 & 0 \\ 0 & 39,82 & 0,86 \\ 0 & 0,86 & 40,42 \end{bmatrix} \times 10^{-12} C/Vm$

centração de elementos nas extremidades da placa. Isso pode ser feito adicionando-se uma razão aritmética ou geométrica na configuração de distribuição da malha. A quantidade de elementos na direção vertical foi determinada de tal modo que em um comprimento de onda houvessem pelo menos dez elementos de malha, o que é suficiente para definir uma senoide. As malhas quadrática e mapeada criam uma quantidade menor de elementos mostrando, ainda assim, o mesmo resultado quando comparada com a malha triangular, conseqüentemente obtém-se um tempo computacional menor na simulação. Apenas na malha mapeada a quantidade de elementos pode ser pré-calculado: simplesmente multiplicando o número de elementos em cada direção. Devido a essas características o tipo de malha mapeada foi escolhida para simulações 2D com  $100 \times 25$  elementos.

Ao se criar uma estrutura em 2D no COMSOL a mesma é desenhada no plano-xy e assim a direção de polarização está perpendicular a esse plano de desenho. Portanto, para as simulações em 2D usou-se as matrizes para o corte-AT apresentadas na Tabela 2.1 [39].

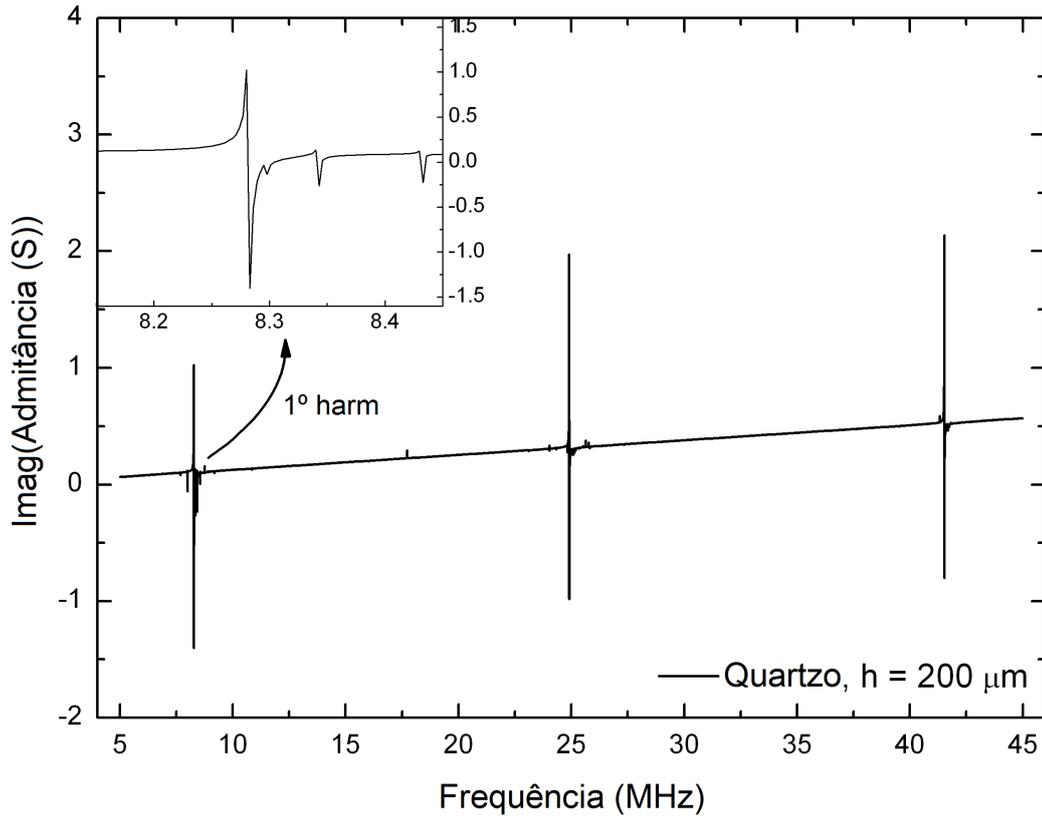


Figura 2.4: Comportamento da admitância para a placa de quartzo no corte-AT em 2D. Tempo de simulação: aproximadamente 1 min.

O retângulo de quartzo tem espessura  $h = 200 \mu\text{m}$  e para  $m = 31$  na Equação B.2, calcula-se o comprimento,  $a = 10115,28 \mu\text{m}$ , no Apêndice B.3 justifica-se as dimensões escolhidas. Para o corte-AT,  $\bar{c}_{66} = 29,24 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  e  $\rho = 2651 \text{ kg/m}^3$ , então  $v = 3322 \text{ m/s}$ .

Tabela 2.2: Resultados para simulações 2D.

harmônico	frequência (MHz)		erro relativo (%)
	teoria	COMSOL	
$f_1$	8,3055	8,2852	0,245
$f_3$	24,9165	24,9096	0,028
$f_5$	41,5276	41,5277	0,000

Realizou-se a simulação mantendo as configurações padrão do COMSOL e na faixa de frequência de 5 MHz para 45 MHz com passo de 10 kHz nas proximidades dos harmônicos. O comportamento da admitância do primeiro até o quinto harmônico pode ser encontrado na Figura 2.4. Uma comparação entre as frequências teóricas e simuladas pode ser encontrada na Tabela 2.2, observa-se uma boa concordância

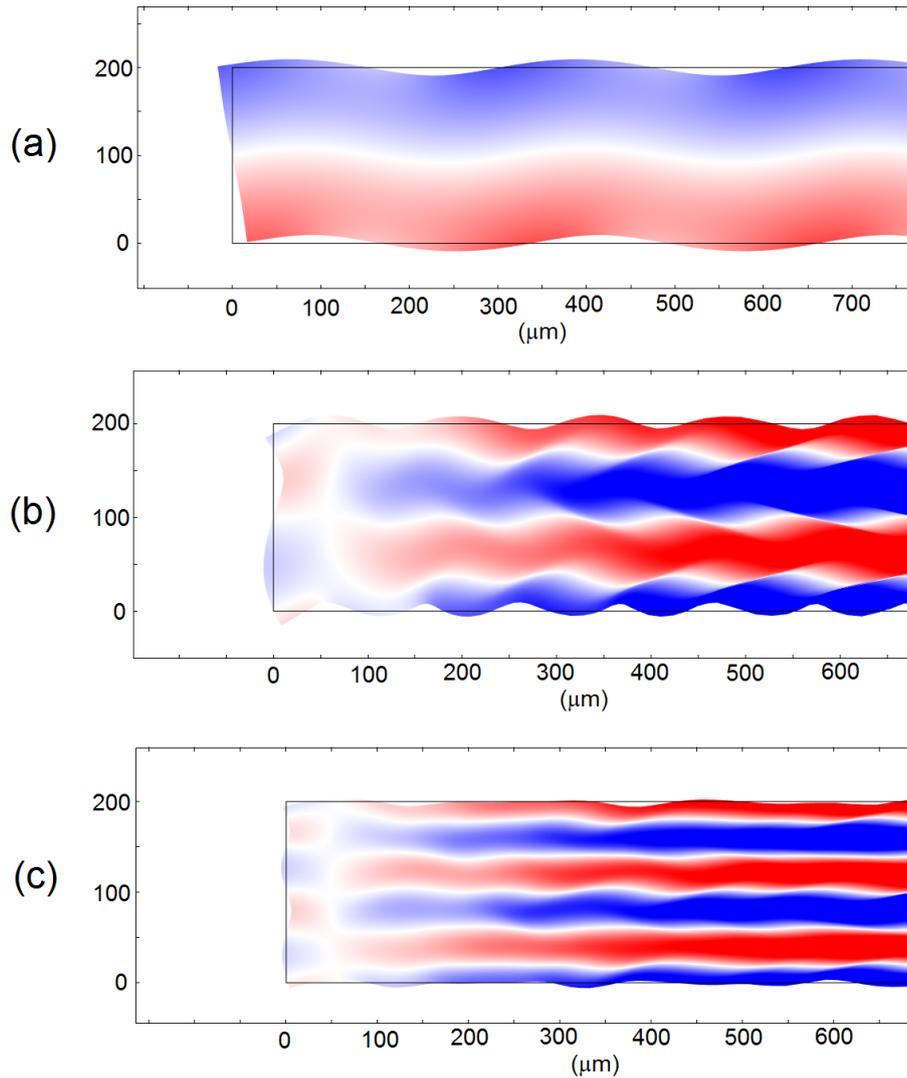


Figura 2.5: Deformações obtidas na simulação 2D, o modo de cisalhamento de espessura está presente. (a) Harmônico fundamental, (b) terceiro harmônico e (c) quinto harmônico.

especialmente para harmônicos mais altos.

Pode-se ver na Figura 2.4 que outras ressonâncias além dos harmônicos aparecem, porém o formato da deformação não está relacionado com o modo de cisalhamento de espessura e na maioria dos casos são apenas vibrações espúrias. A fim de verificar esta observação um segundo estudo foi realizado onde verificou-se a deformação da placa nas proximidades do primeiro, terceiro e quinto harmônicos, os resultados são mostrados na Figura 2.5. As cores azul e vermelha correspondem aos deslocamentos em sentidos opostos, a deformação mostrada está muito ampliada, na realidade ela é muito pequena. Pode-se ver para o terceiro e quinto harmônicos a presença de nós nas extremidades. Não foi possível isolar apenas o modo de cisalhamento de espessura

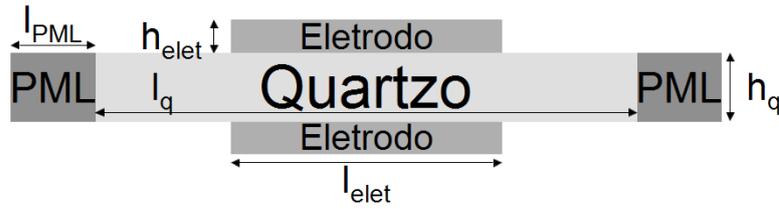


Figura 2.6: Seção em corte transversal da geometria do ressonador.

na simulação, assim também aparecem algumas deformações nos contornos horizontais, mas a forma senoidal nos contornos verticais é verificada para todos os harmônicos como esperado.

## 2.3 Estruturas ressonantes em 3D

Nessa seção uma modelagem tridimensional é realizada, onde diversos parâmetros são analisados com mais ênfase. Diferentes módulos da física podem ser acoplados em conjunto numa mesma simulação no COMSOL. No caso de dispositivos piezoelétricos, este inclui tanto mecânica de sólidos e eletrostática. Antes de se iniciar as simulações, deve-se definir cinco aspectos no modelo: geometria, materiais, malha, as regiões de absorção de energia e física. Uma descrição detalhada a cerca da criação de arquivos de simulações no COMSOL versão 4.4 podem ser encontrados no Apêndice C.

### 2.3.1 Geometria

Para a modelagem do ressonador de quartzo considerou-se a geometria em forma de disco. Uma vista em corte transversal utilizada para as simulações é apresentada na Figura 2.6.

Nas simulações iniciais a espessura e o diâmetro do disco são  $h_q = 230 \mu\text{m}$  e  $l_q = 15 \text{ mm}$ , respectivamente, essas dimensões são baseadas no ressonador de pressão da *Quartzdyne* que trabalha na frequência de ressonância em torno 7,22 MHz [30]. A forma dos eletrodos segue a mesma geometria da estrutura de quartzo com espessura de  $h_{elet} = 100 \text{ nm}$  e diâmetro  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ . Durante as simulações algumas dessas dimensões sofrem variações.

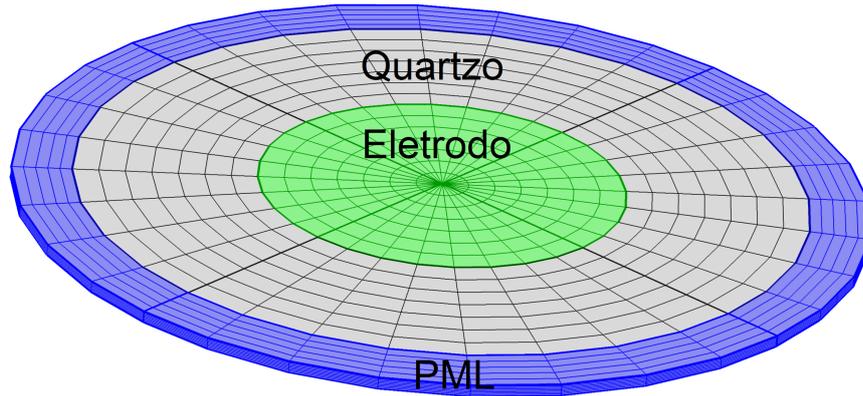


Figura 2.7: Malha utilizada nas simulações. A região azul é o domínio PML e as regiões verdes representam os domínios de eletrodos.  $l_q = 15$  mm,  $h_q = 230$   $\mu$ m,  $l_{PML} = 1,2$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$  e  $h_{elet} = 100$  nm.

### 2.3.2 Materiais

Um tipo de material é definido para cada região. Os eletrodos são definidos como alumínio. Para as regiões de cristal de quartzo as propriedades do material são dependentes da orientação. A orientação do cristal, ou seja, o corte escolhido é feito diretamente no COMSOL através da definição dos ângulos de Euler. Usa-se para isso as matrizes elástica, piezoelétrica e de permissividade relativa na orientação direita, assim, não há a necessidade de mudar essas constantes para cada corte diferente. A orientação cristalográfica adotada nas simulações são baseadas na norma IEEE de 1987, em que o corte-AT é definido como  $(YXl)-35,25^\circ$  [41]. O COMSOL segue tal norma.

### 2.3.3 Malha

A geometria da malha é apresentada na Figura 2.7. Para o modo de cisalhamento de espessura a densidade de malha na espessura influencia na correta simulação da frequência de ressonância. Mas deve-se ter cuidado ao aumentar a densidade da malha, pois, aumenta-se também o tempo computacional. Através de um rápido estudo de convergência da frequência de ressonância fundamental, como mostrado na figura 2.8, verificou-se que o valor da frequência muda muito pouco para uma quantidade de 8 elementos de malha por meio comprimento de onda, então,  $N = 8$  foi considerado suficiente para modelar o modo de cisalhamento de espessura do ressonador.

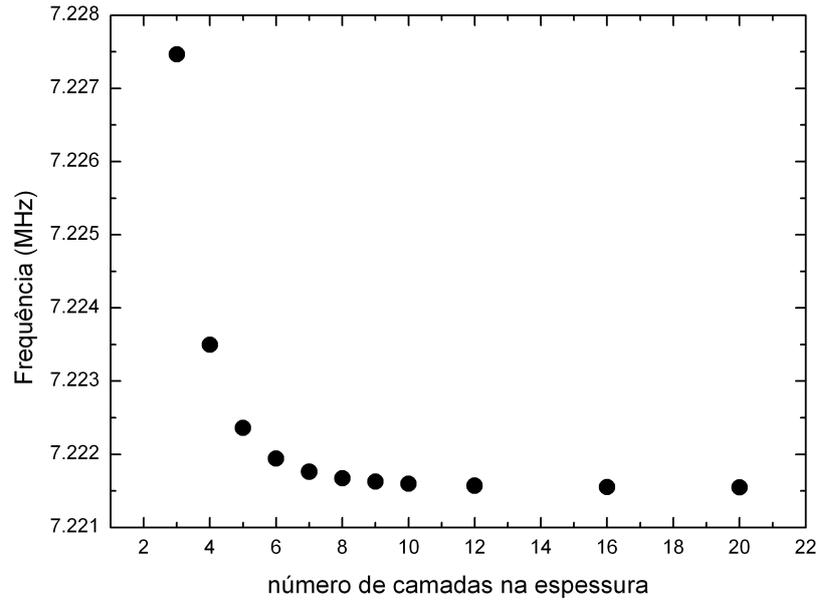


Figura 2.8: Convergência da frequência de ressonância em função do número de camadas da malha ao longo da espessura do quartzo.

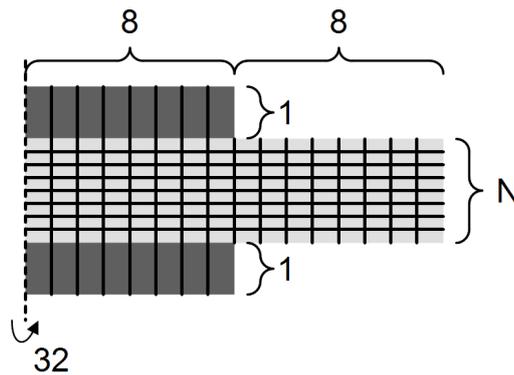


Figura 2.9: Dados para a criação da malha no disco.

Em comparação com o disco de quartzo os eletrodos são muito mais finos. Assim, apenas um elemento de malha ao longo da direção da espessura é usado.

A determinação da malha na estrutura em forma de disco com eletrodos foi configurada conforme o esquema apresentado na Figura 2.9, essa estrutura é criada como um sólido de revolução onde 32 posições são varridas durante a revolução, as demais densidade de malha em cada seguimento são indicadas na mesma figura e  $N$  corresponde a densidade de malha ao longo da espessura do quartzo. A estrutura completa totaliza 5888 elementos e é mostrada na Figura 2.7.

### 2.3.4 Tratamento das regiões de absorção de energia

Em um sensor de pressão a quartzo há muitos caminhos possíveis para a dissipação de energia. Os principais estão relacionados as perdas nas estruturas de suporte, contatos quartzo-eletrodos, dissipação no ambiente de gás envolto ao ressonador e imperfeições da superfície.

As perdas nas estruturas de suporte são causadas por ondas acústicas que transportam energia do ressonador para as tampas ou estruturas de suporte, ou para o substrato no caso de ressonadores MEMS. Uma vez que essas ondas não estão localizadas próximas da região central do ressonador, a energia associada a elas pode ser considerada essencialmente perdida e é eventualmente convertida em calor.

O fator de qualidade pode ser determinado diretamente a partir das análises de vibração livre levando em consideração as dissipações do material [60]. Adicionalmente, nesse mesmo trabalho, os autores propõem uma base de suporte em que todas as ondas que chegam até ela são dissipadas, ou seja, nenhuma onda é refletida de volta para o ressonador. A presença das estruturas de suporte reduz o fator de qualidade, uma vez que funcionam como dissipadores de energia. Um limite inferior de  $Q$  é obtido se a base é dita semi-infinita, assim, ela absorverá toda energia acústica irradiada a partir do ressonador. Esse limite inferior de  $Q$  é útil para avaliar o projeto de ressonadores e suas estruturas de suporte. Portanto, o método de dissipação de energia semi-infinito é proposto para pré-dizer o limite inferior de  $Q$ . A modelagem desse método foi realizada pela aplicação de técnicas de escalas usando elementos finitos. As reflexões são limitadas pela aplicação de camadas perfeitamente casadas, PML (em inglês, *Perfectly Matched Layers*), que absorvem a energia das ondas incidentes. A versão 4.4 do COMSOL já implementa em suas funções essas técnicas propostas por Yong *et al* [35].

A principal vantagem na proposta PML é que se pode envolver a área onde o ressonador é montado a fim de simular uma camada de absorção perfeita de energia acústica. Isso permite obter, após a extração de parâmetros pelas curvas de impedância, um modelo elétrico mais realista do ressonador.

O fator de qualidade como um resultado das estruturas de suportes pode ser obtido por meio de domínios PML posicionados ao redor do ressonador [60, 35, 61]. Uma

região PML não é estritamente falando uma condição de contorno, mas um domínio adicional que absorve as ondas incidentes sem produzir reflexões. Em outras palavras, as regiões determinadas como PML trabalham como um absorvedor de energia semi-infinito e dissipa a energia das ondas incidentes, portanto, ajuda a determinar o fator de qualidade do ressonador.

No COMSOL Multiphysics versão 4.4, as regiões PML estão disponíveis para análises em resposta em frequência e *eigenfrequency*. As propriedades dos materiais nessa região devem ser iguais as do domínio adjacente. PMLs são tratadas como um absorvedor anisotrópico e são implementadas nas simulações no sistema de coordenadas cilíndricas.

Na Figura 2.7 um domínio PML contorna o disco ressonador. O raio do círculo externo não é uma dimensão crítica desde que essa dimensão forneça uma quantidade de elementos de malha satisfatória, em torno de 5 a 6 elementos.

### 2.3.5 Configuração da física

Nessa etapa define-se o conjunto de equações diferenciais a ser resolvido e suas condições de contorno. Na região piezoelétrica, o COMSOL resolve ambas as equações estruturais e elétricas, mas nas regiões de eletrodos só resolve as equações estruturais. As equações elétricas não são resolvidos nos eletrodos porque a condutividade elétrica do alumínio ( $3,54 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$ ) é várias ordens de grandeza maior do que a do quartzo (ver Tabela 1.5) e, portanto, as regiões com alumínio irão atuar como regiões equipotenciais permitindo uma condução de corrente extremamente pequena através delas. Assim, as características elétricas do alumínio não tem qualquer efeito significativo sobre a resposta do ressonador. O acoplamento electromecânico dominante é encontrado apenas na região piezoelétrica.

Finalmente, especifica-se as condições de contorno elétricas e mecânicas. Um exemplo de condição de contorno é o nível de tensão elétrica alternada aplicada nos eletrodos, onde um deles recebe um terminal de 5 V de pico e o outro é modelado como *ground*. As condições de contorno mecânicas para as simulações com pressão estão relacionadas a restrição de estrutura fixa e aplicação de carga. Uma restrição de superfície fixa é aplicada em algumas simulações para modelar a estrutura numa po-

sição fixa. Uma aplicação de carga é uma condição que substitui as condições padrões definidas ao se iniciar um modelo no COMSOL. Estabelece-se que uma determinada carga mecânica é aplicada sobre um contorno do desenho geométrico. Isto pode ser usado para modelar a pressão experimentada nas paredes do sensor de quartzo.

## 2.4 Resultados das simulações 3D

Além dos domínios PMLs que contribuem para dissipação de energia da estrutura, adicionalmente o modelo também incorpora as perdas mecânicas e elétricas no material piezoelétrico por meio de fatores de perda. Um fator de perda estrutural representa a histerese na curva de tensão-deformação e um fator de perda dielétrico representa a perda de polarização, que se manifesta como a histerese na curva de polarização versus campo elétrico do material. O fator de perda dielétrico não será implementado nas simulações. O fator de perdas elástico ou amortecimento elástico está relacionado a viscosidade do material, assim, uma matriz de viscosidade para o cristal de quartzo a 30 °C é usada [62]. Faz-se essa relação por meio da seguinte equação

$$FP = \frac{\omega \eta_{ij}}{c_{ij}} \quad (2.1)$$

em que,  $FP$  é o fator de perdas,  $\omega$  é a frequência angular,  $\eta_{ij}$  é a viscosidade e  $c_{ij}$  é a constante elástica, a notação de Voigt é usada. Os eletrodos são modelados como um material elástico linear, e da mesma maneira um fator de perdas pode ser definido. A região PML absorve as ondas elásticas e contribui para o amortecimento da estrutura. Isso modela as perdas devido aos suportes ou grampos de montagem.

Devido a adição de um mecanismo de perda ou amortecimento na região piezoelétrica obtém-se com isso frequências de ressonâncias complexas. A parte real é a frequência efetiva do modo de vibração investigado e a parte imaginária está relacionada com o efeito de amortecimento ou decaimento das vibrações.

Enquanto a análise de resposta em frequência é útil para se obter os parâmetros elétricos do ressonador e conseqüentemente  $Q$ , ela apenas permite a determinação de um conjunto de configurações (geometria, ângulo de corte, pressão, etc.) a cada simulação, porém o tempo de simulação aumenta com a redução do passo de frequência e

consequentemente se torna uma análise muito demorada. Assim, optou-se por simulações com o estudo *eigenfrequency* onde um determinado conjunto de configurações podem ser realizados no valor da frequência de ressonância e não numa larga faixa de frequência. Simulações no domínio da frequência são realizadas para estudos de espectroscopia de impedância.

Simulações envolvendo condições de contorno mecânicas devem acontecer em duas etapas: Etapa 1 - modo estacionário (*Stationary*) e Etapa 2 - *Eigenfrequency*. Aqui, a opção “*Include geometric nonlinearity*” é ativada em cada etapa.

### 2.4.1 Comportamento $f \times Q$

Uma figura de mérito utilizada nos ressonadores é o produto entre frequência e fator de qualidade [63, 64, 65, 66, 67]. A primeira simulação 3D realizada no COMSOL foi para extrair a dependência do fator de qualidade em função da frequência de ressonância. Nessa simulação a espessura dos eletrodos foi considerada nula. A faixa de frequência é obtida variando-se a espessura do disco de quartzo, quatro diâmetros foram considerados: 5, 15, 30 e 90 mm. Os resultados podem ser vistos na Figura 2.10. Observa-se que o fator de qualidade aumenta com a frequência, alcança um valor máximo e em seguida começa a decrescer. Em altas frequências, o fator de qualidade é limitado pelo fator de qualidade relacionado as perdas intrínsecas, ou seja, a viscosidade do quartzo. As simulações mostram uma excelente concordância com a Equação teórica 1.6. A redução de  $Q$  em baixas frequências é observada experimentalmente [63].

De acordo com os resultados experimentais da literatura [63] o fator de qualidade devido as perdas intrínsecas é dado por  $Q = 16 \times 10^{12} \times f^{-1}$ , e este está muito próximo ao resultado da Equação 1.7, que é também obtido nas simulações (Figura 2.10).

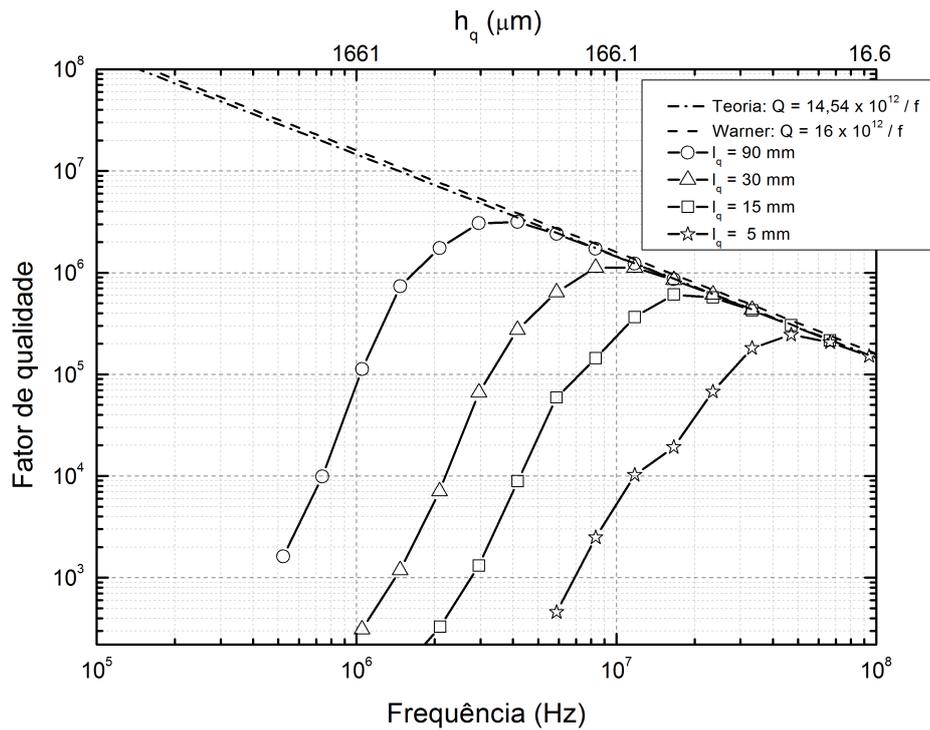


Figura 2.10: Fator de qualidade devido as perdas intrínsecas do disco ressonador de quartzo no corte-AT com  $l_q = 5, 15, 30$  e  $90$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$  e  $l_{PML} = 1,2$  mm.

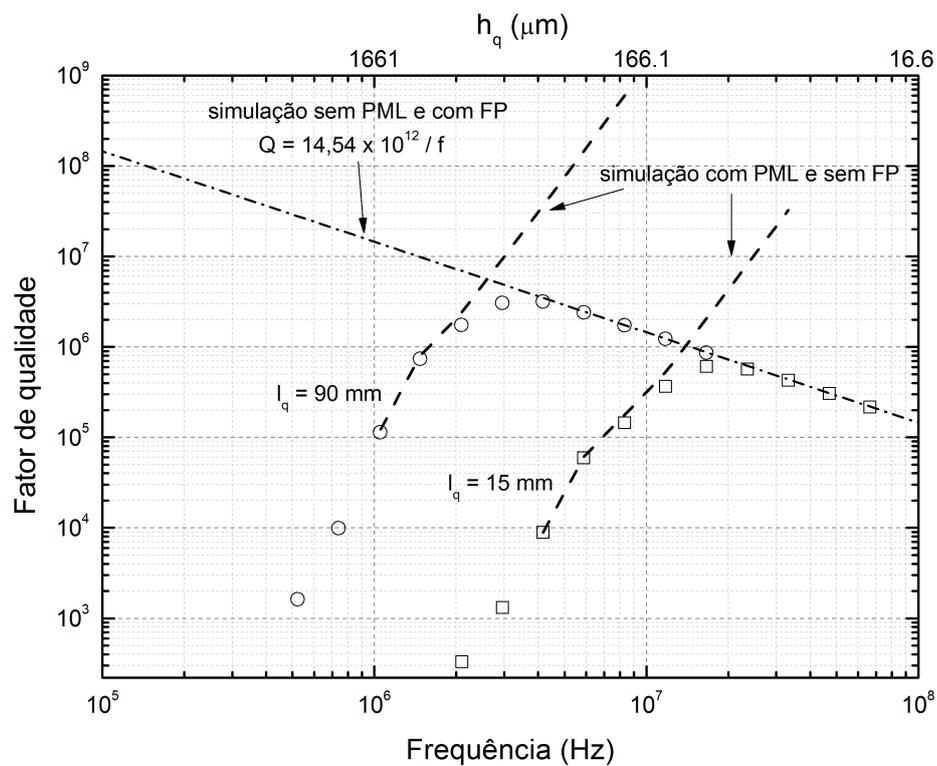


Figura 2.11: Análise das contribuições no fator de qualidade devido a presença ou ausência da PML e do FP.  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$  e  $l_{PML} = 1,2$  mm

Tabela 2.3: Análise do fator de qualidade devido a presença ou ausência da PML e das perdas por viscosidade do quartzo.  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet}/l_q = 0,5$ ,  $h_{elet} = 0$  e  $l_{PML} = 1,2$  mm.

PML	FP	$Q$			observações sobre $Q$
		$h_q = 400 \mu\text{m}$ $f = 4,174 \text{ MHz}$	$h_q = 100 \mu\text{m}$ $f = 16,630 \text{ MHz}$	$h_q = 50 \mu\text{m}$ $f = 33,249 \text{ MHz}$	
×	×	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{18}$	$\sim 10^{18}$	limitado pela malha
✓	×	$8,921 \times 10^3$	$2,064 \times 10^6$	$3,234 \times 10^7$	$Q \sim Q(f, l_q)$
×	✓	$3,475 \times 10^6$ (teo: $3,484 \times 10^6$ )	$8,657 \times 10^5$ ( $8,744 \times 10^5$ )	$4,329 \times 10^5$ ( $4,373 \times 10^5$ )	$Q = \frac{\bar{c}_{66}}{\omega \eta_{66}}$
✓	✓	$8,893 \times 10^3$	$6,099 \times 10^5$	$4,272 \times 10^5$	$f < f_{Q_{max}} \Rightarrow$ PML atua
					$f > f_{Q_{max}} \Rightarrow$ FP atua

Uma análise levando em consideração a atuação da PML e do fator de perdas (FP) separadamente está presente na Figura 2.11. Uma simulação sem considerar o FP mostra que o fator de qualidade cresce proporcionalmente à frequência e também é diretamente proporcional ao diâmetro do disco de quartzo. Sem a região PML o comportamento segue a Equação 1.6, ou seja,  $Q$  é inversamente proporcional a  $f$  e não mostra nenhuma dependência com o diâmetro do disco. Quando a PML e o FP são considerados numa mesma simulação o fator de qualidade tem uma contribuição maior devido a PML para baixas frequências e uma contribuição maior devido a FP em altas frequências. Um resumo com alguns valores de simulação para  $l_q = 15$  mm é tratado na Tabela 2.3.

#### 2.4.2 $Q \times$ diâmetro dos eletrodos

O comportamento do fator de qualidade em função do diâmetro dos eletrodos para o disco ressonador de quartzo é apresentado por meio da Figura 2.12. Aqui, não se considera a espessura dos eletrodos, mas apenas a área sujeita a diferença de potencial elétrico. Claramente observa-se que existe uma relação ótima  $l_{elet}/l_q$  para cada espessura  $h_q$  do quartzo, onde o fator de qualidade é máximo. Esse resultado é extremamente importante quando a espessura final do disco ressonador de quartzo for escolhida, onde se poderá selecionar no processo de fabricação dos eletrodos o

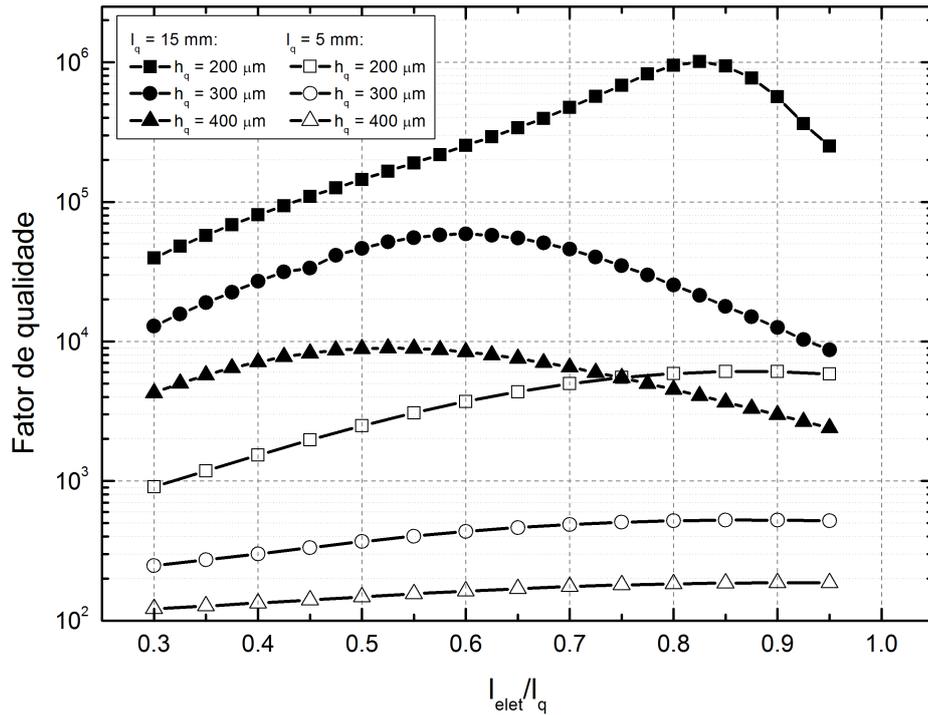


Figura 2.12: Fator de qualidade em função do diâmetro dos eletrodos,  $l_q = 15$  mm,  $h_{elet} = 0$  e  $l_{PML} = 1,2$  mm.

diâmetro que otimiza o fator de qualidade.

### 2.4.3 Concavidade

Uma abordagem para aumentar o fator de qualidade dos ressonadores é a utilização de superfícies com concavidade de modo a confinar a energia de vibração o máximo possível no centro do ressonador. Com isso evita-se que parte da energia acústica alcance as bordas do ressonador e consequentemente as estruturas de suporte, e também chega-se a reduzir os modos indesejados de vibração [3]. Ajustando-se as curvaturas nas superfícies de ressonadores com dois modos de vibração é possível reduzir as reflexões de harmônicos indesejados e aumenta-se a separação de frequências entre os modos de interesse e modos indesejados [68]. Diferentes tipos de concavidades podem ser utilizadas, tais como: plano-convexa e bi-convexa [69].

De maneira a avaliar o efeito da concavidade, uma superfície de contorno esférica é usada como modelo, suas relações geométricas estão presentes na Figura 2.13, o raio,  $R$ , pode ser calculado como

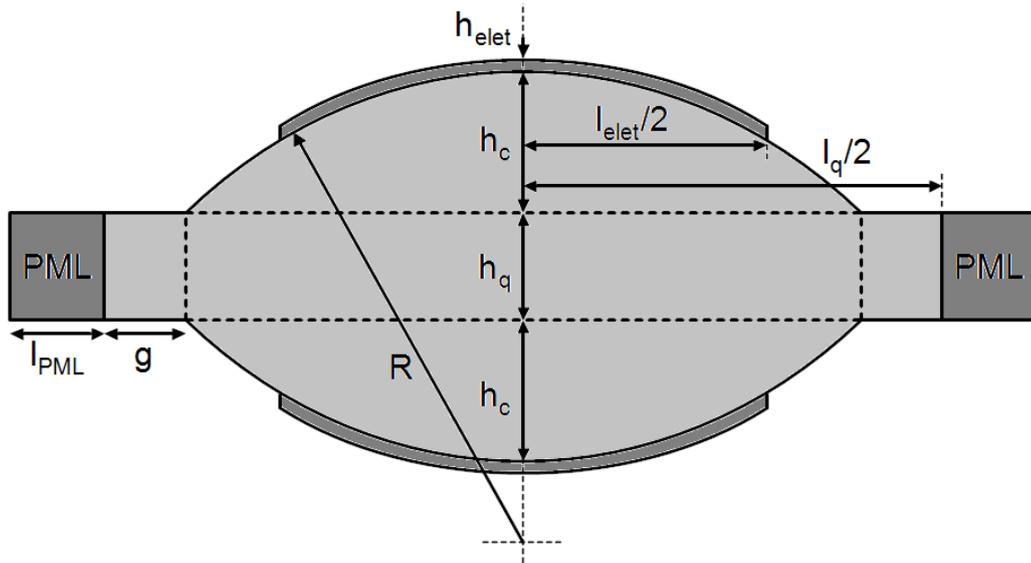


Figura 2.13: Detalhe da geometria para o ressonador de quartzo bi-convexo.

$$R = \frac{h_c}{2} + \frac{\left(\frac{l_q}{2} - g\right)^2}{2h_c} \quad (2.2)$$

onde  $h_c$  é a espessura da superfície curva no centro do disco. No modelo desenvolvido um trecho de segmento de raio igual a  $g$  é deixado plano de modo a permitir uma boa vedação entre as tampas do disco e essa região.

Estudos de *eigenfrequency* combinados com variações no parâmetro  $h_c$  são realizados para extrair o fator de qualidade do ressonador. Os resultados podem ser visualizados na Figura 2.14 para as estruturas bi-convexas e plano-convexas onde considera-se três valores de  $h_q$ , 200, 300 e 400  $\mu\text{m}$ . A espessura dos eletrodos é considerada nula. Uma comparação para a frequência e o fator de qualidade entre os ressonadores bi-convexo e plano-convexo para  $h_q = 200 \mu\text{m}$  pode ser encontrada na Tabela 2.4. O fator de qualidade é pouco afetado se apenas uma das duas superfícies apresenta concavidade, porém do ponto de vista do processo de fabricação a estrutura plano-convexa se torna mais fácil de ser obtida. Como seria de se esperar observa-se uma diminuição da frequência de ressonância à medida que  $h_c$  aumenta.

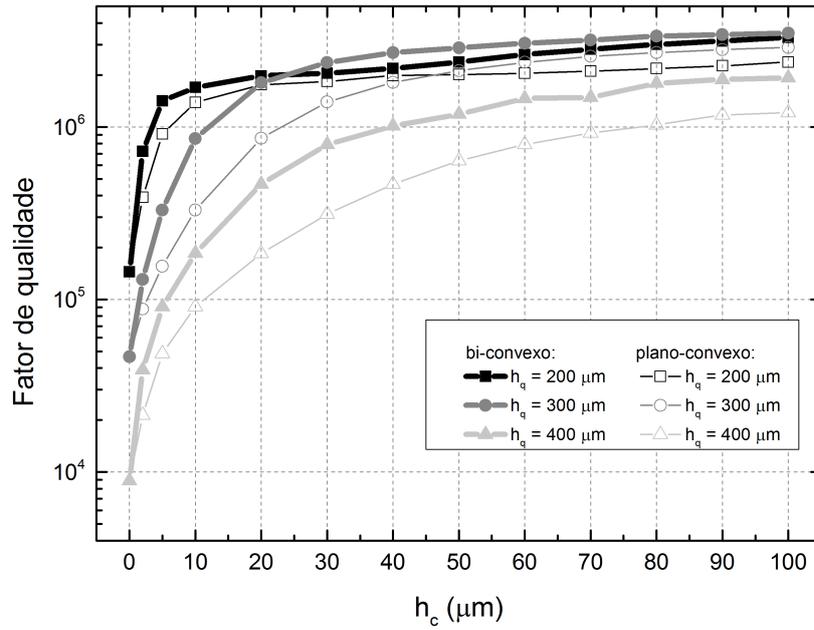


Figura 2.14: Comportamento do fator de qualidade em relação a concavidade,  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_{elet} = 0$ ,  $l_{PML} = 1,2$  mm e  $g = 1,2$  mm.

Tabela 2.4: Frequência e fator de qualidade para o ressonador com concavidade,  $h_q = 200$   $\mu\text{m}$ ,  $l_q = 15$  mm,  $h_{elet} = 0$ ,  $l_{PML} = 1,2$  mm e  $g = 1,2$  mm.

$h_c$ ( $\mu\text{m}$ )	bi-convexo		plano-convexo	
	$f$ (MHz)	$Q$ ( $\times 10^6$ )	$f$ (MHz)	$Q$ ( $\times 10^6$ )
0	8,3245	0,1446	8,3245	0,1446
2	8,1778	0,7212	8,2514	0,3905
5	7,9604	1,4163	8,1411	0,9115
10	7,6174	1,6935	7,9604	1,3889
20	7,0091	1,9771	7,6174	1,7551
30	6,4906	2,0486	7,3008	1,8370
40	6,0445	2,1811	7,0091	1,9843
50	5,6570	2,3781	6,7398	2,0126
60	5,3173	2,6273	6,4906	2,0438
70	5,0173	2,8160	6,2595	2,1020
80	4,7502	3,0080	6,0445	2,1793
90	4,5117	3,1484	5,8442	2,2620
100	4,2958	3,2999	5,6570	2,3780

Na Figura 2.10 vê-se que para  $l_q = 15$  mm e  $h_q = 200$   $\mu\text{m}$  tem-se  $Q = 1,44 \times 10^5$ , se para esse mesmo ressonador fosse adicionada uma concavidade em pelo menos uma das superfícies, então, segundo o gráfico da Figura 2.14 o fator de qualidade seria superior a um milhão com  $h_c \geq 10$   $\mu\text{m}$ .

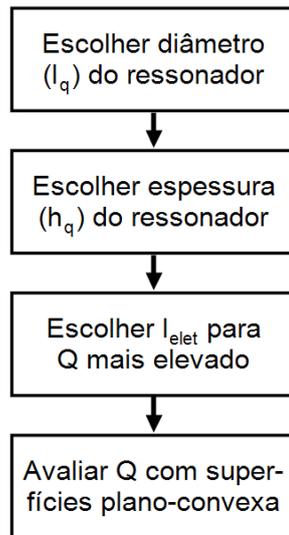


Figura 2.15: Fluxograma para processo de otimização do fator de qualidade em disco ressonadores de quartzo.

#### 2.4.4 Ressonadores miniaturizados

Nessa subseção, faz-se uma análise mais detalhada do fator de qualidade para um disco ressonador com  $l_q = 5$  mm e espessura entre 200 e 400  $\mu\text{m}$  o que corresponde, para ressonadores plano-plano, a frequências de operação entre 4,15 e 8,3 MHz. O fluxograma apresentado na Figura 2.15 pode ser utilizado para se elevar o fator de qualidade do dispositivo otimizando para isso a largura dos eletrodos ( $l_{elet}$ ) e a espessura da superfície curva no centro do disco ( $h_c$ ).

Para um diâmetro  $l_q = 5$  mm, observa-se que para a faixa de frequência desejada a ressonância em 8,3 MHz fornece um fator de qualidade mais elevado, conforme Figura 2.10, o que também está justificado no gráfico da Figura 2.12 para  $h_q = 200$   $\mu\text{m}$ , onde observa-se também que para  $l_{elet}/l_q = 0,85$  o fator de qualidade alcança valor máximo, com um aumento de quase 3 vezes em relação a razão  $l_{elet}/l_q = 0,5$ .

A próxima etapa é verificar o comportamento de  $Q$  quando o disco ressonador é feito plano-convexo. Para tanto escolheu-se a razão  $l_{elet}/l_q = 0,75$  e  $g = 0,5$  mm, uma captura de tela para essa geometria pode ser visualizada na Figura 2.16.

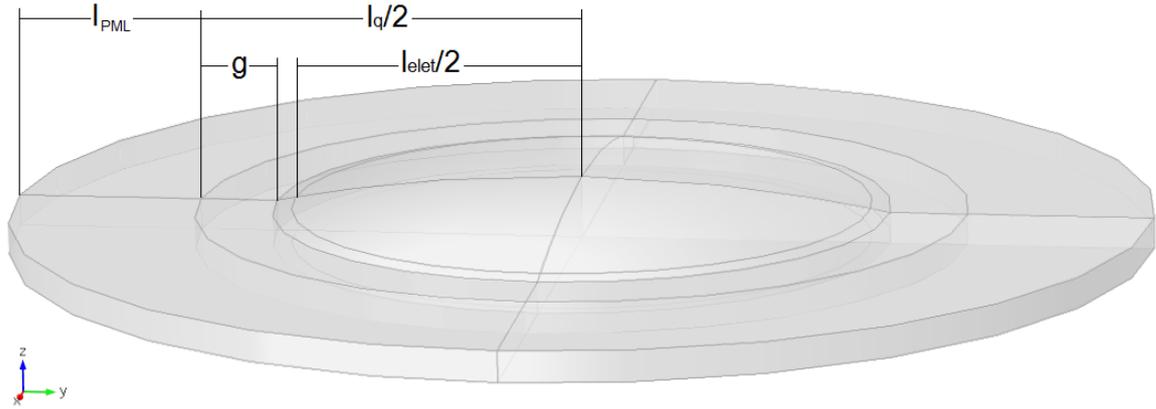


Figura 2.16: Disco ressonador de quartzo plano-convexo.  $h_q = 200 \mu\text{m}$ ,  $l_q = 5 \text{ mm}$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $g = 0,5 \text{ mm}$  e  $l_{elet}/l_q = 0,75$ .

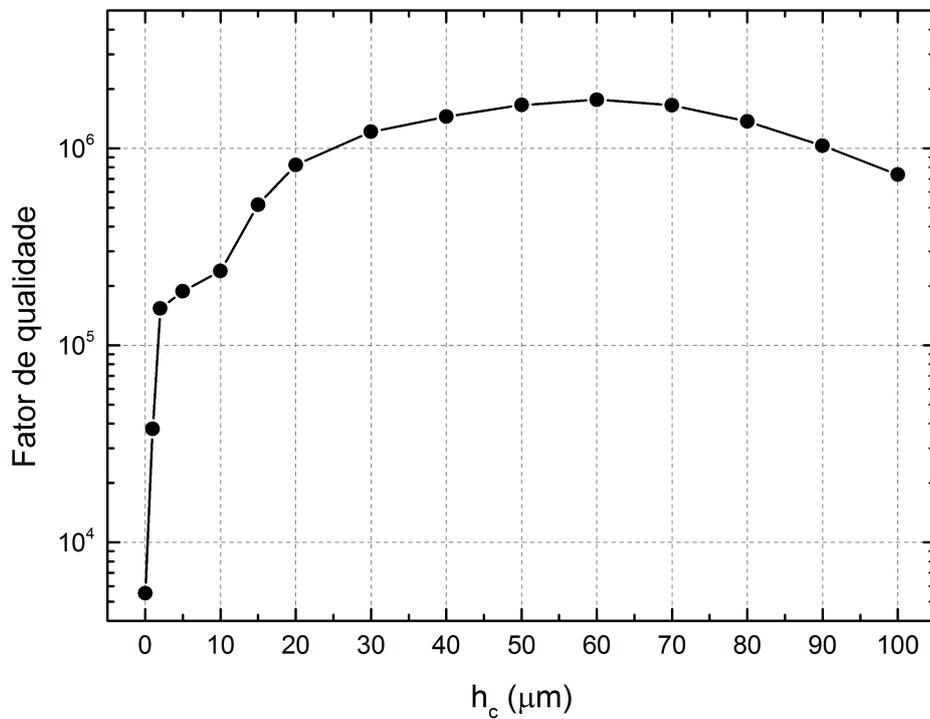


Figura 2.17: Comportamento do fator de qualidade para o disco de quartzo plano-convexo com as seguintes dimensões:  $h_q = 200 \mu\text{m}$ ,  $l_q = 5 \text{ mm}$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $g = 0,5 \text{ mm}$  e  $l_{elet}/l_q = 0,75$ .

Os resultados das simulações do fator de qualidade variando  $h_c$  é mostrado na Figura 2.17. Está sendo investigado o comportamento do fator de qualidade com concavidade para diâmetros menores que 5 mm. Pode-se observar que na faixa analisada o valor máximo de  $Q$  ocorre para  $h_c = 60 \mu\text{m}$ . Um resumo das etapas de otimização realizadas é encontrado na Tabela 2.5. Observa-se que apenas ajustando a relação  $l_{elet}/l_q = 0,75$  o fator de qualidade chega a dobrar de valor, mas a grande

Tabela 2.5: Resumo do processo de otimização do fator de qualidade no disco ressonador de quartzo. Parâmetros fixos usados na simulação:  $h_q = 200 \mu\text{m}$ ,  $l_q = 5 \text{ mm}$  e  $g = 0,5 \text{ mm}$ .

Configuração	$f$ (MHz)	$Q$
$l_{elet}/l_q = 0,5$ $h_c = 0$ (plano-plano)	8,3651	$2,488 \times 10^3$
$l_{elet}/l_q = 0,75$ $h_c = 0$ (plano-plano)	8,3461	$5,510 \times 10^3$
$l_{elet}/l_q = 0,75$ $h_c = 60 \mu\text{m}$ (plano-convexo)	6,6898	$1,764 \times 10^6$

contribuição é alcançada com a geometria plano-convexo, chegando a um aumento de praticamente três ordens de grandeza. Devido ao aumento efetivo da espessura no centro do ressonador a ressonância passa a ocorrer numa frequência mais baixa.

### 2.4.5 Perdas nos eletrodos

Utilizando as dimensões do ressonador otimizado da subseção anterior avalia-se agora a presença de eletrodos de alumínio com uma espessura  $h_{elet} = 100 \text{ nm}$ . Nas configurações de dispositivos piezoelétricos os eletrodos são modelados como *Linear elastic material* isso permite atribuir um fator de perdas isotrópico,  $FP_{elet}$ , de valor adimensional onde 0 corresponde a ausência de perda. Um resumo dos resultados das simulações é apresentado na Tabela 2.6. Observa-se um aumento do fator de qualidade quando a espessura dos eletrodos é inserida na modelagem com  $h_c = 0 \mu\text{m}$ , porém, a partir de  $FP_{elet} = 10^{-2}$  o fator de qualidade é reduzido como seria de se

Tabela 2.6: Fator de qualidade em função das perdas nos eletrodos para um disco de quartzo. Parâmetros fixos usados na simulação:  $h_q = 200 \mu\text{m}$ ,  $l_q = 5 \text{ mm}$ ,  $l_{elet}/l_q = 0,75$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$  e  $g = 0,5 \text{ mm}$ .

$h_{elet}$ (nm)	FP <sub>elet</sub>	$h_c = 0 \mu\text{m}$		$h_c = 60 \mu\text{m}$	
		$f$ (MHz)	$Q$	$f$ (MHz)	$Q$
0	-	8,3461	$5,510 \times 10^3$	6,6898	$1,764 \times 10^6$
100	0	8,3393	$8,575 \times 10^3$	6,6896	$1,761 \times 10^6$
	$10^{-3}$	8,3393	$8,575 \times 10^3$	6,6896	$1,754 \times 10^6$
	$10^{-3}$	8,3393	$8,575 \times 10^3$	6,6896	$1,700 \times 10^6$
	$10^{-2}$	8,3393	$8,573 \times 10^3$	6,6896	$1,298 \times 10^6$
	$10^{-1}$	8,3393	$8,554 \times 10^3$	6,6896	$3,861 \times 10^5$
	1	8,3393	$8,363 \times 10^3$	6,6896	$4,811 \times 10^4$
	10	8,3393	$6,839 \times 10^3$	6,6896	$4,932 \times 10^3$

esperar. Para as situações com  $h_c = 60 \mu\text{m}$  observa-se sempre uma redução do fator de qualidade a partir da situação com espessura nula de eletrodos.

Apesar do fator de perdas inserido nos eletrodos não corresponder exatamente as características do alumínio, como ocorreu para o quartzo, é possível confirmar a eficácia do modelo do transdutor também com o mecanismo de perda relacionado aos eletrodos.

### 2.4.6 Espectroscopia de impedância

Nessa seção avalia-se o fator de qualidade através de simulação no domínio da frequência onde o módulo e a fase da impedância elétrica são obtidos para um disco ressonador de quartzo plano-plano no corte  $\theta = 32^\circ$  e  $\varphi = 0^\circ$ . Os seguintes dados da simulação foram usados:  $h_q = 350 \mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 0$ ,  $l_q = 10,5 \text{ mm}$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $l_{elet}/l_q = 0,5$  e passo de 500 Hz.

O comportamento da impedância na região da frequência de ressonância para o primeiro harmônico pode ser visualizado na Figura 2.18. O tempo de simulação foi de aproximadamente 24 horas, correspondendo a um total de 600 pontos. Os resultados de simulação são comparados com os resultados experimentais discutidos na Seção 4.2.1. Utilizando o método de extração de parâmetros de Máximos e Mínimos [32] foi possível calcular o fator de qualidade para o disco ressonador a partir dos dados experimentais e de simulação, esses resultados podem ser visualizados na Tabela 2.7. Observa-se em especial uma discrepância considerável quanto a resistência elétrica, quase uma ordem de grandeza. De fato espera-se que o experimento apresente mais perdas, isso é refletido num valor inferior para o fator de qualidade.

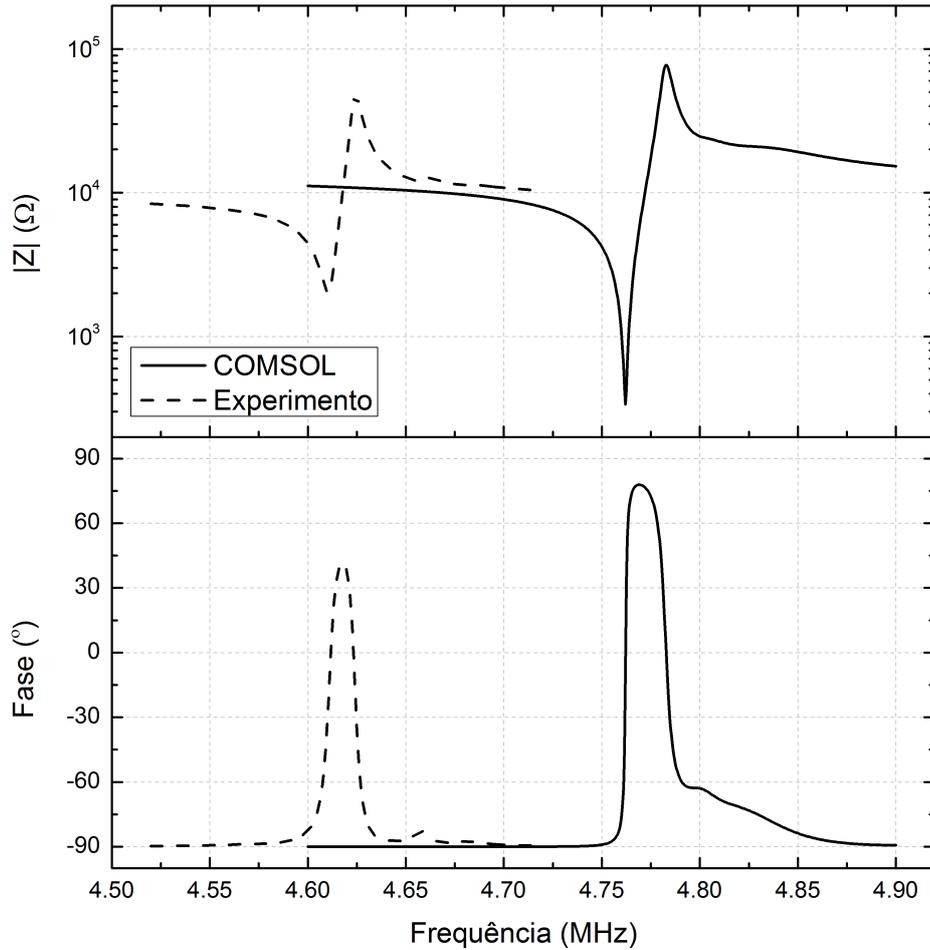


Figura 2.18: Comportamento da impedância na região do primeiro harmônico para o disco ressonador de quartzo plano-plano para o corte  $\theta = 32^\circ$  e  $\varphi = 0^\circ$ . Dados da simulação:  $h_q = 350 \mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 0$ ,  $l_q = 10,5 \text{ mm}$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $l_{elet}/l_q = 0,5$ .

Tabela 2.7: Extração de parâmetros para o disco ressonador de quartzo plano-plano para o corte  $\theta = 32^\circ$  e  $\varphi = 0^\circ$ . Dados da simulação:  $h_q = 350 \mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 0$ ,  $l_q = 10,5 \text{ mm}$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $l_{elet}/l_q = 0,5$ .

Parâmetro	Dados	
	experimento	simulação
$f$ (MHz)	4,6094	4,7621
$R$ ( $k\Omega$ )	2,0215	0,33783
$L$ (mH)	51,7331	48,8593
$C$ (fF)	23,0368	22,8619
$C_0$ (pF)	3,72076	2,5864
$Q$	741	3441 (via estudo <i>eigenfrequency</i> ) 4327 (via Mét. Máx. Mín.)

### 2.4.7 Análise das deformações no ressonador

Deformações obtidas no COMSOL a partir do disco ressonador de quartzo operando no modo de cisalhamento de espessura são visualizadas na sequência de imagens apresentada na Figura 2.19, onde um fator de escala foi utilizado. Observa-se que a onda de cisalhamento propaga-se ao longo da espessura do disco, mas as deformações ocorrem primordialmente ao longo da direção-x, isso ocorre pois o efeito piezoelétrico associado ao corte-AT do quartzo ocorre mais intensamente no eixo-x (ver Apêndice A.1). Verificando-se tais deformações sem nenhum fator de escala observa-se através da escala de cores que as deformações são mais intensas na região onde os eletrodos estão presentes, ou seja, no centro do ressonador.

O entendimento do sentido de vibração do disco é um dado importante para o projeto do ressonador e permite que numa situação em que o disco é apoiado ou sustentado a posição para tal suporte possa ser escolhida de modo a não influenciar em outros parâmetros do projeto, em especial no fator de qualidade. Assim, com o intuito de verificar o comportamento do fator de qualidade numa situação em que o ressonador está sustentado em duas posições, de maneira semelhante ao observado em cristais de quartzo utilizados em circuitos osciladores (ver Figura 2.20(a)), avaliou-se inicialmente, duas geometrias de ressonadores (plano-plano e plano-convexo) onde três posições para os suportes são examinadas, conforme Figura 2.20(b).

Na modelagem, os suportes são de alumínio e pôde-se considerar duas situações como condição de contorno, na primeira apenas a superfície do suporte mais afastada do disco de quartzo é fixada exatamente como se mostra na Figura 2.20(b), permitindo que o corpo do suporte possa ocasionalmente se deformar em decorrência das vibrações no quartzo. Na segunda condição de contorno toda a região do suporte é mantida fixa, ou seja, todos os pontos do suporte ficarão imóveis mesmo estando em contato com o quartzo vibrando. Uma captura de tela do ressonador com suportes é apresentada na Figura 2.20(c). Com intuito de analisar apenas a contribuição da sustentação mecânica do ressonador no fator de qualidade não foram consideradas perdas nos suportes.

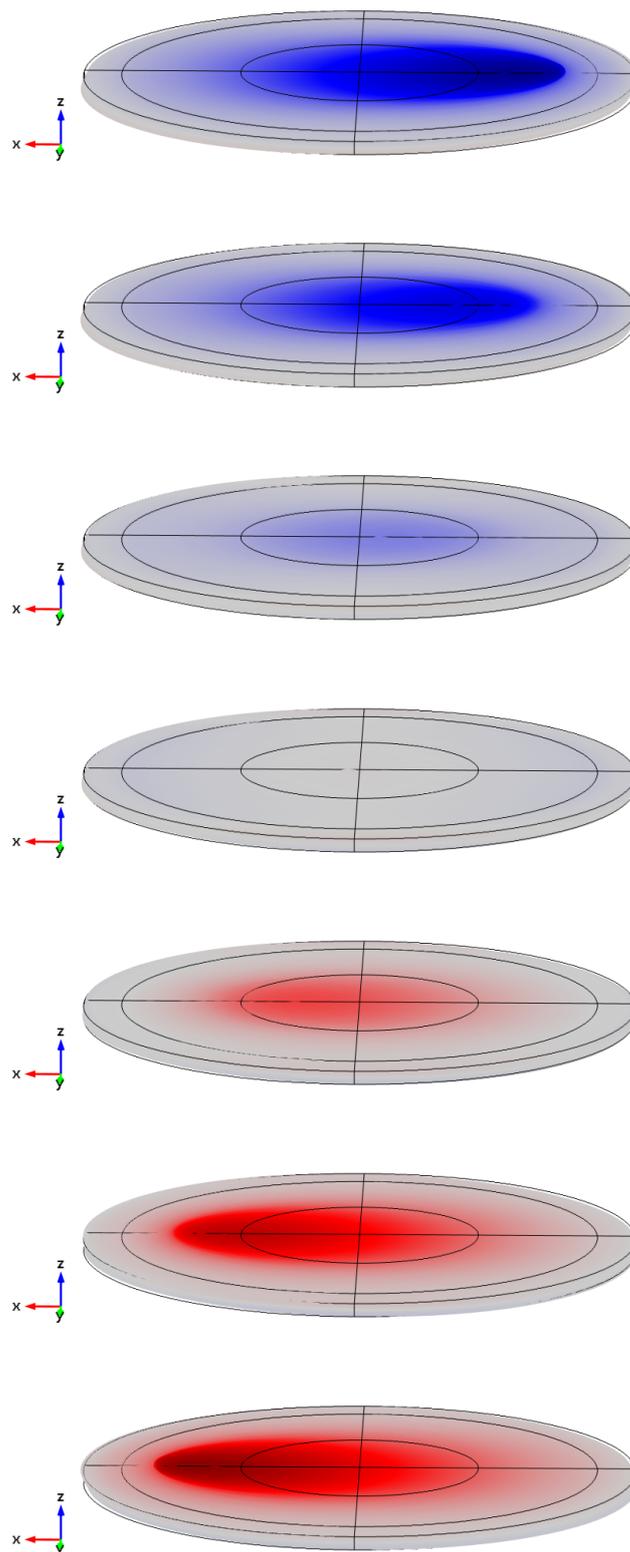


Figura 2.19: Deformação do primeiro harmônico do disco ressonador de quartzo operando no modo de cisalhamento de espessura. As cores azul e vermelha correspondem à deslocamentos em sentidos opostos na direção-x. Meio-ciclo completo de vibração é mostrado. Para facilitar a visualização das deformação usou-se um fator de escala bastante exagerado ( $\sim 10^6$ ).

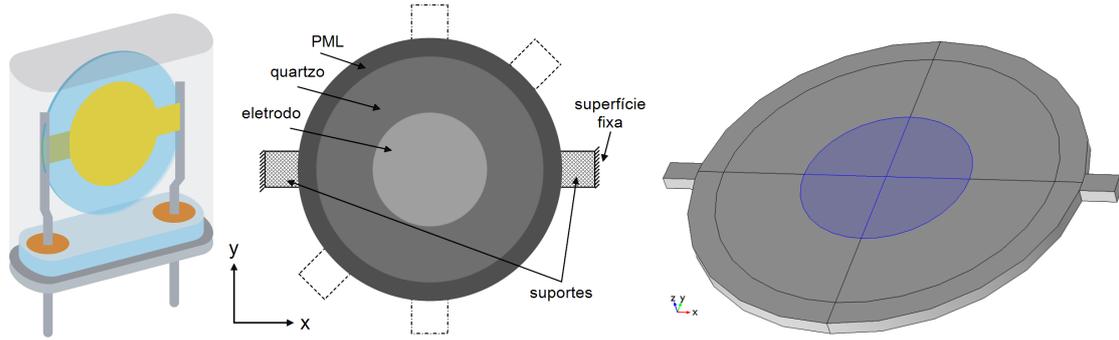


Figura 2.20: (a) Típico oscilador comercial de quartzo. (b) Ilustração do disco ressonador com suportes. (c) Desenho dos suportes no COMSOL.

Tabela 2.8: Análise da posição dos suportes.  $l_{PML} = 1,2$  mm,  $h_{elet} = 0$ .

geometria		plano-plano		plano-convexo	
		$h_q = 400 \mu\text{m}$ $l_q = 15$ mm	$h_c = 0 \mu\text{m}$ $l_{elet}/l_q = 0,5$	$h_q = 200 \mu\text{m}$ $l_q = 15$ mm	$h_c = 60 \mu\text{m}$ $l_{elet}/l_q = 0,75$
posição dos suportes		superfície fixada	suporte todo fixado	superfície fixada	suporte todo fixado
sem suportes	$f$ (MHz)	4,17340		6,68981	
	$Q$	8898		$1,7643 \times 10^6$	
na direção-x	$f$ (MHz)	4,17100	4,17103	6,68811	6,68811
	$Q$	5025	6647	$1,62992 \times 10^6$	$1,62969 \times 10^6$
na direção-y	$f$ (MHz)	4,17101	4,17103	6,68811	6,68811
	$Q$	6124	6166	$1,62989 \times 10^6$	$1,62988 \times 10^6$
em $45^\circ$	$f$ (MHz)	4,17099	4,17103	6,68811	6,68811
	$Q$	6274	6594	$1,62996 \times 10^6$	$1,62997 \times 10^6$

Os resultados são organizados e mostrados na Tabela 2.8. Primeiramente, conclui-se que a frequência de ressonância sofre uma redução de 0,05% para a situação de ressonador plano-plano e de 0,02% para o ressonador plano-convexo. Nota-se também que para a situação de ressonador plano-plano um fator de qualidade mais elevado é observado na condição de contorno em que todo o suporte é fixado e, quando posicionado ao longo da direção-x, apresenta um fator de qualidade ligeiramente mais elevado em relação as outras posições. Já para o ressonador plano-convexo as variações do fator de qualidade para as situações simuladas são mínimas e para efeitos práticos de projeto pode-se dizer que não contribuem numa posição mais ou menos favorável para o posicionamento dos suportes. Isso muito provavelmente está relacionado a presença da concavidade, que reforça o fato de servir como concentradora de energia vibracional no centro do ressonador e, então, o efeito mecânico analisado não

contribuiu consideravelmente no fator de qualidade. Mas, vale enfatizar, que é notória a diminuição do fator de qualidade quando os suportes são inseridos seja qual for a geometria do ressonador.

Uma vez que nessa modelagem tem-se os suportes posicionados após a região PML seria interessante também analisar o comportamento do fator de qualidade na situação onde os suportes fazem contato com a região ativa do ressonador, ou seja, antes da região PML. Nesse sentido, realizou-se uma segunda modelagem, onde três configurações de estruturas foram consideradas, os detalhes para cada uma delas podem ser observados nas Figuras 2.21, 2.22 e 2.23. Os resultados para o fator de qualidade estão na Tabela 2.9.

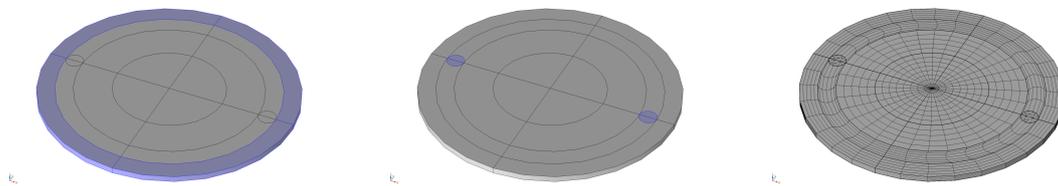


Figura 2.21: (a) PML. (b) Superfícies fixas. (c) Malha.

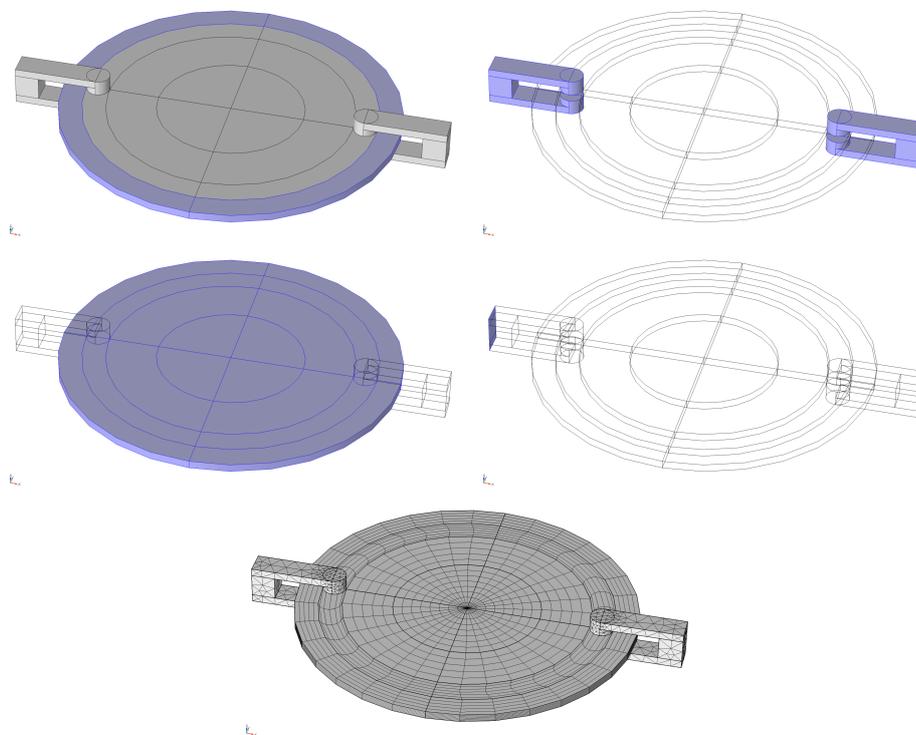


Figura 2.22: (a) PML. (b) Alumínio. (c) Quartzo. (d) Superfícies fixas. (e) Malha.

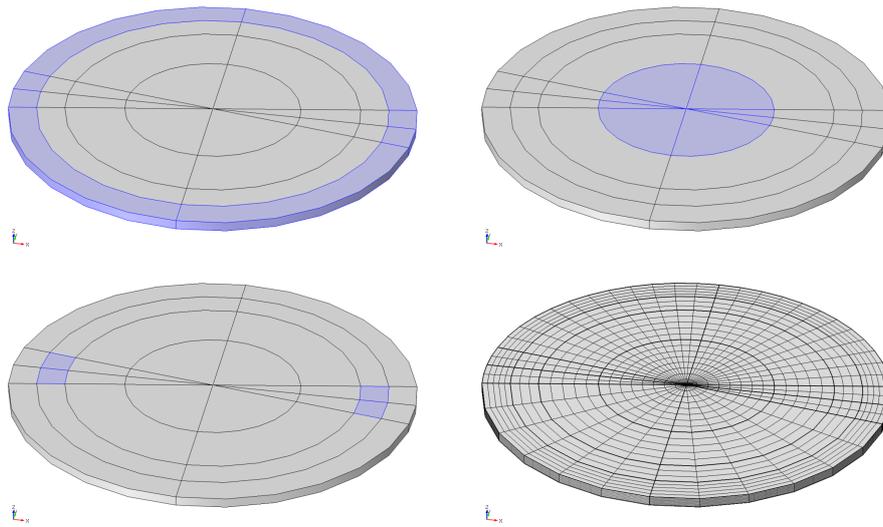


Figura 2.23: (a) PML. (b) Eletrodos. (c) Superfícies fixas. (d) Malha.

Analisando os dados da Tabela 2.9 vê-se que nas três configurações o fator de qualidade é maior quando as superfícies estão fixadas ao longo da direção-x. O que, a princípio contraria a intuição uma vez que, se as deformações ocorrem ao longo da direção-x então, de modo a não interferir de maneira considerável no fator de qualidade, se poderia esperar que isso aconteceria se os suportes estivessem colocados ao longo da direção-y. E se observa também que o fator de qualidade encontrado nas situações de superfície fixada ao longo da direção-x supera o valor da situação onde nenhuma superfície está fixada. Como sugestão para essas contradições pode-se fazer uma simulação de modo que os suportes são também considerados como PML.

Tabela 2.9: Análise da posição dos suportes. Disco plano-plano,  $h_q = 400 \mu\text{m}$ ,  $l_q = 15 \text{ mm}$ ,  $l_{elet}/l_q = 0,5$ ,  $l_{PML} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $h_{elet} = 0$ .

Configuração superfície fixa	Fator de qualidade		
	Figura 2.21	Figura 2.22	Figura 2.23
sem fixação	~8898		
em x	14447	11382	16185
em y	7521	7451	7618

### 2.4.8 Influência da temperatura

A depender da orientação cristalográfica variações de temperatura provocam consideráveis variações nas frequências de ressonância. Para os cristais de cortes-AT e -ST o comportamento da frequência com a temperatura pode ser descrito por uma função cúbica, conforme a Equação 2.3. Os coeficientes  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são sensíveis a pequenas variações de  $\theta$  para um mesmo corte, os valores para o corte-AT são encontrados na Tabela 2.10 [70]. Portanto, a variação da frequência pode ser precisamente controlada por pequenas variações do ângulo de corte, como pode ser visto na Figura 2.24(a) para o corte-AT [42].

$$\frac{\Delta f}{f} = A_1 (T - T_0) + A_2 (T - T_0)^2 + A_3 (T - T_0)^3 \quad (2.3)$$

Tabela 2.10: Coeficientes de temperatura para um disco de quartzo no corte-AT.

quartzo corte-AT	
$A_1$	$(-1,293 - 0,08308 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-6}$
$A_2$	$(-2,889 - 0,0990 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-9}$
$A_3$	$(101,3 + 0,200 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-12}$
em que $\Delta\theta = \theta - 35^\circ 30'$	

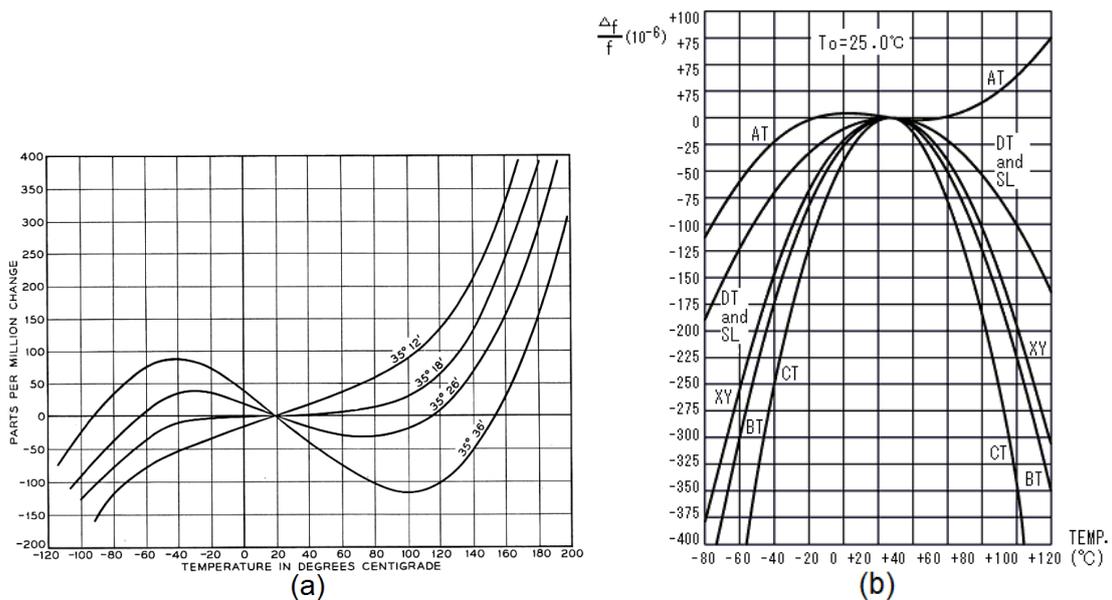


Figura 2.24: (a) Dependência do ângulo de corte nas curvas de frequência  $\times$  temperatura em ressonadores de quartzo no corte-AT. (b) Curvas para o comportamento frequência  $\times$  temperatura para diversos cortes no quartzo.

A constante  $T_0$  representa o ponto de inflexão da função, para o corte-AT  $T_0 = 25$  °C e para o corte-SC  $T_0 = 92$  °C. Esse comportamento cúbico está em contraste com os outros tipos de corte que têm características de estabilidade térmica seguindo um comportamento parabólico, como se visualiza na Figura 2.24(b) [71]. Isso faz com que o corte-AT seja muito indicado para aplicações onde se deseja uma forte estabilidade na frequência sobre uma larga faixa de temperatura.

O quartzo apresenta transição de fase  $\alpha - \beta$  a 573 °C, acima dessa temperatura o cristal perde suas propriedades piezoelétricas tornando-se inútil como sensor ou componente eletrônico [38].

### Modelagem com temperatura

Os valores das constantes elásticas do quartzo costumam ser superiores quando comparados a de outros sólidos de peso específico semelhante, além das constantes serem pouco sensíveis a variação de temperatura. O corte-AT do quartzo é o corte comumente utilizado quando não se deseja que o ressonador seja sensível a temperatura, ou seja, quando se pode considerar que o cristal tem um coeficiente de temperatura nulo numa certa faixa de temperatura. Na referência [42], Mason determina o comportamento da frequência de ressonância como função do ângulo de corte e da temperatura, e mostra que as constantes elásticas independentes em função da temperatura para o quartzo podem ser obtidas pelas Equações 2.4 a 2.10 (em unidade de N/m<sup>2</sup>).

$$c_{11} = 86,75 \times 10^9 \left[ 1 - 53,5 \times 10^{-6} (T - 50) - 75 \times 10^{-9} (T - 50)^2 - 15 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.4)$$

$$c_{12} = 6,15 \times 10^9 \left[ 1 - 3030 \times 10^{-6} (T - 50) - 1500 \times 10^{-9} (T - 50)^2 + 1910 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.5)$$

$$c_{13} = 9,6 \times 10^9 \left[ 1 - 510 \times 10^{-6} (T - 50) - 2000 \times 10^{-9} (T - 50)^2 + 600 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.6)$$

$$c_{14} = 18,2 \times 10^9 \left[ 1 + 90 \times 10^{-6} (T - 50) - 270 \times 10^{-9} (T - 50)^2 - 630 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.7)$$

$$c_{33} = 104,8 \times 10^9 \left[ 1 - 165 \times 10^{-6} (T - 50) - 187 \times 10^{-9} (T - 50)^2 - 410 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.8)$$

$$c_{44} = 58,58 \times 10^9 \left[ 1 - 171 \times 10^{-6} (T - 50) - 212 \times 10^{-9} (T - 50)^2 - 65 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.9)$$

$$c_{66} = 40,26 \times 10^9 \left[ 1 + 168 \times 10^{-6} (T - 50) - 5 \times 10^{-9} (T - 50)^2 - 167 \times 10^{-12} (T - 50)^3 + \dots \right] \quad (2.10)$$

Tabela 2.11: Constantes elásticas para o quartzo em função da temperatura.

$c_{pq}$	$(\times 10^9 N/m^2)$				
	Yang [39]	Equações 2.4 a 2.10			
		25 °C	50 °C	100 °C	200 °C
$c_{11}$	86,74	86,86	86,75	86,5	85,9
$c_{12}$	6,99	6,6	6,15	5,19	3,18
$c_{13}$	11,91	9,71	9,6	9,3	8,45
$c_{14}$	17,91	18,15	18,2	18,26	18,29
$c_{33}$	107,2	105,2	104,8	103,88	101,62
$c_{44}$	57,94	58,82	58,58	58,04	56,78
$c_{66}$	39,88	40,09	40,26	40,59	41,24

Os valores das constantes elásticas calculadas para temperaturas de 25, 50, 100 e 200 °C são mostrados na Tabela 2.11. Observa-se que apenas  $c_{14}$  e  $c_{66}$  aumentam com o aumento da temperatura, este comportamento está relacionado à transição de fase  $\alpha - \beta$  que ocorre no quartzo [38]. Para a modelagem da influência da temperatura no COMSOL usou-se o resultado dessas equações na matriz elástica do quartzo, onde adotou-se o ângulo  $\theta$  definido no sentido anti-horário e a matriz piezoelétrica na orientação direita.

Para a estrutura em forma de disco a variação da frequência em função da temperatura é esboçada na Figura 2.25, com a variação da frequência calculada como  $(f - f_0)/f_0$  onde  $f_0$  é a frequência de ressonância na temperatura de referência. As frequências de ressonância do primeiro harmônico são analisadas e a variação em partes por milhão corresponde a normalização para  $T = 25$  °C. Verifica-se uma boa concordância entre a simulação realizada no COMSOL com os valores obtidos pela Equação 1.9, porém a variação da frequência chega a ser uma ordem de grandeza maior quando comparada com outras referências [42, 72, 71]. Tal discrepância pode estar relacionada a ordem do harmônico analisado, mas ainda assim o comportamento da curva com a temperatura é muito semelhante.

Observa-se na Figura 2.25 que a menor variação de frequência na faixa de 0 a 200 °C corresponde a  $\theta$  entre 34° e 34,5°, um pouco diferente do valor que se observa na literatura, 35,25°.

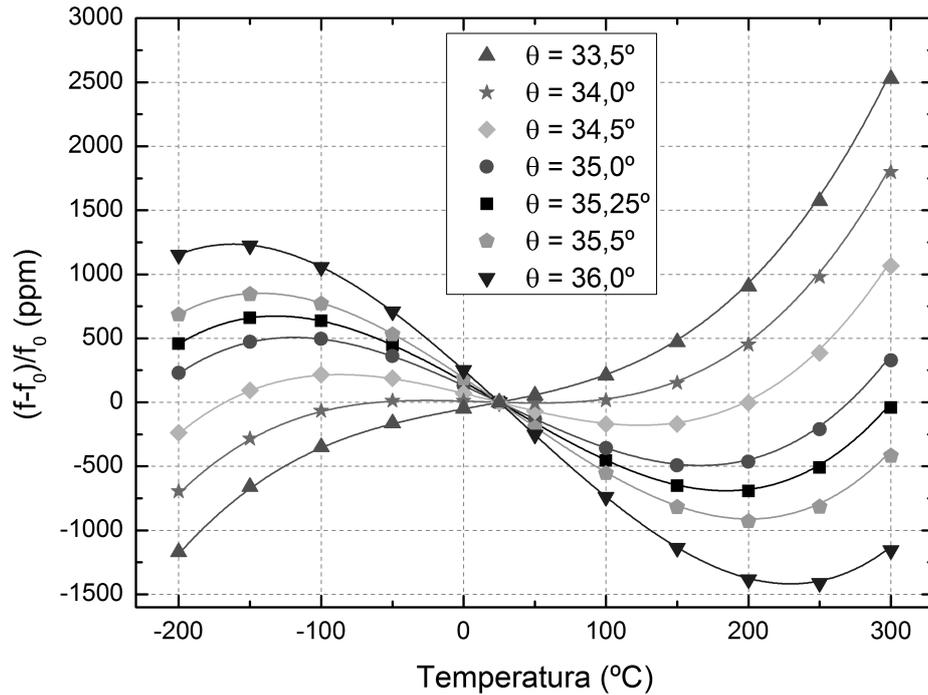


Figura 2.25: Variação da frequência de ressonância fundamental como função da temperatura para um disco de quartzo no corte-AT. A normalização ocorre para a frequência de ressonância na temperatura de 25 °C. Os pontos são os resultados das simulações no COMSOL e as linhas contínuas reproduzem o comportamento da Equação 1.9.  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230$   $\mu$ m,  $h_{elet} = 100$  nm.

## 2.5 Estruturas ressonantes em 3D com capas

Nessa seção as estruturas em forma de placa e disco são montadas ou suportadas em estruturas também de quartzo e se assemelham as geometrias dos sensores de pressão da *Schlumberger* e da *Quartzdyne*.

### 2.5.1 Geometrias e malha

Para a geometria do sensor da *Schlumberger* a placa de quartzo é encapsulada por uma casca cilíndrica fechada em suas extremidades. Os raios interno e externo são  $(l_q/2)$  e  $(l_q/2 + a)$ , respectivamente, como esquematizado na Figura 2.26(a). Para as simulações determinou-se os parâmetros  $a = b = c = 800$   $\mu$ m. A malha para essa estrutura pode ser visualizada na Figura 2.26(b).

Para a geometria do sensor da *Quartzdyne* o disco de quartzo é encapsulado por duas capas protetoras. Internamente essas capas são vazadas num formato semi-esférico. A construção dessa geometria no COMSOL foi realizada pela revolução do

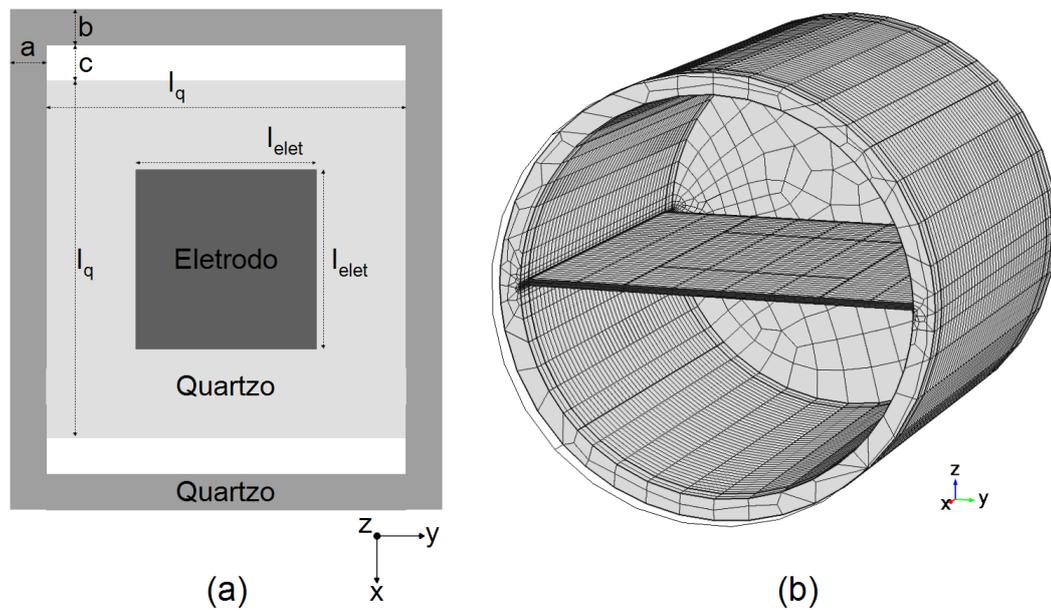


Figura 2.26: (a) Modelo em 2D da geometria semelhante ao sensor da *Schlumberger*. (b) Malha utilizada na modelagem, a tampa frontal foi removida para facilitar a visualização do interior.  $l_q = 15 \text{ mm}$ ,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 100 \text{ nm}$  e  $a = b = c = 800 \text{ }\mu\text{m}$ .

plano apresentado na Figura 2.27(a) com  $d = e = 800 \text{ }\mu\text{m}$ . A malha da estrutura resultante em 3D é mostrada na Figura 2.27(b), totalizando 7168 elementos. O disco ressonador está considerado no vácuo.

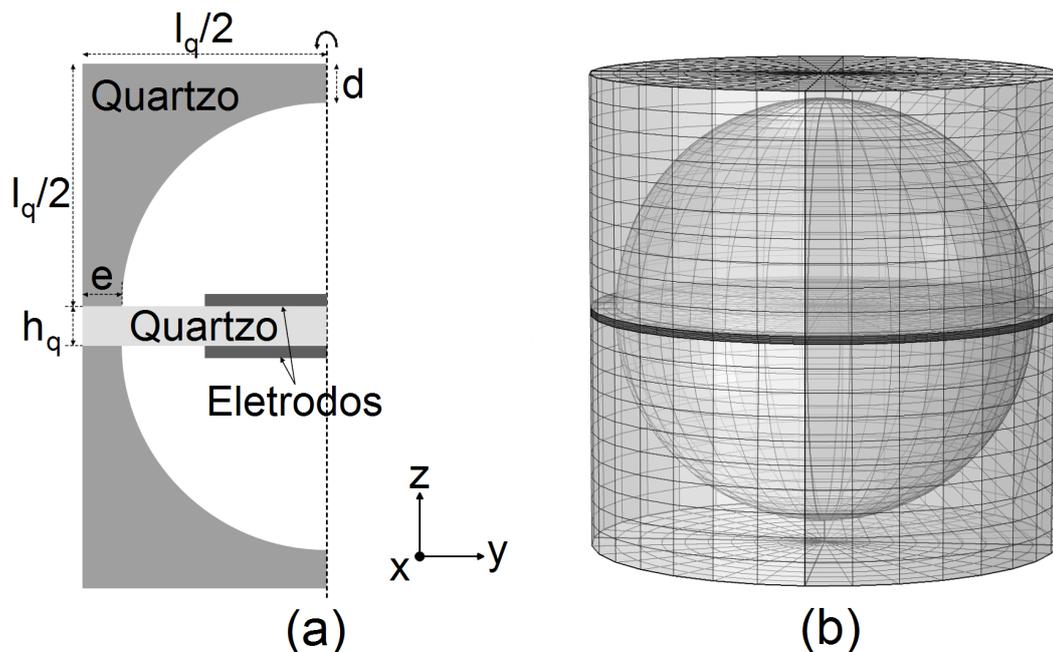


Figura 2.27: (a) Secção em corte transversal da estrutura de disco modelada com as capas protetoras. (b) Malha obtida durante a revolução.  $l_q = 15 \text{ mm}$ ,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 100 \text{ nm}$  e  $d = e = 800 \text{ }\mu\text{m}$ .

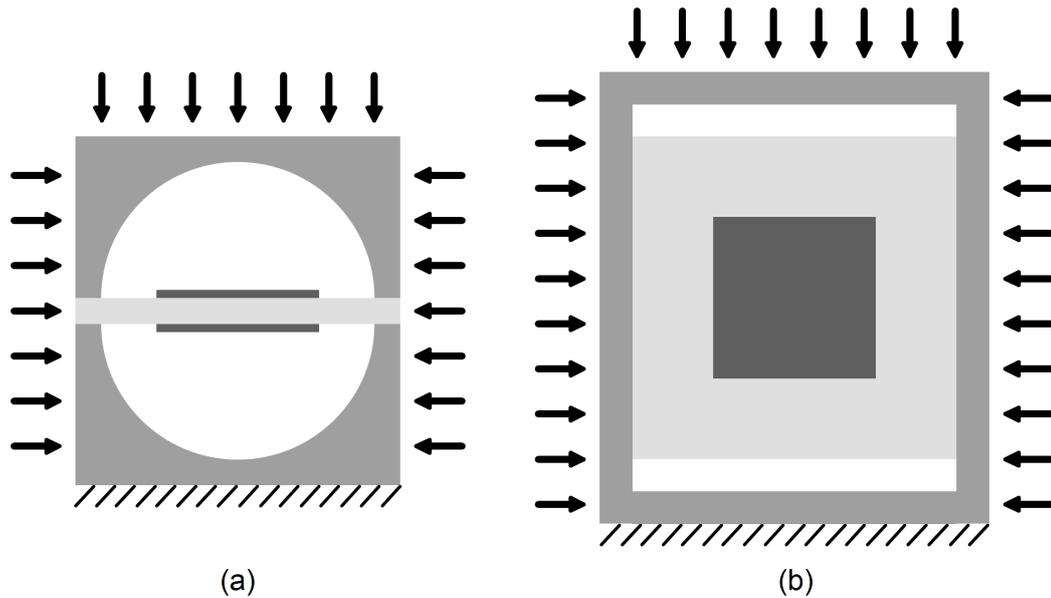


Figura 2.28: Aplicação de pressão na estrutura semelhante ao sensores da *Quartzdyne* (a) e da *Schlumberger* (b).

### 2.5.2 Aplicação de pressão

A resistência mecânica e a estabilidade do material dependem criticamente da preparação de sua superfície como o polimento mecânico e ataque químico, sabe-se que o quartzo cristalino é aproximadamente 24 vezes mais forte na compressão do que na tensão. Assim, deseja-se projetar a estrutura ressonante de modo que ela opere em compressão [31].

As condições de contorno referentes a aplicação de pressão nas superfícies do ressonador envolvido por capas (*Quartzdyne*) foram determinadas conforme a Figura 2.28(a). No COMSOL, usou-se a opção “*boundary load*” para se aplicar a pressão. Exige-se, para a correta modelagem, que pelo menos três pontos da estrutura sejam fixados, de maneira a evitar rotações ou translações da mesma dentro dos seus seis graus de liberdade. Assim, para a estrutura do sensor da *Quartzdyne* fixou-se o plano de sua base cilíndrica inferior como se vê na Figura 2.28(a).

Uma sequência de imagens referentes a deformação da estrutura na faixa de pressão de  $1,01 \times 10^5$  Pa a  $1,4 \times 10^8$  Pa (14,7 psi a 20000 psi) está presente na Figura 2.29. As deformações mostradas estão em um grau de escala bastante exagerado justamente para permitir uma análise comparativa a medida que o nível de pressão aumenta. Observa-se que a “cintura” do cilindro é fortemente afetada pela pressão, e é nessa

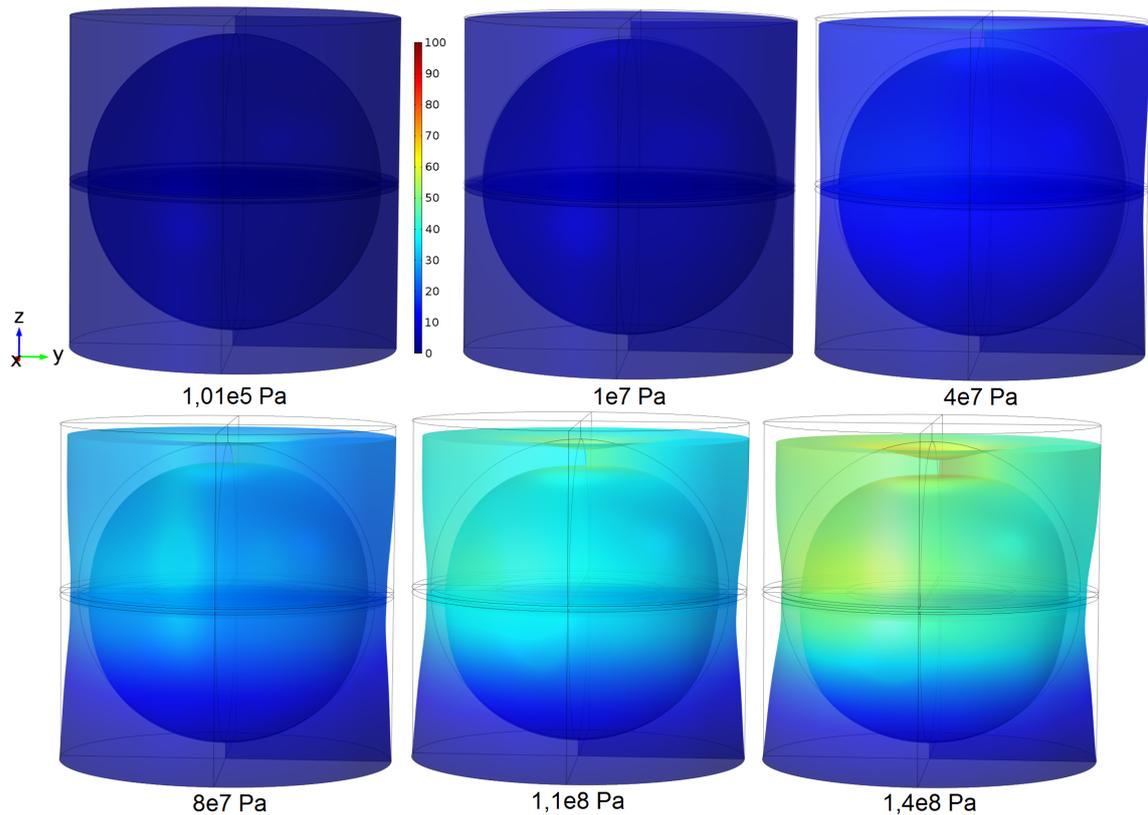


Figura 2.29: Deformação da estrutura com a aplicação de pressão numa temperatura de 50 °C. O fator de escala está bastante exagerado. Na legenda, a cor azul corresponde a mínima deformação e a cor vermelha a máxima deformação.  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230$   $\mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 100$  nm e  $d = e = 800$   $\mu\text{m}$ .

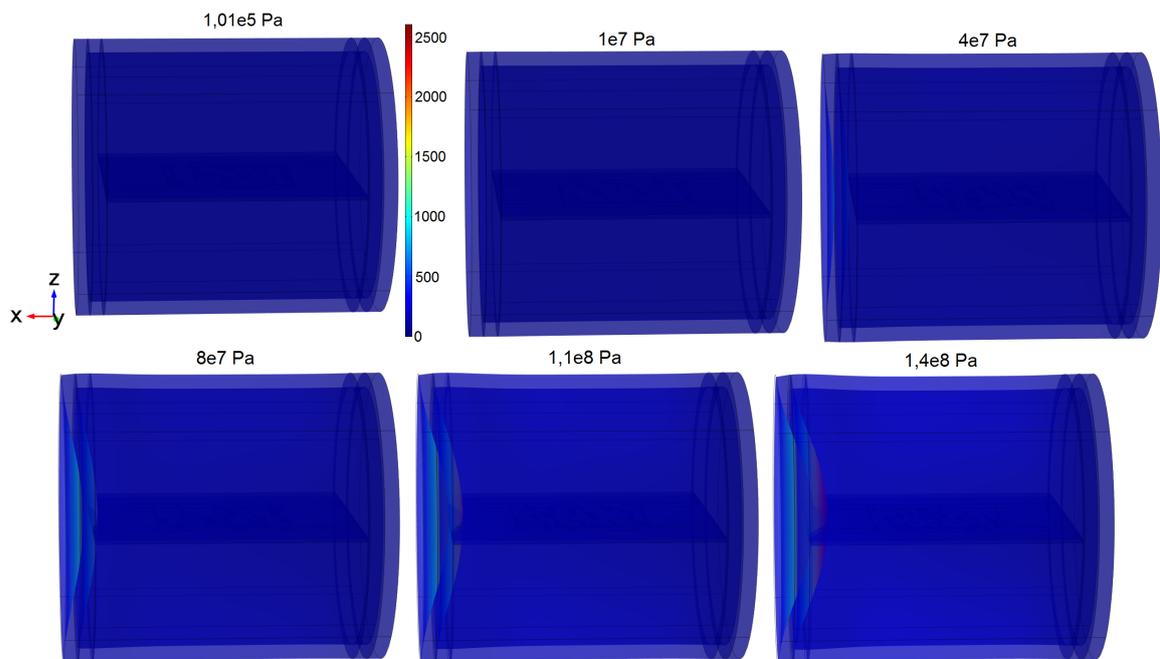


Figura 2.30: Deformação da estrutura baseada no sensor da *Schlumberger* com a aplicação de pressão numa temperatura de 50 °C. O fator de escala está bastante exagerado. Na legenda, a cor azul corresponde a mínima deformação e a cor vermelha a máxima deformação.  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230$   $\mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 100$  nm e  $a = b = c = 800$   $\mu\text{m}$ .

região que se encontra o disco ressonador com os eletrodos. Vê-se também que a região central do plano superior é fortemente afetada pela pressão. Esses efeitos podem ser minimizados escolhendo-se valores para  $d$  e  $e$  mais espessos.

Para a estrutura baseada no sensor da *Schlumberger* as condições de contorno são encontradas na Figura 2.28(b). Uma sequência de imagens mostrando a aplicação crescente de pressão pode ser visualizada na Figura 2.30. Novamente, assim como aconteceu para a estrutura da *Quartzdyne*, o plano oposto ao plano fixo é o mais afetado pela pressão. Observa-se também uma redução considerada na “cintura” do cilindro.

### 2.5.3 Aplicação de pressão e temperatura

No COMSOL, para se determinar a frequência de ressonância ao mesmo tempo que se aplica uma pressão estática na estrutura deve-se primeiro obter a tensão mecânica gerada como resultado da pressão aplicada. Portanto, seleciona-se inicialmente um estudo *stationary* e depois realiza-se um estudo *eigenfrequency* (ver Figura C.35).

Por fim, a resposta da frequência de ressonância como função de duas variáveis independentes, temperatura e pressão, foi obtida. As simulações ocorreram para limites de temperatura de 0 a 200 °C e pressões de 14 a 20000 psi. Os resultados obtidos para a estrutura do sensor da *Quartzdyne* se encontram na Tabela 2.12. O comportamento da variação da frequência em partes por milhão como função da temperatura e da pressão é apresentado na Figura 2.31, onde os dados da frequência são normalizados para a frequência de ressonância em 25 °C e 14,7 psi.

Tabela 2.12: Frequências de ressonância para diferentes pressões e temperaturas do ressonador baseado na estrutura da *Quartzdyne*.  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230$   $\mu$ m,  $h_{elet} = 100$  nm e  $d = e = 800$   $\mu$ m.

Pressão		Frequência (MHz)			
(Pa)	(psi)	25 °C	50 °C	100 °C	200 °C
$1,01 \times 10^5$	14,7	7,257514	7,256403	7,254224	7,252512
$1,0 \times 10^6$	145	7,257237	7,256062	7,253941	7,252186
$1,0 \times 10^7$	1450	7,254335	7,253237	7,251091	7,249280
$4,0 \times 10^7$	5803	7,244827	7,243666	7,241421	7,239549
$7,0 \times 10^7$	10155	7,235239	7,234028	7,231748	7,229750
$1,0 \times 10^8$	14507	7,225727	7,224445	7,222141	7,220030
$1,4 \times 10^8$	20310	7,212869	7,211635	7,209297	7,207002

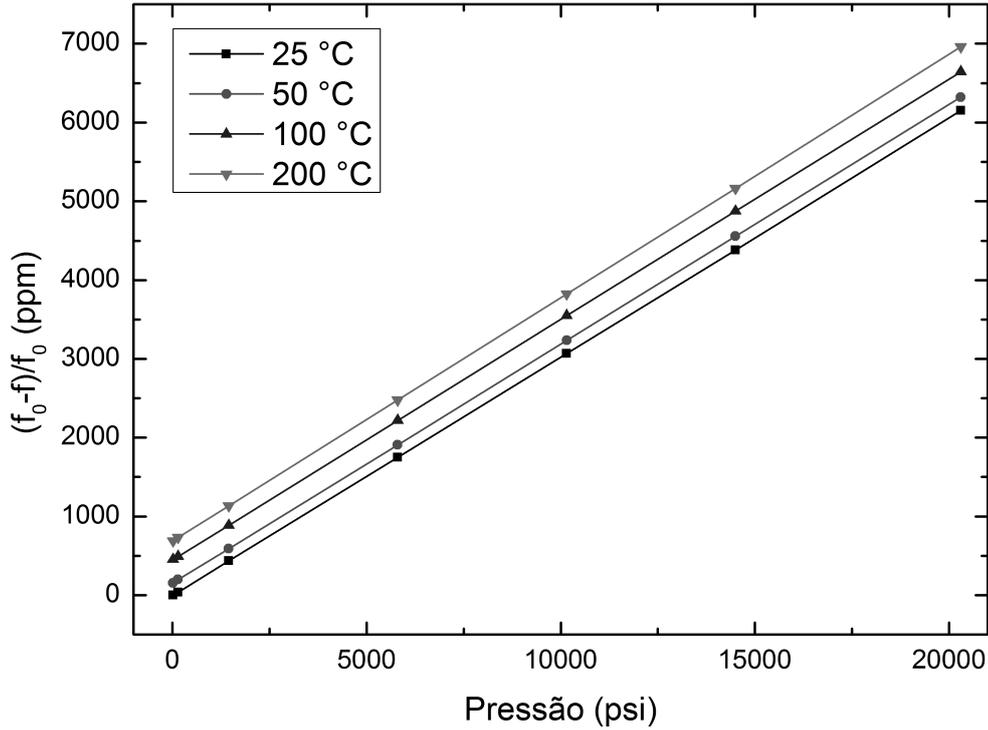


Figura 2.31: Variação da frequência em função da pressão para temperaturas constantes de 25, 50, 100 e 200 °C. Estrutura baseada no sensor da *Quartzdyne*.  $l_q = 15$  mm,  $l_{elet} = 0,5 \times l_q$ ,  $h_q = 230 \mu\text{m}$ ,  $h_{elet} = 100$  nm e  $d = e = 800 \mu\text{m}$ .

Para uma mesma temperatura a resposta da pressão é linear com praticamente a mesma inclinação em todas as temperaturas simuladas. De fato, esses resultados apresentam boa concordância com o comportamento observado no trabalho de Beerwinkle *et al* [56].

O comportamento da frequência de ressonância com a pressão, como mostrado na Tabela 2.12 permite conhecer a sensibilidade,  $S$ , da frequência em relação a pressão. Para a temperatura de 25 °C observa-se

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta p} = \frac{7212869 - 7257514}{20310 - 14,7} \approx -2,2 \text{ Hz/psi} \quad (2.11)$$

logo, considerando que a resolução na pressão do sensor desejado é de 0,01 psi, então, calcula-se uma resolução na frequência de 0,022 Hz, ou seja, uma vez que o ressonador esteja operando na sua frequência de ressonância deve-se garantir uma leitura da frequência com intervalo mínimo de 0,022 Hz para uma variação de pressão de 0,01 psi. Nessa situação um conversor de frequência para digital com erro relativo máximo

de

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{0,022}{7257514} \approx 3 \times 10^{-9} = 0,003 \text{ ppm} \quad (2.12)$$

deverá ser utilizado.

Como será apresentado no Capítulo 5 o conversor de frequência para digital desenvolvido para o projeto desse sensor de pressão apresenta erro relativo de 1 ppm, logo para  $f_0 = 7,257514$  MHz a resolução na frequência será de 7,257514 Hz o que fornece uma resolução na pressão de 3,29 psi.

## 2.6 Considerações finais

Nesse capítulo implementou-se no COMSOL *Multiphysics* um modelo computacional para o sensor de pressão a quartzo orientado no corte-AT e baseado nas geometrias dos sensores da *Quartzdyne* e *Schlumberger*. As simulações aconteceram sob três principais fatores: análise das perdas, análise da geometria e resposta em frequência como uma função da pressão e temperatura.

Durante os modelos desenvolvidos muitas foram as dificuldades que iam surgindo à medida que uma nova situação deveria ser simulada. As principais dificuldades encontradas estavam relacionadas a definição da orientação do cristal e a maneira de introduzir a matriz de viscosidade na ferramenta. Além disso, diferentes foram as versões do programa utilizadas, desde a versão 4.1, passando por 4.2, 4.2a, 4.3, 4.3a, 4.3b, até finalmente a versão 4.4, onde eventualmente numa transição algum parâmetro ou configuração crítica para o modelo era atualizado e nem sempre tais modificações eram esperadas, muito menos de fácil percepção na tela do programa.

Como ponto de partida, os modelos para o cristal de quartzo foram criados em 2D, mas com o intuito de obter resultados mais precisos e realistas passou-se para uma implementação tridimensional. A região PML posicionada como uma extensão do disco contribuiu na absorção de energia permitindo simulações mais realista. Portanto, viu-se que o domínio PML tem uma contribuição significativa no fator de qualidade.

Torna-se difícil e não existe qualquer base teórica para comparar a qualidade ou a adequação dos projetos de ressonadores a quartzo antes dos dispositivos serem

fabricados. Não há método formal de análise para o cálculo de  $Q$  sem recorrer a suposições prévias de vários mecanismos de perdas tais como a viscosidade, contatos de eletrodos e suportes de montagem. Nessa tese, estes mecanismos são introduzidos na modelagem e depois mudando um parâmetro geométrico particular foi possível encontrar uma otimização. Vale lembrar que na natureza até mesmo os parâmetros do quartzo, como as constantes elásticas, podem variar dependendo da localidade de onde ele foi extraído.

Verificou-se nas simulação para o corte-AT com  $\theta = 35,25^\circ$  que o ressonador tem uma considerável resposta com a temperatura. Esse efeito pode ser minimizado escolhendo-se um ângulo  $\theta$  ligeiramente inferior, próximo de  $34,25^\circ$ .

Como comentou-se no primeiro capítulo observa-se um processo de miniaturização dos sensores de pressão a quartzo comerciais ao longo do tempo. Por outro lado, observando a Figura 2.10 nota-se que para uma mesma frequência o comportamento do fator de qualidade tende a diminuir com a redução do diâmetro do disco ressonador e isso atrapalha o processo de miniaturização. Com o intuito de otimizar o fator de qualidade avaliou-se modificações na geometria do ressonador a partir de um diâmetro igual a 5 mm, a escolha desse valor será justificada no Capítulo 5 e também está motivada a facilidade de fazer medição distribuída ao longo do poço de petróleo com sensores pequenos. Foi possível concluir que considerando apenas as perdas intrínsecas do quartzo o fator de qualidade alcançou valores superiores a 1 milhão numa estrutura plano-convexa com  $h_q = 200 \mu\text{m}$ ,  $h_c = 60 \mu\text{m}$  e  $l_{elet}/l_q = 0,75$ .

Simulações tratando de características do ambiente de operação, como temperatura e pressão, puderam ser modeladas, mas outras também deverão ser consideradas, em especial, o ambiente de gás ao redor do ressonador e a presença de um fluido transmitindo a pressão para as capas.

## Capítulo 3

# Fabricação do transdutor de quartzo

O processo de fabricação do sensor de pressão à quartzo tratado neste capítulo baseia-se na estrutura apresentada na Figura 1.3(d). Essa estrutura foi escolhida por ter uma geometria simples e ser de fácil fabricação, além disso os equipamentos necessários estão disponíveis no laboratório. O disco ressonador de quartzo deve estar orientado no corte-AT, pois, como já comentou-se esse corte favorece uma mínima variação da frequência de ressonância com a temperatura. São apresentadas dois métodos diferentes para a fabricação do transdutor de quartzo, um deles faz uso de uma etapa fotolitográfica, onde uma máscara litográfica foi desenhada contendo o formato dos eletrodos. Em ambos os métodos uma etapa de usinagem por abrasão ultra-sonora é executada. Etapas de deposição de metal também foram realizadas e assim filmes finos de alumínio foram crescidos por pulverização para fabricação dos eletrodos. Com os eletrodos depositados foram realizadas as etapas de colagem dos contatos elétricos onde avaliou-se duas possibilidades, a primeira com cola epóxi condutora e a segunda com tinta prata, as lições aprendidas em cada uma dessas possibilidades são mencionadas. A fabricação de transdutores com concavidade não foi realizada devido a inviabilidade de máquinas para esse processo, mas são apresentadas técnicas para tal procedimento. Considerações sobre o processo de fabricação das capas protetoras são discutidas no final do capítulo. Almeja-se que o ressonador vibrando no modo de vibração de cisalhamento de espessura forneça um elevado fator de qualidade e isso poderá ser avaliado no próximo capítulo que trata da caracterização do sensor.

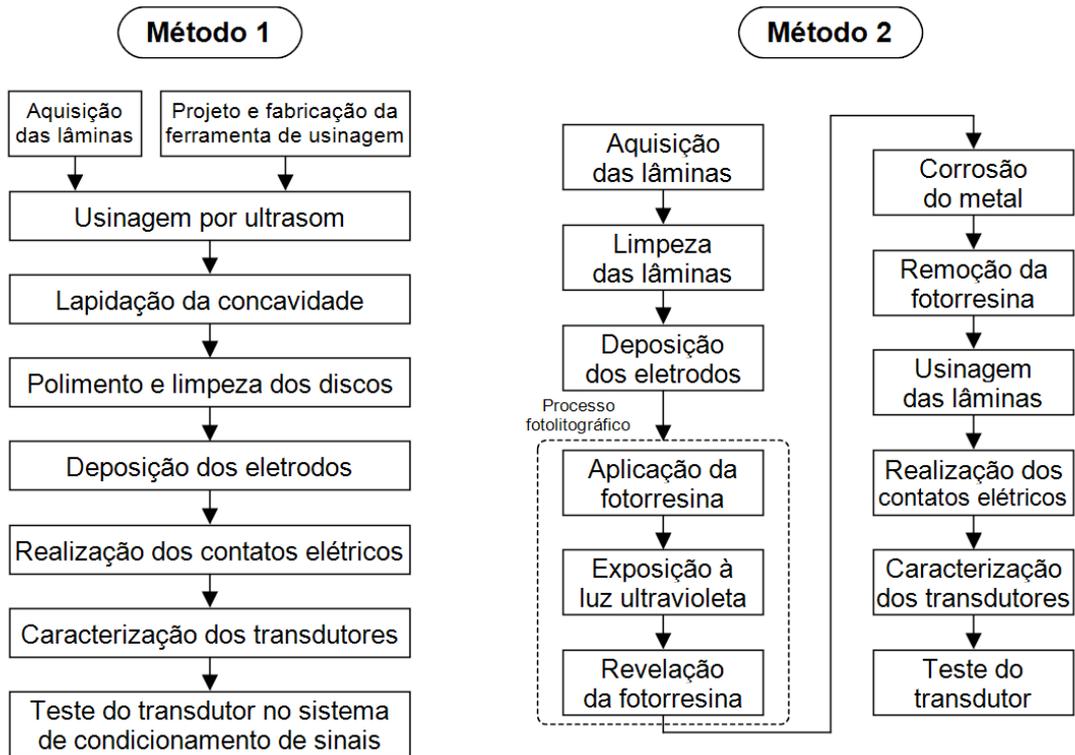


Figura 3.1: Métodos de fabricação para o disco ressonador de quartzo.

### 3.1 Métodos de fabricação

A fabricação do disco ressonador proposto neste trabalho foi realizada em várias etapas onde dois métodos são abordados e chamados de Método 1 e Método 2, uma descrição em forma de diagrama de blocos é apresentada na Figura 3.1 para cada um. No Método 1, o primeiro passo consiste na aquisição das lâminas de quartzo que podem ser obtidas comercialmente nas espessuras desejadas e em diâmetros de 3", assim cada lâmina é capaz de fornecer mais de um disco ressonador. Paralelamente, a ferramenta de usinagem (broca que irá fazer o furo no quartzo) deve ser projetada e fabricada. Depois ocorre a etapa de usinagem por abrasão ultrasonora, seguida da etapa de polimento e limpeza. Os eletrodos são depositados nos discos usinados num processo de deposição por pulverização.

Já no Método 2, a deposição do metal ocorre antes da usinagem da lâmina. Nesse método ocorre uma etapa fotolitográfica composta pela aplicação da fotorresina, exposição à luz ultravioleta e revelação da fotorresina. Nessa etapa uma máscara fotolitográfica com a geometria dos eletrodos deve ser adquirida. Após isso, ocorre a corrosão do metal e em seguida a remoção da fotorresina que não foi exposta a luz

ultravioleta. Eventual etapas de cozimento também serão aplicadas. Nesse ponto tem-se as lâminas de quartzo com os eletrodos já posicionados restando apenas a etapa de usinagem.

Cada uma dessas etapas citadas serão comentadas com mais detalhes nas próximas seções. Uma vez que se tem os discos com os eletrodos pode-se fazer um contato elétrico e acopla-los no analisador de impedância para se fazer a caracterização elétrica.

## 3.2 Aquisição e limpeza das lâminas de quartzo

O processo de fabricação do disco ressonador inicia-se com a aquisição das lâminas (em inglês, *wafers*) de quartzo nas espessuras desejadas. Cristais de quartzo podem ser obtidos diretamente da natureza ou por crescimento hidrotérmico (quartzo cultivado). Os cristais brutos podem ser laminados com uma serra de diamante. Alguns fabricantes podem ainda fornecer cristais já usinados com diâmetro e espessura desejados. Na Tabela 3.1 resumi-se algumas características de uma relação de lâminas adquiridas comercialmente.

Tabela 3.1: Características das lâminas utilizadas.

	espessura ( $\mu\text{m}$ )	ângulo de corte	diâmetro	fabricante
1	$350 \pm 10$	$32^\circ$	3"	<a href="http://www.roditi.com">http://www.roditi.com</a>

Com o intuito de se evitar o acúmulo de impurezas nas superfícies da lâmina e conseqüentemente na interface entre o quartzo e os eletrodos, realiza-se uma limpeza com a submersão da lâmina nas soluções apresentadas na Tabela 3.2: Entre uma solução e outra as lâminas são submetidas a um enxágue com água deionizada (DI) por 1 minuto. A secagem destas lâminas é feita com jato de nitrogênio.

Tabela 3.2: Soluções usadas na limpeza das lâminas.

Solução	descrição	temperatura	tempo
$C_3H_6O$	acetona	ambiente ( $22^\circ\text{C}$ )	5 min
$C_2H_6O$	álcool etílico	ambiente ( $22^\circ\text{C}$ )	5 min
$H_2SO_4$	ácido sulfúrico <sup>1</sup>	ambiente ( $22^\circ\text{C}$ )	5 min

<sup>1</sup>Para remoção da cera usada durante a usinagem.

### 3.3 Deposição dos eletrodos

O processo de crescimento de filmes metálicos por deposição sem reação com o substrato (lâmina de quartzo) pode ocorrer por deposição física a partir da fase de vapor. Nesse processo as espécies do filme são arrancadas fisicamente de uma fonte por temperatura (evaporação) ou por impacto de íons (pulverização, em inglês, *sputtering*), enquanto o ambiente de processo é mantido em baixa pressão. Nesse trabalho a técnica de pulverização foi adotada e será discutida a seguir.

#### 3.3.1 Deposição por pulverização

A deposição por pulverização ocorre pela ejeção de material numa superfície (alvo) por bombardeamento de partículas de alta energia numa câmara a baixa pressão. As espécies mais utilizadas neste bombardeamento são átomos inertes e pesados. Inertes de modo a reduzir a possibilidade de reação com outros íons do plasma e pesados de modo a possuírem um maior momento linear no momento de impacto com o alvo. Por estas razões o argônio é um dos gases mais utilizados. A ionização dos átomos de argônio se processa pelas colisões com elétrons, produzindo uma descarga gasosa luminescente (estado de plasma). Os átomos do material alvo são ejetados em todas as direções da câmara e parte deles chegam continuamente ao substrato, onde formam um filme do mesmo material do alvo [73, 74].

O campo elétrico usado na câmara para acelerar os elétrons no sentido do alvo pode ser criado por uma fonte de corrente contínua (DC) ou por uma fonte de corrente alternada de frequência elevada, na ordem de rádio-frequência (RF), tipicamente 13,56 MHz, ou ainda uma combinação dessas duas.

Com uma fonte de corrente contínua tem-se no interior da câmara o alvo ligado ao terminal negativo, cátodo, e o suporte do substrato formando o ânodo. No início são ionizados alguns átomos de argônio, por simples aplicação do campo elétrico, ou recorrendo ao aquecimento de um filamento que, por efeito termo-elétrico, libera elétrons livres. Um elétron livre acelerado colide com o  $Ar$  neutro arrancando-lhe um elétron e transformando-o em um íon  $Ar^+$ . O elétron livre inicial, agora lento, e o que foi arrancado são acelerados pelo campo elétrico aplicado produzindo, numa reação em cadeia, mais e mais íons de argônio. Os íons  $Ar^+$  são acelerados e chocam-

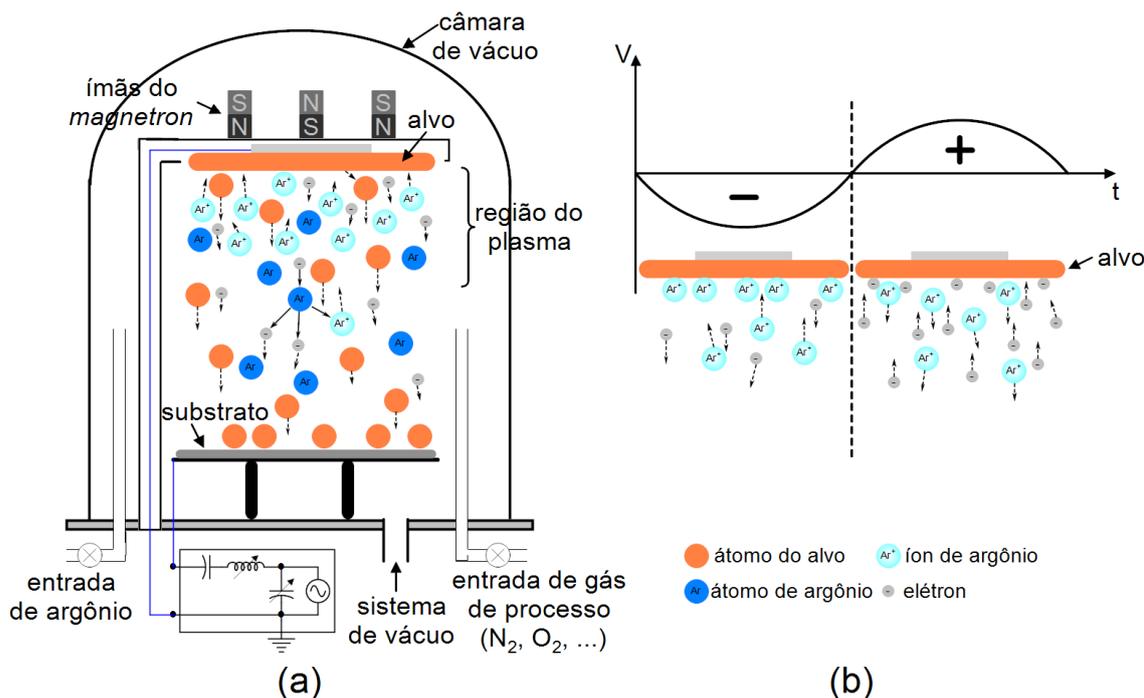


Figura 3.2: (a) Ilustração do processo de pulverização por RF. (b) Comportamento dos íons e elétrons em cada semi-ciclo num processo de pulverização por RF.

se com o alvo, resultando desta colisão a liberação de vários tipos de partículas, em especial átomos (ou agregados de átomos) do material que constitui o alvo. Os átomos neutros arrancados com elevada energia cinética acabam por se depositar no substrato formando um filme fino. Porém, o uso de uma fonte de corrente contínua tem uma limitação: caso o material de que é constituído o alvo não seja condutor este não poderá funcionar como um eletrodo, pois, ocorrerá um acúmulo de cargas positivas no alvo aumentando o potencial elétrico em sua superfície e diminuindo até um valor nulo a capacidade do cátodo de atrair íons positivos do plasma e consequentemente interrompendo o processo de pulverização. Diante disso pode-se usar uma fonte de RF [74, 75].

No processo de pulverização por fonte de RF, ilustrado na Figura 3.2(a), a polarização alternada imposta no alvo faz com que durante o semi-ciclo negativo os íons de  $Ar^+$  sejam atraídos até o alvo, pulverizando-o. Durante o semi-ciclo positivo os elétrons que são atraídos em direção ao alvo, de modo que ocorre a anulação de algum acúmulo de carga positiva que possa ter ocorrido no semi-ciclo anterior, este processo está representado na Figura 3.2(b). Uma vez que a mobilidade dos elétrons é superior a dos íons, devido a sua menor inércia, esses serão mais atraídos do que os íons para

a superfície do alvo durante os semi-ciclos, resultando numa carga elétrica efetiva estática negativa no alvo, ou seja, cria-se um potencial contínuo negativo (potencial de auto-polarização). Portanto, os íons passam a ser atraídos mais pelo potencial negativo induzido do que pelo potencial de RF propriamente dito [73, 74].

A técnica de pulverização por RF permite a utilização de alvos isolantes, além de permitir através de um mesmo equipamento depositar filmes condutores, semicondutores e isolantes, de espessuras variadas. Quanto a taxa de deposição a configuração por RF permite alcançar valores mais elevados quando comparada com a DC.

Com o intuito de aumentar ainda mais a taxa de deposição, pode-se aplicar um campo magnético no alvo, de modo a provocar um confinamento magnético do plasma, obrigando os elétrons a descreverem trajetórias helicoidais próximas do alvo, essa técnica é denominada de pulverização com *magnetron* e é aplicável em ambas as configurações DC e RF. Na pulverização convencional, nem todos os elétrons contribuem para a ionização do gás inerte. Os elétrons não aproveitados para ionização viajam até colidirem com a câmara produzindo radiação e aquecimento. Nessa nova trajetória seguida pelos elétrons eles acabam percorrendo distâncias maiores, aumentando, assim, a probabilidade de ocorrência de colisões com átomos do gás inerte, e, conseqüentemente, a formação de íons  $Ar^+$  mais próxima do alvo, e minimiza também o aquecimento do substrato por colisões desses elétrons. Essa técnica permite diminuir a pressão de trabalho, reduzindo assim a possibilidade de contaminação do filme formado [73, 74].

Durante o processo de pulverização ocorre uma elevação de temperatura considerável no porta substrato causada pelo choque contínuo de elétrons energéticos. A temperatura do alvo também aumenta no decorrer do processo devido ao bombardeamento dos íons. A fim de se evitar o aumento excessivo da temperatura, costuma-se refrigerar, à água, os eletrodos da máquina.

Quando no processo de pulverização é utilizado apenas gás inerte, como é o caso do argônio, tem-se uma pulverização não reativa, pois não ocorre reação química do gás com o alvo. Já numa pulverização reativa um outro gás também é inserido no interior da câmara, por exemplo, na formação de filmes de nitreto de alumínio (AlN), tem-se na câmara argônio e nitrogênio e como alvo o alumínio. A mistura de gases é necessária para equilibrar a reação, um estudo de estequiometria é importante nesse

processo.

Alguns processos fazem uso também de um controle de temperatura. Em geral, uma elevação de temperatura é obtida através de um aquecimento resistivo instalado embaixo do porta substrato. Usa-se um controlador proporcional integral derivativo (PID) como ferramenta para se ter um domínio preciso e estável da temperatura durante o processo.

A reprodutibilidade da deposição por pulverização está relacionada ao controle de diversos parâmetros como, por exemplo, pressão de trabalho, fluxo dos gases envolvidos, potência direta e refletida de RF, temperatura, etc. Esses parâmetros também modificam a impedância formada pelo plasma no sistema RF. Desta forma para que se garanta a taxa de deposição para uma determinada potência de RF fornecida pelo gerador o circuito do gerador e o circuito formado pelo plasma devem estar com as impedâncias aproximadamente iguais para que se garanta a máxima transferência de potência, ou seja, se tenha um valor mínimo de potência refletida. Este casamento de impedâncias pode ser feito por um conjunto de indutores e/ou capacitores, como se vê na Figura 3.2(b) [75].

Quando o interior da câmara fica exposto ao ar ambiente ele sofre inevitavelmente um processo de oxidação e/ou contaminação. Esta camada de óxido/contaminante assim como outras impurezas no interior da câmara e das mangueiras dos gases precisam ser removidas antes da deposição do filme. Este procedimento é denominado de plasma de limpeza. Durante esse procedimento de limpeza o porta substrato passa a funcionar como cátodo e então os íons são atraídos em direção ao substrato removendo eventuais impurezas em sua superfície também. Tal procedimento em geral dura de 5 a 10 minutos e é realizado com uma potência mais baixa do que a potência utilizada no plasma de processo.

O equipamento de pulverização utilizado nessa tese é o sistema comercial *ATC Orion* fabricado pela *AJA International* e faz uso de uma fonte de rádio-frequência com *magnetron*. Este sistema está dividido nos seguintes blocos principais: câmara, sistema de vácuo, alvos, fonte de RF, suporte de substratos com controle de temperatura, sistema de casamento de impedância, sistema fechado de refrigeração, válvulas de gases, medidores de pressão e *magnetron*. O sistema de deposição está mostrado na Figura 3.3. Diversos tipos de filmes podem ser depositados a depender do material



Figura 3.3: Sistema de deposição de filmes finos por pulverização utilizado nessa tese.

alvo (a câmara desse sistema suporta até três alvos diferentes) e dos gases no interior da câmara (gases de trabalho), pode-se obter filmes de Al, ligas de Al (AlN), Pt, Au, Ti, W, Si, SiO<sub>2</sub>, etc. Nessa tese, os eletrodos utilizados na superfície do quartzo são de alumínio. A superfície do porta substrato fica posicionada logo abaixo dos alvos por uma distância de 20 cm.

### 3.3.2 Projeto do suporte para as deposições

No Método 1 de fabricação, ver Seção 3.1, faz-se necessário o uso de um suporte para deposição, pois, após a obtenção dos disco ressonadores no diâmetro desejado, seja comercialmente ou por usinagem (Seção 3.5.1), os mesmo devem ser posicionados na pulverizadora de tal forma que a deposição dos eletrodos ocorra numa área bem determinada. Para tanto, tem-se na Figura 3.4 um esquema de projeto para esse suporte.

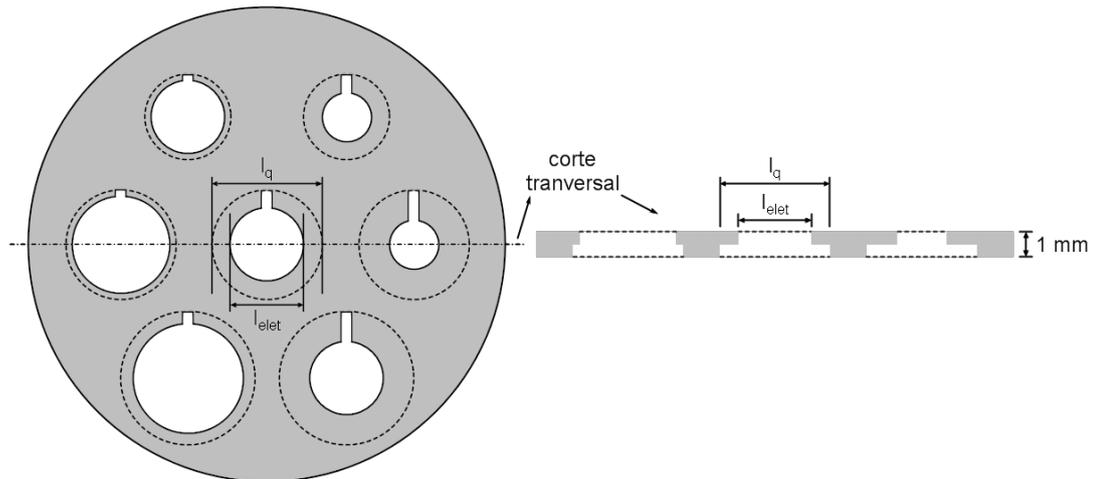


Figura 3.4: Esquema de suporte dos discos de quartzo para deposição dos eletrodos na pulverizadora.

O suporte deve consistir de uma placa de metal circular (ou de formato quadrangular) com cerca de 8 cm de diâmetro e com 1 a 2 cm de altura com vários furos de diâmetros diferentes de tal forma que em um lado do suporte os furos correspondam aos diâmetros dos eletrodos e do outro lado aos diâmetros do disco de quartzo, assim, na Figura 3.4 os círculos tracejados correspondem aos diâmetros do disco de quartzo, como se vê no corte transversal. Após a deposição na primeira face dos discos o suporte é removido da pulverizadora e os discos tem as faces invertidas de tal forma que as marcações dos contatos elétricos dos eletrodos fiquem na mesma direção porém em sentidos opostos.

Alternativamente pode-se fazer esse processo de delimitação dos eletrodos com um papel adesivo onde um furo com o tamanho desejado do eletrodo é feito juntamente com a delimitação para os contatos elétricos.

### 3.3.3 Deposições realizadas

Nas deposições buscou-se crescer um filme fino de alumínio nos discos de quartzo usinados. Inicialmente o objetivo foi validar o experimento e se familiarizar com a máquina de pulverização, para então otimizar o processo e o filme formado. Foram necessários dois processos de deposição, um para cada superfície do disco de quartzo, onde as condições físicas deveriam ser as mesmas. Os parâmetros ajustados nas deposições são encontrados na Tabela 3.3 e uma fotografia mostrando o plasma durante

Tabela 3.3: Parâmetros estabelecidos nas deposições.

Parâmetro	Valor ajustado
Pressão base	$10^{-6}$ Torr
Pressão de processo	10 mTorr
Temperatura	ambiente (22 °C)
Rotação do porta-substrato	30 rpm
Tempo de deposição	40 minutos
Potência RF direta	300 W
Potência RF refletida	0 W
Fluxo de Ar	18 sccm

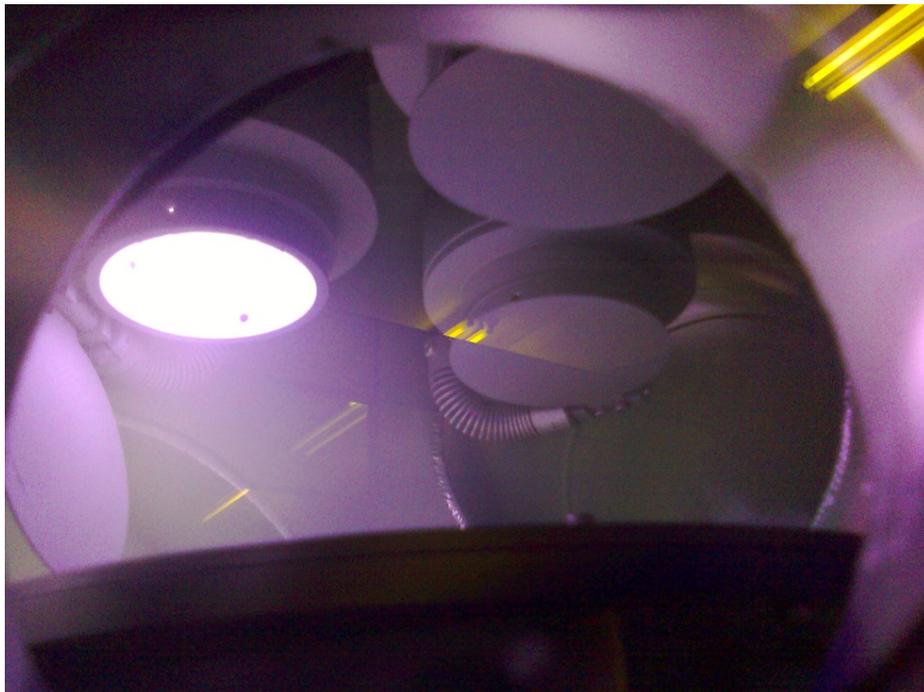


Figura 3.5: Fotografia mostrando o interior da câmara durante a deposição, o *shutter* do alumínio está aberto e a luz decorrente do estado de plasma é visualizada.

o processo de pulverização pode ser encontrada na Figura 3.5. Essa imagem é vista através do visor de vidro que permite observar a parte interna da câmara mesmo enquanto ocorre o processo de pulverização. Uma visualização utilizando um microscópio óptico das deposições estão na Figura 3.6, em (a) usou-se um plástico fino para definir a região dos eletrodos durante a pulverização, já em (b) usou-se um papel adesivo com um orifício bem definido para os eletrodos, consequentemente conseguiu-se uma delimitação melhor do filme formado.

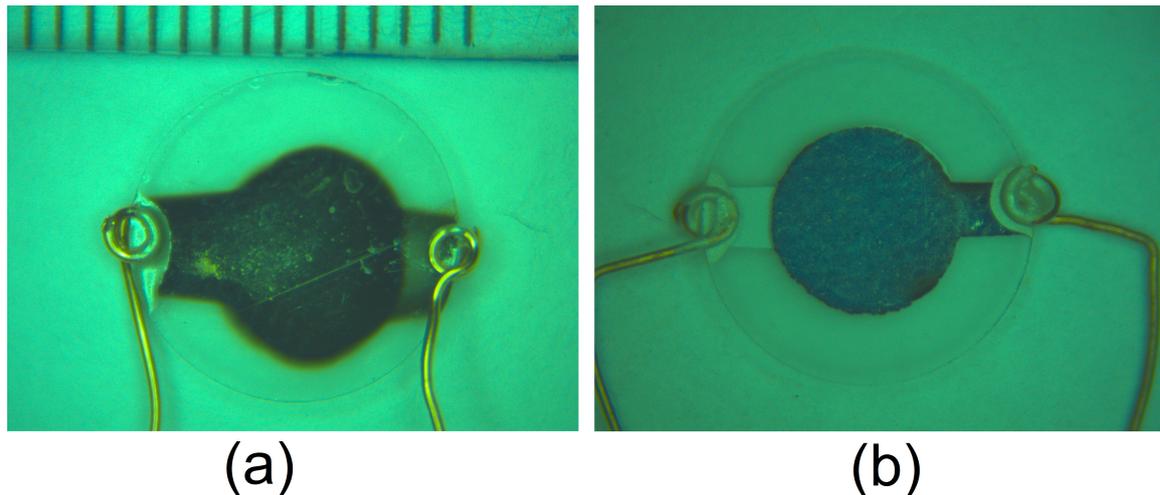


Figura 3.6: Visualização através do microscópio óptico das deposições de Al nos discos de quartzo. Contatos elétricos feitos com cola epóxi condutora (a) e com tinta prata (b).

### 3.4 Etapas dos processos de fotolitografia

As etapas dos processos fotolitográficos para a fabricação dos eletrodos do sensor de pressão são baseadas nas etapas de fabricação de dispositivos eletrônicos, tais como circuitos integrados, claro que em um nível de complexidade inferior, visto que apenas uma máscara é necessária para tal, não obstante exige-se os devidos cuidados e atenção na execução de cada uma de suas etapas, pois, a falha em alguma das etapas do processo de fotolitografia compromete toda a cadeia subsequente da fabricação do sensor [76].

Para o desenvolvimento dos eletrodos, seguindo o Método 2, várias etapas necessitam ser realizadas, dentre elas: o projeto e desenvolvimento das máscaras, aplicação de fotorresistes, processos de espalhamento e cozimento dos resistes, processos de alinhamento, exposição UV, revelação, corrosão, remoção e inspeção final dos resistes, algumas dessas serão comentadas a seguir. Um fluxo do processo de fabricação com essas etapas está ilustrado na Figura 3.7. Todas essas etapas, com exceção da fabricação das máscaras, podem ser realizadas no ambiente de sala limpa do Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da Universidade Federal de Pernambuco.

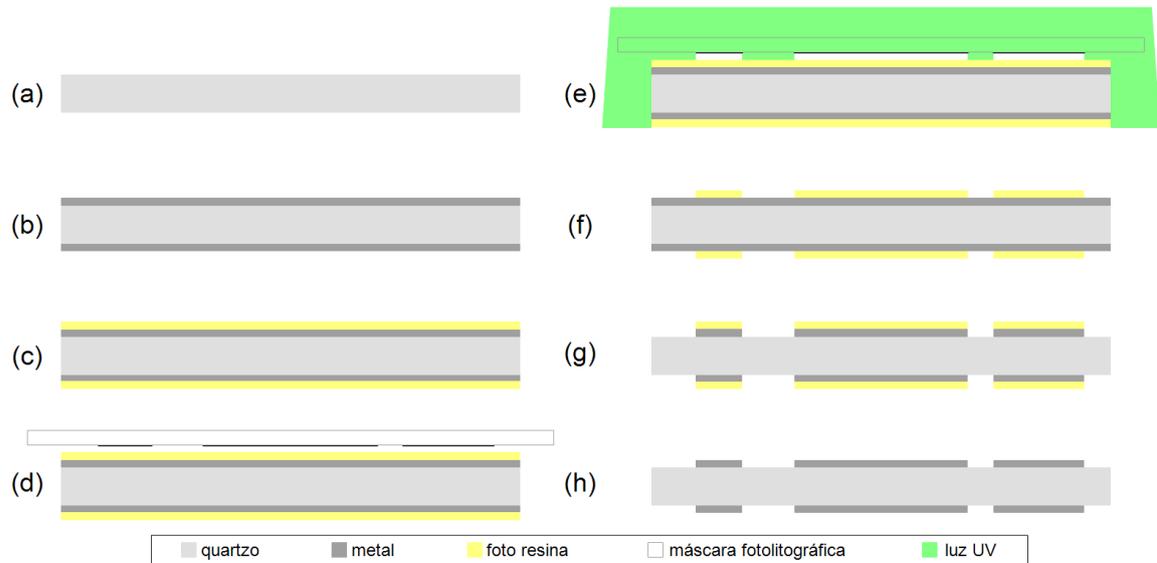


Figura 3.7: Etapas de fabricação. (a) Limpeza da lâmina de quartzo. (b) Deposição de metal. (c) Aplicação da fotorresina. (d) Posicionamento da máscara fotolitográfica na máquina alinhadora. (e) Exposição de luz ultra-violeta na máquina alinhadora. (f) Revelação da fotorresina sensibilizada pela luz. (g) Corrosão da camada de metal não protegida pela fotorresina. (h) Remoção completa da fotorresina.

### 3.4.1 Projeto das máscaras

A máscara consiste de um material translúcido, usualmente uma placa de vidro, com um arranjo de padrões que bloqueiam ou permitem a passagem de luz. Na máscara é gravada por um processo de litografia eletrônica<sup>1</sup> o padrão do desenho que se quer passar para o substrato ou lâmina.

O projeto de máscaras é realizado com o auxílio de um sistema computacional conhecido como CAD (*Computer Aided Design*). Nessa tese as máscaras foram projetadas no programa *Klayout* [77]. A versão inicial da máscara para três diferentes diâmetros de disco de quartzo é mostrada na Figura 3.8, essa consiste na forma quadrangular com 4" de largura devendo a lâmina ter 3" de diâmetro. Com o intuito de facilitar a fabricação da lâmina, ou seja, o processo de litografia dos padrões, os eletrodos não foram desenhados em forma circular, mas sim como polígonos de 12 lados,

<sup>1</sup>Litografia eletrônica ou litografia por feixe de elétrons é a prática de varrer com um feixe de elétrons um padrão desejado numa superfície coberta com um filme, denominado de *resiste*, e de remover seletivamente ou regiões expostas ou não expostas do *resiste* com o feixe, ou seja, desenha-se um padrão nanômetro a nanômetro, de maneira que podem ser alcançados tamanhos incrivelmente pequenos (da ordem de 20 nm). O propósito, assim como a fotolitografia, é a criação de estruturas muito pequenas no *resiste* que podem posteriormente ser transferidas para o substrato. No entanto, a litografia por feixe de elétrons é muito cara e consome mais tempo do que fotolitografia.

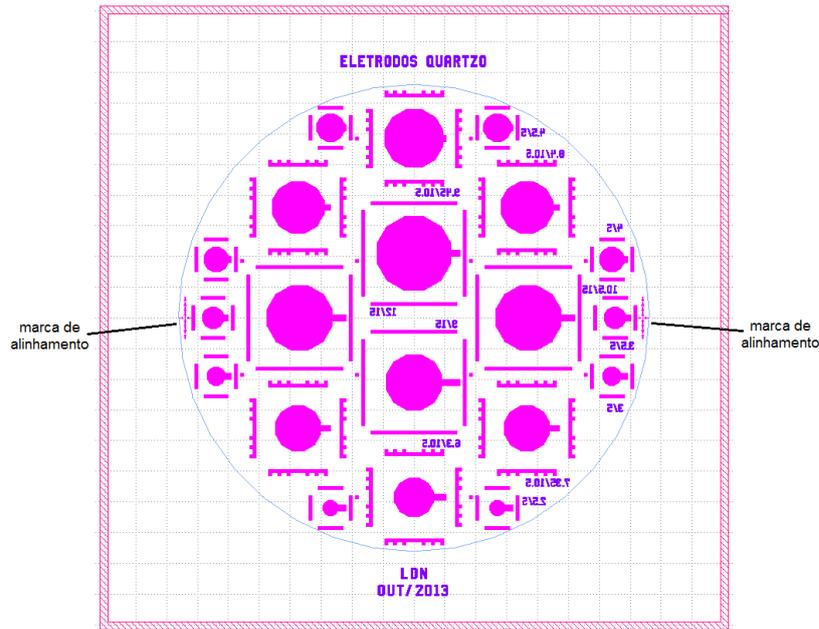


Figura 3.8: Máscara com os padrões de eletrodos para três diâmetros do disco de quartzo.

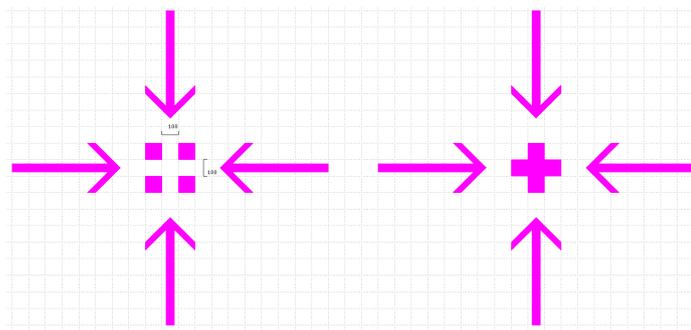


Figura 3.9: Marcas de alinhamento da máscara (a grade tem  $100 \mu\text{m}$  de largura).

pois o processo de litografia é feito ponto a ponto e consegue-se maior velocidade em formas não circulares.

Pode-se observar duas marcas de alinhamento na máscara, posicionadas diametralmente opostas, ver Figura 3.9. Essas são importantes, nesse caso, para facilitar o alinhamentos de cada par de eletrodos nas faces da lâmina de quartzo. Aqui, uma marca consiste de 4 quadrados onde entre eles forma-se uma cruz e a outra marca consiste de um desenho em forma de cruz que preenche o espaço entre os quadrados da primeira marca, as setas, também mostradas, auxiliam na localização dessas marcas na máquina de alinhamento.

Observa-se que na máscara existe uma duplicidade para alguns diâmetros de ele-

Tabela 3.4: Dimensões dos eletrodos desenhados na máscara.

diâmetro quartzo (mm)	diâmetro eletrodos (mm)				
	$(l_{elet}/l_q)$				
5	2,5	3	3,5	4	4,5
	(0,5)	(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)
10,5		6,3	7,35	8,4	9,45
		(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)
15		9	10,5	12	
		(0,6)	(0,7)	(0,8)	

trodos, se faz isso para não ser necessário uma segunda máscara correspondente a segunda face da lâmina, em contrapartida cria-se no final da etapa fotolitográfica algumas estruturas duplicadas na lâmina. Esse fato pode ser observado na Figura 3.8, onde considerando-se uma linha imaginária equidistante a posição das marcas de alinhamento tem-se uma simetria para os diâmetros dos eletrodos em relação a essa linha (as únicas estruturas não duplicadas correspondem a que estão sob a linha imaginária).

Após a primeira exposição de ultra-violeta em uma face da lâmina decorre-se com as outras etapas de fotolitografia para então iniciar o mesmo processo na outra face de modo que ao final dessa segunda etapa tem-se em cada face da lâmina os padrões da máscara.

A Tabela 3.4 contém as diâmetros dos eletrodos desenhados na máscara, tem-se sempre o objetivo de preencher o maior espaço possível da área da máscara.

As máscaras deveram ser fabricadas no CTI-SP, em Campinas.

### 3.5 Usinagem por abrasão ultra-sonora

A técnica de usinagem por ultrassom é um processo que permite executar penetrações de formas variadas em materiais duros, frágeis e quebradiços como cristais, vidros e cerâmicas. Em relação aos outros processos de usinagem, como a usinagem a laser ou por feixe de elétrons e íons, as vantagens principais são a preservação da integridade superficial do material usinado, maior taxa de remoção de material e equipamentos de menor custo. A usinagem por ultra-som não é um processo térmico, químico ou elétrico. Portanto, não ocorrem mudanças nas propriedades metalúrgicas, físicas e químicas das peças usinadas [78].

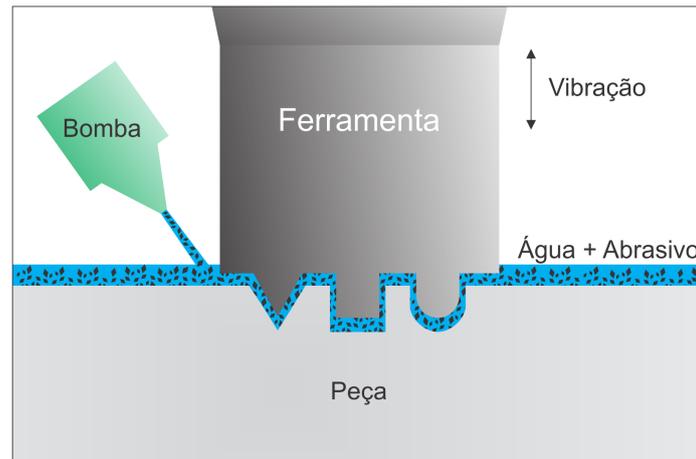


Figura 3.10: Esquema do processo de usinagem por abrasão ultrasonora. A ferramenta vibra apenas na direção perpendicular a superfície da peça numa frequência em torno de 20 kHz.

Na usinagem por ultrassom, uma ferramenta é colocada para vibrar sobre uma peça mergulhada em um meio líquido com pó abrasivo em suspensão numa frequência em torno de 20 kHz. O “martelamento” produzido pelas vibrações é capaz de erodir o material da peça, formando uma cavidade com a forma negativa da ferramenta. Não existe contato entre a ferramenta e a peça. A usinagem é feita pelos grãos finos e duros do material abrasivo que atacam a superfície da peça de maneira suave e uniforme, um esquema de usinagem é apresentado na Figura 3.10. O material abrasivo deve ser, no mínimo, tão duro quanto a peça usinada. Mesmo assim, parte do próprio abrasivo acaba sendo erodida durante a usinagem, de modo que a área de usinagem deve ser continuamente alimentada por um suprimento adicional de grãos. Este procedimento contribui também para resfriar a suspensão durante a usinagem e facilita a remoção do material erodido. Da mesma forma a ferramenta também está exposta ao desgaste pelos grãos abrasivos, mas este é pequeno em relação ao desgaste provocado na peça [79].

O processo de usinagem por ultra-som aproveita a energia de vibração mecânica, comunicada aos grãos de abrasivo, que vibram na mesma direção do sonotrodo. O sonotrodo é constituído por uma barra metálica, na qual se ativam as vibrações ultrasonoras, no sentido do seu eixo. Na ponta do sonotrodo é fixada a ferramenta, com a forma inversa da que se deseja dar à peça a ser usinada. Devido às altas frequências de trabalho, o sonotrodo deve possuir alta resistência à fadiga. O material de maior

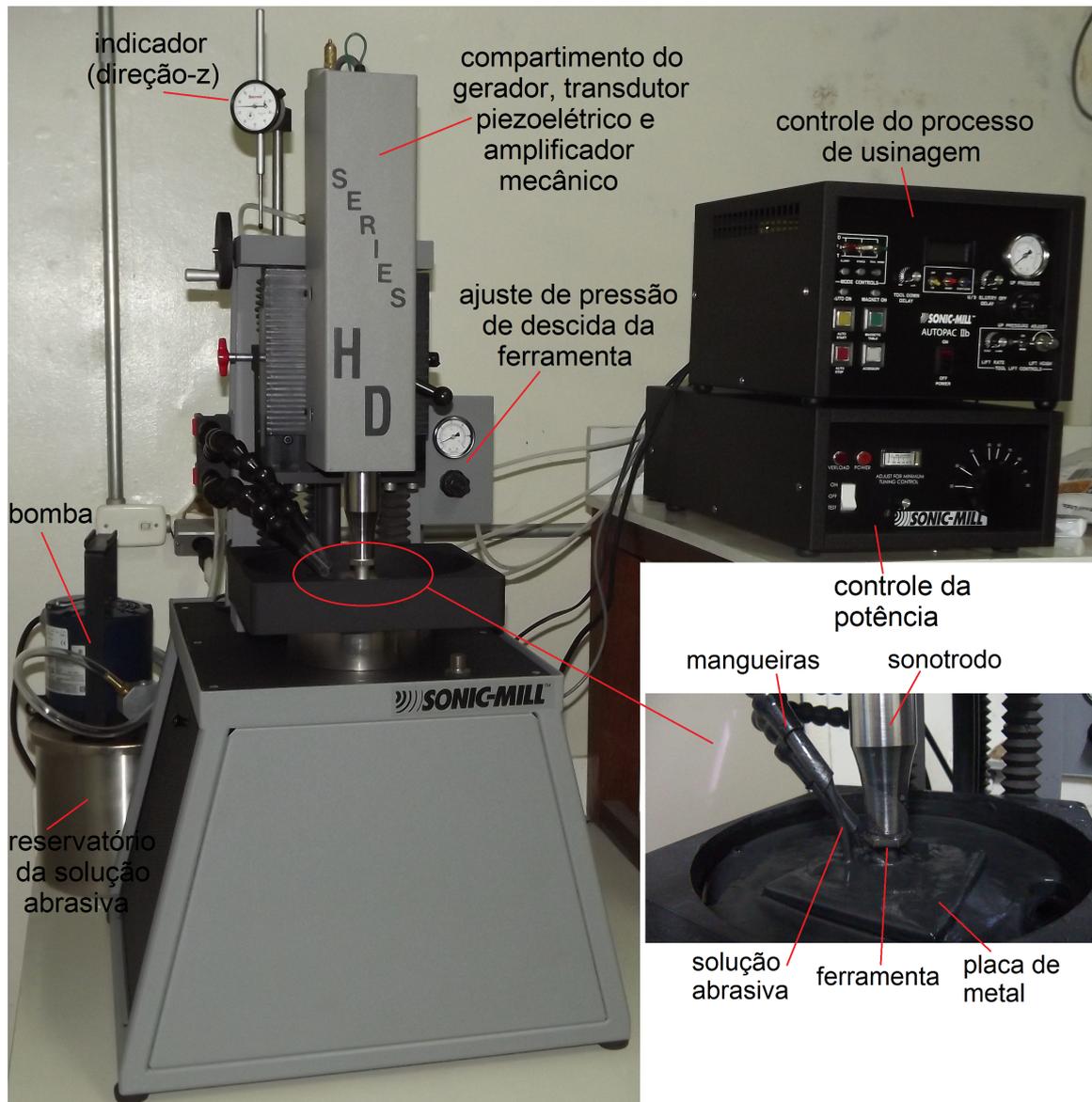


Figura 3.11: Máquina de usinagem por abrasão ultrasonora *Sonic-Mill AP-1000*.

utilização atualmente tem sido o titânio.

### 3.5.1 Aparato experimental para a usinagem

O processo de usinagem das lâminas de quartzo foi realizado no equipamento *Sonic-Mill AP-1000* disponível no LDN, uma foto do mesmo é mostrada na Figura 3.11. Esse equipamento é formado basicamente por uma fonte de tensão com frequência em torno de 20 kHz, um transdutor piezoelétrico, um amplificador mecânico, que tem por função transmitir e aumentar as amplitudes das vibrações do transdutor sobre o qual está fixado, um sonotrodo, responsável por transmitir as vibrações mecânicas

do amplificador até a ferramenta (broca), que é facilmente substituível, uma solução abrasiva (água e abrasivo) e a peça a ser usinada.

A máquina de ultra-som utiliza uma fonte de energia que converte a tensão da rede elétrica convencional para energia elétrica em 20 kHz. Esta energia elétrica de alta frequência alimenta um transdutor piezoelétrico que transforma as oscilações elétricas em ondas ultrasonoras. O movimento de ultra-som a partir do transdutor é amplificado e transmitido para o sonotrodo chegando através dele até a ferramenta de corte.

Como abrasivo pode-se utilizar, em ordem crescente de dureza, o óxido de alumina, o carbetto de silício (SiC) e o carbetto de boro ( $C_4B$ ), este último é o grão mais comum. O tamanho dos grãos mais usuais são classificados em termos da granularidade, #220, #320 e #400, com diâmetros médios de 63  $\mu\text{m}$ , 33  $\mu\text{m}$  e 23  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O tamanho dos grãos também determina a taxa de usinagem, quanto maior a granularidade mais lenta é a usinagem.

A solução abrasiva foi preparada com carbetto de boro e água destilada na razão de 1:1,5 por volume. Verificou-se que 690 g de carbetto de boro equivale a um volume de 500 ml, assim, para essa quantidade de abrasivo adicionou-se 750 ml de água. Porém, constatou-se que um volume final de aproximadamente 3200 ml dessa mistura permite uma circulação contínua de solução abrasiva na peça a ser usinada.

Como se comentou, as partículas abrasivas tem dimensões microscópicas e em contato com a ferramenta passam a se mover na direção perpendicular a face do disco de quartzo causando micro-lascamentos no cristal.

Além da circulação constante renovar os grãos abrasivos que fazem contato com a lâmina de quartzo ele também está resfriando a ferramenta e removendo os resíduos do quartzo. De maneira a minimizar a decantação da mistura a mesma é mexida imediatamente antes do início da usinagem quando a bomba é ligada e também usa-se uma espátula para remove o carbetto de boro que se deposita ao redor da peça durante o processo de usinagem.

A ferramenta de usinagem deve ser desenvolvida de forma negativa da peça que se deseja usinar, no caso para um disco de quartzo ela deve consistir de uma casca cilíndrica cujo diâmetro interno corresponde ao diâmetro do disco de quartzo desejado. Uma ferramenta com diâmetro interno de 10,5 mm é mostrada na Figura 3.12(a),

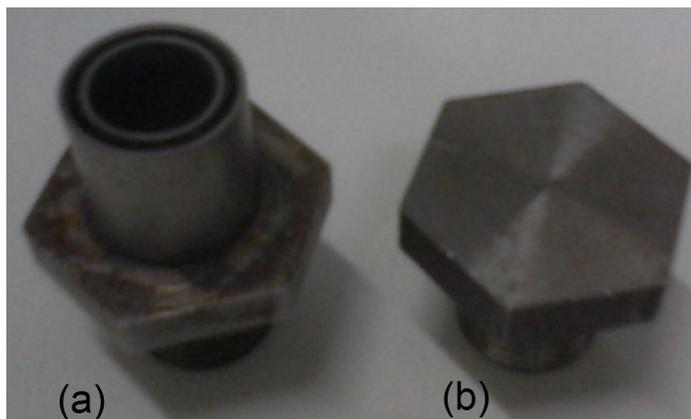


Figura 3.12: (a) Ferramenta para usinagem do disco ressonador de quartzo. (b) Base para soldar a casca cilíndrica.

ela é fixada no sonotrodo através de sua rosca, já na Figura 3.12(b) mostra-se uma ferramenta pré-pronta, faltando apenas soldar a casca cilíndrica. O massa ideal da ferramenta final deve ficar em torno de 57 g, esse valor é definido pelo fabricante e visa otimizar o sistema ressonante na frequência de ultrassom.

As lâminas de quartzo foram coladas com uma cera especial (7036.20 *Blanchard Wax*) numa placa de metal de 8 cm  $\times$  8 cm  $\times$  0,5 cm. Essa cera em temperatura ambiente está no estado sólido, mas ao ser aquecida começa a derreter em aproximadamente 180 °C, assim a placa de metal foi posicionada sobre a superfície de uma chapa quente e a lâmina de quartzo pode ser fixada através da cera. Após isso, a placa de metal é firmemente fixada na máquina de usinagem graças a um forte eletroímã que pode ser ligado durante a usinagem.

### 3.5.2 Usinagens realizadas

A primeira usinagem foi realizada num pedaço de lâmina de quartzo com 350  $\mu\text{m}$  de espessura e utilizando a ferramenta mostrada na Figura 3.12(a), o objetivo sobretudo foi validar o experimento e se familiarizar com a máquina. Uma foto do primeiro furo da lâmina pós-usinada ainda colada na placa de metal pode ser visualizado na Figura 3.13. Ao todo foram realizadas cinco usinagens. Após a remoção do quartzo usinado e da cera constatou-se que na maioria das usinagens o metal também foi erodido, isso pode ser visualizado na Figura 3.14.

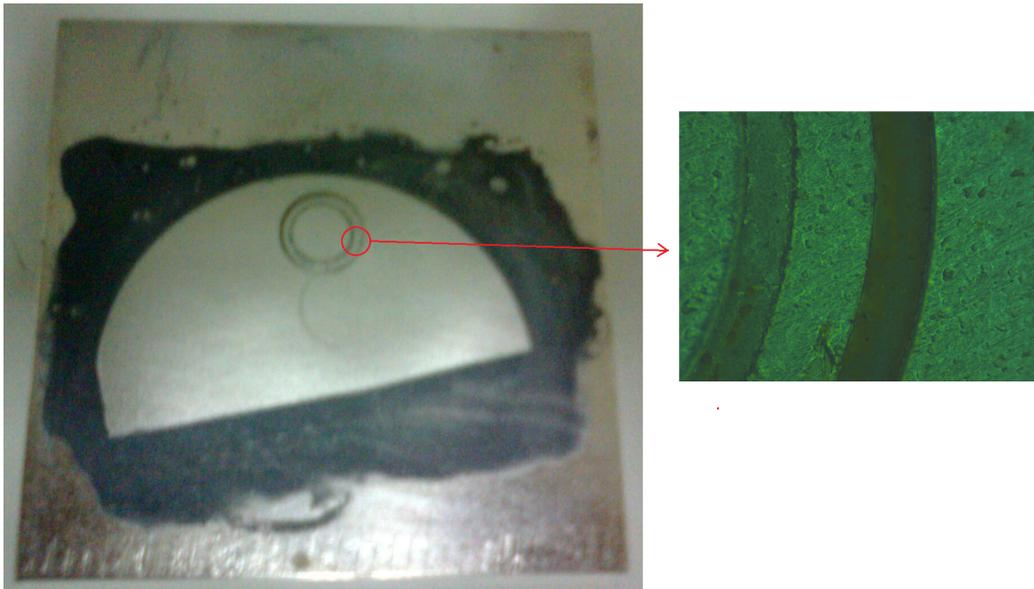


Figura 3.13: Lâmina de quartzo pós-usinada e detalhe no microscópio óptico.

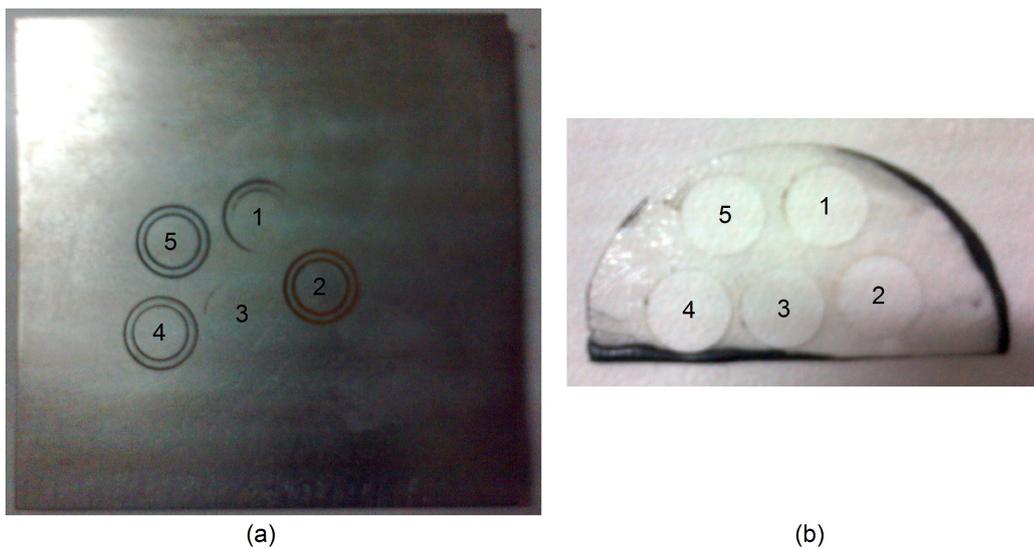


Figura 3.14: Fotos da placa de metal (a) e da lâmina de quartzo (b) após a primeira série de usinagens.

Alguns dados dessa primeira série foram anotados e estão relacionados na Tabela 3.5 para cada usinagem realizada. A pressão de descida da ferramenta sobre a lâmina de quartzo é feito por ajuste de válvula, ver Figura 3.11, através desse ajuste pode-se também suavizar o reposicionamento da ferramenta na peça entre os intervalos de elevação do sistema para renovação da solução abrasiva quando esse procedimento for necessário.

Quanto ao tempo de usinagem observa-se que a usinagem 3 foi realizada mais

Tabela 3.5: Dados da configuração da máquina de usinagem utilizados na primeira série de usinagens.

# usinagem	Ajuste micrômetro ( $\mu m$ )	Pressão na descida da ferramenta (psi)	Potência ultrassom	Tempo de usinagem
1	visual	-	20 - 40 %	> 30min
2	430	10	20 %	31min 34s
3	400	10	20 %	2min 30s
4	400	10	20 %	5min 13s
5	430	10	20 %	8min 58s

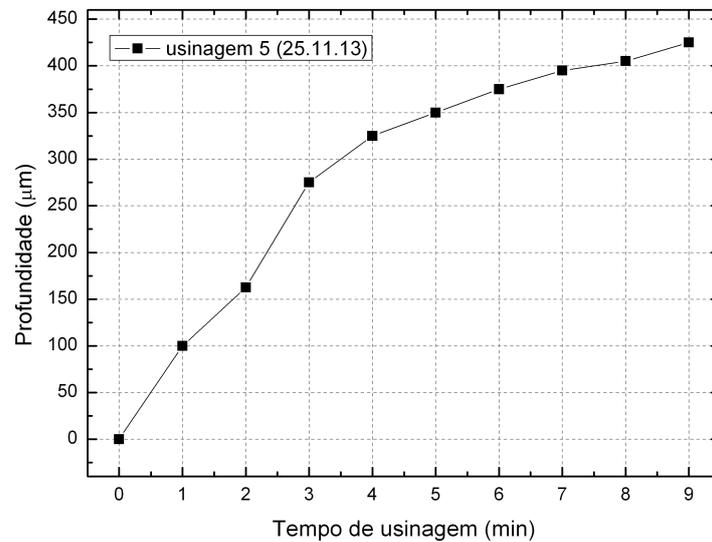


Figura 3.15: Comportamento da usinagem 5 ao longo do tempo.

rapidamente e conseqüentemente não erodiu a placa de metal. Para a usinagem de número 5 verificou-se o andamento do medidor de profundidade a cada 1 minuto, esse comportamento pode ser observado na Figura 3.15. Entre o segundo e terceiro minuto se observa a maior taxa de remoção,  $112 \mu m/min \approx 2 \mu m/s$ . Segundo informações do fabricante da máquina a taxa de remoção para o quartzo é de  $0,001''$  a  $0,002''$  inch/s (ou 25 a 50  $\mu m/s$  aproximadamente). Logo, para uma espessura de 350  $\mu m$  é esperado um tempo máximo de 14 s. Outros parâmetros de controle também devem ser observados e otimizados para que o processo de usinagem seja feito num tempo mais curto e para que a peça não sofra desgastes exagerados o que pode causar trincas ou até mesmo quebras.

### 3.6 Contatos elétricos

Considerando um sensor ainda não encapsulado, ou seja, sem as capas protetoras, foi necessário colocar fios de cobre com diâmetro de 0,4 mm e comprimento de 3 cm nos terminais do disco ressonador, conforme se vê na Figura 3.6. Numa primeira tentativa usou-se cola epóxi condutora e com um tempo de cura de aproximadamente 4 horas percebeu-se boa aderência dos fios nos eletrodos de alumínio. Numa segunda tentativa usou-se tinta prata, mas essa não mostrou-se tão boa para manter o contato mecânico entre o fio e o quartzo, mesmo com tempo de cura superior a 12 horas, ocorrendo do mesmo se desfazer após a movimentação da estrutura entre os equipamentos no laboratório.

A resistência elétrica entre o eletrodo de alumínio e o fio condutor foi verificada. Numa situação ótima almeja-se como resultado dessa leitura uma resistência elétrica nula. Essa leitura foi realizada com um multímetro digital (Minipa, ET-2095) na posição ohmímetro, onde uma das ponteira está posicionada no centro do eletrodo e a outra no fio condutor, conforme Figura 3.16. Na Tabela 3.6 tem-se um resumo desse estudo. Nas medições de resistência elétrica onde usou-se cola epóxi foi difícil encontrar uma leitura estável no multímetro, já para as medições dos contatos feitos com tinta prata os valores verificados eram estáveis e também apresentaram uma resistência bem inferior.

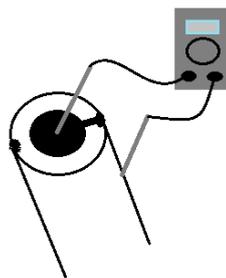


Figura 3.16: Configuração para se determinar a resistência elétrica entre os eletrodos e os fios condutores.

Tabela 3.6: Dados das medidas de resistência elétrica entre os eletrodos e os fios.

Colagem dos contatos elétricos	Resistência ( $\Omega$ )	
	lado 1	lado 2
cola epóxi condutora	$\geq 49$	$\geq 4,6$
tinta prata	1,3	1,2

### 3.7 Considerações sobre concavidade

Sobre a fabricação de ressonadores com concavidade uma técnica utilizada é por polimento [80], isso pode ser alcançado através de uma máquina de polimento e lapidação, um exemplo de equipamento é o da linha Lapmaster LSP [81]. Esta máquina é capaz de executar rotinas complexas de lapidação e produzir resultados precisos e repetíveis.

Aliada a etapa de polimento uma etapa de corrosão a plasma pode ser desenvolvida também [80]. Assim, um processo de corrosão por plasma de íons reativos RIE (*reactive ion etching*) foi simulado na ferramenta computacional *Intellifab* [82] disponível no LDN, essa ferramenta é destinada a simulação de processos de fabricação em ambientes de sala limpa. Com o objetivo de ajustar os parâmetros em cada processo várias simulações foram realizadas e uma visualização final da estrutura pode ser observada na Figura 3.17. Porém, devido a limitação gráfica da ferramenta não foi possível visualizar com detalhes o processo de formação de curvatura esperado. A ferramenta *Athena* da *Silvaco International* [83] permite essa visualização de maneira mais objetiva, mas como as ferramentas da *Silvaco* apresentam uma licença comercial mais onerosa estão temporariamente desativadas no laboratório.

Para transdutores com concavidade a deposição do metal para formação dos eletrodos só deve ocorrer após a etapa final de fabricação do ressonador.

### 3.8 Considerações sobre as capas protetoras

As capas protetoras são fabricadas a partir de um bloco de quartzo, onde usando-se processo de usinagem por abrasão ultra-sonora chega-se na geometria desejada.

A colagem das capas no disco de quartzo deve ser realizada num ambiente de vácuo e um gás de baixa massa molecular como, por exemplo, hélio, pode ser utilizado [15]. Isso é importante para minimizar as perdas de energia vibracional no ambiente do ressonador. A colagem deve funcionar também como uma excelente vedação não permitindo que o gás no interior das capas escape.

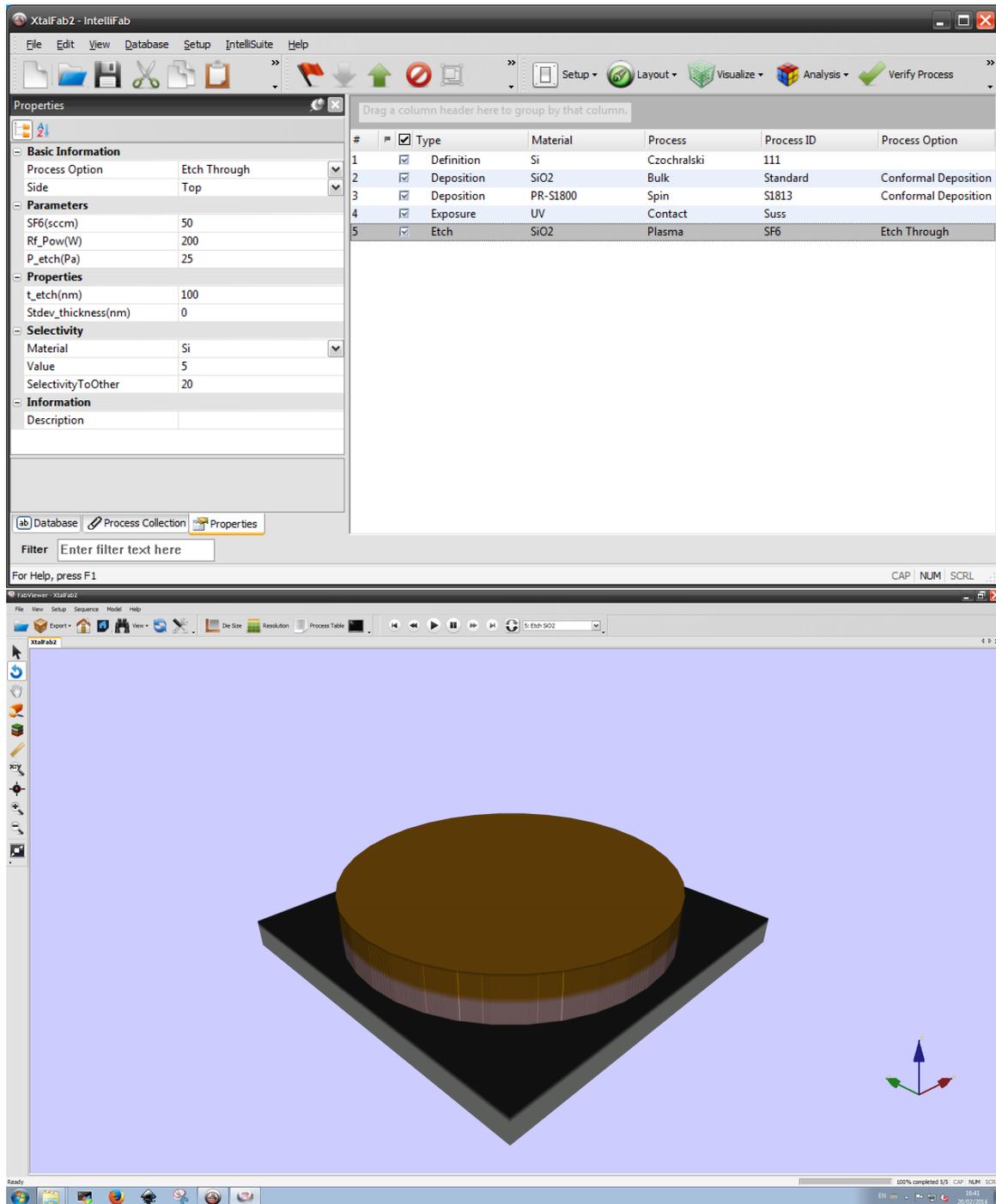


Figura 3.17: Simulação do processo de fabricação de ressonador plano-convexo no *Intellifab*. (a) Definição dos processos. (b) Visualização final da estrutura.

### 3.9 Considerações finais

Quando se pretende fabricar um dispositivo utilizando técnicas de microeletrônica é necessário conhecer os diversos processos pelos quais esse dispositivo irá passar, por

que as propriedades das estruturas formadas são altamente dependentes da qualidade do trabalho em cada um dos processos.

A aquisição de novas lâminas de quartzo ou cristais de quartzo bruto é um evento importante para dar continuidade as usinagens. Bem como a aquisição de novas ferramentas. Uma grande dificuldade tem sido encontrar uma empresa para fazer a soldagem com prata da casca cilíndrica nas ferramentas pré-prontas. Como a máquina de usinagem foi adquirida no decorrer desse trabalho, exigiu-se uma considerável dedicação e tempo para montagem e ligação da mesma, o que atrasou o andamento dos trabalhos.

Devido ao atraso na importação da alinhadora de máscaras, o que atrasou também a vinda de um técnico da Áustria específico para a montagem e aplicação de um treinamento no LDN, não foi possível realizar as etapas de processos fotolitográficos, porém o projeto das máscaras estão prontos ficando sua fabricação como trabalho futuro.

Por terem se tratado das primeiras usinagens realizadas no LDN e a primeira utilização da alinhadora de máscaras era esperado que muitas dificuldades fossem encontradas. Entretanto, pode-se considerar que as fabricações realizadas foram bastante satisfatórias. Em particular, para o processo de usinagem, já se consegue um bom domínio do equipamento e com bons resultados.

Foi necessário também dedicação e tempo até se chegar em boas condições no processo de pulverização, inicialmente precisou-se entender o funcionamento do equipamento e de todos os seus acessórios.

A deposição do alumínio apresentou boa uniformidade em especial quando foi realizada com o uso de papel adesivo para delimitar a região dos eletrodos. Diante disso, é interessante nos trabalhos futuros variar o diâmetro de modo a permitir uma maior ou menor região de eletrodo e verificar o comportamento do fator de qualidade. Vale lembrar que em um mesmo processo de pulverização vários discos de quartzo podem ser inseridos no interior da câmara de deposição, o que evita desperdícios do alvo de alumínio e otimiza o tempo de fabricação.

# Capítulo 4

## Caracterização

A caracterização dos ressonadores de quartzo é realizada neste capítulo. Inicialmente, diversos cristais de quartzo foram submetidos a análise de raios-X conhecida por DXR, onde por meio de difratogramas é possível identificar os picos de difração característicos ao corte do cristal. Essa etapa foi realizada no Departamento de Física da UFPE onde está disponível o equipamento DXR-5000 da Siemens.

Através das curvas de impedância obtidas por meio de um analisador de impedância os parâmetros elétricos dos ressonadores fabricados foram extraídos e partir deles calculou-se o fator de qualidade. Um transdutor de pressão da *Quartzdyne* também foi caracterizado e os dados obtidos permitem fazer comparações e análises importantes. Num ambiente de baixo vácuo cristais de quartzo comerciais são caracterizados e um ligeiro aumento do fator de qualidade é observado.

No final do capítulo diversas considerações são feitas sobre os procedimentos de caracterização realizados onde sugestões são propostas para futuras investigações.

## 4.1 Caracterização por difração de raios-X

Cristais de quartzo foram submetidos à técnica de difração de raios-X a fim de se identificar onde ocorre os máximos de difração para cada amostra. Utilizou-se o difratômetro de raios-X D5000 fabricado pela Siemens e disponível no Departamento de Física da UFPE. O elemento fonte de raio-X utilizado foi o cobre, onde  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  (40 kV @ 30 mA).

Analisou-se cinco amostras de quartzo: um cubo, onde uma face de cada par de faces simétricas foi submetida aos raios-X, uma placa, um pedaço de lâmina (orientada em  $32^\circ$ ), um disco pós-usinado (disco da Figura 3.6, porém o raio-X aconteceu antes da deposição dos eletrodos) e uma capa protetora do transdutor de pressão da *Quartzdyne*, a imagem dessas amostras são mostradas na Figura 4.1.

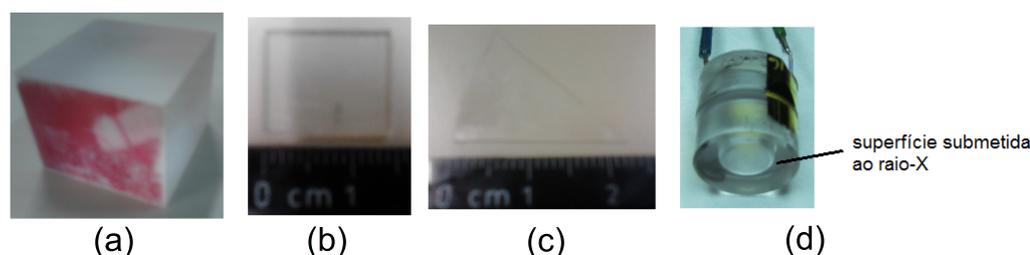


Figura 4.1: Amostras usadas no difratômetro: (a) cubo (face vermelha é a frontal), (b) placa, (c) pedaço de lâmina e (d) capa do sensor da *Quartzdyne* (Cortesia CEN-PES/PETROBRAS).

Na Figura 4.2(a) tem-se o difratograma<sup>1</sup> tomado como referência para o quartzo<sup>2</sup>. Vale destacar que essa referência é obtida a partir de pó de quartzo, o que permite encontrar mais ocorrências de difrações numa quantidade maior de ângulos. O pico de difração mais intenso na notação  $hkl$  ocorre no plano 011 em  $26,62^\circ$ .

O difratograma para as amostras analisadas são apresentados na Figura 4.2(b)-(h), varreu-se uma faixa de  $10^\circ$  a  $90^\circ$  com um passo de  $0,02^\circ/s$ . Nos difratogramas mostrados nas Figura 4.2(b) e (e) observa-se picos de difração em  $26,82^\circ$  e  $26,8^\circ$ , respectivamente, o que certamente está relacionado ao plano 011 observado no difra-

<sup>1</sup>Para não causar confusão ao leitor vale deixar claro que o ângulo  $\theta$  da Equação de Bragg e que aparece nos difratogramas não corresponde ao ângulo de orientação de corte do cristal, são ângulos de naturezas distintas.

<sup>2</sup>Os dados desse difratograma podem ser encontrados em [http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/xtal\\_data/DIFfiles/04292.txt](http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/xtal_data/DIFfiles/04292.txt) e são mostrados na Figura B.4 do Apêndice B.2.2. Esses dados estão relacionados a referência [84].

tograma de referência. Para os difratogramas das amostras correspondente ao pedaço de lâmina de quartzo e do disco usinado, ambas com espessura de  $350 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$  e orientadas em  $32^\circ$ , Figuras 4.2(f) e (g), nenhum pico foi identificado. Quanto a análise da capa do sensor da *Quartzdyne* observa-se um pico em  $21,32^\circ$ , que está próximo do pico de referência 100 em  $20,84^\circ$  e outro em  $26,7^\circ$  que deve estar relacionado ao plano 011.

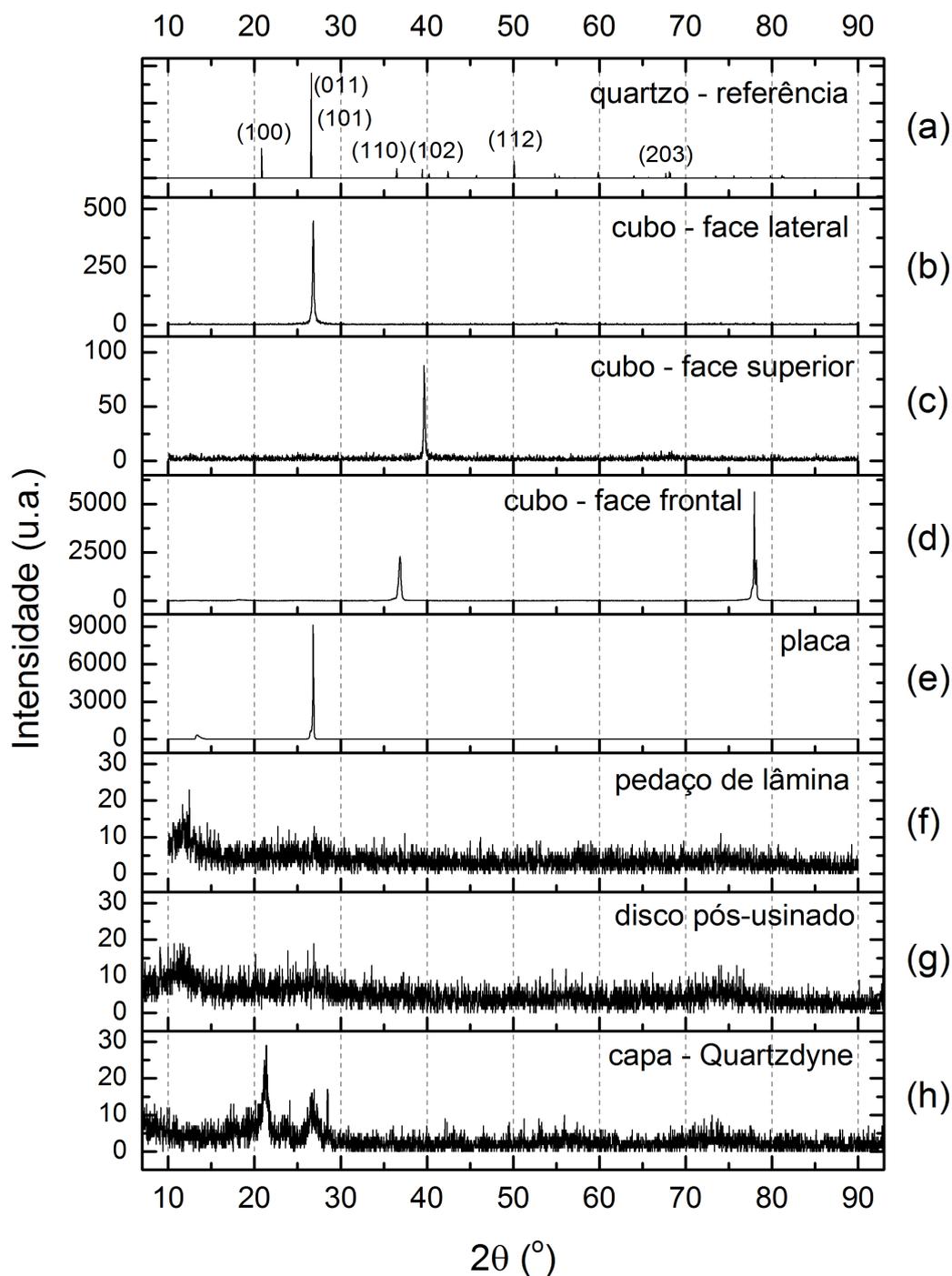


Figura 4.2: Difratogramas das amostras de quartzo.

## 4.2 Caracterização por impedância elétrica

O fator de qualidade dos dispositivos fabricados pode ser calculado a partir das curvas de impedância obtidas numa faixa de frequência próxima a frequência de ressonância do ressonador. Para isso é necessário fazer a extração de parâmetros elétricos de tais curvas, nesta tese utiliza-se o método de Máximos e Mínimos [32], a partir desses parâmetros obtém-se o valor de  $Q$  por meio da Equação 1.8. Utilizou-se o impedancímetro modelo Agilent 4294A *Precision Impedance Analyzer* disponível no LDN conectado a um computador através de um barramento GPIB para capturar o módulo e a fase da impedância. Os cristais de quartzo foram posicionados na placa de circuito impresso mostrada na Figura 4.3 (desenvolvida pela Engenheira Tallita Sobral no LDN), que por sua vez era conectada ao impedancímetro.



Figura 4.3: Placa de circuito impresso para acoplar cristais ao impedancímetro.

### 4.2.1 Discos pós-usinados

O discos de quartzo pós-usinados são mostrados na Figura 3.6. As curvas de impedância podem ser visualizadas na Figura 4.4. Utilizando o método de extração de parâmetros de Máximos e Mínimos foi possível calcular o fator de qualidade para os discos ressonadores, um resumo dos parâmetros pode ser encontrados na Tabela 4.1. Considerando a Equação 1.9 com  $\theta = 32^\circ$  calcula-se  $f_0 = 4,72$  MHz, portanto, um valor com boa concordância ao obtido no impedancímetro.

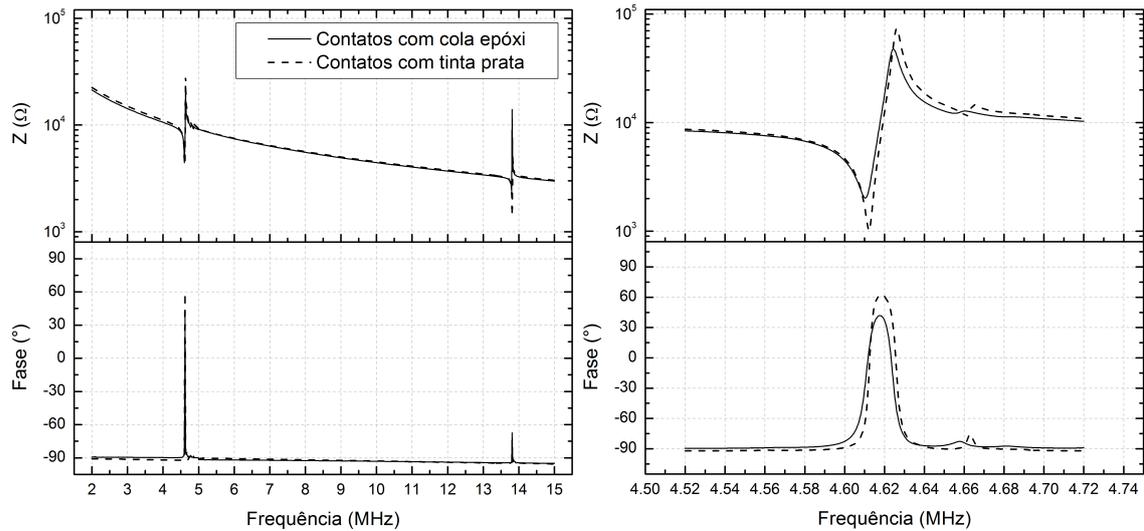


Figura 4.4: Módulo e fase da impedância para os discos de quartzo pós-usinados, o primeiro harmônico é mostrado com mais detalhes nas curvas à direita.

Tabela 4.1: Extração de parâmetros dos discos de quartzo pós-usinado.

Parâmetro	Cristal com	
	cola epóxi	tinta prata
$f_s$ (MHz)	4,6094	4,6122
$f_p$ (MHz)	4,6239	4,6260
$R$ (kΩ)	2,0215	1,0076
$L$ (mH)	51,7331	55,0104
$C$ (fF)	23,0368	21,6455
$C_0$ (pF)	3,72076	3,6249
$Q$	741	1582

Comparando os valores apresentados na Tabela 4.1 observa-se que o fator de qualidade chega a dobrar de valor quando utiliza-se tinta prata (reflexo sobretudo da redução à metade do parâmetro  $R$ ), mas possivelmente isso também está relacionado a melhor definição do filme fino depositado para forma os eletrodos uma vez que foi usado papel adesivo na delimitação dessa região. Porém, ainda assim, os valores obtidos para o fator de qualidade são considerados baixo em relação ao simulado, como se vê na Tabela 2.7. Isso pode ser justificado por diversos fatores, dentre eles: a resistência elétrica e mecânica dos eletrodos de alumínio, da cola epóxi e da tinta prata, rugosidade da superfície e perdas de energia vibracional para os suportes da montagem, ou seja, os fios que fazem os contatos elétricos.

### 4.2.2 Transdutor de pressão da *Quartzdyne*

Curvas de impedância também foram obtidas de um transdutor de pressão da *Quartzdyne* gentilmente cedido pelo CENPES/PETROBRAS (no âmbito do projeto de pesquisa que vem sendo desenvolvido no LDN). O comportamento do módulo e da fase em torno das frequências de ressonância no primeiro e no terceiro harmônicos encontra-se na Figura 4.5. Observa-se uma assinatura de ressonância no terceiro harmônico bem mais definida que no primeiro, e de fato a medição de pressão desses transdutores ocorre na frequência de ressonância do terceiro harmônico.

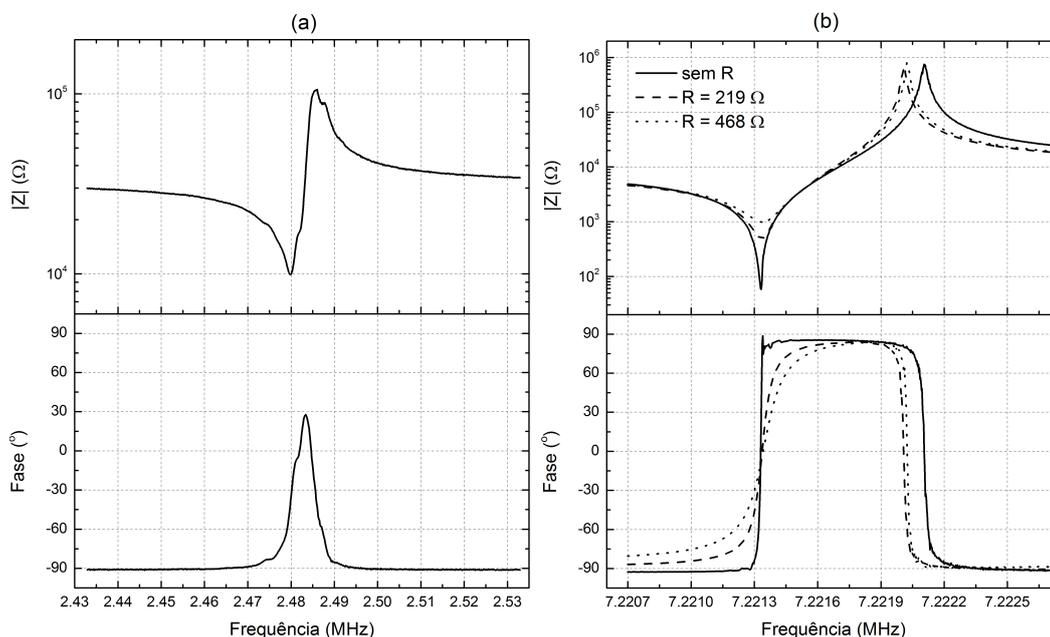


Figura 4.5: (a) Módulo e fase da impedância para o primeiro harmônico do cristal de pressão da *Quartzdyne*. (b) Curvas de impedância para o terceiro harmônico do cristal de pressão da *Quartzdyne*.

Com o intuito de avaliar a alteração do fator de qualidade devido a presença de uma resistência conhecida colocada em série com os terminais do transdutor, conforme Figura 4.6, foi feita a captura das curvas de impedância para dois valores de resistor, 219 e 468  $\Omega$ , os resultados podem ser comparados através da Figura 4.5(b). E na Tabela 4.2 resumi-se os dados da extração de parâmetros. Claramente percebe-se um desvio de comportamento tanto no módulo como na fase da impedância com a presença dos resistores. O valor da fase é reduzido proporcionalmente com o aumento da resistência. Observa-se também que a frequência de ressonância paralela sofreu uma ligeira redução de valor o que pode estar relacionado a presença de capacitâncias

parasitas devido a inserção dos resistores, que acabam por contribuir na capacitância estática do transdutor. Pode-se concluir também que com uma resistência em série alta o formato da fase se assemelha ao formato observado na Figura 4.4, ou seja, confirma o alto valor de  $R$  mostrado na Tabela 4.1.

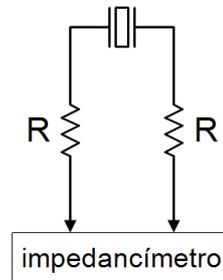


Figura 4.6: Arranjo de resistores em série acoplados ao transdutor de pressão da *Quartzdyne*.

Tabela 4.2: Extração de parâmetros do cristal de pressão da *Quartzdyne*.

harm	$f_s$ (MHz)	$f_p$ (MHz)	$C_0$ (pF)	$R$ ( $\Omega$ )	$L$ (H)	$C$ (fF)	$Q$
1 $^\circ$	2,479900	2,486025	2,401180	9921,7410	0,414309	9,941398	650,65
3 $^\circ$	7,221332	7,222105	2,010062	58,024320	1,129436	0,430074	$8,831 \times 10^5$
3 $^\circ/2 \times 219\Omega$	7,221335	7,222012	2,796211	485,67309	1,287815	0,377182	$1,203 \times 10^5$
3 $^\circ/2 \times 468\Omega$	7,221340	7,222022	2,271156	981,28680	1,278379	0,379966	$5,911 \times 10^4$

### 4.3 Caracterização sob elevada pressão

A caracterização do transdutor sob elevada pressão deverá ser realizada num laboratório de metrologia, onde um equipamento de calibração de pressão poderá ser utilizado para variar a pressão aplicada ao transdutor enquanto um impedancímetro ou o circuito de condicionamento de sinais é mantido num ambiente em condições normais de pressão permitindo observa a variação da frequência com a aplicação de pressão.

### 4.4 Caracterização sob elevada temperatura

O cristal de quartzo orientado no corte-AT deve apresentar uma mínima variação na frequência de ressonância devido à variações de temperatura. O LDN dispõe de uma mufla cuja temperatura pode ultrapassar os 150  $^\circ\text{C}$  (ver Figura 4.7) que poderá ser

utilizado na caracterização dos transdutores de pressão logo que sua devida fabricação ocorra.



Figura 4.7: Mufla disponível no LDN para caracterização térmica dos transdutores.

## 4.5 Caracterização em ambiente de baixo vácuo

Um dos fatores que influenciam o fator de qualidade do ressonador de quartzo está relacionado ao ambiente de gás em que ele está inserido. Em um ambiente de vácuo espera-se um aumento do fator de qualidade. Com o objetivo de verificar esse efeito cristais de quartzo comerciais com fator de qualidade relativamente altos foram inseridos numa câmara evacuada e conectados a um impedancímetro, como se visualiza na Figura 4.8. A câmara consiste de garrafa de vidro com volume interno de 1 litro, cuja a tampa foi cuidadosamente preparada para que por ela passem os dois fios do

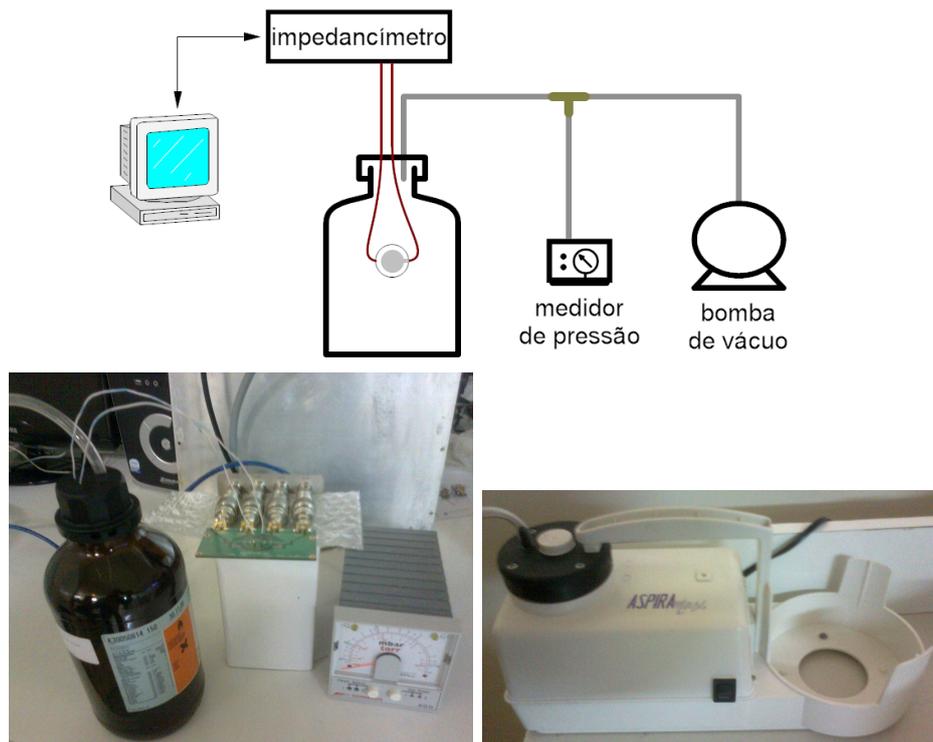


Figura 4.8: Aparato experimental para captura das curvas de impedância com o cristal mantido num ambiente de baixo vácuo.

cristal e uma mangueira por onde se faz vácuo. Uma bomba de vácuo para consultório odontológico foi utilizada. Através de uma derivação na mangueira instalou-se um medidor de pressão.

Dois cristais de quartzo comerciais, como mostrado na Figura 2.20(a), foram utilizados, um com ressonância em 4 MHz e o outro em 10 MHz. As curvas de impedância foram capturadas em quatro situações diferentes, na seguinte ordem:

- Situação 1: cristal com o encapsulamento de metal não alterado;
- Situação 2: cristal com a tampa superior do encapsulamento removida;
- Situação 3: cristal com a tampa superior do encapsulamento removida e com um fio de 25 cm soldado em cada terminal;
- Situação 4: mesmo que anterior, porém inserido na câmara com vácuo (bomba ligada).

Durante os experimentos verificou-se um suave aumento da fase ( $\sim 0,5^\circ$ ) num valor de frequência fixo (entre  $f_s$  e  $f_p$ ) quando a bomba de vácuo era ligada para ambos

os cristais analisados. Mas devido as flutuações na leitura da fase achou-se melhor avaliar o fator de qualidade via extração de parâmetros. As curvas de impedância são observadas na Figura 4.9, enquanto que os dados da extração de parâmetros estão na Tabela 4.3.

Primeiramente, observa-se que os cristais comerciais sem nenhuma alteração no encapsulamento ou nos seus terminais apresentam um fator de qualidade da ordem de  $10^4$  a  $10^5$ , o que está um pouco abaixo do observado no transdutor de pressão da *Quartzdyne*. Percebeu-se que apenas retirando a superfície superior do encapsulamento metálico o fator de qualidade teve uma ligeira redução, o que pode ser um indício de que no processo de encapsulamento desses dispositivos haja alguma preocupação com o tratamento do ambiente de gás ao redor do cristal. A princípio o encapsulamento funciona como uma blindagem e proteção mecânica. É notória a redução da  $f_p$  quando fios de 25 cm são soldados aos terminais dos cristais. Observando o detalhe da fase nos gráficos da Figura 4.9 nota-se uma redução gradual de seu valor à medida que o encapsulamento é aberto e posteriormente quando os fios são soldados aos terminais, ou seja, da Situação 1 a Situação 3. Da Situação 3 para a Situação 4, ou seja, quando o cristal experimenta o baixo vácuo no interior da câmara, tem-se uma elevação do fator de qualidade e também da fase, o que seria esperado uma vez que a dissipação de energia devido as vibrações do ressonador para o ambiente no qual ele está inserido diminui.

Quanto a leitura no medidor de pressão não foi possível perceber uma variação considerável no mostrador. O equipamento atua na faixa de  $10^{-3}$  a 10 Torr, uma vez que a pressão ambiente (1 atm) equivale a  $\approx 760$  Torr acredita-se que seria necessário um medidor para pressões entre 10 Torr e a pressão ambiente para esse experimento.

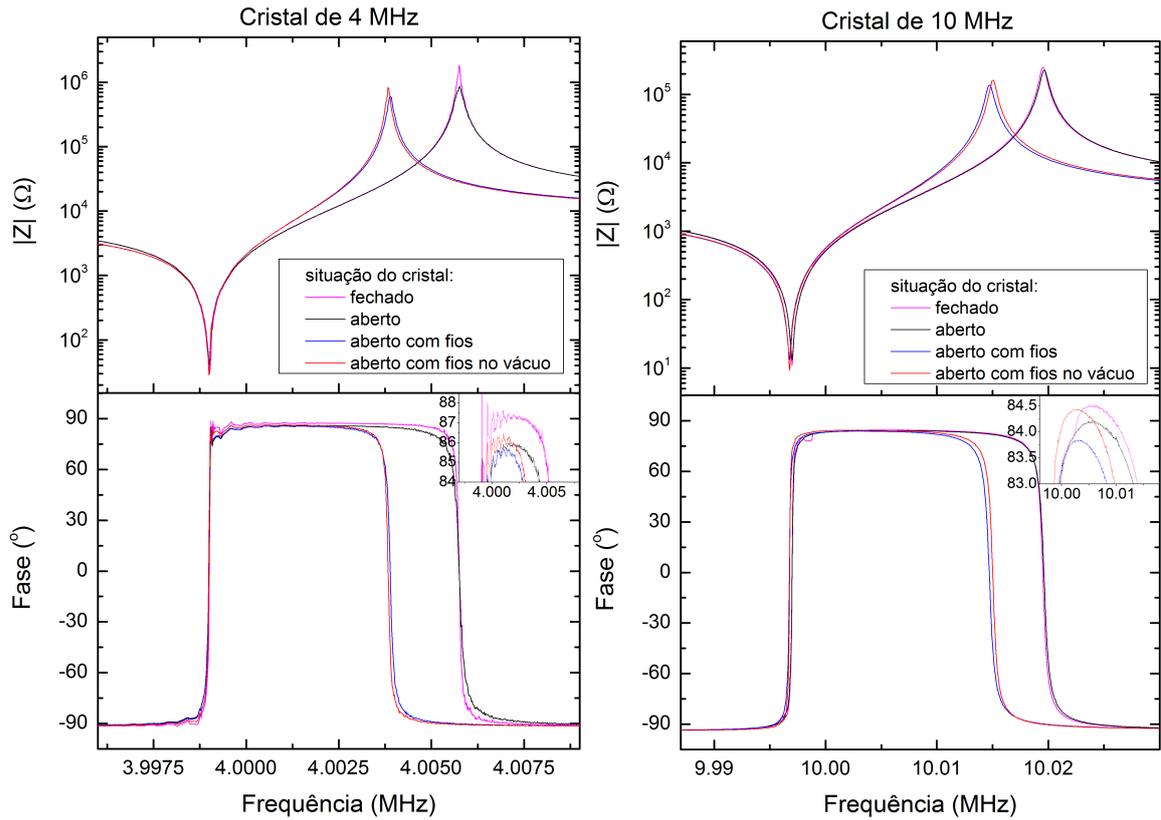


Figura 4.9: Curvas de impedância para os cristais comerciais sob diferentes situações.

Tabela 4.3: Dados da extração de parâmetros para os cristais comerciais sob diferentes situações.

Cristal comercial		Situação			
		1	2	3	4
4 MHz	$f_s$ (MHz)	3,999012	3,999012	3,998993	3,998993
	$f_p$ (MHz)	4,005743	4,005762	4,003887	4,003831
	$C_0$ (pF)	3,533297	3,581045	5,023007	5,072702
	$R$ ( $\Omega$ )	29,719322	44,093807	40,492118	28,629995
	$L$ (mH)	133,049415	130,911402	128,763482	128,984219
	$C$ (fF)	11,904790	12,099216	12,301160	12,280109
	$Q$	$1,1248 \times 10^5$	$7,4598 \times 10^4$	$7,9901 \times 10^4$	$1,1320 \times 10^5$
10 MHz	$f_s$ (MHz)	9,997000	9,9947000	9,996750	9,996750
	$f_p$ (MHz)	10,019500	10,019625	10,014750	10,015063
	$C_0$ (pF)	4,979053	5,108120	6,479209	6,183791
	$R$ ( $\Omega$ )	10,851580	13,013328	13,202260	9,291354
	$L$ (mH)	11,299595	10,949635	10,853406	11,177365
	$C$ (fF)	22,437687	23,147346	23,353744	22,676871
	$Q$	$6,5385 \times 10^4$	$5,2851 \times 10^4$	$5,1636 \times 10^4$	$7,5561 \times 10^4$

## 4.6 Considerações finais

Neste capítulo, os cristais de quartzo passaram por um processo de caracterização por meio de raios-X e os ressonadores fabricados foram caracterizados eletricamente através de um impedancímetro. Apesar dos difratogramas do disco de quartzo usinado não ter apresentado nenhum pico, ou seja, nenhuma orientação predominante, a assinatura nas curvas de impedância foi bem determinada e apresentou razoável concordância com o comportamento simulado. Os resultados dos raios-X merecem ser refeitos, pois, é esperado que a lâmina de quartzo utilizada na fabricação apresente uma orientação bem definida.

Na caracterização do transdutor de pressão da *Quartzdyne* foi possível comprovar o elevado fator de qualidade,  $\sim 10^6$ , dos transdutores comerciais. Quanto aos transdutores fabricados observa-se das extrações de parâmetros uma elevada resistência elétrica, que reduz consideravelmente o fator de qualidade, em consequência do processo de colagem dos contatos elétricos e das perdas ôhmicas nos eletrodos.

O experimento em baixo vácuo para verificar o comportamento do fator de qualidade se mostrou bastante satisfatório apesar da sua construção improvisada. Percebeu-se uma pequena elevação de  $Q$  quando cristais comerciais eram sujeitos a baixa pressão na câmara de vácuo. Como os ressonadores fabricados apresentaram baixíssimo fator de qualidade não foi possível evidenciar o mesmo efeito. As variações da fase foram pequenas e podem ser confundidas com as flutuações das medidas do impedancímetro. Diante disso melhorias no arranjo experimental devem ser feitas como, por exemplo, ajustar o sistema para alcançar pressões ainda mais baixas.

Com os dados da caracterização identifica-se onde ocorreram as principais falhas nas etapas de fabricação permitindo que tais etapas sejam repetidas com o intuito de melhorar os transdutores e otimizar a fabricação. Nesse sentido chegar-se-á em transdutores coerentes com as especificações para esse trabalho descritas no capítulo primeiro. Infelizmente devido a uma série de fatores não se chegou em tais especificações, mas os caminhos percorridos até aqui permitiram ter uma visão de todas as etapas de caracterização dos transdutores ficando como trabalhos futuros a otimização dos processos assim como a aquisição dos equipamentos restantes necessários.

Por fim, vale salientar que a padronização e otimização dos diversos parâmetros

de fabricação para as especificações almejadas possibilitará a produção em maior escala dos transdutores, diminuindo o tempo despendido na mesma e aumentando a disponibilidade de transdutores para caracterizações e testes.

# Capítulo 5

## Sensor inteligente proposto

Neste capítulo é apresentado o projeto do sensor inteligente de pressão. O objetivo é conhecê-lo internamente a partir dos diversos blocos que o constitui para em seguida elaborar os circuitos e dá início aos teste de validação de cada bloco, para finalmente integrar todo o sistema num único encapsulamento, tendo como resultado um dispositivo miniaturizado.

Inicialmente, os diversos blocos que constitui o sensor são apresentados. Alguns blocos como os circuitos de condicionamento de sinais são elaborados utilizando componentes discretos outros, como o conversor de frequência para digital, são realizados em circuitos dedicados com implementação em ASIC.

Com o intuito de consolidar o processo de miniaturização de sensores de pressão para aplicação em poços de petróleo é apresentada uma proposta de encapsulamento cujas dimensões são baseadas em informações obtidas com a Petrobras quanto ao local de instalação e a disponibilidade de espaço no poço.

Finalmente, apresenta-se os procedimento de testes com a integração de todos os blocos do sensor e discute-se as dificuldades encontradas.

## 5.1 Introdução

Com o avanço da tecnologia de integração o desenvolvimento de sensores estão cada vez mais fazendo parte de aplicações com funções inteligentes, que detectam várias condições e fornecem informações a computadores para controlar e monitorar diversas situações, são os chamados “sensores inteligentes” [85, 86, 87, 88]. Nesse novo conceito têm-se, além da capacidade de combinar um sensor com um transdutor de maneira mais eficiente e com menor custo possível, a vantagem de processar e transmitir os dados monitorados ou armazenados, ou seja, eles podem ser acoplados a sistemas de microprocessadores e computadores em rede, podendo fornecer informações via cabo ou por algum meio de comunicação sem fio. O conceito de sensor inteligente é padronizado pela família de normas IEEE 1451. A família de normas IEEE 1451 trata da especificação de dados eletrônicos e descreve as interfaces de rede e protocolos de comunicação para os modelos de interface do sensor inteligente [89].

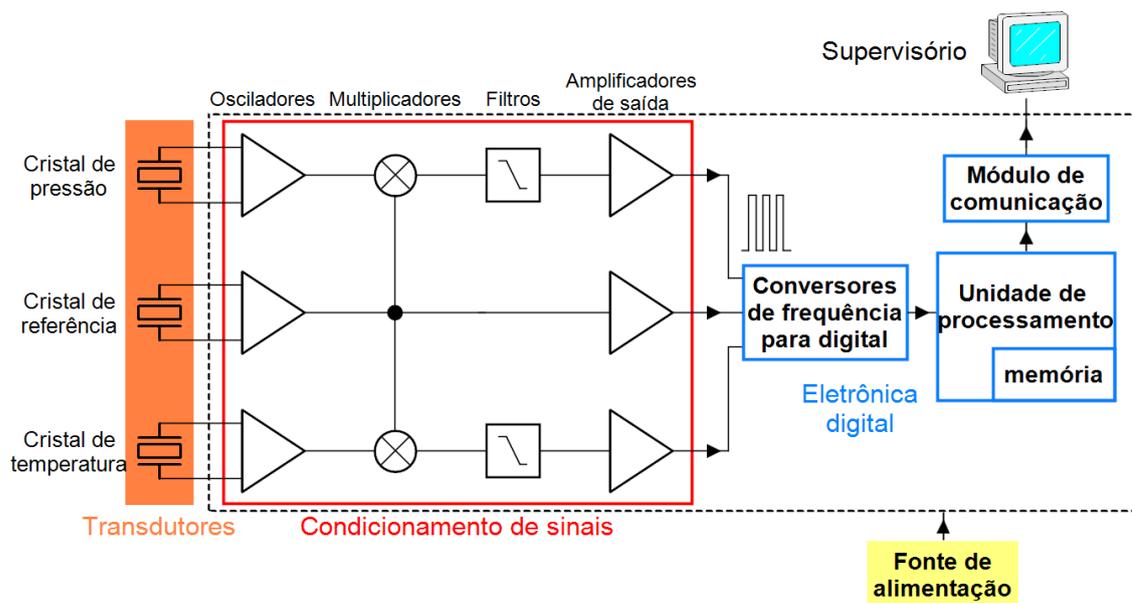


Figura 5.1: Sensor inteligente proposto para monitoração da pressão e temperatura em poços de petróleo e gás.

O diagrama em blocos para o sensor inteligente de pressão proposto é apresentado na Figura 5.1. Ele é composto por três transdutores de quartzo relacionados à medição de pressão, temperatura e o terceiro como referência de frequência. Na parte de condicionamento de sinais encontra-se circuitos osciladores, misturados e

amplificadores, a saída deste último está em formato de onda quadrada cuja frequência está relacionada a grandeza medida. Conversores de frequência para digital são responsáveis por fazer a digitalização da informação de frequência e enviá-las à unidade de processamento. Uma memória não-volátil pode ser usada, por exemplo, para armazenar informações de calibração do transdutor. Por fim, um módulo de comunicação é responsável por transmitir as medições de pressão e temperatura para um supervisor através de um protocolo de comunicação adequado.

O meio de transmissão de dados mais utilizado é realizado por longos cabos que chegam até o sensor, esses cabos são especiais para suportar altas temperaturas e recebem bastante reforço mecânico (ver Figura B.7).

Do ponto de vista de comunicação sem fio o ambiente de poço de petróleo e gás está longe de ser um local ideal para dispositivos eletrônicos transmissores de RF, sobretudo devido a presença de água salgada que age atenuando o sinal de potência. Outras implementações já foram pensadas, como, por exemplo, usar a própria estrutura do poço como uma linha de transmissão coaxial, onde o *casing* (ver Apêndice B.4) seria o condutor de terra, o *tubing* o condutor de sinal e o dielétrico seria o próprio fluxo multifásico (petróleo, gás e água), porém diversos fatores não colaboram com essa proposta: as perdas durante a transmissão do sinal devido a presença de água, a estrutura *casing-tubing* pode apresentar curtos-circuitos ou circuitos abertos, entre outros [90].

Os sensores inteligentes serão colocados em áreas remotas, o que não permitirá facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Neste cenário, o tempo de vida de um sensor depende da quantidade de energia disponível. Aplicações, protocolos, e algoritmos para rede de sensores não podem ser escolhidos considerando apenas sua “elegância” e capacidade, mas definitivamente a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de qualquer solução para esse tipo de rede deve levar em consideração o consumo de energia.

Além da fabricação do transdutor de pressão, partes dos circuitos envolvidos no sensor inteligente foram analisados nesta tese e serão mais detalhados a seguir.

## 5.2 Circuitos de condicionamento

### 5.2.1 Osciladores, multiplicadores e amplificadores

O objetivo do circuito oscilador é gerar uma saída em forma de onda quadrada cuja frequência esteja relacionada a pressão experimentada pelo cristal de quartzo, o que facilita a integração ao circuito digital posterior, no caso o conversor de frequência para digital. Um estudo de osciladores a cristal desenvolvido para sensores de pressão pode ser encontrado na dissertação de Mestrado da Engenheira Tallita Sobral realizada no LDN como parte do projeto do sensor inteligente de pressão [32].

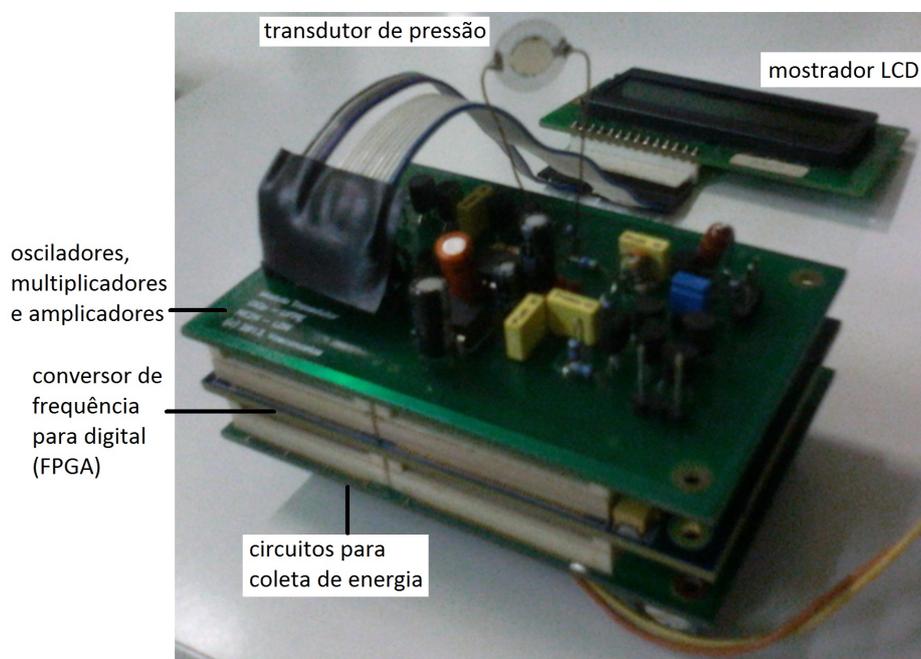


Figura 5.2: Empenhamo de placas com os diversos circuitos para o sensor de pressão (Engenheiro Henrique Müller).

Os circuitos osciladores, multiplicadores e amplificadores estão apresentados na Figura 5.2. O projeto dos mesmos foi realizado pelo Engenheiro Henrique Müller no LDN, numa primeira versão estão montados na forma de componentes discretos com transistores MOSFETs, paralelamente o mesmo está sendo desenvolvido em circuito integrado onde as simulações ocorrem no simulador SpiceOpus e o projeto analógico nas ferramentas CADENCE.

### 5.2.2 Conversor de frequência para digital

O conversor de frequência para digital foi desenvolvido em linguagem de descrição de *hardware* VHDL e funciona numa ampla faixa de frequência. Para a prototipação foi utilizada a FPGA XC3S500E da família Spartan-3E da Xilinx disponível no LDN e a ferramenta de projeto ISE 9.2i também da Xilinx [91].

Inicialmente, a validação do conversor foi realizada aplicando-se vários sinais de onda quadrada numa larga faixa de frequência, 100 Hz a 2 MHz, através do gerador de funções PM5190-Philips onde a leitura do conversor pôde ser comparada com a leitura de um freqüencímetro de precisão HP53181A. As medidas mostraram um erro de 1 ppm quando comparadas com o freqüencímetro.

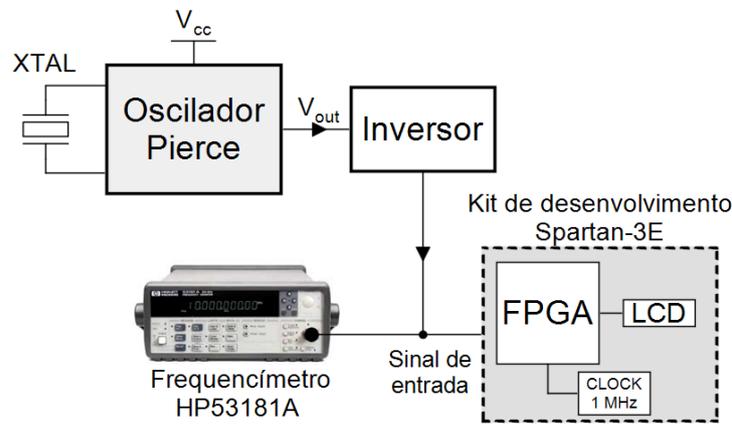


Figura 5.3: Aparato experimental para obter as frequências de cristais.

Posteriormente, o conversor foi testado com um circuito oscilador Pierce. Como estava disponível no laboratório diversos cristais comerciais, esses foram posicionados no componente XTAL como se vê na Figura 5.3. Após a devida fabricação do transdutor de pressão será possível observar a variação da frequência do oscilador nesse arranjo experimental. Aqui, o sinal  $V_{out}$  foi aplicado a um inversor lógico, para converter a onda senoidal numa onda quadrada. A saída foi aplicada ao freqüencímetro e ao conversor de frequência, como se mostra na Figura 5.3. Neste esquema, o sinal de relógio é obtido a partir do sinal de 50 MHz presente no kit de desenvolvimento. Este sinal é dividido até 1 MHz, servindo como referência para o conversor. Os resultados destas duas leituras foram semelhantes até uma casa decimal particular, a partir deste algarismo decimal uma flutuação foi observada em ambos os dispositivos, como pode ser visto na Tabela 5.1. A flutuação é devido à instabilidade apresentada no circuito

Tabela 5.1: Conformidade entre o conversor de frequência e o frequencímetro de precisão HP53181A.

Cristal	Digitos coincidentes
corte-X (10 MHz)	10,0109 MHz
corte-Y (10 MHz)	9,924 MHz
comercial (10 MHz)	9,998 MHz
comercial (4 MHz)	3,9992 MHz

oscilador.

Após os resultados positivos do conversor em FPGA deu-se início ao desenvolvimento de um ASIC nas ferramentas de circuito integrado CADENCE disponível no LDN<sup>1</sup>. Nesse chip, incorporou-se também dois osciladores obtidos na própria biblioteca de circuitos da ferramenta de projeto, de modo que operem como o sinal de referência para o conversor. Uma captura de tela do *layout* enviado para a fabricação do ASIC encontra-se na Figura 5.4. A fabricação ocorreu na empresa AMS (*Austriamicrosystems*).

Vale ressaltar que o processo de envio dos chips fabricados para o LDN sofreu diversos contratempos. Numa primeira compra, diversos problemas alfandegários foram encontrados, de modo que, foi necessário iniciar um segundo processo de fabricação e de compra, pois, na primeira remessa o lote com os chips ficou preso na alfândega. Decorridos mais de 6 meses desde o primeiro pedido de fabricação, finalmente, o ASIC do conversor chegou ao laboratório. Uma foto do chip fabricado está presente na Figura 5.5.

Diversos testes foram feitos tanto no conversor como nos osciladores. Os testes nos osciladores mostraram o funcionamento esperado com diferentes cristais com frequências de ressonância distintas. Porém, os testes realizados no conversor não foram positivos. Não foi possível verificar em nenhum dos pinos de saída do conversor um sinal no nível lógico esperado. Com isso, uma análise detalhada do *layout* enviado para fabricação foi realizada nas ferramentas de projeto, e pôde-se constatar que a ligação do anel de alimentação dos *pads* não foi realizada corretamente. Devido ao término da licença de uso da ferramenta de projeto não foi possível reenviar um novo *layout* com as devidas correções para uma nova fabricação do ASIC.

<sup>1</sup>As ferramentas foram adquiridas dentro do Programa CI Brasil do CNPq.

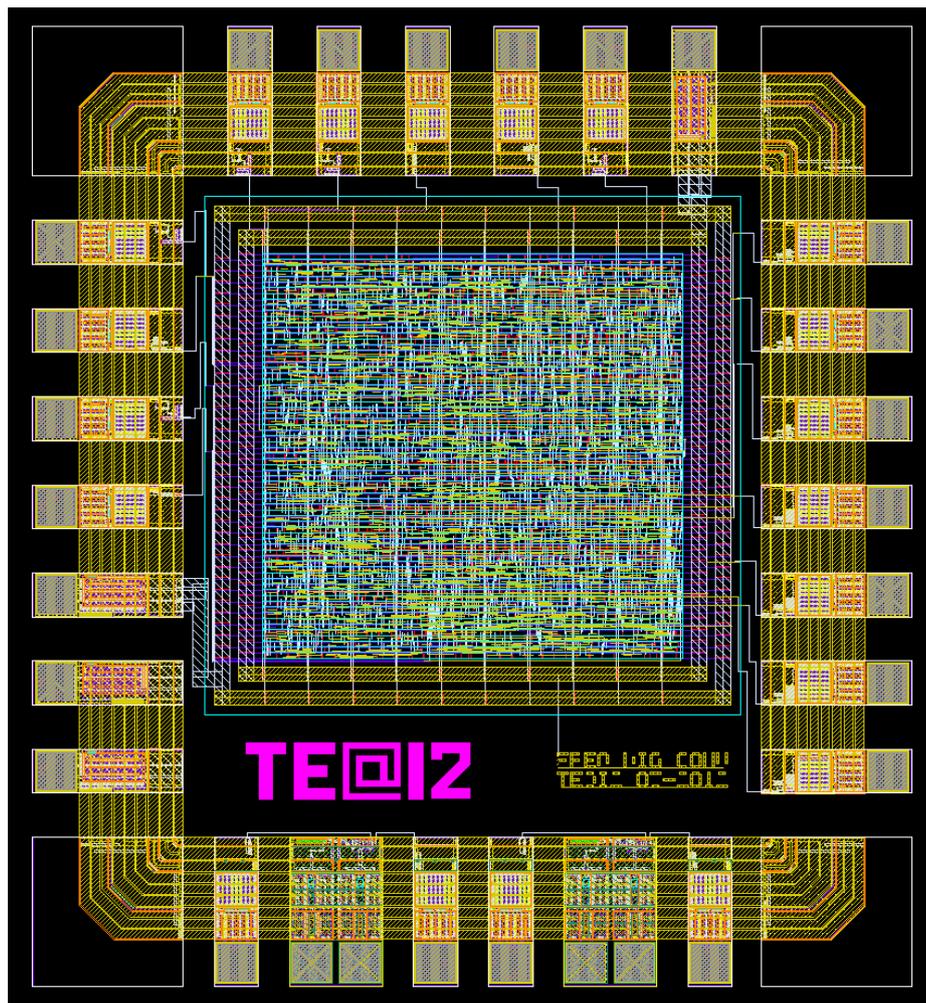


Figura 5.4: *Layout* do conversor de frequência para digital, dimensões:  $2000 \times 2200 \mu\text{m}$ .

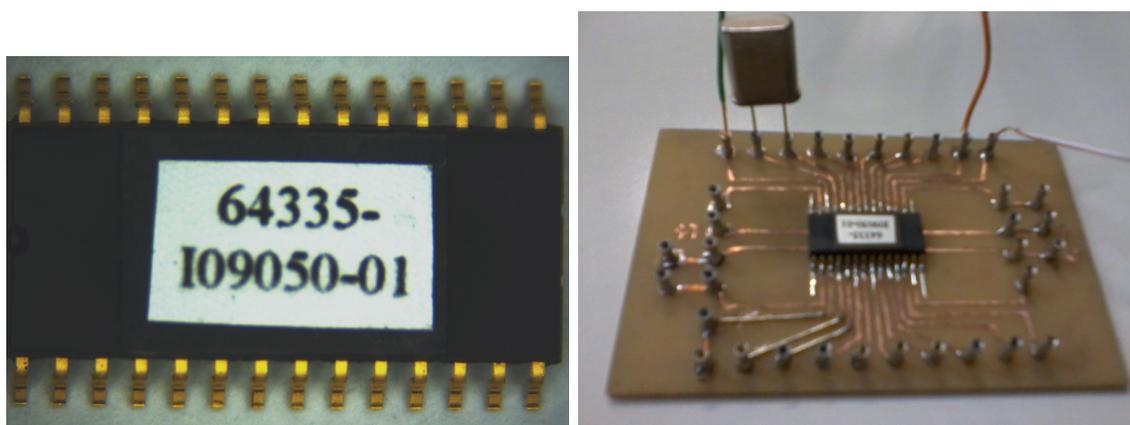


Figura 5.5: (a) Foto do chip do conversor de frequência para digital obtida por meio de um microscópio óptico. (b) Placa de circuito impresso desenvolvida para validação do chip.

### 5.3 Sistema para coleta de energia

Num ambiente de poço de petróleo os sensores inteligentes de pressão serão colocados em áreas remotas, o que não permitirá facilmente o acesso a esses elementos para manutenção ou troca de bateria. Nesse sentido, um sistema capaz de extrair energia do próprio ambiente de instalação do sensor para supri-lo é proposto.

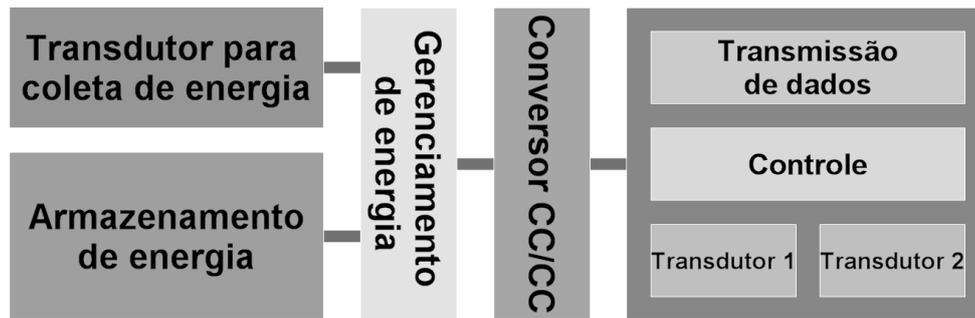


Figura 5.6: Componentes de um sensor inteligente com sistema de coleta de energia.

Uma visão esquemática dos componentes de um sensor inteligente com coleta de energia é apresentada na Figura 5.6. Tal sistema é composto do transdutor para coleta de energia, unidade de gerenciamento, armazenamento e conversão CC/CC de energia, unidade de controle (processamento, memória, condicionamento, etc.), transdutores e transmissão de dados. Os dispositivos para armazenamento de energia são em geral baterias ou capacitores de estado sólido.

Diferentes mecanismos de transdução são investigados na literatura para a coleta de energia, entretanto, o efeito piezoeletrico tem se destacado devido a densidade de energia que proporciona e também facilidade de uso. Outra possibilidade consiste na conversão de energia através da indução eletromagnética, com uma bobina móvel, que oscila sob a ação das vibrações, ficando submetida a um campo magnético variável.

A configuração mais simples de um gerador piezoeletrico é composta por vigas ou placas metálicas recobertas por uma ou mais camadas de material piezoeletrico e excitadas a partir do movimento de sua base conforme Figura 5.7 [92, 93, 94]. O estudo destes geradores tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas em escala reduzida, os dispositivos MEMS.

Um sistema de gestão de energia realizado com um circuito integrado da *Linear Technology*, o LTC3588-1, é apresentado na Figura 5.8. A unidade de armazenamento

é constituída por um supercapacitor [95, 96].

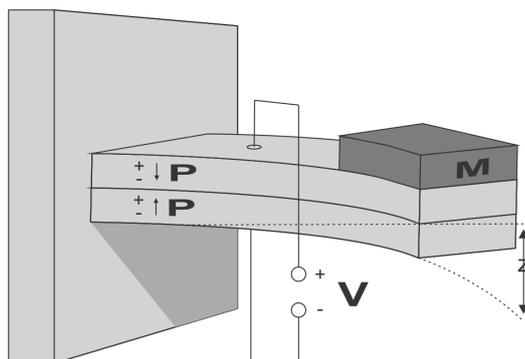


Figura 5.7: Esquema de estrutura para a geração de energia a partir de vibração.

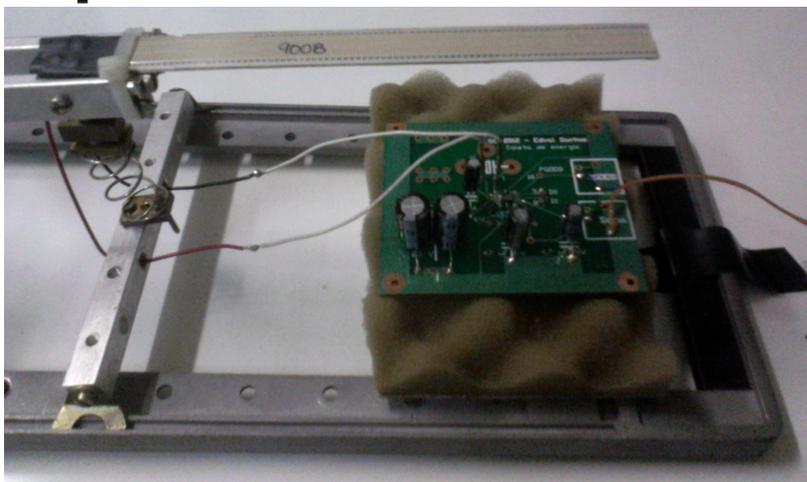
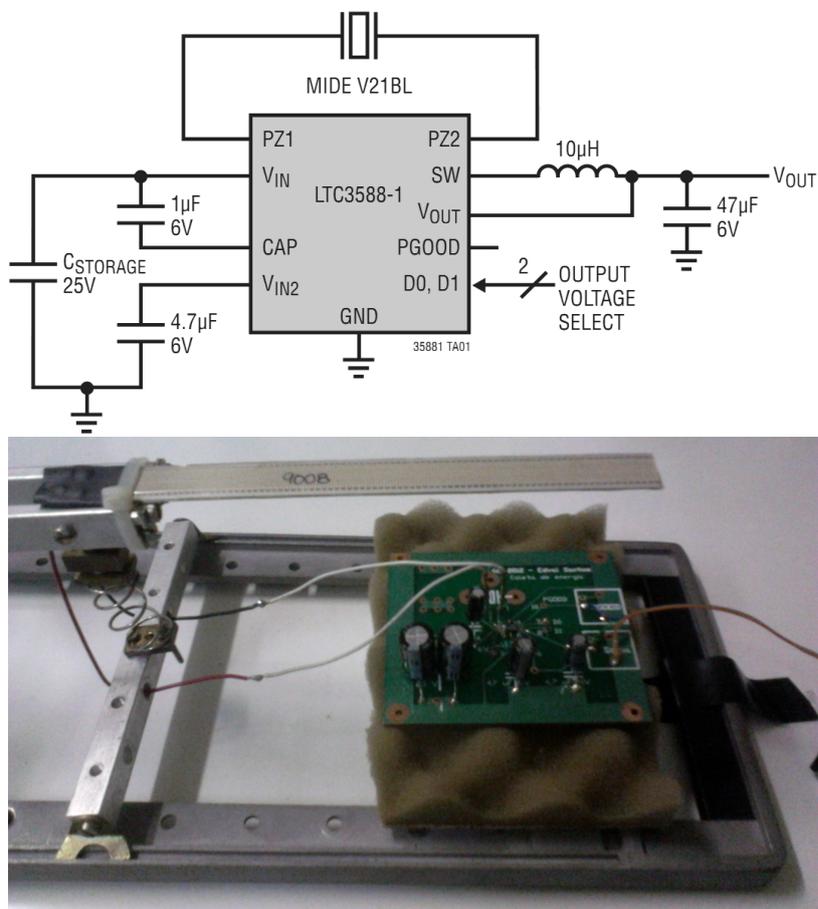


Figura 5.8: Esquema elétrico do circuito integrado LTC3588-1 para coleta de energia por vibração e implementação do sistema de testes (Engenheiro Henrique Müller).

## 5.4 Testes de bancada

### 5.4.1 Validação do circuito de condicionamento

O diagrama de blocos do circuito de condicionamento é mostrado na Figura 5.1. Enquanto que a placa de testes é mostrada na Figura 5.2 juntamente com o ressonador de quartzo fabricado fazendo parte do circuito oscilador Pierce. Não foi possível utilizar um cristal de referência, pois, é necessário que o mesmo tenha uma ressonância muito próxima a do cristal fabricado, assim, em substituição foi utilizado um gerador de funções (onda senoidal), modelo Agilent 33522A. Também não foi considerado o cristal de temperatura. A saída do multiplicador é conectada a um inversor lógico de modo que na saída do inversor tem-se um sinal de onda quadrada. A leitura da frequência foi obtida por meio de um frequencímetro de precisão.

A frequência fundamental do cristal fabricado é de 4,612 MHz, mas ao inseri-lo no circuito percebeu-se que o mesmo oscilava apenas na frequência de 13,86 MHz, ou seja, no terceiro harmônico. Assim, variou-se a frequência do gerador de funções para valores bem próximos a esse e observou-se a frequência após o estágio do inversor. Espera-se que a mesma esteja entre 10 kHz e 100 kHz, o que é suficiente para relacionar a faixa de aplicação de pressão com a frequência nos sensores da *Quartzdyne*. Realmente obteve-se a uma variação satisfatória, os resultados podem ser visualizados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Comportamento do circuito de condicionamento de sinais.

Gerador de funções (MHz)	Frequencímetro (kHz)
13,85	32,47
13,86	42,63
13,87	52,15

### 5.4.2 Testes com aplicação de pressão

O aparato experimental desenvolvido para fins de validação do transdutor de pressão é apresentado na Figura 5.9. Aqui, o sistema de condicionamento de sinais é composto por um circuito oscilador do tipo Pierce. A informação digitalizada da frequência do oscilador na saída do conversor é transmitida para um LCD via comunicação

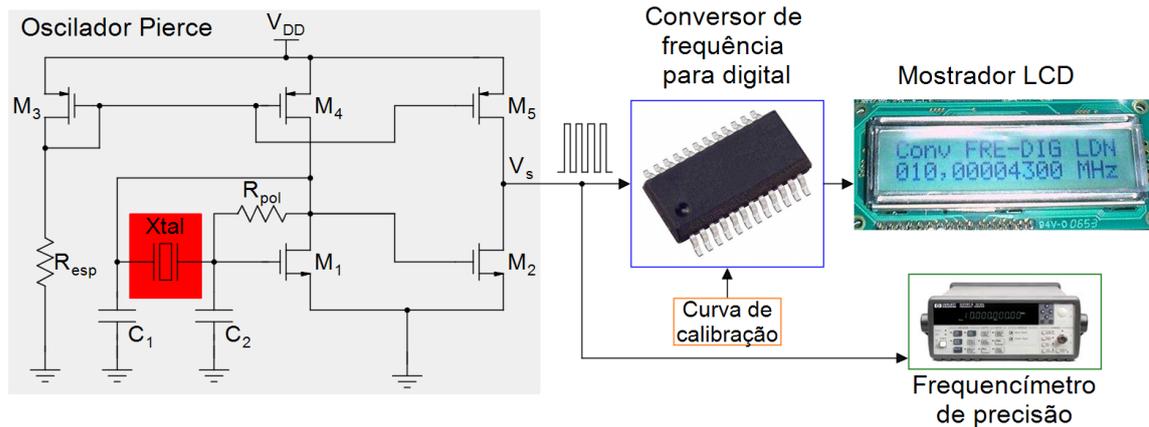


Figura 5.9: Aparato experimental para validação do transdutor de pressão. O diagrama esquemático do oscilador Pierce para o sensor inteligente está presente.

serial onde os resultados são comparados com as leituras de um freqüencímetro de precisão (HP53181A) disponível no LDN. Adicionalmente, poderá ser gravado no próprio ASIC do conversor uma curva de calibração permitindo assim fazer a relação entre freqüência e pressão e, eventualmente, com um segundo cristal para medição de temperatura, entre freqüência e temperatura.

## 5.5 Encapsulamento

A integração de todos os blocos do sensor inteligente de pressão ocorre no encapsulamento. A definição das dimensões máximas para o encapsulamento do sensor estão baseadas em informações técnicas obtidas com a Petrobras, essa comunicação foi realizada no âmbito de um projeto de pesquisa realizado no LDN. Em reuniões, informações sobre o local de instalação de sensores de pressão e o espaço disponível para seu encaixe na tubulação foram obtidas. Diferentemente dos PDGs (ver Apêndice B.4) que vem sendo usados no mandril (trecho da tubulação designada para utilização de sensores) e que monitoram a pressão e a temperatura em um ponto específico do poço, o sensor desenvolvido nesse trabalho tem como objetivo ser instalado no reservatório do poço numa estrutura de tela. Tal tela visa impedir a entrada de corpos indesejáveis para o interior da tubulação, funcionando como um filtro, deixando passar apenas o petróleo. Nela existe uma região com diâmetro de 3/8" e alguns centímetros de comprimento onde o sensor poderá ser instalado. Uma proposta de encapsulamento com

base nessas informações é apresentada na Figura 5.10, a disposição dos transdutores e dos blocos de circuitos eletrônicos também é mostrada.

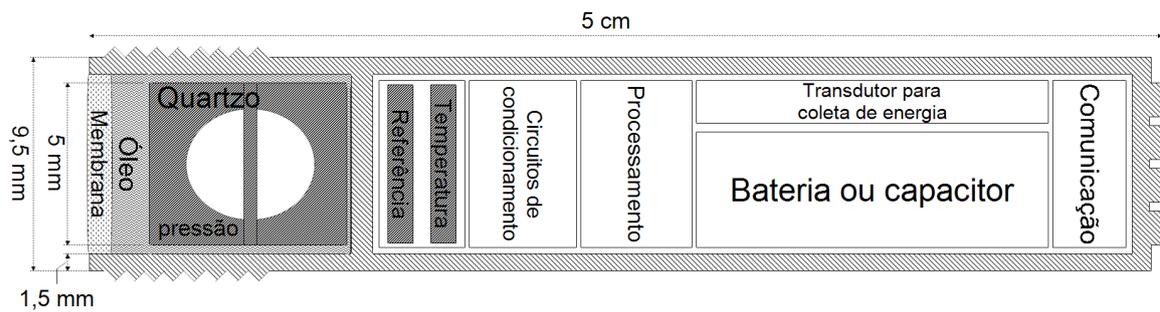


Figura 5.10: Vista em corte transversal do encapsulamento para o sensor inteligente de pressão.

O disco ressonador de quartzo devidamente protegido por duas capas forma o transdutor de pressão, este está posicionado num primeiro compartimento preenchido com óleo mineral. A pressão decorrendo do petróleo é transferida para a membrana que por sua vez é repassada para o óleo e, então, de maneira hidrostática chega até o transdutor. Esse mecanismo é baseado no sensor de pressão da *Quartzdyne* [97]. Num segundo compartimento estão posicionados os demais transdutores e os circuitos eletrônicos.

## 5.6 Proposta de integração 3D

Com o intuito de se evitar perdas de conteúdo de informação ou interferência de alguma fonte de sinal indesejado que podem adicionar compensação, não-linearidade e ruídos nos sinais, e também devido ao fato que determinadas funções são específicas para cada tipo de aplicação, pode-se buscar a realização de todo o sistema eletrônico em um mesmo *chip*. Isso é possível devido ao avanço das técnicas de microfabricação, e tais dispositivos são denominados de “sensores inteligentes integrados”. Nesse tipo de implementação ganha-se sobretudo na redução do tamanho, do peso e na economia de energia do sensor, o que é muito desejado para aplicações onde o espaço de instalação do sensor é muito reduzido e também de difícil acesso.

Mostra-se na Figura 5.11 uma proposta em corte transversal de todo o sistema, onde o quartzo de pressão deve ter largura em torno de 5 a 10 cm e será fabricado por usinagem e quartzo de referência poderá ser desenvolvido em estrutura FBAR

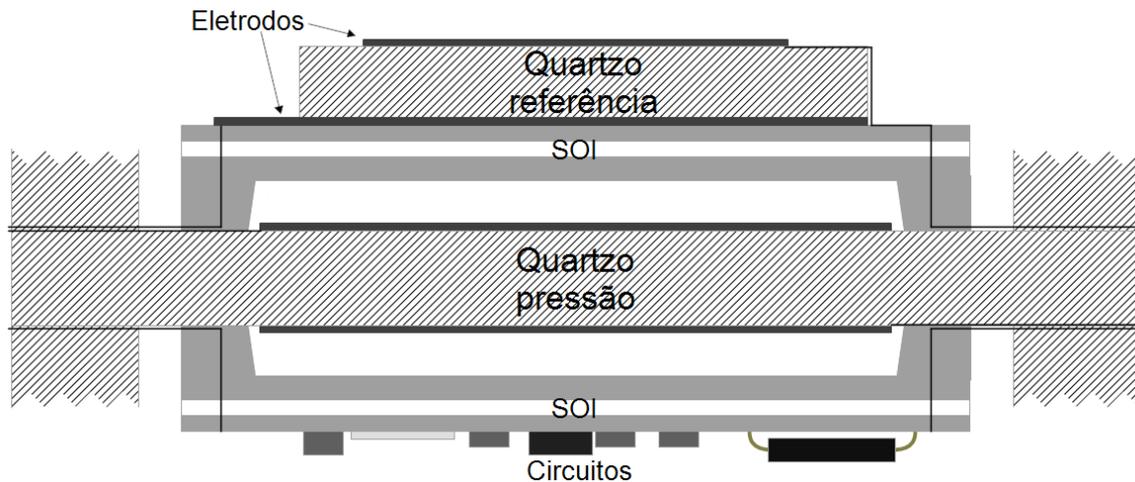


Figura 5.11: Integração de transdutores de quartzo e circuitos em lâminas de SOI (Cortesia Prof. Edval Santos).

ou SMR. Após a fabricação e a caracterização dos tradutores e projeto em circuito integrado da eletrônica de condicionamento e eletrônica digital todo o sistema poderá ser combinado em um mesmo encapsulamento.

Após a confecção das máscaras têm-se as etapas de colagem, essa poderá ser realizada na empresa EVG localizada na Áustria [98]. As etapas de deposição, seja por pulverização ou evaporação, serão realizadas no LDN, assim como as etapas de fotolitografia, cozimento e corrosão quando necessárias.

## 5.7 Considerações finais

Nesse capítulo, mostrou-se a integração do sensor inteligente de pressão, descrevendo seus principais componentes e seus respectivos desenvolvimentos, além de deixar claro como proceder com os testes em bancada.

A realização do conversor de frequência para digital passou por diversas etapas de projeto, desde da concepção dos códigos em VHDL até o envio do ASIC para fabricação. Com isso conseguiu-se estabelecer no laboratório um fluxo de processo utilizando ferramentas comerciais de projeto de circuitos integrados digitais. Vale ressaltar que obter o domínio dessas ferramentas foi uma atividade bastante trabalhosa. Foi necessário despender bastante tempo para entender seu funcionamento, onde várias versões para o fluxo de processo foram aprimoradas a medida que o conhecimento da ferramenta avançava. Superados os problemas de envio do ASIC, foi realizada sua

caracterização no LDN, mas infelizmente verificou-se uma falha na alimentação dos *pads* do conversor de frequência para digital e o mesmo deverá ser reenviado para fabricação de forma a se conseguir seu pleno funcionamento. Uma vez que todo o sistema eletrônico seja testado em componentes discretos poderá ser desenvolvido o ASIC de todos os blocos do sensor inteligente.

Uma proposta de sistema de coleta de energia do ambiente através de um transdutor piezoelétrico foi apresentada e poderá ser utilizada não apenas em ambiente de poço mas também em outras aplicações de sensores inteligentes onde a instalação do mesmo é de difícil acesso para troca de baterias.

Uma vez que o transdutor de pressão seja fabricado no corte-AT será possível iniciar os teste em alta pressão. O encapsulamento proposto, por sua vez, poderá ser fabricado paralelamente ao desenvolvimento dos transdutores e quando pronto poderá ser testado em ensaios de rigidez mecânica.

Futuramente com a integração do transdutor e do circuitos de condicionamentos no encapsulamento será possível fazer testes em campo do sensor de pressão, onde poderá ser verificada a disposição da Petrobras que dispõem de poços específicos para esse tipo de teste.

# Capítulo 6

## Conclusões

Essa tese aborda o desenvolvimento de sensores inteligentes de pressão para aplicação em poços de produção de petróleo e gás. A realização de trabalhos práticos envolvendo etapas de usinagem e fabricação em microeletrônica são sempre atividades que exigem informações de diversas áreas de conhecimento como, mecânica, eletrônica, materiais e fabricação, que aqui estão reunidas, de modo que o desenvolvimento do sensor miniaturizado é alcançado.

Para se desenvolver dispositivos usando técnicas de microfabricação deve-se ter uma boa infraestrutura em laboratório, desde as etapas de projeto e simulação, passando pelas etapas de fabricação, equipamentos para caracterização e por fim a prototipagem, onde se busca validar o dispositivo em condições próximas para as quais ele foi especificado. Viu-se que no LDN essas características são encontradas e que é possível também colaborações com outros laboratórios nacionais e internacionais.

A principal razão para o uso dos ressonadores à cristal de quartzo em diversas aplicações com controle de frequência é o seu alto fator de qualidade aliado ao pequeno tamanho da estrutura. Um critério importante diz respeito ao compromisso entre ter uma estrutura cuja frequência de ressonância seja no máximo de 10 MHz, pois, acima dessa frequência exige-se bem mais complexidade dos circuitos eletrônicos envolvidos, e que tenha robustez mecânica suficiente para aguentar pressões da ordem de 100 MPa (14507 psi). A limitação na frequência de operação exclui a possibilidade de transdutores de pressão a filmes finos, enquanto que a faixa de operação de pressão exclui a possibilidade do uso de MEMS.

Uma modelagem para o fator de qualidade do transdutor piezoelétrico de quartzo

foi implementada com sucesso. O modelo foi validado para o cristal de quartzo no corte-AT. Para conseguir uma simulação mais realista, uma região PML foi incluída de maneira a modelar a energia absorvida por estruturas de suporte.

Visando um projeto com elevado fator de qualidade, verificou-se que o mesmo é limitada pela perdas intrínsecas na região de altas frequências, aqui modelada pela viscosidade do quartzo. No entanto, discos com superfícies bi-convexa ou plano-convexa podem ser usados para aumentar o fator de qualidade substancialmente. Uma pequena curvatura já produz um aumento de dez vezes. Além disso, o disco de ressonância plano-convexo apresenta quase o mesmo fator de qualidade em relação ao bi-convexo. Assim, uma vez que apenas uma superfície é curva o processo de fabricação se torna mais simples.

A resposta em frequência para o sensor de quartzo configurando sua instalação no fundo do poço de petróleo foi simulada, nessa situação o sensor foi submetido a pressões superiores a 100 MPa por compressão e a temperaturas de 200 °C. Os resultados de simulação apresentados neste trabalho podem ser usados como linha de fundo para otimizar o fator de qualidade de tais transdutores.

O desenvolvimento dos discos ressonadores de quartzo seguiram basicamente duas etapas de fabricação. O uso da máquina de usinagem foi um grande desafio e exigiu bastante esforço e tempo dedicado para conhecimento da máquina, uma vez que se tratou de um equipamento novo no LDN, e o treinamento no mesmo se deu de maneira autodidata. Utilizando a técnica de deposição de filmes finos por pulverização conseguiu-se fazer os eletrodos dos discos de quartzo usinados, onde o uso de papel adesivo para proteger as regiões de não crescimento de filme se mostrou bastante satisfatória. Infelizmente as lâminas utilizadas não estavam orientadas no corte-AT, mas independente do corte da lâmina uma metodologia para fabricação está validada e se mostrou bastante eficaz.

Na etapa de caracterização elétrica foi realizada a extração de parâmetros dos discos fabricados e o fator de qualidade comparado com os resultados de simulação. Como resultado obteve-se um comportamento de  $Q$  bem inferior, o que pode ser justificado pelas condições como os contatos elétricos foram aderidos ao disco ressonador, pois, seja fazendo uso de cola epóxi condutora como de tinta prata, isso acaba contribuindo com perdas relacionadas a resistência elétrica e mecânica do ressonador.

Por fim, diante do exposto pode-se citar como qualidades em destaque desse projeto o uso da tecnologia piezoelétrica com o quartzo que permite a medição de altas pressões e tem o comportamento com a temperatura bem definido, a robustez mecânica do sensor, as facilidades que as técnicas de fabricação proporcionam para se construir a estrutura com a frequência desejada, a sensibilidade na aferição da pressão com o uso do conversor de frequência para digital, o tamanho compacto do sensor encapsulado, ou seja, a miniaturização, a inovação da proposta com integração 3D, a possibilidade de expansão com outros módulos de eletrônica como, por exemplo, para coleta de energia e transmissão de dados.

## 6.1 Contribuições dessa tese

As seguintes contribuições desta tese podem ser destacadas:

- Modelagem computacional piezoelétrica do ressonador de quartzo;
- ASIC do conversor de frequência para digital desenvolvido utilizando ferramentas comerciais;
- Princípio de consolidação e domínio de tecnologia nacional das etapas de modelagem, fabricação e testes de desempenho para um sensor inteligente de pressão a quartzo.

## 6.2 Trabalhos futuros

A continuidade do presente trabalho deve estar primeiramente dedicada a usinagem de discos ressonadores de quartzo devidamente orientados no corte-AT. Para tanto, lâminas com espessuras entre 200 e 400  $\mu\text{m}$  devem ser adquiridas e da mesma forma ferramentas de usinagens para discos com diâmetros de 5 mm. Para aumentar o fator de qualidade das estruturas usinadas, um processo de polimento de superfícies pode ser avaliado de modo a se criar um disco ressonador plano-convexo. Paralelamente, o processo de fabricação das capas protetoras poderá ser desenvolvido. E, então, após a deposição dos eletrodos e colagem das capas protetoras o transdutor estará pronto para testes de desempenho utilizando o sistema de calibração de pressão.

Nesse ponto, seria interessante confrontar os resultados experimentais com os resultados de simulação aqui apresentados. Dessa análise poderá ser possível melhorar alguma etapa do processo de fabricação com o intuito de otimizar o fator de qualidade. Um outro ponto importante diz respeito a avaliar computacionalmente como o fluido que envolve o transdutor de pressão afeta o fator de qualidade. Uma vez que um primeiro protótipo completo do transdutor de pressão esteja pronto poderá ser avaliada sua resolução de pressão utilizando os circuitos discretos desenvolvidos no projeto.

Por fim, numa etapa futura, o ressonador de quartzo devidamente fabricado e caracterizado poderá ser combinado em um mesmo encapsulamento com a eletrônica de condicionamento e processamento, gerenciamento de energia e circuito de comunicação desenvolvidos em substratos com tecnologia SOI e desta maneira avançar na direção do que realmente se almeja que é um sensor inteligente de pressão para aplicações em poços de petróleo e também outros ambientes considerados como agressivos.

# Apêndice A

## Piezoelasticidade

O efeito piezoelétrico acopla as propriedades mecânicas e elétricas de um cristal. Como resultado desse acoplamento tem-se uma polarização. Um modelo molecular simples explicando a polarização elétrica como resultado de uma força ou deformação sobre o material é apresentado na Figura A.1(a). Antes do material ser submetido a uma força externa o centro resultante das cargas positivas e negativas em cada molécula coincidem, fazendo com que o efeito dessas cargas seja cancelado mutuamente. Como resultado é obtida uma molécula eletricamente neutra.

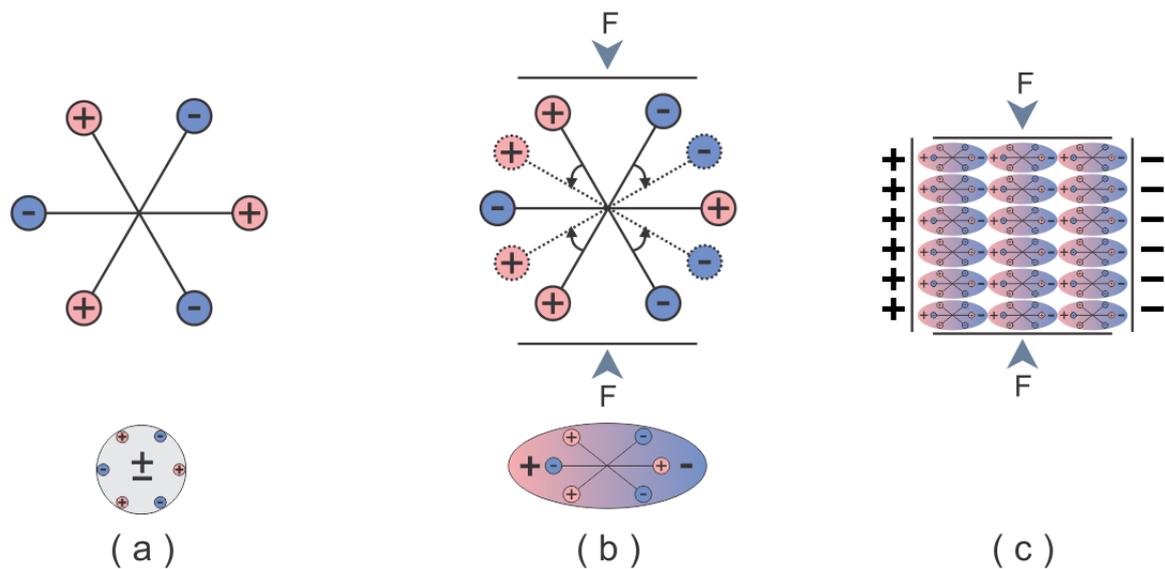


Figura A.1: O processo de polarização em um cristal piezoelétrico. (a) Molécula não perturbada. (b) Molécula sujeita a uma força externa. (c) Efeito de polarização na superfície do material.

Ao exercer uma tensão mecânica no material, sua estrutura é deformada elasti-

camente, levando a uma separação dos centros de cargas positivas e negativas das moléculas, o que gera pequenos dipolos como pode ser visto na ver Figura A.1(b). As cargas internas dos pólos são mutuamente canceladas e a distribuição das cargas ligadas aparecem na superfície do material, conforme a Figura A.1(c), ou seja, o material está polarizado. Esta polarização gera um campo elétrico macroscópico e pode ser usada para transformar a energia mecânica (deformação do material) em energia elétrica. Essa característica constitui o efeito direto da piezoelectricidade e foi descoberta em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie ao analisarem cristais de sal. A palavra “piezo” é de origem grega e significa pressão, assim “piezoelectricidade” pode ser entendida como eletricidade por pressão [37].

Similarmente, o efeito inverso também ocorre, ou seja, a aplicação de um campo elétrico produz uma resposta mecânica. Isso significa que uma propagação de onda elástica através do cristal piezoeletrico pode ser originada usando um campo elétrico externo.

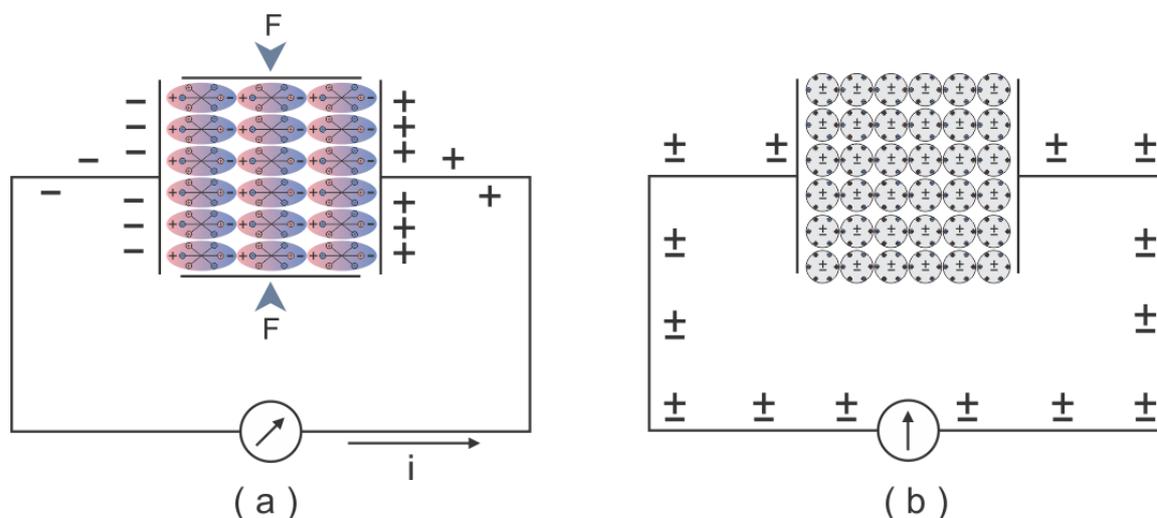


Figura A.2: (a) Movimento de cargas elétricas livres quando o material sofre uma deformação. (b) Após a retirada da deformação o fluxo de corrente cessa.

Se eletrodos são depositados nas superfícies do cristal e esses são curto-circuitados, então a aplicação de uma força deformadora no cristal irá causar o movimento das cargas elétricas livres do condutor, conforme a Figura A.2(a), este fluxo de cargas livres permanecerá até que o efeito de polarização seja neutralizado. Quando a força é retirada a polarização desaparece e o fluxo de cargas livres será em sentido contrário até que o equilíbrio seja atingido, conforme a Figura A.2(b).

O efeito piezoelétrico, direto ou inverso, só ocorre em estruturas cristalinas que não possuem um centro de simetria, uma vez que essa propriedade física tem sua origem justamente na anisotropia do cristal, ou seja, no fato da resposta do material a um estímulo externo não ser a mesma em todas as direções. Ao ser tensionado ou comprimido, um material piezoelétrico passará a apresentar uma polarização elétrica ou uma mudança de polarização se o material tiver uma polarização espontânea não nula.

As estruturas cristalinas podem ser divididas em 32 classes ou grupos pontuais. Entre essas 32 classes, 20 não têm centro de simetria e exibem propriedades piezoelétricas [99].

Os irmãos Curie verificaram experimentalmente que a densidade de cargas que surgia na superfície do cristal era proporcional a tensão (*stress*) mecânica exercida e da mesma forma tal densidade desaparecia com a ausência de deformação. Essa relação foi então formulada matematicamente e de maneira simples é apresentada na Equação A.1,  $P$  representa a polarização piezoelétrica,  $d$  é o coeficiente de deformação piezoelétrico e  $T_d$  representa a tensão mecânica de deformação aplicada ao material piezoelétrico [37]. A unidade de tensão mecânica no sistema internacional (SI) é o  $N/m^2$  (Newton por metro quadrado), que também pode ser chamada de Pascal, cujo símbolo é  $Pa$ .

$$P = dT_d \quad (\text{A.1})$$

Os irmãos Curie verificaram também o efeito inverso e demonstraram que a razão entre a deformação (*strain*) produzida e a magnitude do campo elétrico aplicado no efeito inverso é igual a razão entre a polarização produzida e a magnitude da tensão mecânica aplicada no efeito direto, conforme a Equação A.2:

$$S = dE \quad (\text{A.2})$$

onde  $S$  é a deformação elástica devido a piezoeletricidade e  $E$  é o campo elétrico aplicado. Deformação representa o gradiente (taxa de variação espacial) do deslocamento devido a tensão aplicada e é uma medida adimensional. O acoplamento entre campo elétrico e deformação elástica depende da classe de simetria do material.

Dentro do limite elástico, ou seja, quando o corpo recupera sua forma original após cessar a atuação da força, existe uma relação linear entre a tensão mecânica aplicada e a deformação elástica, linearidade esta que expressa uma relação geral conhecida como Lei de Hooke. Essa relação para o caso unidimensional e para sólidos não piezoelétricos é dada por:

$$T_e = cS \quad (\text{A.3})$$

onde  $T_e$  representa a tensão mecânica e  $c$  é a constante elástica relacionada a rigidez do material, também conhecida como módulo de Young para o caso unidimensional.

Os efeitos direto e inverso podem ser formulados com variações e utilizando também a Lei de Hooke:

$$P = dT_d = dcS = eS \quad (\text{A.4})$$

$$T_e = cS = cdE = eE \quad (\text{A.5})$$

onde  $e$  é a constante de acoplamento piezoelétrico responsável por acoplar de maneira linear os efeitos mecânico e elétrico.

Eletricamente, um material piezoelétrico é um dielétrico polarizado e devido a essa polarização piezoelétrica o vetor deslocamento elétrico  $D$  total será dado pela Equação A.6:

$$D = \varepsilon E + P = \varepsilon E + eS \quad (\text{A.6})$$

onde  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do material.

Durante a aplicação de uma campo elétrico num material piezoelétrico surge uma tensão mecânica resultante, conforme a Figura A.3. Analisando um ponto particular do material essa resultante será dada pela Equação A.7.

$$T = cS - eE \quad (\text{A.7})$$

Para um material piezoelétrico tridimensional, as equações precisam levar em conta o fato de que pode haver anisotropias. Nesse caso, as grandezas e os coeficientes dos termos das equações acopladas deixam de ser escalares e passam a ser

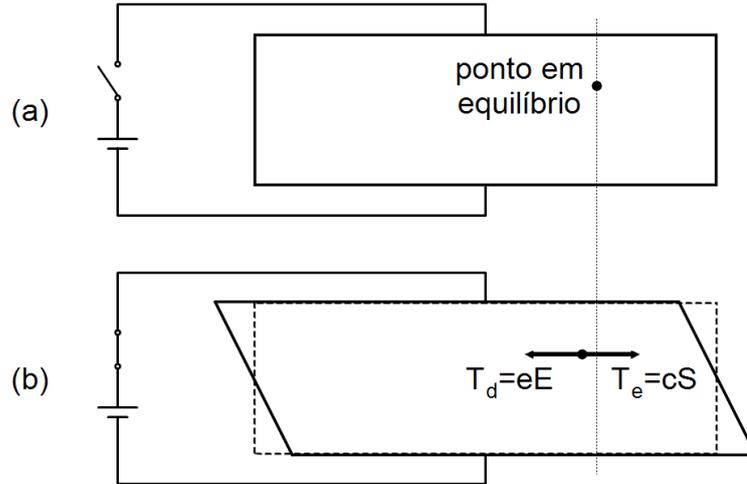


Figura A.3: Tensões que atuam num ponto do interior de um material piezoelétrico quando sujeito a uma diferença de potencial.

tensores, logo, as Equações A.6 e A.7 devem ser reescritas. Assim, essas equações tensoriais representam matematicamente os efeitos da piezoelectricidade direto (Equação A.8) e inverso (Equação A.9) e juntas são denominadas Relações Constitutivas da Piezoelectricidade.

$$D_i = e_{ijk}S_{jk} + \varepsilon_{ij}E_j \quad (\text{A.8})$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k \quad (\text{A.9})$$

Cada elemento do tensor  $T_{ij}$  representa a componente da tensão na direção  $j$  agindo na  $i$ -ésima face de um volume infinitesimal (ver Figura A.4). A deformação pode ser calculada para qualquer direção no sólido e é dada pela seguinte equação

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \sum_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right) \quad (\text{A.10})$$

esse tensor é simétrico, portanto,  $S_{ij} = S_{ji}$ , e relaciona a taxa de variação de deslocamento de um ponto na direção  $i$  ao longo do eixo- $j$ . Por exemplo,  $S_{11}$  representa o gradiente de deslocamento na direção-1 ao longo do eixo-1. Esse termo será não-nulo no caso de um material fixado em uma de suas extremidades sendo esticado ao longo do eixo-1. Da mesma maneira,  $S_{22}$  e  $S_{33}$  representam deformações nas direções 2 e 3, respectivamente. Os termos  $S_{ij}$  quando  $i \neq j$  são denominadas de deformações de cisalhamento, essas deformações são não-nulas quando há uma diferença angular

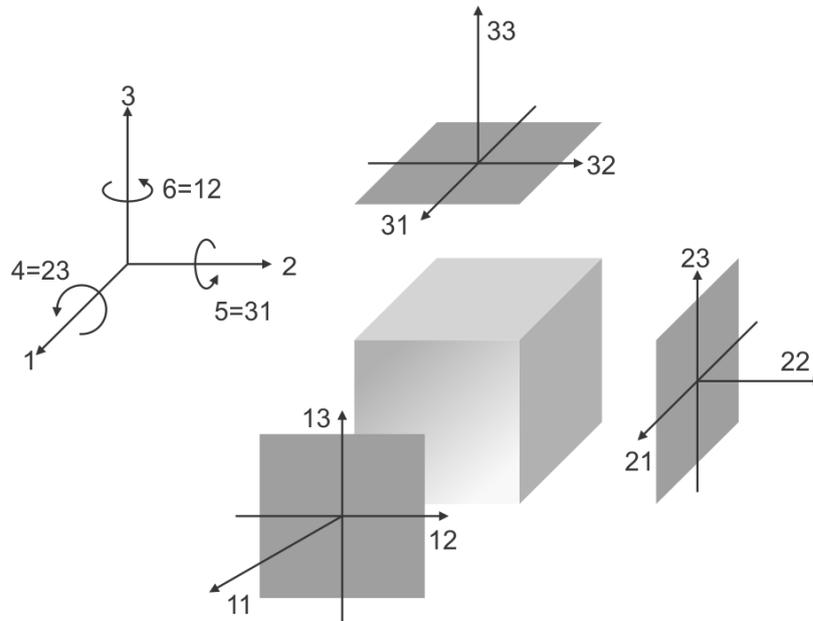


Figura A.4: Indicação dos eixos coordenados num cubo piezoelétrico. Cada eixo tem diferentes tipos de tensões e deformações agindo no material.

entre elementos iniciados nas direções  $i$ -ésima e  $j$ -ésima. Tensões e deformações em um sólido elástico podem ser compressivas, tracionadas ou cisalhadas. A tensão de compressão tende a encurtar o material, enquanto que uma tensão de tração tende a alongá-lo. Estas tensões formam a classe de tensões longitudinais [100].

Para um modelo de primeira ordem, ou seja, linear, as derivadas de ordem maior que a unitária podem ser desprezadas na Equação A.10. Uma vez que o deslocamento de um ponto no interior do material pode ocorrer nas três dimensões a componente  $u_i$  representa o deslocamento do ponto na direção  $i$  da posição inicial  $x_i$  para a posição final  $x'_i$ ,  $u_i = x'_i - x_i$ .

Muitas vezes é mais conveniente trabalhar com uma notação matricial compacta, como a notação de Voigt [39]. A notação de Voigt consiste na substituição de pares de índices  $ij$  ou  $kl$  por simples índices  $p$  ou  $q$ , onde  $i, j, k$  e  $l$  assumem os valores 1, 2 ou 3, e  $p$  e  $q$  assumem os valores 1, 2, 3, 4, 5 ou 6, conforme a Tabela A. Nessa nova notação têm-se  $S_{ij} = S_p/2$  quando  $i \neq j$  e  $p = 4, 5$  ou  $6$  [37].

Tabela A.1: Notação de redução de índices de acordo com Voigt.

$ij$ ou $kl$	11	22	33	23 ou 32	31 ou 13	12 ou 21
$p$ ou $q$	1	2	3	4	5	6

Vê-se que um ponto particular num material piezoelétrico pode experimentar 6

tipos de tensões mecânicas, três longitudinais que dependem das direções das coordenadas e três transversais ou tipo torção envolvendo o eixo correspondente como apresentado na Figura A.4. Muitas vezes é usado como convenção que a direção-3 está alinhada ao longo do eixo de polarização do material [101].

Na forma matricial as Equações A.8 e A.9 se tornam

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} & \varepsilon_{14} & \varepsilon_{15} & \varepsilon_{16} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{24} & \varepsilon_{25} & \varepsilon_{26} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} & \varepsilon_{34} & \varepsilon_{35} & \varepsilon_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

A presença de anisotropias na rede cristalina implica em matrizes simétricas, em geral existem 21 constantes elásticas independentes, 18 constantes de acoplamento piezoelétricas independentes e 6 constantes dielétricas independentes. As constantes elásticas podem ser entendidas como constantes de mola microscópicas que caracterizam o comportamento elástico do sólido.

## A.1 Placa ressonante de quartzo ideal

Os modos de vibração e as frequências de ressonância de uma estrutura de quartzo são determinados usando as Equações A.8 e A.9. Para um cristal de quartzo de espessura  $h$  e orientado no corte-AT onde suas superfícies estão livres de tensão mecânica e agem

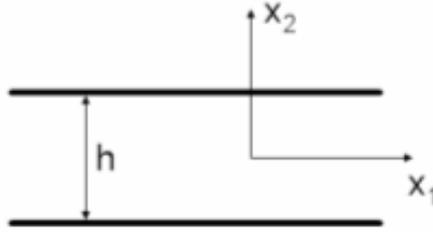


Figura A.5: Placa de quartzo de espessura  $h$  com comprimento infinito na direção  $x_1$ , os potenciais elétricos são aplicados nas posições  $h/2$  e  $-h/2$ .

como eletrodos (ver Figura A.5), a resposta de um estímulo elétrico nos eletrodos faz com que a estrutura comece a vibrar. Assumindo que o sistema é sem perdas o mesmo ficará convertendo energia elétrica em mecânica e vice-versa devido ao efeito piezoelétrico [39]. Nesse sentido as equações que governam o movimento são:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0 \quad \left( -\frac{h}{2} < x_2 < \frac{h}{2} \right) \quad (\text{A.13})$$

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k, \quad D_i = e_{ijk} S_{jk} + \varepsilon_{ij} E_j \quad \left( -\frac{h}{2} < x_2 < \frac{h}{2} \right) \quad (\text{A.14})$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad E_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \quad \left( -\frac{h}{2} < x_2 < \frac{h}{2} \right) \quad (\text{A.15})$$

onde  $\Phi$  é o potencial elétrico. A densidade de cargas livres é nula, pois, o material piezoelétrico age como um dielétrico nessa região, assim haverá apenas cargas polarizadas, que são consideradas intrinsecamente em sua definição. Será considerada a possibilidade dos seguintes deslocamentos e potenciais:

$$u_i = u_i^*(x_2) e^{j\omega t} \quad (\text{A.16})$$

$$\Phi = \Phi^*(x_2) e^{j\omega t} \quad (\text{A.17})$$

Considera-se apenas deslocamento do corpo na direção  $x_1$  e conseqüentemente só haverá componente não-nula de deformação  $S_6$ :

$$S_6 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} \quad (\text{A.18})$$

Como o campo elétrico está aplicado na direção  $x_2$ , só haverá variação de potencial

na direção  $x_2$ :

$$E_2 = -\frac{\partial\Phi}{\partial x_2} = -\frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2}e^{j\omega t} \quad (\text{A.19})$$

Na forma matricial a tensão mecânica será dada pela Equação A.20:

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & 0 & 0 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2}e^{j\omega t} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ e_{21} & 0 & 0 \\ e_{31} & 0 & 0 \\ e_{41} & 0 & 0 \\ 0 & e_{22} & e_{53} \\ 0 & e_{22} & e_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2}e^{j\omega t} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.20})$$

As componentes não-nulas da tensão são mostradas a seguir.

$$T_5 = c_{56} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} + e_{25} \frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} \quad (\text{A.21})$$

$$T_6 = c_{66} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} + e_{26} \frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} \quad (\text{A.22})$$

Na forma matricial o deslocamento elétrico será dado pela Equação A.23.

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{25} & e_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{35} & e_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2}e^{j\omega t} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ 0 & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2}e^{j\omega t} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.23})$$

As componentes não-nulas do deslocamento elétrico são mostradas a seguir.

$$D_2 = e_{26} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} - \varepsilon_{22} \frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} \quad (\text{A.24})$$

$$D_3 = e_{36} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} - \varepsilon_{32} \frac{\partial\Phi^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} \quad (\text{A.25})$$

As equações de movimento e carga fornecem as Equações A.26 e A.27.

$$\frac{\partial T_6}{\partial x_2} = \rho \ddot{u}_1 \Rightarrow c_{66} \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_2^2} + e_{26} \frac{\partial^2 \Phi^*}{\partial x_2^2} = -\rho \omega^2 u_1^* \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{\partial D_2}{\partial x_2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \Phi^*}{\partial x_2^2} = \frac{e_{26}}{\varepsilon_{22}} \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_2^2} \quad (\text{A.27})$$

Pode-se integrar a Equação A.27:

$$\Phi^* = \frac{e_{26}}{\varepsilon_{22}} u_1^* + B_1 x_2 + B_2 \quad (\text{A.28})$$

onde  $B_1$  e  $B_2$  são constantes de integração. Substituindo a Equação A.28 nas Equações A.22 e A.26 obtém-se:

$$T_6 = \bar{c}_{66} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} e^{j\omega t} + e_{26} B_1 e^{j\omega t} \quad (\text{A.29})$$

$$\frac{d^2 u_1^*}{dx_2^2} + \frac{\rho}{\bar{c}_{66}} \omega^2 u_1^* = 0 \quad (\text{A.30})$$

onde

$$\bar{c}_{66} = c_{66} (1 + k_{26}^2) , \quad k_{26}^2 = \frac{e_{26}^2}{c_{66} \varepsilon_{22}} \quad (\text{A.31})$$

aqui  $k_{26}$  representa o coeficiente de acoplamento eletromecânico ou piezoelétrico. A solução da Equação A.30 fornece a Equação A.32.

$$u_1^*(x_2) = A_1 \sin(\xi x_2) + A_2 \cos(\xi x_2) , \quad \xi = \sqrt{\frac{\rho}{\bar{c}_{66}}} \omega \quad (\text{A.32})$$

Substituindo está última na expressão do potencial e da tensão mecânica tem-se

$$\Phi^*(x_2) = \frac{e_{26}}{\varepsilon_{22}} [A_1 \sin(\xi x_2) + A_2 \cos(\xi x_2)] + B_1 x_2 + B_2 \quad (\text{A.33})$$

$$T_6 = \{\bar{c}_{66} \xi [A_1 \cos(\xi x_2) - A_2 \sin(\xi x_2)] + e_{26} B_1\} e^{j\omega t} \quad (\text{A.34})$$

Aplicando a condição de contorno apresentada na Equação A.35, ou seja, que não há tensão mecânica em nenhuma das três direções nas superfícies da placa, a Equação A.34 resulta no Sistema de Equações A.36.

$$T_6 = 0 , \quad x_2 = \pm \frac{h}{2} \quad (\text{A.35})$$

$$\begin{cases} \bar{c}_{66}\xi [A_1 \cos(\xi \frac{h}{2}) - A_2 \sin(\xi \frac{h}{2})] + e_{26}B_1 = 0 \\ \bar{c}_{66}\xi [A_1 \cos(\xi \frac{h}{2}) + A_2 \sin(\xi \frac{h}{2})] + e_{26}B_1 = 0 \end{cases} \quad (\text{A.36})$$

Somando e subtraindo essas duas equações do sistema tem-se

$$\bar{c}_{66}\xi A_1 \cos\left(\xi \frac{h}{2}\right) + e_{26}B_1 = 0 \quad (\text{A.37})$$

$$\bar{c}_{66}\xi A_2 \sin\left(\xi \frac{h}{2}\right) = 0 \quad (\text{A.38})$$

Outra condição de contorno permite escrever a Equação A.39.

$$\Phi\left(\frac{h}{2}, t\right) - \Phi\left(-\frac{h}{2}, t\right) = V_0 e^{j\omega t} \quad (\text{A.39})$$

Aplicando a Equação A.33 nessa última tem-se

$$2\frac{e_{26}}{\varepsilon_{22}}A_1 \sin\left(\xi \frac{h}{2}\right) + 2B_1 \frac{h}{2} = V_0 \quad (\text{A.40})$$

Considerando a situação de vibração livre e que nenhum potencial externo é aplicado ao cristal,  $V_0 = 0$ , as Equações A.37, A.38 e A.40 se desacoplam em dois conjuntos de equações. Para o modo simétrico tem-se a Equação A.38 e para o modo anti-simétrico as Equações A.37 e A.40.

Considerando a solução não-trivial para o modo simétrico obtém-se a Equação A.41.

$$\sin\left(\xi \frac{h}{2}\right) = 0 \Rightarrow \xi_n \frac{h}{2} = n \frac{\pi}{2}, n = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (\text{A.41})$$

Semelhantemente para o modo anti-simétrico chega-se na Equação A.42.

$$\cot\left(\xi \frac{h}{2}\right) = \frac{2\bar{k}_{26}^2}{\xi h}, \quad \bar{k}_{26}^2 = \frac{k_{26}^2}{1 + k_{26}^2} \quad (\text{A.42})$$

onde  $\bar{k}_{26}^2$  é chamado de coeficiente de acoplamento efetivo e  $0 \leq \bar{k}_{26}^2 < 1$ . Se esse coeficiente for suficientemente pequeno ao ponto de ser desprezado, então, tem-se a seguinte condição para o modo anti-simétrico:

$$\cos\left(\xi \frac{h}{2}\right) = 0 \Rightarrow \xi_n \frac{h}{2} = n \frac{\pi}{2}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{A.43})$$

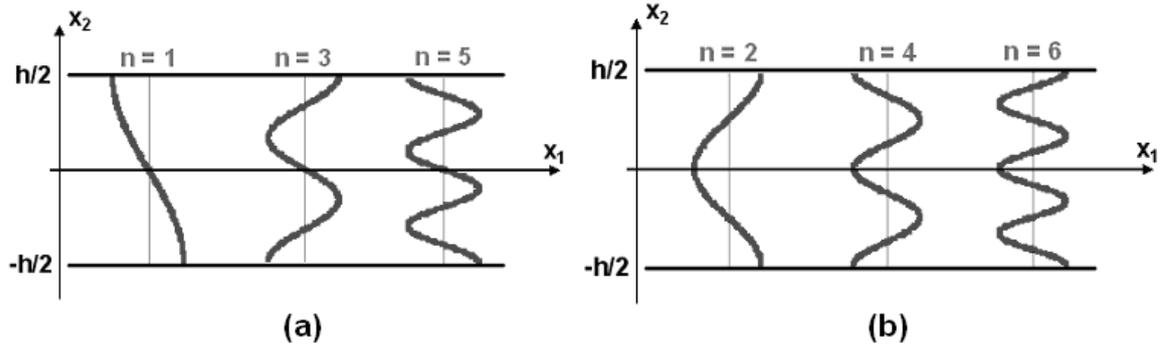


Figura A.6: Perfis de deformação de uma placa de quartzo com espessura  $h$ . (a) Modo de vibração anti-simétrico (harmônicos ímpares). (b) Modo de vibração simétrico (harmônicos pares).

Seja para o modo simétrico ou anti-simétrico chega-se na Equação A.44 para as frequências de ressonância. Essas frequências são função da espessura da placa, da densidade e de constantes elástica, piezoelétrica e dielétrica do quartzo. As deformações podem ser visualizados na Figura A.6 e as equações para os modos de vibração simétrico e anti-simétrico são escritos nas Equações A.45 e A.46, respectivamente.

$$f_n = n \frac{v}{2h}, v = \sqrt{\frac{\bar{c}_{66}}{\rho}} \quad (\text{A.44})$$

$$u_1^*(x_2) = A_2 \cos\left(n\pi \frac{x_2}{h}\right), n = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (\text{A.45})$$

$$u_1^*(x_2) = A_1 \sin\left(n\pi \frac{x_2}{h}\right), n = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{A.46})$$

Portanto, a placa de quartzo bidimensional no corte-AT se deforma ao longo da direção  $x_1$  quando se aplica um campo elétrico ao longo da direção da espessura,  $x_2$ , e irá vibrar no modo de cisalhamento de espessura. Assim, nesse modo de vibração o deslocamento é perpendicular a direção de propagação da onda, e um ponto particular da estrutura se move na direção  $x_1$  com amplitude que depende da coordenada  $x_2$ .

## A.2 Placa ressonante de quartzo com perdas

### A.2.1 Fator de qualidade

Um modelo matemático comumente utilizado para se considerar as perdas em ressonadores de quartzo consiste em considerar os mecanismos de perdas como um fenômeno viscoso [35, 37]. Assim, as relações constitutivas da piezoeletricidade são modificadas para

$$T_{ij} = c_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k + \left( \eta_{ijkl}\dot{S}_{kl} \right) \quad (\text{A.47})$$

$$D_i = e_{ijk}S_{jk} + \varepsilon_{ij}E_j \quad (\text{A.48})$$

onde o termo  $\eta_{ijkl}$  é o coeficiente que representa a viscosidade do quartzo, assim, o termo entre parêntesis na Equação A.47 corresponde a fricção interna do material piezoelétrico.

Nesse caso, obtém-se a equação de movimento dada por

$$\frac{\partial T_6}{\partial x_2} = \rho\ddot{u}_1 \Rightarrow c_{66}\frac{\partial S_6}{\partial x_2} - e_{26}\frac{\partial E_2}{\partial x_2} + \eta_{66}\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{\partial S_6}{\partial t}\right) = \rho\ddot{u}_1 \quad (\text{A.49})$$

Utilizando as Equações A.18, A.19 e A.27, a Equação A.49 se reorganiza como

$$\bar{c}_{66}\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + \eta_{66}\frac{\partial^3 u_1}{\partial t\partial x_2^2} = \rho\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (\text{A.50})$$

Considerando novamente a solução da forma  $u_1 = u_1^*(x_2)e^{j\omega t}$ , obtém-se

$$\frac{d^2 u_1^*}{dx_2^2} + \gamma^2 u_1^* = 0 \quad (\text{A.51})$$

em que

$$\gamma = \omega\sqrt{\frac{\rho}{\bar{c}_{66}}}\frac{1}{\sqrt{1 + j\frac{\omega\eta_{66}}{\bar{c}_{66}}}} = \frac{\omega}{v}\frac{1}{\sqrt{1 + j\frac{1}{2Q}}} \approx \frac{\omega}{v}\left(1 - j\frac{1}{2Q}\right) \quad (\text{A.52})$$

onde  $Q$  é denominado de fator de qualidade relacionado as perdas por viscosidade:

$$Q = \frac{\bar{c}_{66}}{\omega\eta_{66}} \quad (\text{A.53})$$

### A.2.2 Impedância de movimento

Sabendo que a Equação A.51 tem solução da forma harmônica, então

$$u_1^*(x_2) = A \sin(\gamma x_2) + B \cos(\gamma x_2) \quad (\text{A.54})$$

$$\Phi^*(x_2) = \frac{e_{26}}{\varepsilon_{22}} [A \sin(\gamma x_2) + B \cos(\gamma x_2)] + Cx_2 + D \quad (\text{A.55})$$

Agora,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  serão determinadas de acordo com as seguintes condições de contorno:

$$T_6 = 0, x_2 = \pm \frac{h}{2} \quad (\text{A.56})$$

$$\Phi\left(-\frac{h}{2}, t\right) - \Phi\left(\frac{h}{2}, t\right) = V_0 e^{j\omega t} \quad (\text{A.57})$$

Entretanto, como será mostrado, para se obter a admitância do ressonador apenas a constante  $C$  é necessária. Após algumas manipulações matemáticas encontra-se que

$$C = \frac{\bar{c}_{66} \gamma V_0}{2 \frac{e_{26}^2}{\varepsilon_{22}} \tan\left(\frac{\gamma h}{2}\right) - \bar{c}_{66} \gamma h}, \quad \bar{c}_{66} = \bar{c}_{66} + j\omega \eta_{66} \quad (\text{A.58})$$

A partir das Equações A.24, A.54 e A.55 o deslocamento elétrico  $D_2$  é

$$D_2 = -\varepsilon_{22} C e^{j\omega t} \quad (\text{A.59})$$

Consequentemente, a densidade de corrente pode ser obtida por

$$J = \frac{\partial D_2}{\partial t} = -j\omega \varepsilon_{22} C e^{j\omega t} \quad (\text{A.60})$$

Se  $J$  é uniforme, a corrente total será

$$I = JA_s = -j\omega \varepsilon_{22} A_s C e^{j\omega t} \quad (\text{A.61})$$

Considerando a diferença de potencial aplicada através do quartzo,  $V_0 e^{j\omega t}$ , a admitância,  $Y$ , pode ser escrita como

$$Y = \frac{I}{V} = -j\omega \varepsilon_{22} A_s \frac{C}{V_0} \quad (\text{A.62})$$

Substituindo (A.58) em (A.62), tem-se

$$Y = -j\omega C_0 \frac{\bar{c}_{66}\gamma h}{2\frac{e_{26}^2}{\varepsilon_{22}} \tan\left(\frac{\gamma h}{2}\right) - \bar{c}_{66}\gamma h}, \quad C_0 = \frac{\varepsilon_{22}A_s}{h} \quad (\text{A.63})$$

A Equação A.63 pode ser reescrita como

$$Y = j\omega C_0 + \frac{1}{Z_m}, \quad Z_m = \frac{j}{\omega C_0} \left( 1 - \frac{\frac{\gamma h}{2}}{\frac{e_{26}^2}{\bar{c}_{66}\varepsilon_{22}} \tan\left(\frac{\gamma h}{2}\right)} \right) \quad (\text{A.64})$$

onde  $Z_m$  é denominada de impedância de movimento (em inglês, *motional impedance*), e está relacionada a impedância elétrica do ressonador como um sistema vibrando devido ao efeito piezoelétrico.

De modo a facilitar o entendimento da impedância  $Z_m$  é necessário simplificar a Equação A.64. Para tanto, considera-se que o ressonador está trabalhando próximo a uma de suas frequências de ressonância. Nessa situação, o produto  $\gamma h$  é aproximadamente  $n\pi$  onde  $n = 1, 3, 5, \dots$ , sendo igual a  $n\pi$  quando as perdas são desprezadas. Nessas frequências a tangente na Equação A.64 tem um pólo. A aproximação  $\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \frac{4\theta}{(n\pi)^2 - \theta^2}$  é usada [102], assim:

$$Z_m = \frac{j}{\omega C_0} \left( 1 - \frac{(n\pi)^2 - (\gamma h)^2}{8K^2} \right) \quad (\text{A.65})$$

onde  $K^2$  é definido como segue:

$$K^2 = \frac{e_{26}^2}{\bar{c}_{66}\varepsilon_{22}} = \frac{e_{26}^2}{\bar{c}_{66}\varepsilon_{22}} \frac{1}{1 + j\frac{1}{Q}} = K_0^2 \frac{1}{1 + j\frac{1}{Q}}, \quad K_0^2 = \frac{e_{26}^2}{\bar{c}_{66}\varepsilon_{22}} \quad (\text{A.66})$$

Nota-se que desprezando as perdas a Equação A.65 fica composta apenas por reatâncias. Nesse caso  $Z_m$  será nula para a seguinte situação de  $\gamma h$ :

$$\frac{(n\pi)^2 - (\gamma h)^2}{8K_0^2} = 1 \Rightarrow (\gamma h)^2 = (n\pi)^2 - 8K_0^2 = \frac{\omega_s^2}{v^2} h^2 \quad (\text{A.67})$$

onde  $\omega_s$  é denominada de frequência de ressonância série, e nessa frequência a admitância é infinita se as perdas são desprezadas.

Substituindo  $\gamma = \frac{\omega}{v} \left(1 + j\frac{1}{Q}\right)^{-\frac{1}{2}}$  e a Equação A.66 na Equação A.65, tem-se

$$Z_m = \frac{j}{\omega C_0} \left[ 1 - \frac{(n\pi)^2 \left(1 + j\frac{1}{Q}\right) - \frac{\omega^2}{v^2} h^2}{8K_0^2} \right] \quad (\text{A.68})$$

Substituindo  $\frac{h^2}{v^2} = \frac{(n\pi)^2 - 8K_0^2}{\omega_s^2}$  obtido da Equação A.67 na Equação A.68 e considerando que a frequência angular  $\omega$  está próxima de  $\omega_s$ , tem-se

$$Z_m = \frac{(n\pi)^2}{8K_0^2\omega C_0 Q} + \frac{j}{8K_0^2\omega C_0} \left[ \left( \frac{\omega^2}{\omega_s^2} - 1 \right) ((n\pi)^2 - 8K_0^2) \right] \quad (\text{A.69})$$

Para o quartzo no corte-AT calcula-se  $K_0^2 = 7,75 \times 10^{-3}$ , assumindo que  $(n\pi)^2 \gg 8K_0^2$ , então

$$Z_m = \frac{(n\pi)^2}{8K_0^2\omega C_0 Q} + j\omega \frac{(n\pi)^2}{8K_0^2\omega_s^2 C_0} + \frac{1}{j\omega} \frac{(n\pi)^2}{8K_0^2 C_0} \quad (\text{A.70})$$

Nota-se que a Equação A.70 é analoga a equação da impedância de um circuito RLC série cuja frequência de ressonância é  $\omega_s$ , e que anula a parte imaginária da impedância. Considerando a relação dos parâmetros elétricos na Equação A.70 e as grandezas físicas envolvidas no ressonador, os parâmetros equivalentes  $R_m$ ,  $L_m$  e  $C_m$  do modelo podem ser obtidos como segue:

$$R_m = \frac{(n\pi)^2 \eta_{66} h}{8e_{26}^2 A_s} \quad (\text{A.71})$$

$$L_m = \frac{\rho h^3}{8e_{26}^2 A_s} \quad (\text{A.72})$$

$$C_m = \frac{8e_{26}^2 A_s}{(n\pi)^2 \bar{c}_{66} h} \quad (\text{A.73})$$

Portanto, o circuito elétrico equivalente que modela a impedância do ressonador piezoelétrico em frequências próximas a de ressonância é um circuito como o mostrado na Figura A.9(B). É interessante perceber que a viscosidade só está presente em  $R_m$ , a grandeza que representa as perdas em circuitos elétricos.

Considerando os parâmetros da Tabela 1.5 para um ressonador em forma de disco com  $h = 230 \mu m$  e raio de eletrodos de  $3,75 mm$ , então, para  $n = 1$  calcula-se  $R_m = 0,228 \Omega$ ,  $L_m = 10,11 mH$  e  $C_m = 48,06 fF$ .

### A.3 Modelo elétrico para o cristal de quartzo

A impedância equivalente  $Z_{eq}$  para o circuito da Figura 1.7(b) é dada pela Equação A.74.

$$\begin{aligned} Z_{eq} &= \frac{Z_0 \cdot Z}{Z_0 + Z} = \frac{\frac{1}{j\omega C_0} [R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})]}{\frac{1}{j\omega C_0} + [R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})]} \\ &= \frac{\omega^2 C^2 R - j\omega [(\omega^2 LC - 1)(\omega^2 LCC_0 - C_0 - C) + (\omega RC)^2 C_0]}{[\omega(\omega^2 LCC_0 - C_0 - C)]^2 + (\omega^2 RCC_0)^2} \end{aligned} \quad (\text{A.74})$$

As frequências de ressonâncias são encontradas quando a impedância  $Z_{eq}$  é puramente resistiva, isso ocorre na seguinte condição

$$(\omega^2 LC)^2 C_0 - 2\omega^2 LCC_0 - \omega^2 LC^2 + C_0 + C + (\omega RC)^2 C_0 = 0 \quad (\text{A.75})$$

o último termo nessa última equação será considerado desprezível quando comparado com os demais termos. Essa consideração é apenas válida no regime onde  $R$  é pequeno [36]. Omitindo esse termo e calculando as raízes da Equação A.75 obtém-se as frequências de ressonâncias série e paralela, Equações A.76 e A.77, respectivamente.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{A.76})$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{1}{LC_0}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \left(1 + \frac{C}{C_0}\right)^{\frac{1}{2}} \approx f_s \left(1 + \frac{C}{2C_0}\right), \frac{C}{C_0} \ll 1 \quad (\text{A.77})$$

As ressonâncias série e paralela também são conhecidas como frequências de “impedância zero” e “impedância infinita”, respectivamente. Nas frequências entre  $f_s$  e  $f_p$  a fase muda de  $-90^\circ$  para  $+90^\circ$  e a impedância do cristal passa a ter um comportamento indutivo.

O comportamento do módulo da impedância e da fase pode ser visualizado na Figura A.7, utilizou-se os valores de  $R_m$ ,  $L_m$  e  $C_m$  obtidos na Seção A.2.2 e a capacitância estática foi obtida pela Equação A.78, onde se encontrou  $C_0 = 7,648 \text{ pF}$ . Para essa situação calcula-se  $f_s = 7,2203 \text{ MHz}$  e  $f_p = 7,2429 \text{ MHz}$ .

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{22} A_s}{h} \quad (\text{A.78})$$

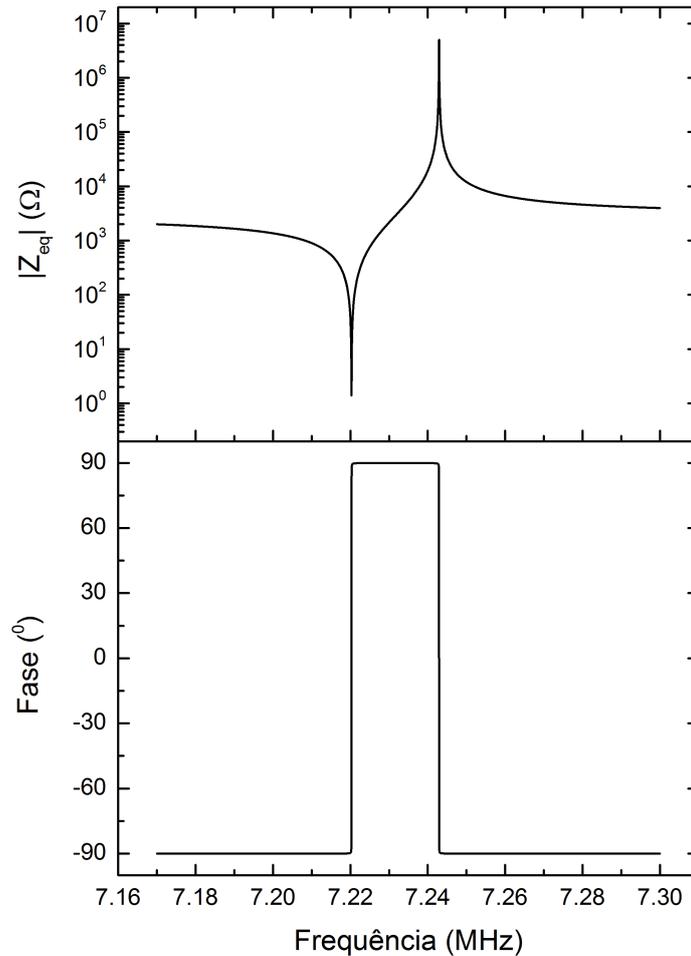


Figura A.7: Comportamento do módulo e da fase de um cristal de quartzo nas frequências de ressonâncias série e paralela.

### A.3.1 Fator de qualidade

O fator de qualidade pode ser determinado pelo cálculo da razão da frequência de ressonância série em relação ao seu espalhamento conforme Equação A.79.

$$Q = \frac{f_s}{\Delta f_{3dB}} \quad (\text{A.79})$$

Uma vez que no circuito RLC série o único elemento que dissipa potência é o resistor, se a sua tensão é máxima implica que a potência dissipada no circuito é máxima e tem-se uma condição de máxima transferência de potência do gerador para o circuito durante a condição de ressonância. A máxima potência na resistência será

$$P_{máx,R} = \frac{V_g^2}{R} \quad (\text{A.80})$$

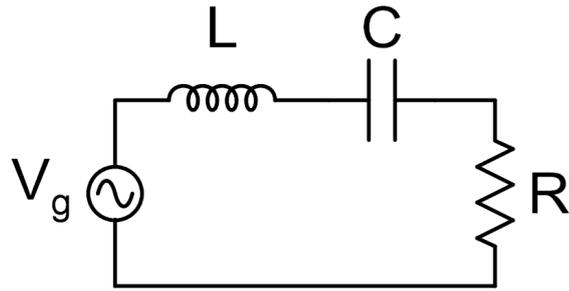


Figura A.8: Circuito RLC em série excitado com fonte de tensão alternada senoidal.

Considerando o circuito RLC da Figura A.8 a frequência de meia potência é definida como sendo a frequência em que a potência no resistor cai pela metade, ou seja,  $-3 \text{ dB}$ . A tensão no resistor é dada por:

$$V_R = RI = R \frac{V_g}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (\text{A.81})$$

A relação entre a tensão na resistência e a tensão no gerador na situação de meia potência ocorre quando

$$P_R = \frac{1}{2} P_{\text{máx},R} \Rightarrow \frac{V_R^2}{R} = \frac{1}{2} \frac{V_g^2}{R} \Rightarrow V_R = \frac{\sqrt{2}}{2} V_g \quad (\text{A.82})$$

As frequências em que essa situação de tensão ocorre é encontrada substituindo a Equação A.82 em  $|V_R|$  na Equação A.81, onde a igualdade a seguir será obtida.

$$\sqrt{2}R = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (\text{A.83})$$

Resolvendo esta última equação em função de  $\omega$  chega-se em quatro soluções, mas duas são descartadas, pois, resultam em frequências negativas, as soluções finais são:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[ \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} - \frac{R}{2L} \right] \quad (\text{A.84})$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} + \frac{R}{2L} \right] \quad (\text{A.85})$$

Obtém-se assim a largura de banda do circuito:

$$\Delta f_{3dB} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{R}{L} \quad (\text{A.86})$$

Portanto, o fator de qualidade para a frequência de ressonância série pode ser obtido em termos dos valores dos componentes do circuito equivalente conforme a Equação A.87.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{A.87})$$

### A.3.2 Equivalência com sistema mecânico

Seja um sistema mecânico composto por um mola de constante  $k$ , uma massa  $m$  e um amortecedor com viscosidade  $b$ . Uma vez que o sistema comece a oscilar sua equação de movimento é escrita conforme a Equação A.88.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A.88})$$

Da mesma forma um circuito RLC série também pode ser modelado por uma equação diferencial de segunda ordem:

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q = V_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A.89})$$

Assim, o sistema vibrando mecanicamente e o circuito elétrico da Figura A.9 são equivalentes, pois, podem ser descritos pela mesma equação diferencial. Essa relação eletro-mecânica é conhecida como o modelo de Butterworth Van-Dyke [37]. O circuito elétrico consiste de dois ramos, um ramo paralelo descreve as características estáticas e um ramo série representa as características de movimento. O ramo série é composto por três componentes: uma capacitância,  $C$ , que representa a elasticidade mecânica do corpo oscilante, uma indutância,  $L$ , que fornece uma medida da massa oscilante e uma resistência,  $R$ , correspondente a perda de energia mecânica devido as fricções internas. No outro ramo a capacitância  $C_0$  está relacionada a capacitância estática devido a presença dos eletrodos no quartzo. Um resumo das grandezas equivalentes pode ser encontrado na Tabela A.2.

Os harmônicos do modo de vibração de cisalhamento como também frequências

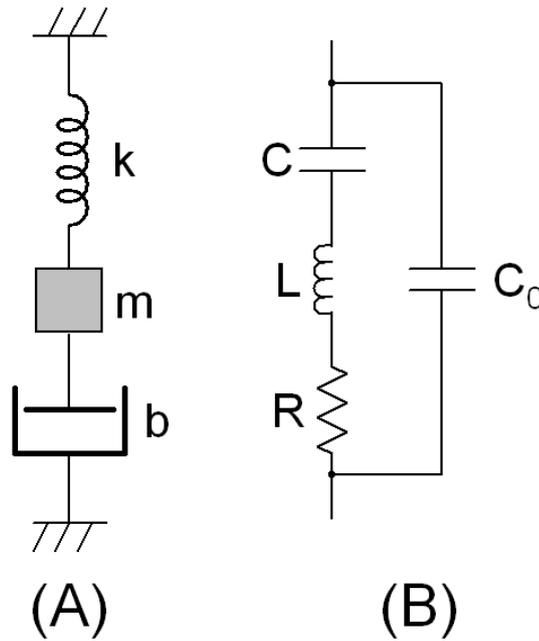


Figura A.9: (A) Modelo mecânico do ressonador com oscilações amortecidas. (B) Modelo equivalente elétrico de Butterworth Van-Dyke para frequências próximas a frequência de ressonância. No braço de movimento tem-se a resistência  $R$  que representa a perda por viscosidade no quartzo.  $L$  e  $C$  representam a massa de vibração inercial e a elasticidade mecânica do quartzo, respectivamente.

de ressonâncias de outros modos podem ser modelados no circuito elétrico equivalente como outros ramos RLC série em paralelo ao capacitor  $C_0$ .

Tabela A.2: Resumo das grandezas equivalentes entre os modelos mecânico e elétrico.

Mecânico		Elétrico	
variável	nomenclatura	variável	nomenclatura
fricção	$b$	resistência	$R$
massa	$m$	indutância	$L$
rigidez elástica	$k$	capacitância	$\frac{1}{C}$
deslocamento	$x$	carga elétrica	$q$
velocidade	$\dot{x}$	corrente	$i = \frac{dq}{dt}$
fator de qualidade	$Q_{mec} = \frac{\sqrt{km}}{b}$	fator de qualidade	$Q_{ele} = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R}$
freq. de ressonância	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	freq. de ressonância	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

# Apêndice B

## Informações complementares sobre o quartzo

O quartzo é um material muito abundante na natureza, pode ser encontrado em muitos ambientes geológicos diferentes, e o seu aspecto visual reflete as várias condições sob as quais se formaram. Quando puro, o quartzo é um material cristalino incolor, transparente e muito duro, sendo visualmente semelhante ao vidro. O quartzo pode aparecer em uma grande variedade de formas e cores, como ametista (violeta), citrino (amarelo), ou quartzo esfumado (cinza, marrom ao preto), entre outras. Os conhecidos cristais de rocha (prismas de seis lados com uma pirâmide de seis lados em suas extremidades) são simplesmente cristais de quartzo bem formados. Pode ser utilizado em diversas aplicações, na produção de vidros e cerâmicas, no comércio de joalherias, mas principalmente como um componente do concreto: areia de quartzo e cascalho de quartzo. No segmento eletro-eletrônico encontra-se aplicações na área aeroespacial, bélica, instrumentação e sensores, comunicação, óptica, brinquedos, sistemas digitais, dispositivos médicos e automobilísticos.

### B.1 Cristalografia

A orientação do cristal piezoelétrico é comumente definida conforme a norma introduzida pelo *Institute of Radio Engineers* (IRE) de 1949 [40]. Porém, com o passar do tempo diversas revisões foram feitas, além disso o IRE tornou-se o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) chegando a definir um versão final para

a norma em 1987 [41].

A diferença fundamental entre as convenções de 1949 e 1987 é a definição do sistema de coordenadas cartesiano (x-y-z) relacionado a estrutura física da rede cristalina do quartzo. Para o quartzo dito direito, o sistema de coordenadas cartesiano na norma de 1987 é rotacionado de  $180^\circ$  no eixo-z em relação ao sistema de coordenadas usado na norma de 1949. Isso causa a inversão de sentido nos eixos-x e y, e conseqüentemente altera a definição dos sinais nas propriedades do material e os ângulos de cortes [103].

Em ambas as normas usa-se a notação que define a orientação de uma fatia, geralmente uma placa em formato retangular, retirada do cristal. Os eixos do cristal são denotados por x, y e z, e a placa é definida por suas arestas  $l$ ,  $w$  e  $t$  (do inglês, *length*, *width* e *thickness*), um exemplo dessa notação está ilustrado na Figura 1.8(b). Como ponto de partida a placa é alinhada nos eixos do cristal e com um máximo de três rotações consegue-se definir qualquer orientação tridimensional da placa. O sentido positivo de cada rotação é dado conforme a regra da mão direita [104].

A norma de 1987 define o corte-AT como  $(YXl)-35,25^\circ$ . As duas primeiras letras entre parênteses especifica a orientação inicial da placa, com respeito a espessura e ao comprimento, respectivamente. Ou seja, a espessura,  $t$ , está posicionada ao longo do eixo-y e o comprimento,  $l$ , ao longo do eixo-x. Posteriormente, até três rotações em relação aos eixos da placa são especificadas pelas letras subsequentes dentro dos parênteses. As magnitudes dos ângulos de rotação sobre os eixos denotados são especificadas depois dos parênteses na mesma ordem das letras. Para o corte-AT, apenas uma rotação é exigida sobre a direção  $l$  (ou eixo-x), de  $-35,25^\circ$ . Isso está ilustrado na Figura 1.8(c).

Matematicamente, muda-se da orientação direita para a esquerda multiplicando a matriz de acoplamento piezoelétrico por  $-1$ , isso resulta na inversão do sentido de polarização [39, 105]. Observa-se também que ao se inverter o sinal dos componentes  $c_{14}$ ,  $c_{24}$  e  $c_{56}$  e seus respectivos simétricos o sentido de definição do ângulo  $\theta$  é invertido.

Contudo, devido as significativas diferenças entre as normas de 1949 e 1987, essa última versão não foi universalmente adotada e foi formalmente removida do IEEE em 2000. Ainda assim, o programa de modelagem computacional COMSOL Multiphysics continua a adotá-la [104]. No sentido de evitar divergências quanto a convenção

utilizada na orientação do cristal de quartzo nessa tese a norma IEEE de 1987 será também adotada.

O cristal de quartzo pode ser obtido da natureza em diferentes tamanhos e graus de perfeição ou por crescimento hidrotérmico (quartzo cultivado) na indústria de cristais cultivados onde se consegue um maior nível de pureza. Desde da década de 70, o uso do quartzo cultivado na produção de dispositivos piezoelétricos ultrapassou o uso do quartzo natural [38].

Os primeiros ressonadores de quartzo foram simples lâminas cortadas de tal maneira que o eixo normal a maior superfície estivesse paralelo ao eixo-x, denominados assim de lâminas de corte-X. Esses dispositivos apresentam um coeficiente de temperatura de  $-20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , isto é, as frequências de ressonância decrescem de 20 Hz por MHz quando a temperatura é incrementada em  $1^\circ\text{C}$  [106].

Em 1920, desenvolveu-se a lâmina de corte-Y, permitindo o uso de cristais de quartzo em frequências mais elevadas, além do que eram de mais fácil excitação e puderam ser grampeadas para sua sustentação. Entretanto, apresentavam duas sérias desvantagens: elevado coeficiente de temperatura ( $+100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) e em determinadas temperaturas se recusam a operar.

Esses problemas foram solucionados em 1929, onde conseguiu-se um coeficiente de temperatura nulo numa certa faixa de temperatura simplesmente girando o plano do corte-Y em torno do eixo-x. O primeiro corte avaliado foi, então, denominado de corte-AT, com o passar do tempo outros cortes foram estudados e denominados de corte-BT, -CT e assim sucessivamente. O corte-BT, por exemplo, foi amplamente utilizado durante a Segunda Guerra Mundial, mas depois ficou obsoleto porque as novas especificações ficavam fora de seus limites de tolerância.

Na indústria, a orientação dos cortes é feita partindo-se de uma placa perpendicular no corte-Y e então girada em torno dos ângulos  $\theta$  e  $\varphi$ , ou seja, dos eixos-x e z, respectivamente [38]. Os ângulos de corte para simples e dupla rotação onde a lâmina de quartzo vibra no modo de cisalhamento de espessura são relacionados na Tabela B.1 com respeito a definição de  $\theta$  e  $\varphi$  mostrada na Figura B.1, o ângulo  $\varphi$  está no plano-xy. A determinação da orientação para o corte é feita por estudos cristalográficos através de difração de raios X, por exemplo.

Tabela B.1: Cortes para o quartzo no modo de vibração de cisalhamento de espessura.

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\varphi$ ( $^\circ$ )	corte
-60	0	BC
-57	0	FT
-49	0	BT
31	0	AC
35,25	0	AT
38	0	CT
42,75	0	ST
66,5	0	ET
35,25	21,9	SC

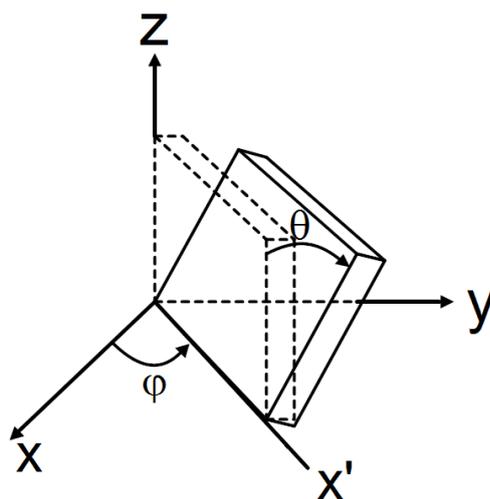


Figura B.1: Ângulos para dupla rotação numa placa de quartzo.

## B.2 Caracterização por difração de raios-X

### B.2.1 Princípio de funcionamento

Os raios-X foram descobertos no final do século 19, mais precisamente em 1895, pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) ao realizar experimentos em que elétrons de alta velocidade em uma câmara evacuada atingiam uma superfície metálica<sup>1</sup>. Dessa colisão Röntgen identificou que o metal ejetava algum tipo de radiação e que pelo fato da comunidade científica da época desconhecer essa natureza denominou tal radiação de “X” (incógnita) ou raios-X. Röntgen evidenciou que essa radiação conseguia penetrar e atravessar materiais sólidos de baixa densidade, dando início a técnica de visualização de imagens conhecida como radiografia [107].

Hoje (2014) sabe-se que os raios-X são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda típico de 0,1 nm (1 Å), portanto, muito menor que o comprimento de onda da luz visível, 400 a 700 nm. Esse fato dificultou por algum tempo saber que tal descoberta se tratava de uma radiação eletromagnética e conseqüentemente o entendimento dos raios-X como um fenômeno ondulatório.

Fenômenos ondulatórios da radiação eletromagnética são compreendidos a partir dos efeitos de interferência e difração. Na interferência tem-se, por exemplo, dois feixes de radiação trafegando num mesmo espaço físico mas que seguem caminhos diferentes podendo apresentar diferença de fase ao se encontrarem, se um dos feixes tiver amplitude máxima e o outro mínima então a superposição dos dois tem efeito nulo, ou seja, a interferência é destrutiva. Por outro lado, se os dois feixes estão com o mesmo valor de fase ao se encontrarem a interferência é construtiva. A difração, por sua vez, é um fenômeno que acontece com ondas que contornam objetos ou orifícios com dimensões da mesma ordem de grandeza que seu comprimento de onda.

O alemão Max von Laue, em 1912, propôs evidenciar a natureza ondulatório dos raios-X através de um rede de difração encontrada em matérias sólidos cristalinos. Essa rede de difração funciona como um conjunto de centros espalhadores da radiação cuja a distância é da ordem de grandeza de 0,1 nm, que hoje sabe-se que corresponde a distância interatômica de um cristal sólido, por exemplo.

---

<sup>1</sup>Quando elétrons de alta energia são desacelerados muito bruscamente ou num espaço muito curto ocorre a emissão de radiação numa faixa muito longa de comprimentos de onda, efeito *bremssstrahlung* (em português, radiação de frenagem).

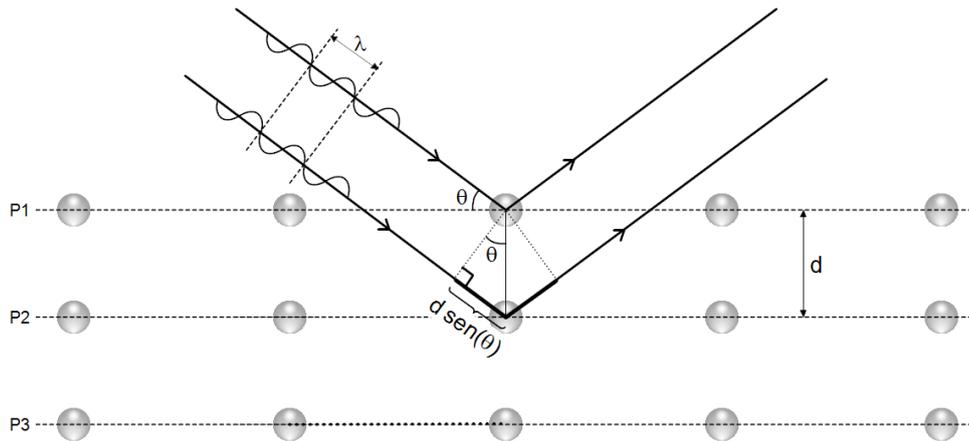


Figura B.2: Esquema da difração na condição de Bragg.

Considerando os átomos em um cristal como representado na Figura B.2, vê-se que nesse arranjo os átomos estão dispostos em intervalos regulares e que a distância entre planos cristalinos é igual a  $d$ . Quando uma frente de onda de raios-X monocromático com comprimento de onda  $\lambda$  atinge os planos P1 e P2 elas podem ser refletidas<sup>2</sup> com o mesmo ângulo, mas só estarão em fase se a condição dada na Equação B.1 for satisfeita, onde  $n$  é um número inteiro positivo e  $\theta$  é o ângulo de incidência dos raios-X nos planos que contém os átomos do cristal.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{B.1})$$

A Equação B.1 é conhecida como a Lei de Bragg e relaciona a diferença de percurso entre os caminhos percorridos pelos feixes em cada plano cristalino para que ocorra uma interferência construtiva. Em relação ao esquema da Figura B.2 o feixe que atinge o plano P2 percorre uma distância de  $2d \sin \theta$  a mais que o feixe que atinge o plano P1, logo os feixes só estarão em fase na reflexão se essa distância for igual a um múltiplo inteiro de  $\lambda$ . Na prática, o máximo de intensidade na interferência construtiva ocorre para  $n = 1$ , que é denominado de máximo de Bragg.

Uma das aplicações em que se pode utilizar a Lei de Bragg é na caracterização de materiais. Incidindo-se um feixe de raios-X de comprimento de onda conhecido sob um cristal verifica-se que existem vários ângulos onde o espectro de difração

<sup>2</sup>Quando a radiação eletromagnética (campo elétrico e magnético oscilando ao longo do tempo) atinge os elétrons ao redor dos átomos do cristal fazem com que tais elétrons passem a oscilar na mesma frequência da radiação, os elétrons, então, adquirem um movimento acelerado devido as oscilações da radiação e como são partículas carregadas passam a emitir radiação eletromagnética.

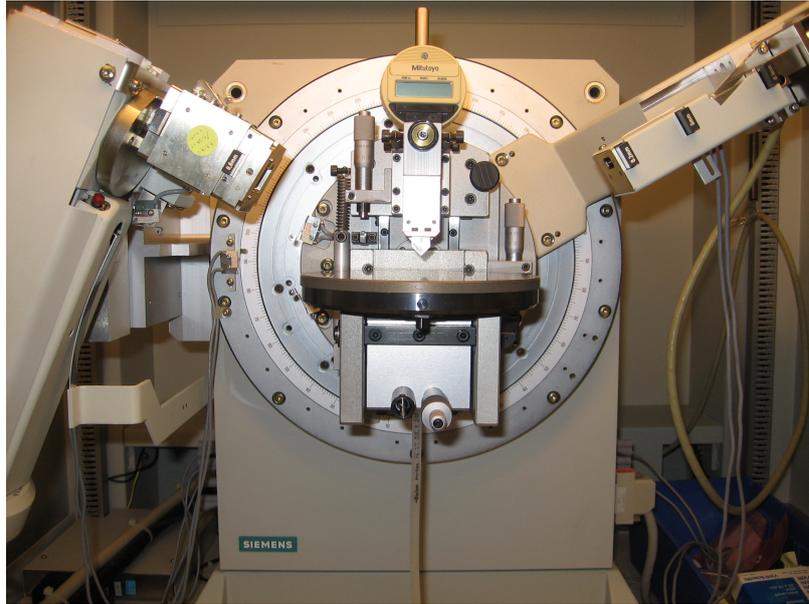


Figura B.3: Difratorômetro de raios-X D5000 da Siemens.

apresenta picos de máxima intensidade, isso ocorre por que em um mesmo cristal pode-se ter vários conjuntos de planos espalhadores. Além disso, a densidade de átomos e elétrons em diferentes planos pode variar e então, a quantidade de energia emitida na reflexão depende de qual conjunto de planos que os feixes estão incidido, consequentemente cada ângulo de difração terá intensidades diferentes. De posse desses ângulos e sabendo-se qual o comprimento de onda do feixe pode-se determinar as distâncias interatômicas dos átomos de um dado cristal. Essa aplicação exige muita precisão e é então denominada de caracterização por meio de difração de raios-X (DXR) onde o equipamento que executada essa aplicação é chamado de difratômetro de raios-X. Na Figura B.3 mostra-se o difratômetro de raios-X D5000 fabricado pela Siemens.

## B.2.2 Dados de Raio-X para o quartzo

Os dados do difratograma do quartzo utilizado como referência são mostrados na Figura B.4 e estão relacionados à referência [84].

AMS\_DATA - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Quartz  
Ikuta D, Kawame N, Banno S, Hirajima T, Ito K, Rakovan J F, Downs R T, Tamada O  
American Mineralogist 92 (2007) 57-63  
First in situ x-ray diffraction identification of coesite and retrograde quartz on a glass thin section of an ultrahigh-pressure metamorphic rock and their crystal structure details  
Locality: Yangkou meta-igneous complex in the middle part of the Sulu UHP terrain, eastern China  
Note: Sample is on a thin section  
\_database\_code\_amcsd 0004265

CELL PARAMETERS: 4.9230 4.9230 5.4090 90.000 90.000 120.000  
SPACE GROUP: P3\_221  
X-RAY WAVELENGTH: 1.541838  
MAX. ABS. INTENSITY / VOLUME\*\*2: 33.86113139

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
20.84	19.90	4.2634	1	0	0	6
26.62	70.07	3.3484	0	1	1	6
26.62	29.93	3.3484	1	0	1	6
36.50	6.34	2.4615	1	1	0	3
39.46	5.72	2.2838	1	0	2	6
40.25	2.82	2.2404	1	1	1	6
42.40	4.52	2.1317	2	0	0	6
45.75	1.04	1.9833	0	2	1	6
45.75	1.74	1.9833	2	0	1	6
50.11	11.39	1.8204	1	1	2	6
54.84	2.77	1.6742	0	2	2	6
55.32	1.31	1.6606	0	1	3	6
59.89	3.80	1.5444	1	2	1	6
59.89	3.41	1.5444	2	1	1	6
64.01	1.42	1.4545	1	1	3	6
67.68	3.18	1.3843	1	2	2	6
68.11	1.09	1.3766	0	2	3	6
68.11	4.09	1.3766	2	0	3	6
68.23	3.09	1.3745	0	3	1	6
73.47	1.17	1.2890	1	0	4	6
75.58	1.40	1.2580	3	0	2	6
79.83	1.60	1.2015	2	1	3	6
81.15	1.69	1.1852	1	1	4	6

-----  
XPOW Copyright 1993 Bob Downs, Ranjini Swaminathan and Kurt Bartelmehs  
For reference, see Downs et al. (1993) American Mineralogist 78, 1104-1107.

Figura B.4: Dados de difração de Raios-X.

### B.3 Otimização geométrica numa placa ressonante de quartzo

Uma vez estabelecida a espessura da placa de quartzo, a relação dessa com o comprimento e a largura deve ser determinada também. O acoplamento entre modos de cisalhamento e modos de flexão ocorrem em comprimentos específicos. O critério para determinação do comprimento é estabelecido de modo a evitar esse acoplamento de modos. O objetivo é reduzir as perdas de energia e conseqüentemente elevar o fator de qualidade. Uma expressão para o comprimento pode ser obtida usando a teoria de placas de Mindlin [108]. Variando a razão comprimento/espessura ( $a/h$ ), obtêm-se pontos de acoplamento máximo e mínimo entre os modos de cisalhamento e os modos de flexão. O menor acoplamento ocorre no meio do intervalo entre dois acoplamentos máximos. O comprimento ótimo para uma placa de quartzo no corte-AT é obtido utilizando a expressão dada na Equação B.2.

$$\frac{a}{h} = \left(m + \frac{1}{2}\right) 1,6056, \quad m = 1, 2, 3, \dots M \quad (\text{B.2})$$

onde  $a$  é o comprimento,  $h$  é a espessura e  $m$  é inteiro positivo. Por exemplo, escolhendo-se a razão de modo que  $a \approx 50h$ . Para  $h = 200 \mu\text{m}$ , obtém-se  $a = 10115,28 \mu\text{m}$ , com  $m = 31$ .

## B.4 Poço de petróleo e instrumentação

O petróleo é encontrado em bacias sedimentares resultantes do soterramento de antigos ambientes aquáticos. Seu uso pelo homem já perdura há mais de um século visto que suas utilidades estão presentes em todo o nosso cotidiano. Observa-se que seu consumo é crescente a cada ano, o que exige constante melhoria em seu processo de extração.

As condições físicas num poço de petróleo permitem caracterizá-lo como ambiente agressivo, seja ele em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). Os níveis máximos de pressão e temperatura estão em torno de 15000 psi (1000 atm ou 100 MPa) e 200 °C, respectivamente. Geralmente os poços em mar são mais profundos podendo alcançar distâncias de até 7 km da superfície da água, como é o caso dos reservatórios do pré-sal descobertos em 2007 na Bacia de Santos no Brasil. Além desses fatores observa-se ainda a presença de água salgada, gases pressurizados, limitações de espaço para se inserir instrumentação, dificuldades de se obter energia para alimentar circuitos e de transmitir sinais de dados até a superfície como limitantes e ao mesmo tempo desafiadores para o uso da eletrônica no processo de extração.

A medição de pressão é de fundamental importância na exploração e produção de petróleo e gás natural. Tradicionalmente para a medição dessa grandeza as indústrias petrolíferas usam sensores comerciais específicos para aplicação em poços de petróleo. Empresas internacionais como a *Schlumberger* e a *Quartzdyne* fabricam esses sensores. No entanto, eles devem ser importados por empresas de extração de petróleo como a Petrobras, o que encarece ainda mais os custos desses sensores.

Na Figura B.5 tem-se uma foto de sensor de pressão desenvolvido pela *Quartzdyne*, observa-se que o seu encapsulamento metálico chega a ter 15 cm de comprimento. Esses sensores são encaixados em estruturas denominadas de PDG (*Permanent Downhole Gauge*). O PDG por sua vez é instalado na coluna de produção de petróleo. Ao longo de cada poço apenas um PDG é instalado, tal limitação se deve principalmente as dificuldades de passar cabos de comunicação e conexão elétrica (ver Figura B.7) uma vez que os poços são muito extensos, porém o ideal seria ter um sistema distribuído de sensores. Um único poço pode possuir múltiplas derivações seja na direção horizontal ou vertical, um esquema de poço em mar pode ser visto na Figura B.6 [109].

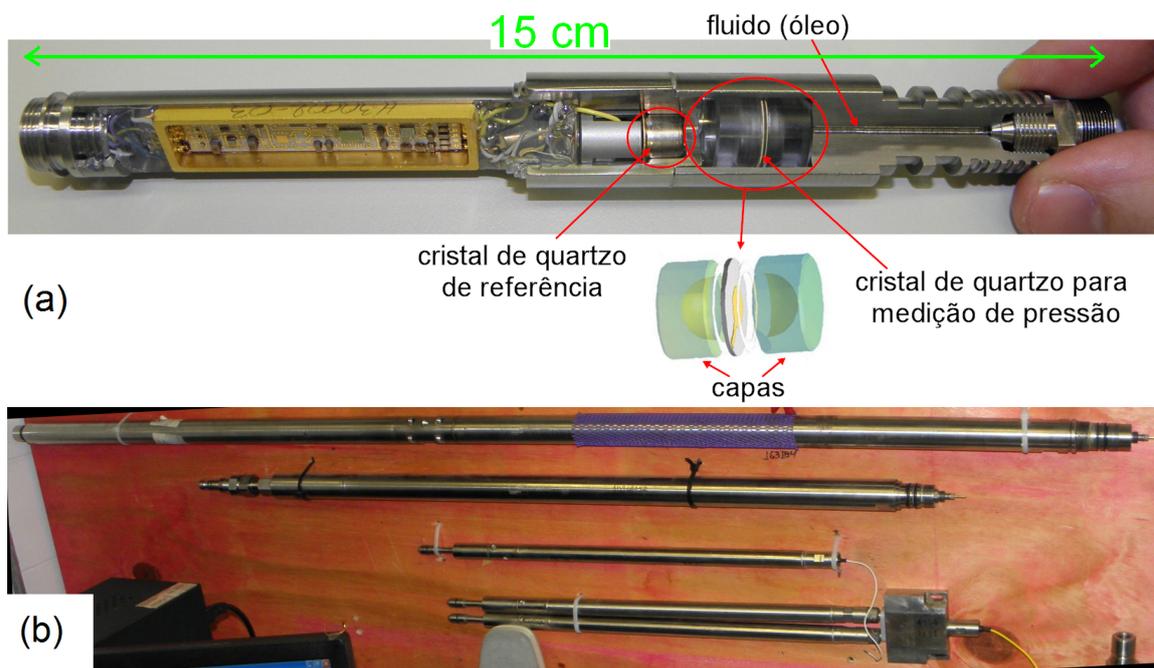


Figura B.5: (a) Sensor de pressão utilizado em poços de petróleo desenvolvido pela *Quartzdyne*. (b) PDGs para medição de pressão e temperatura. (Cortesia CEN-PES/Petrobras).

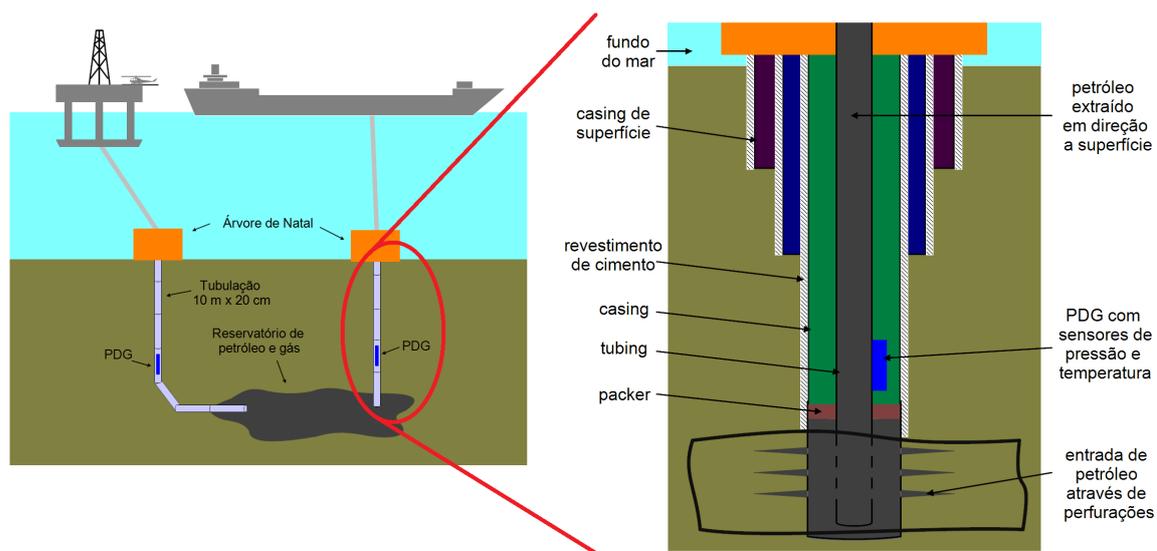


Figura B.6: Esquema simplificado de sistema de extração de petróleo.



Figura B.7: Exemplo de cabo utilizado em sensores instalados em poços de petróleo. No centro tem-se uma estrutura coaxial para envio dos dados e nas extremidades cabos de aço para reforço mecânico (Cortesia CENPES/PETROBRAS).

# Apêndice C

## Configuração das simulações 3D no COMSOL

Esse apêndice detalha como ocorreu as etapas de configuração dos arquivos de simulação no programa COMSOL Multiphysics versão 4.4.

### C.1 Novo arquivo de simulação

Mostra-se na Figura C.1 a tela inicial ao se iniciar o programa, clicar em *Model Wizard*. Quando se inicia um novo arquivo de simulação três itens devem ser escolhidos. Na janela seguinte escolhe-se a geometria, 3D. Em seguida selecionar a física *Structural Mechanics* => *Piezoelectric Devices (pzd)* e clicar em *add*. Avançar para a próxima janela clicando em *Study*, escolher o estudo *Eigenfrequency* (para obter o comportamento da admitância escolher o estudo *Frequency Domain*), clicar em *Done*.

Visualiza-se a janela conforme a Figura C.2. O campo *Length unit* pode ser alterado para  $\mu\text{m}$ . O arquivo é salvo (*File* => *Save As*) com o nome *ressonador\_quartzo\_v1*.

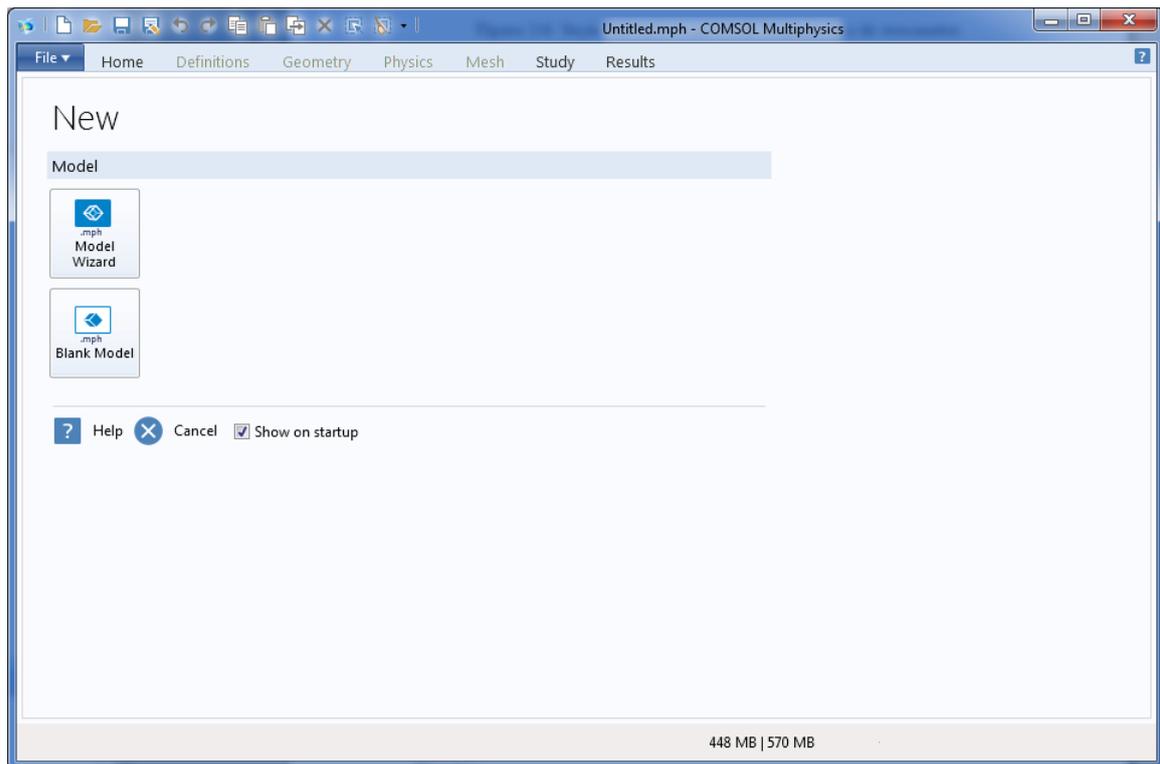


Figura C.1: Tela inicial do programa COMSOL Multiphysics versão 4.4.

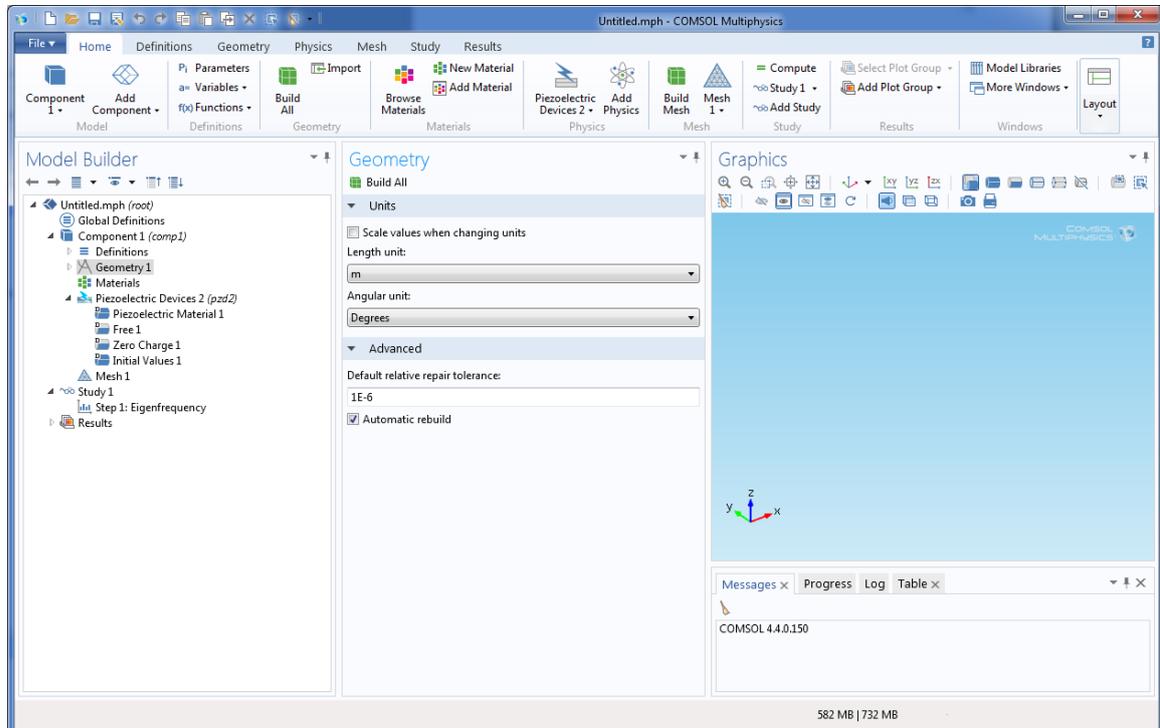


Figura C.2: Tela após a inicialização de um novo modelo.

Parameters			
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
tetha	35.25	35.250	ângulo de corte para simples rotação [graus]
beta	-90+tetha	-54.750	ângulo de Euler
phi	0	0	ângulo de corte para dupla rotação [graus]
h_quartzo	230	230.00	espessura do disco de quartzo [um]
h_elet	0.1	0.10000	espessura dos eletrodos [um]
h_curv	400	400.00	espessura da superfície curvada no centro do disco [um]
larg_quartzo	15000	15000	diâmetro do disco quartzo [um]
razao_diam	0.5	0.50000	razão entre os diâmetros do eletrodo e do disco de quartzo
larg_elet	larg_quartzo*razao_diam	7500.0	diâmetro dos eletrodos [um]
larg_PML	1200	1200.0	largura da região PML [um]
n_elementos	16	16.000	número de elementos para a malha ao longo do raio
TESTE	n_elementos*(larg_elet/larg_quartzo)	8.0000	variável para teste
malha1	round(TESTE)	8.0000	variável para teste
pressao	10e6	1.0000E7	pressão aplicada na estrutura [Pa]
temp	25	25.000	temperatura em que as constantes elásticas são calculadas [Celsius]
c11	$86.75e9*(1-53.5e-6*(temp-50)-75e-9*(temp-50)^2-15e-12*(temp-50)^3)$	8.6862E10	constante elástica c11 [Pa]
c12	$6.15e9*(1-3030e-6*(temp-50)-1500e-9*(temp-50)^2+1910e-12*(temp-50)^3)$	6.6099E9	constante elástica c12 [Pa]
c13	$9.6e9*(1-510e-6*(temp-50)-2000e-9*(temp-50)^2+600e-12*(temp-50)^3)$	9.7103E9	constante elástica c13 [Pa]
c14	$18.2e9*(1+90e-6*(temp-50)-270e-9*(temp-50)^2-630e-12*(temp-50)^3)$	1.8156E10	constante elástica c14 [Pa]
c33	$104.8e9*(1-165e-6*(temp-50)-187e-9*(temp-50)^2-410e-12*(temp-50)^3)$	1.0522E11	constante elástica c33 [Pa]
c44	$58.58e9*(1-171e-6*(temp-50)-212e-9*(temp-50)^2-65e-12*(temp-50)^3)$	5.8823E10	constante elástica c44 [Pa]
c66	$40.26e9*(1+168e-6*(temp-50)-5e-9*(temp-50)^2-167e-12*(temp-50)^3)$	4.0091E10	constante elástica c66 [Pa]
eta11	1.37e-3	0.0013700	viscosidade do quartzo eta11 [Pa.s]
eta12	0.73e-3	7.3000E-4	viscosidade do quartzo eta12 [Pa.s]
eta13	0.71e-3	7.1000E-4	viscosidade do quartzo eta13 [Pa.s]
eta14	0.01e-3	1.0000E-5	viscosidade do quartzo eta14 [Pa.s]
eta33	0.96e-3	9.6000E-4	viscosidade do quartzo eta33 [Pa.s]
eta44	0.36e-3	3.6000E-4	viscosidade do quartzo eta44 [Pa.s]
eta66	0.32e-3	3.2000E-4	viscosidade do quartzo eta66 [Pa.s]
eta_elet	1e-2	0.010000	fator de perdas adimensional para os eletrodos

Figura C.3: Lista de parâmetros definidos no modelo.

## C.2 Definições globais

A ferramenta permite que o usuário defina parâmetros durante a criação de seu modelo, uma lista de exemplo pode ser visualizada na Figura C.3, isso pode ser inserido indo até a coluna *Model Builder* clicar com o botão direito do mouse em *Global Definitions* e escolher a opção *Parameters*. Parâmetros definidos nesta lista como, por exemplo, uma determinada dimensão ou a temperatura, podem ser programados para se modificarem durante a simulação.

## C.3 Configuração do ângulo de corte

Antes de se iniciar o desenho da geometria é válido atentar-se para o seguinte, devido a anisotropia do quartzo suas constantes elásticas, piezoelétricas e dielétricas se modificam a depender do ângulo de corte. Assim, duas possibilidades foram estudadas para se ter o correto posicionamento da estrutura no COMSOL. Na primeira, define-se um plano de trabalho e posiciona-se a estrutura de modo que sua espessura fique ao longo do eixo-y do sistema de coordenadas do COMSOL, a partir dessa posição

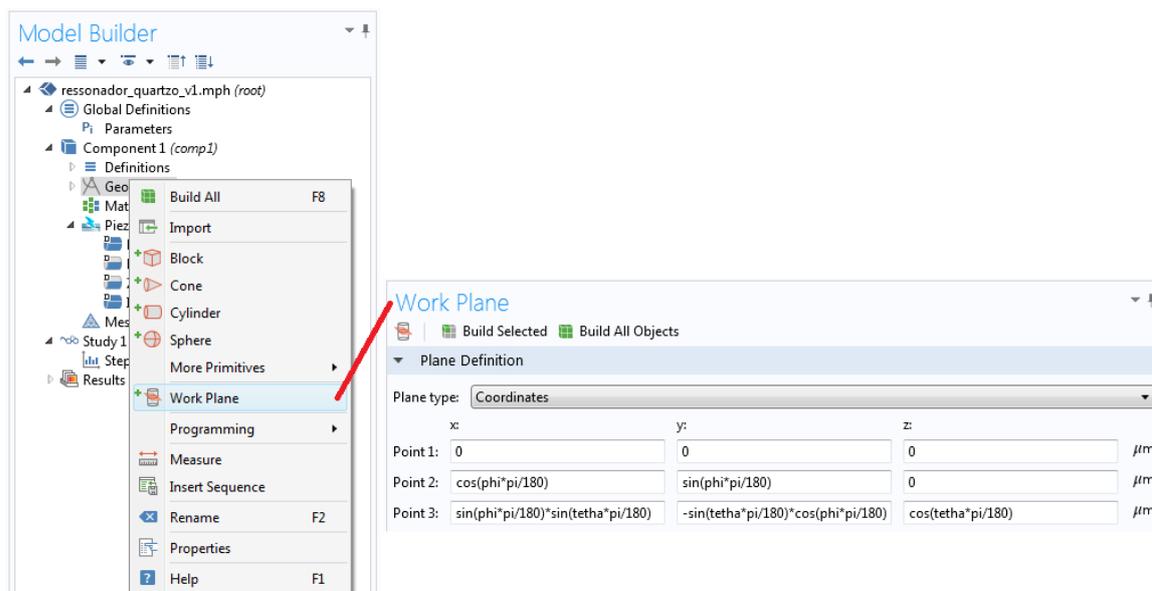


Figura C.4: Plano de trabalho definido pelos ângulos  $\theta$  e  $\varphi$ .

faz-se as devidas rotações tanto em  $\theta$  como em  $\varphi$ . Para isso, criou-se um plano de trabalho definido por três pontos, conforme Figura C.4, onde os ângulos  $\theta$  e  $\varphi$  podem ser facilmente modificados para o corte selecionado. Por fim, uma operação de extrusão é aplicada determinando a espessura desejada do ressonador. Um disco no corte-AT no sistema de coordenadas global do COMSOL pode ser visualizado na Figura C.5.

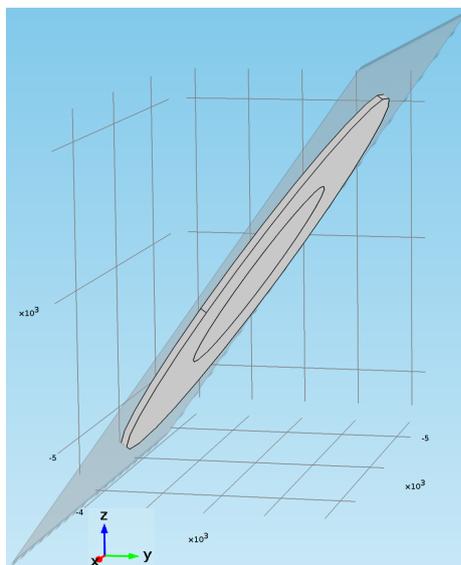


Figura C.5: Visualização do plano de trabalho e do disco ressonador criado por extrusão.

A outra possibilidade consiste em definir um sistema de coordenadas rotacionado através dos ângulos de Euler, isso pode ser inserido indo até a coluna *Model Builder*

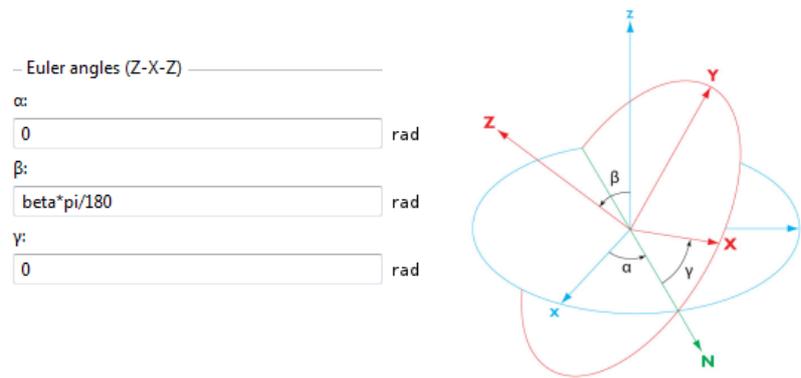


Figura C.6: Ângulos de Euler usados no COMSOL.

clicar com o botão direito do mouse em *Definitions* e escolher a opção *Coordinate Systems => Rotated System*. Um máximo de três rotações podem ser usadas para definir a orientação desejada. Esse método de três rotações é compatível com o conceito de ângulos de Euler apresentado na Figura C.6. Nesse caso a estrutura é desenhada conforme a Figura C.7(e) no sistema de coordenadas global do COMSOL. Portanto, apenas o ângulo  $\beta$  sofre modificação,  $\beta = -90^\circ + 35,25^\circ = -54,75^\circ$ . Essa última foi a opção escolhida para as simulações, uma vez que oferece mais facilidade na construção da geometria em especial quando capas e outras características são investigadas.

Para qualquer uma das duas maneiras de orientar o cristal no COMSOL deve-se usar as matrizes conforme a Tabela 1.6. Outra possibilidade é usar o quartzo da biblioteca do COMSOL que cuja orientação também segue a norma IEEE de 1987. Nas simulações escolheu-se a orientação direita, pois, ela é adotada no cultivo do quartzo e conseqüentemente usada na fabricação dos ressonadores.

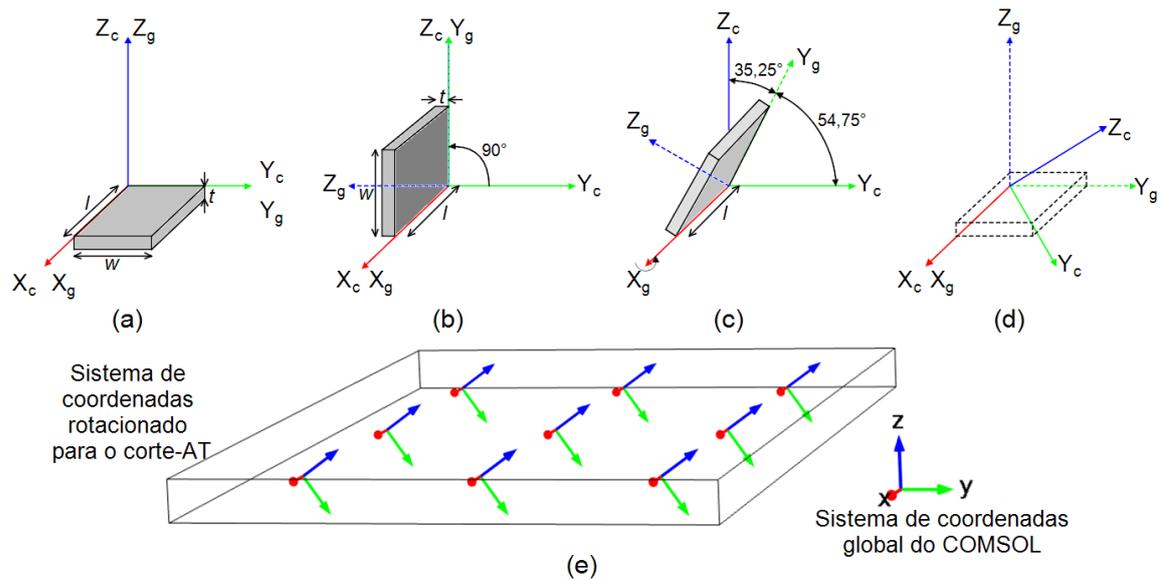


Figura C.7: Procedimento para se definir uma placa de quartzo no corte-AT no COMSOL com direção normal alinhada ao eixo-Z global ( $Z_g$ ). Segundo a norma IEEE de 1987 o corte-AT é definido como  $(YXl)-35,25^\circ$ . (a) Inicia-se com a componente normal à superfície da placa na direção-Z do cristal ( $Z_c$ ), logo, o sistema de eixos global e do cristal coincidem. (b) Rotaciona-se a placa para que sua espessura,  $t$ , fique ao longo do eixo-Y do cristal ( $Y_c$ ) (o ponto de partida para a definição IEEE), o sistema de eixos global é rotacionado com a placa. (c) Rotaciona-se a placa  $-35,25^\circ$  sobre o eixo-X global ( $X_g$ ). (d) Por fim, rotaciona-se todo o esquema de modo que o sistema de coordenadas global é orientado tal como aparece no COMSOL. (e) Visualização do sistema de eixo rotacionado no COMSOL.

## C.4 Geometria

Para dar início ao desenho da geometria cria-se um plano de trabalho conforme Figura C.8 e nele quatro retângulos, conforme Figura C.9, usando as definições globais para chegar na geometria desejada. Clicar com o botão direito do mouse em *Work Plane 1* e escolher *Revolver*. Após isso visualiza-se a geometria conforme a Figura C.10.

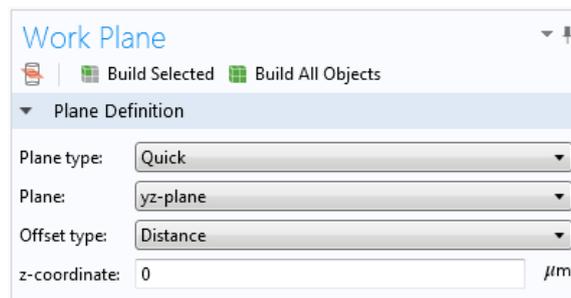


Figura C.8: Definição do plano de trabalho.

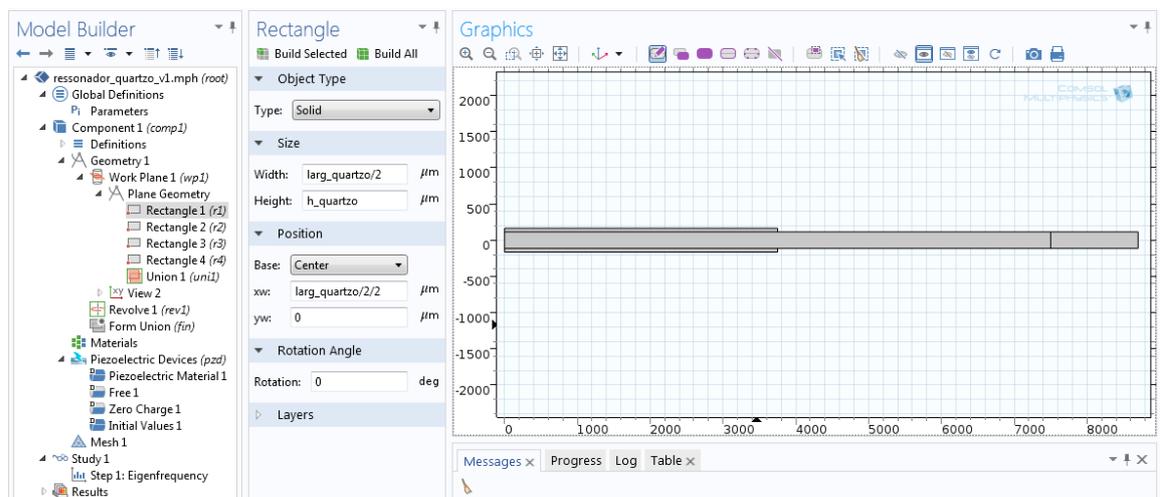


Figura C.9: Entidades da geometria.

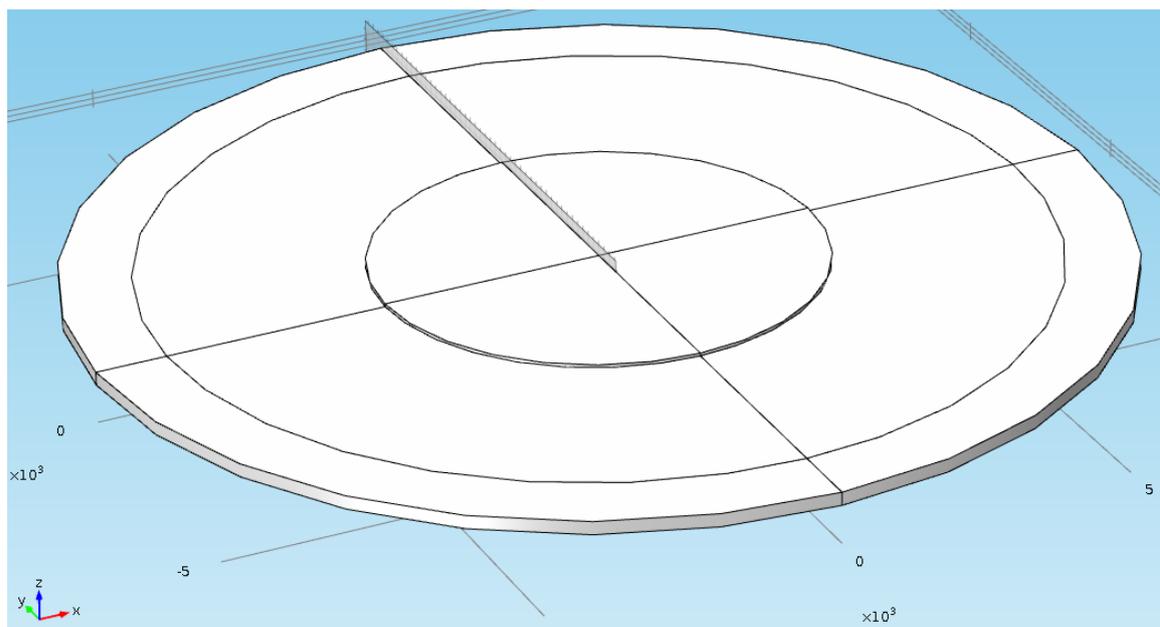


Figura C.10: Disco ressonador com eletrodos e envolvido pela região PML.

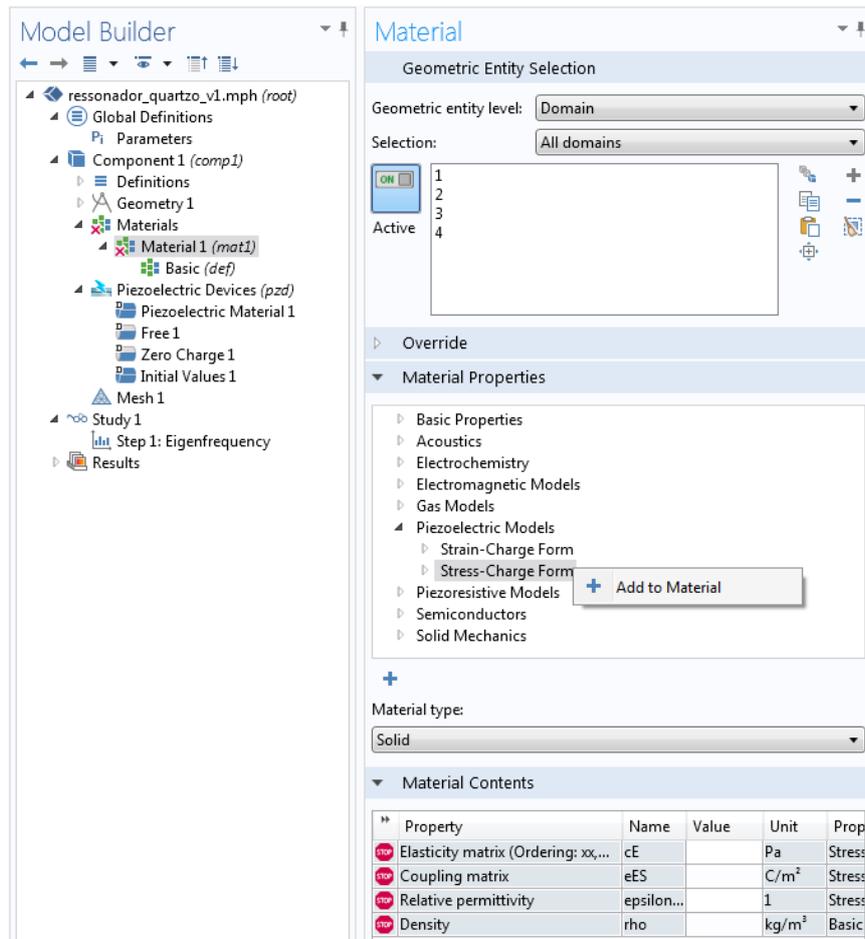


Figura C.11: Definição do material.

## C.5 Materiais

### C.5.1 Quartzo

O material quartzo é definido através da matriz elástica, cujos componentes foram inseridos nas definições globais, da matriz piezoelétrica, da matriz de permissividade elétrica relativa e pela densidade. Para tanto deve-se clicar com o botão direito do mouse em *Materials* e escolher a opção *New Material*. Para inserir as matrizes manualmente clicar com o botão direito do mouse em *Stress-Charge Form* e em seguida *Add to Material*, conforme C.11. Em seguida seleciona-se *Stress-charge form* em *Material 1* (pode-se renomear para *Quartzo*). Seguindo seleciona-se o campo vazio onde será inserida a matriz elástica e clica-se no botão *edit*, conforme C.12, a edição é feita conforme a Figura C.13. Repete-se este mesmo procedimento para as demais matrizes.



Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
✓ Density	rho	2700[kg/m <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
✓ Young's modulus	E	70e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio	
✓ Poisson's ratio	nu	0.33	1	Young's modulus and Poisson's ratio	
Relative permeability	mur	1	1	Basic	
Heat capacity at constant pressure	Cp	900[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic	
Thermal conductivity	k	238[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic	
Electrical conductivity	sigma	3.774e7[S/m]	S/m	Basic	
Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	1	1	Basic	
Coefficient of thermal expansion	alpha	23e-6[1/K]	1/K	Basic	
Murnaghan third-order elastic m...	l	-2.5e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan	
Murnaghan third-order elastic m...	m	-3.3e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan	
Murnaghan third-order elastic m...	n	-3.5e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan	

Figura C.14: Parâmetros para o alumínio.

## C.6 Região PML

A região PML é definida clicando-se com o botão direito em *Definitions* e escolhendo-se a opção *Perfectly Matched Layer*, conforme a Figura C.15. Dentro das configurações para *Perfectly Matched Layer* na opção *Domain Selection* indicar 1 e na opção *Type* escolher *Cylindrical*.

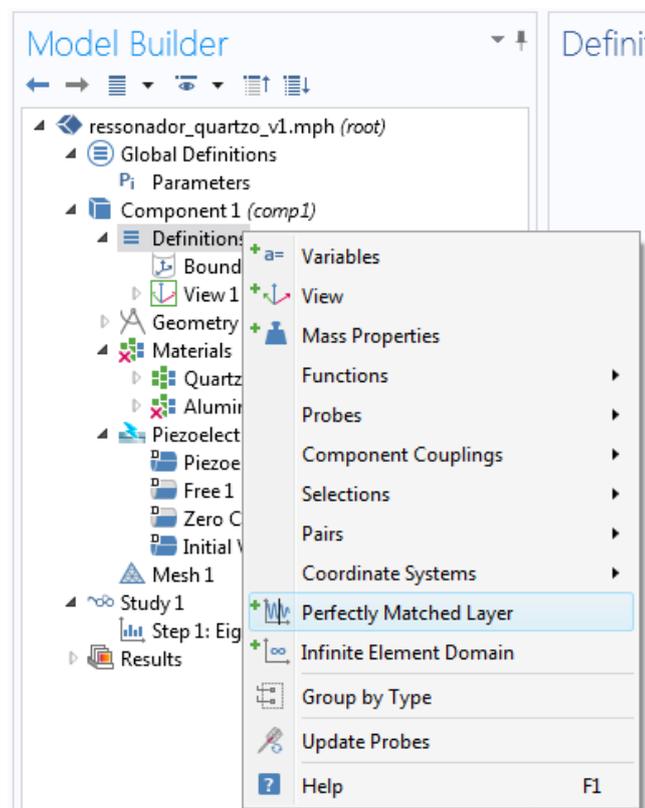


Figura C.15: Definição da região PML.

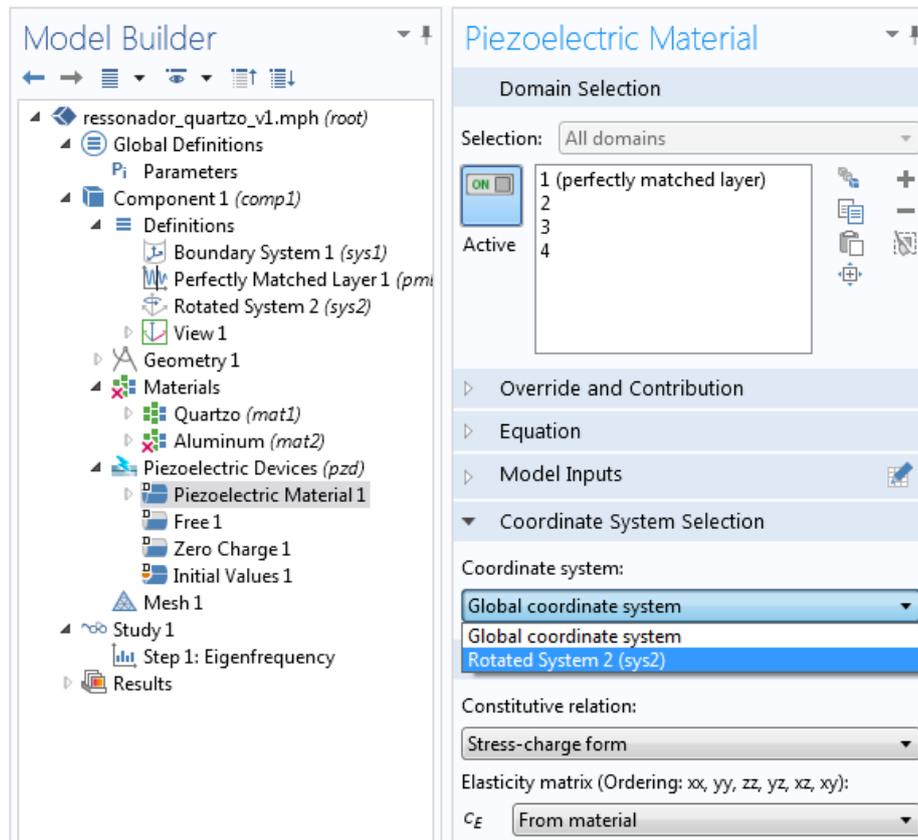


Figura C.16: Determinação do sistema de coordenadas rotacionado.

## C.7 Configuração da física

O sistema de coordenadas rotacionado deve ser indicado nessa etapa, selecionando-se *Piezoelectric Material 1* visualiza-se o campo *Coordinate System* que contém a opção *Rotated System 2*, conforme Figura C.16.

Para inserir as perdas do material “Quartzo” deve-se clicar com o botão direito em *Piezoelectric Material 1* e escolher a opção *Damping and Loss*. Dentro das configurações para *Damping and Loss* na opção *Damping Settings* => *Loss factor for elasticity matrix  $cE$*  modificar para *User defined* e em seguida *Symmetric*. Esse campo deve ficar preenchido como se vê na Figura C.17.

Os eletrodos devem ser modelados como um material elástico linear, para isso deve-se clicar com o botão direito em *Piezoelectric Devices* e escolher a opção *Linear Elastic Material*. Os domínios 3 e 4 devem ser indicados. Para inserir perdas nos eletrodos deve-se clicar com o botão direito do mouse em *Linear Elastic Material 1* e escolher a opção *Damping*. Nas configuração de *Damping* um valor de perda adimensional pode ser inserido conforme a Figura C.18.

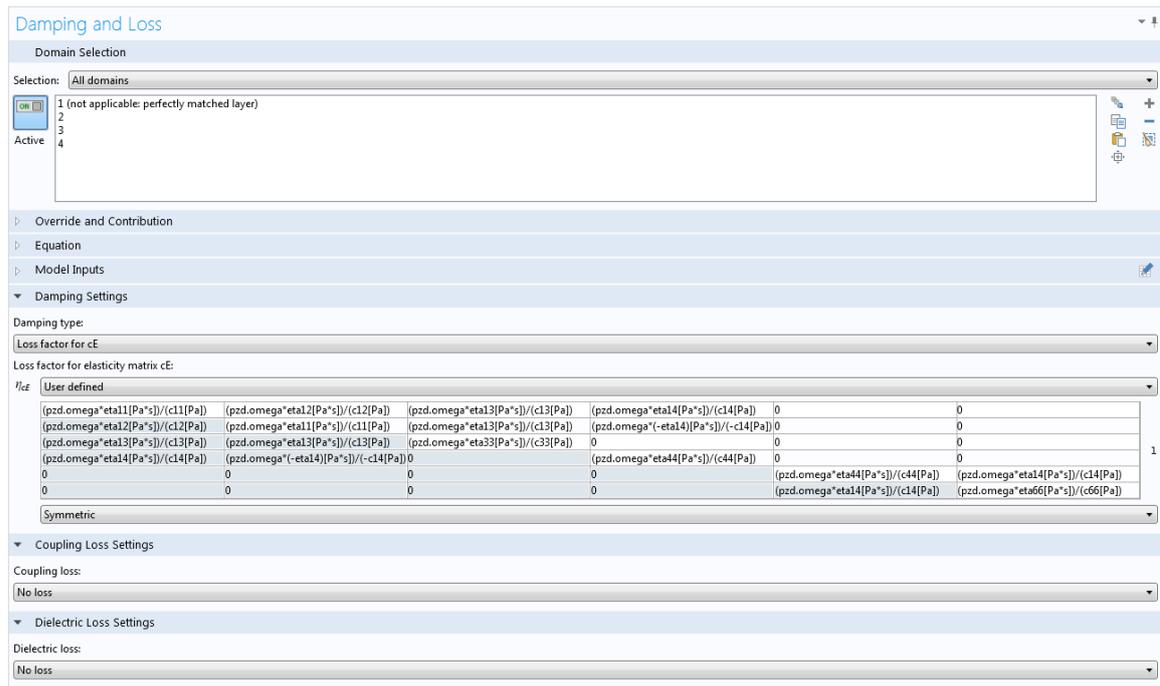


Figura C.17: Configuração das perdas do quartzo.

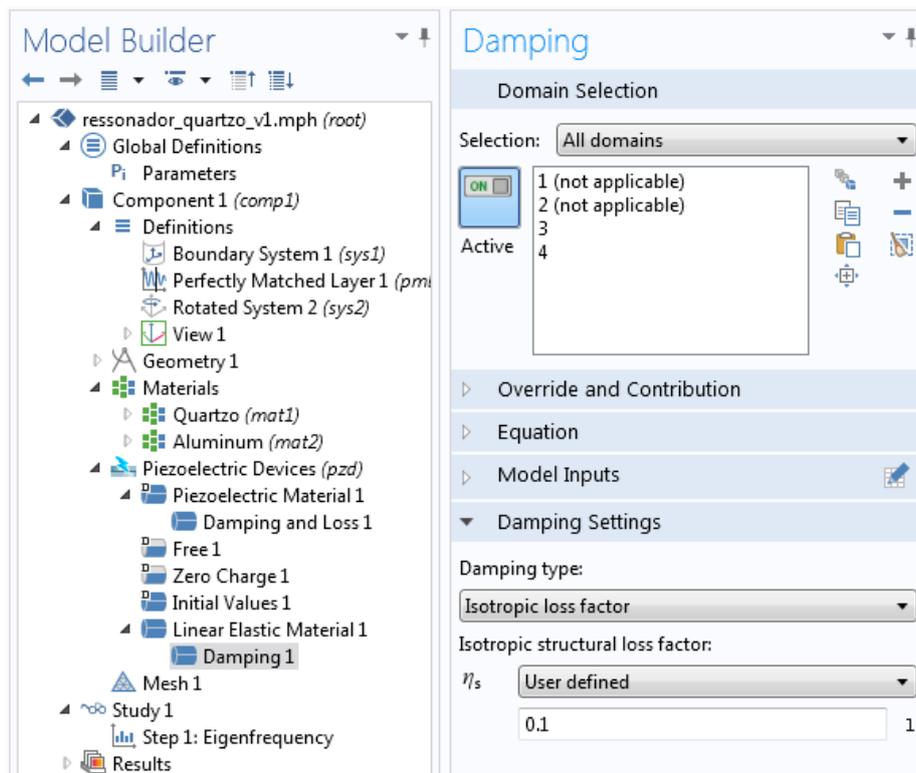


Figura C.18: Configuração das perdas eletrodos.

Ainda na configuração da física deve-se determinar os potenciais elétricos dos eletrodos. Para tanto clica-se com o botão direito do mouse sobre *Piezoelectric Devices*

e escolhe-se a opção *Electrical* => *Terminal*, onde são indicadas as superfícies 21, 22, 35 e 42 e também escolhe-se a opção *Electrical* => *Ground*, onde são indicadas as superfícies 17, 18, 33 e 40. A opção *Terminal* deve ser configurada para *Voltage* conforme Figura C.19.

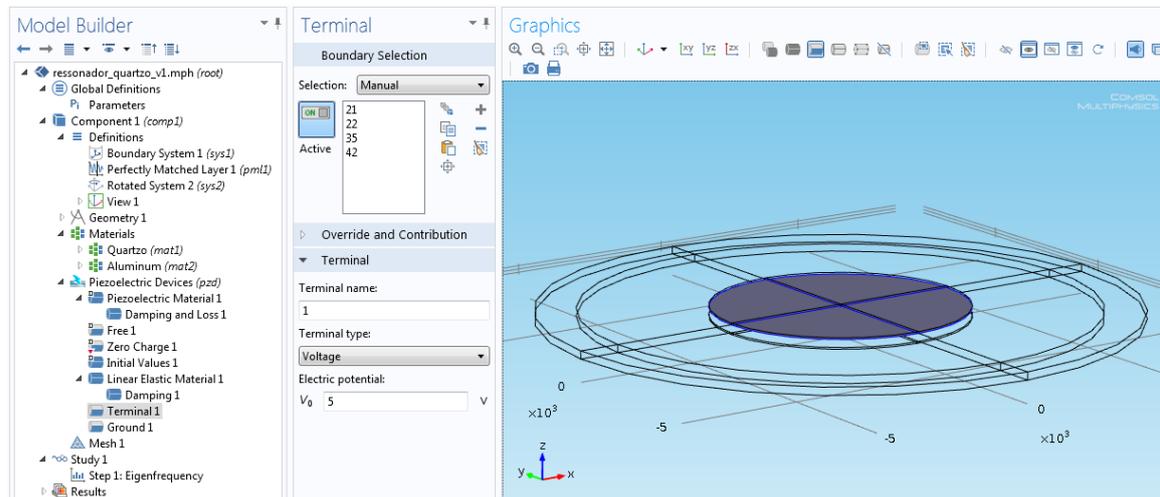


Figura C.19: Configuração do potencial nos eletrodos.

## C.8 Configuração da malha

A malha é criada seguindo dois passos. Primeiramente determina-se o padrão de malha no mesmo plano de trabalho no qual a geometria foi criada e depois expande-se essa malha como um sólido de revolução. Para definir a primeira malha clica-se com o botão direito do mouse em *Mesh 1* e escolhe-se a opção *More Operations* => *Mapped*, as superfícies 37, 39, 41 e 48 são indicadas. Agora clica-se com o botão direito em *Mapped 1* e escolhe-se a opção *Distribution*, esse procedimento é repetido mais três vezes. Nas configurações de *Distribution 1* as linhas 52, 68 e 73 são indicadas e no campo *Number of elements* digita-se 8, definindo-se assim 8 elementos de malha ao longo da espessura do disco ressonador. Nas configurações de *Distribution 2* as linhas 53 e 56 são indicadas e no campo *Number of elements* entra-se com a variável global “malha1” Nas configurações de *Distribution 3* as linhas 62 e 65 são indicadas e no campo *Number of elements* entra-se com a variável global “n\_elementos-malha1” Nas configurações de *Distribution 4* as linhas 69 e 71 são indicadas e no campo *Number of elements* entra-se com o valor 5. Ao término dessa primeira etapa visualiza-se a

malha conforme a Figura C.20.

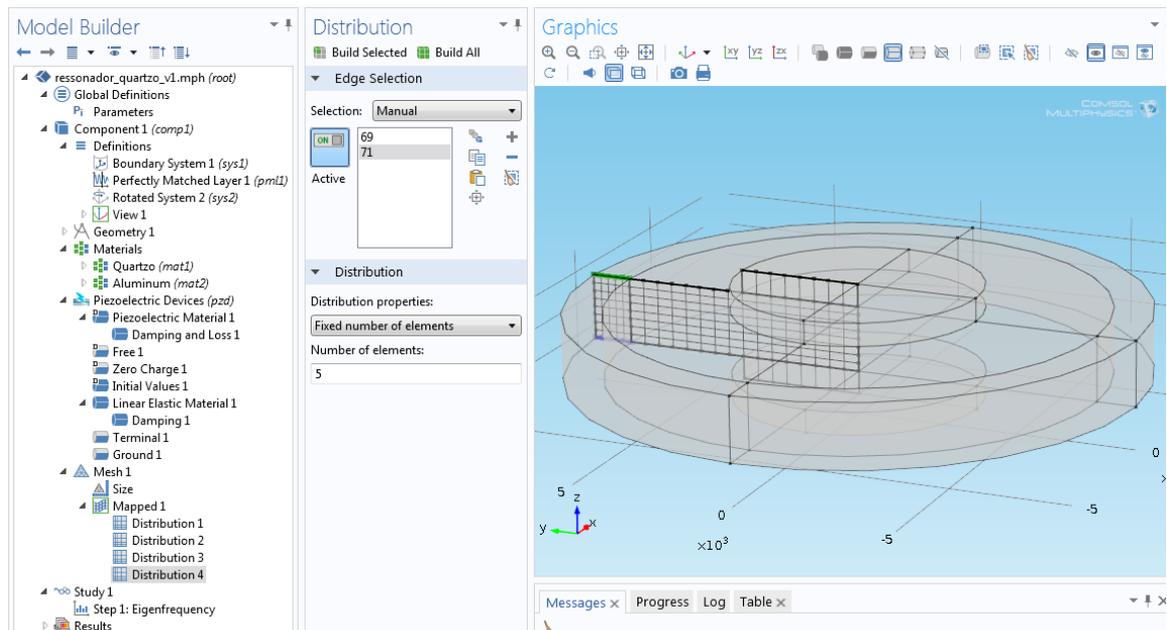


Figura C.20: Construção parcial da malha.

Na segunda etapa clica-se em *Mesh 1* e escolhe-se a opção *Swept*. Nas configurações para *Swept* tanto em *Source Faces* como em *Destination Faces* indica-se 37, 39, 41 e 48. Por fim, clica-se com o botão direito do mouse em *Swept* e escolhe-se a opção *Distribution*, onde os quatro domínios são indicados e no campo *Number of elements* entra-se com o valor 32. Um total de 5888 elementos de malha são criados, conforme Figura C.21.

## C.9 Configuração do estudo *Eigenfrequency*

Nas configurações de estudo *eigenfrequency* dois campos devem ser informados: “*Desired number of eigenfrequencies*” e “*Search for eigenfrequencies around*”, uma captura de tela é visualizada na Figura C.22, o primeiro campo se refere a quantos valores de frequência de ressonância serem buscados na simulação, por exemplo, informando-se o valor 5 nesse campo, 5 valores acima e 5 cinco valores abaixo do valor de frequência determinado no segundo campo serão buscados.

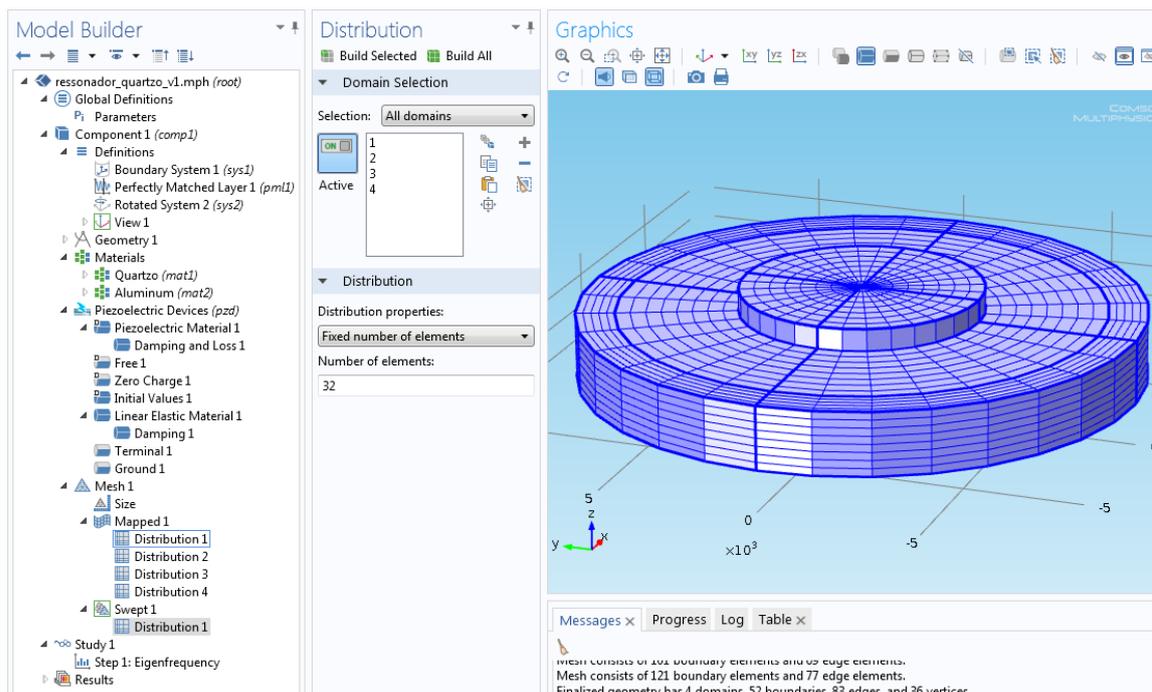


Figura C.21: Malha final no disco.

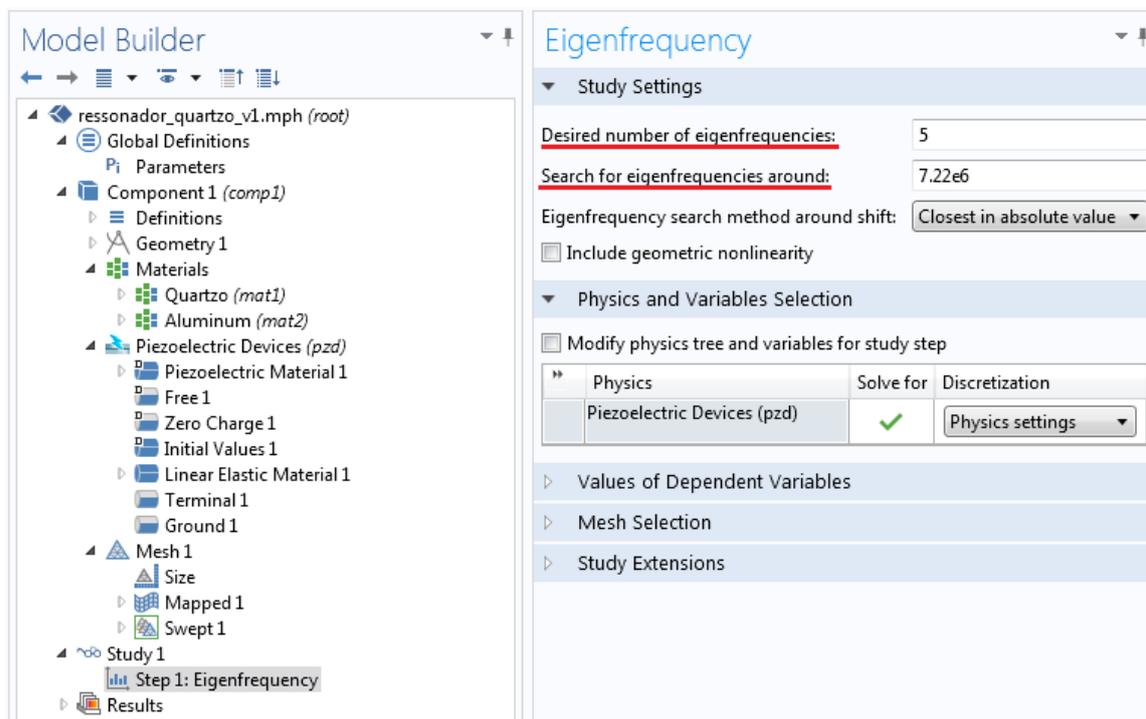


Figura C.22: Configuração do estudo *eigenfrequency*.

### C.9.1 Visualização dos resultados

Para iniciar a simulação clicar em *Compute*. Decorreu-se um tempo de simulação de 5 minutos. Os resultados podem ser visualizados em *Results* => *Displacement (pzd)*. No sentido de facilitar a interpretação das deformações ocorridas no disco algumas modificações de configuração são feitas em *Surface 1* e *Deformation*, conforme Figura C.23.

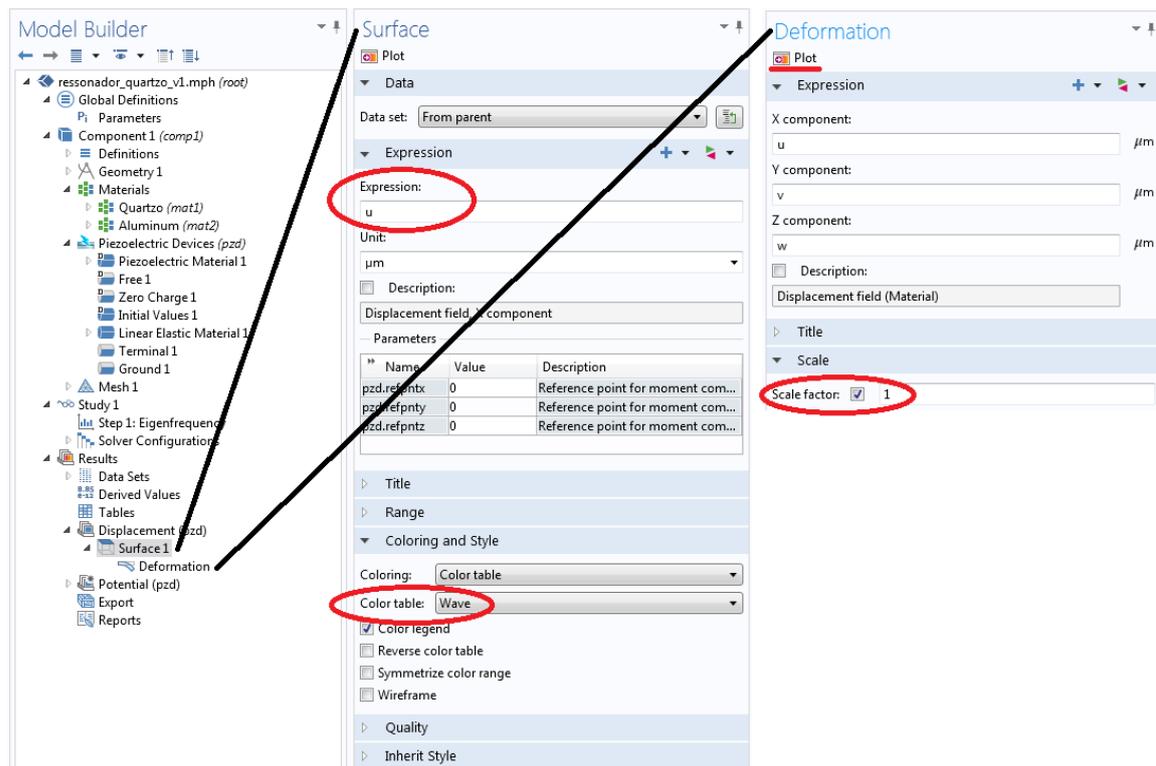


Figura C.23: Configurando a visualização dos resultados.

Dentro de *Results* pode-se ir até *Export* e clicando-se com o botão direito do mouse escolher a opção *Player*, configurar conforme Figura C.24.

Após apertar *Play*, as dez frequências encontradas na simulação são apresentadas, dentre elas aquela que corresponde ao modo de vibração de cisalhamento é a de posição 2, conforme Figura C.25. Mostra-se que o tempo de simulação foi de 558 segundos.

Havendo a necessidade de se inserir um parâmetro variável nas simulações clicar com o botão direito do mouse em *Study 1* e escolher *Parametric Sweep*.

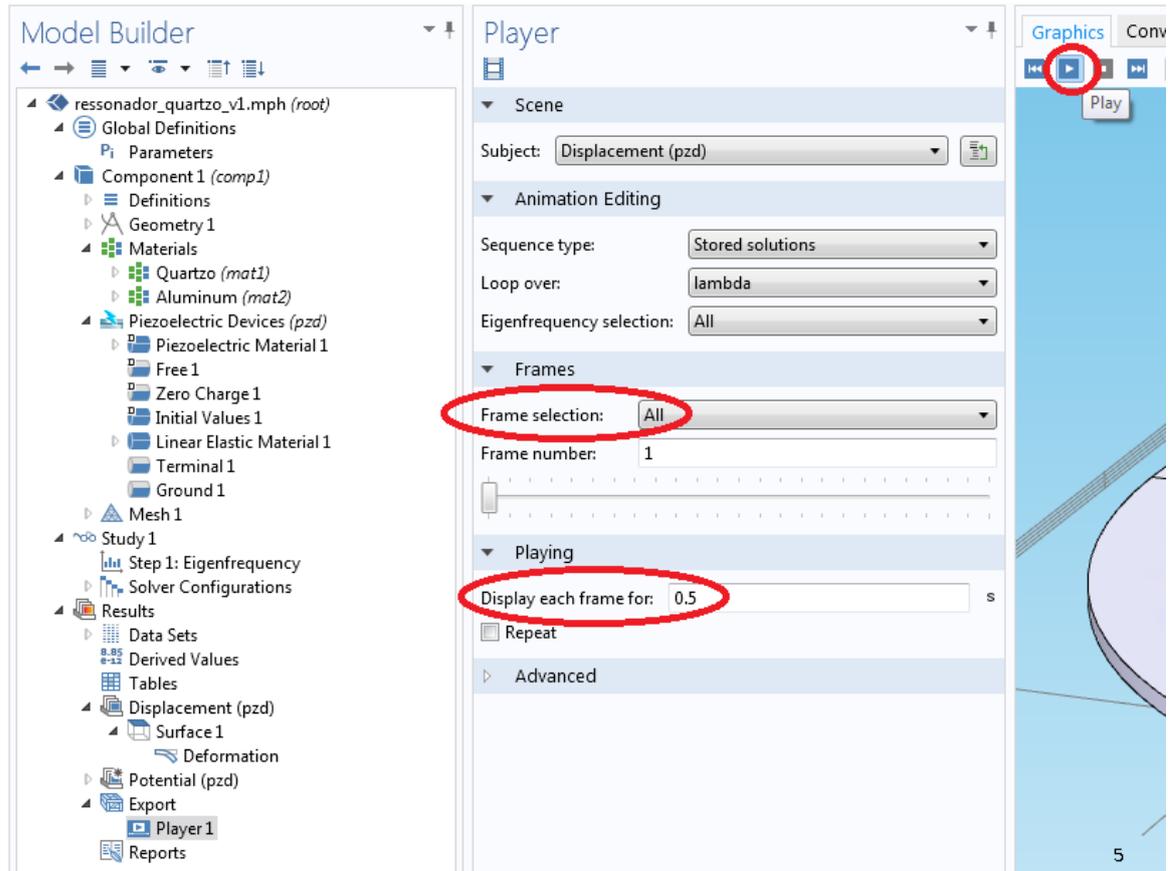


Figura C.24: Definindo *Player*.

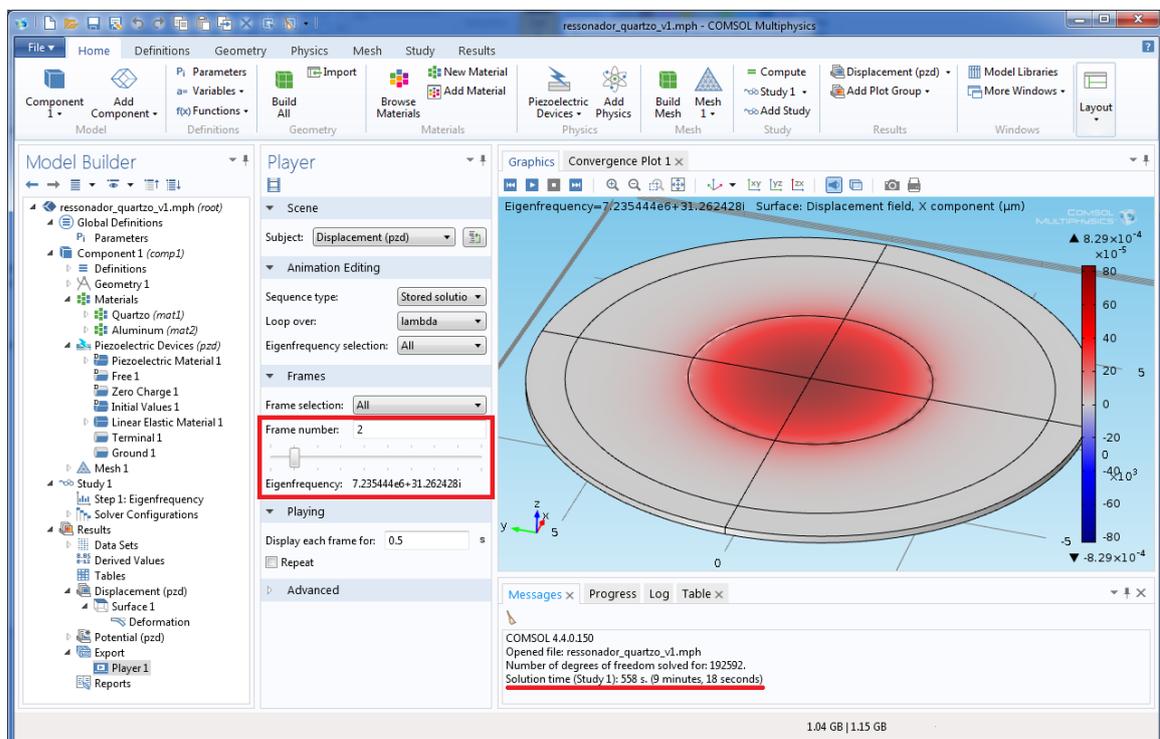


Figura C.25: Visualização do resultado para o estudo *eigenfrequency*.

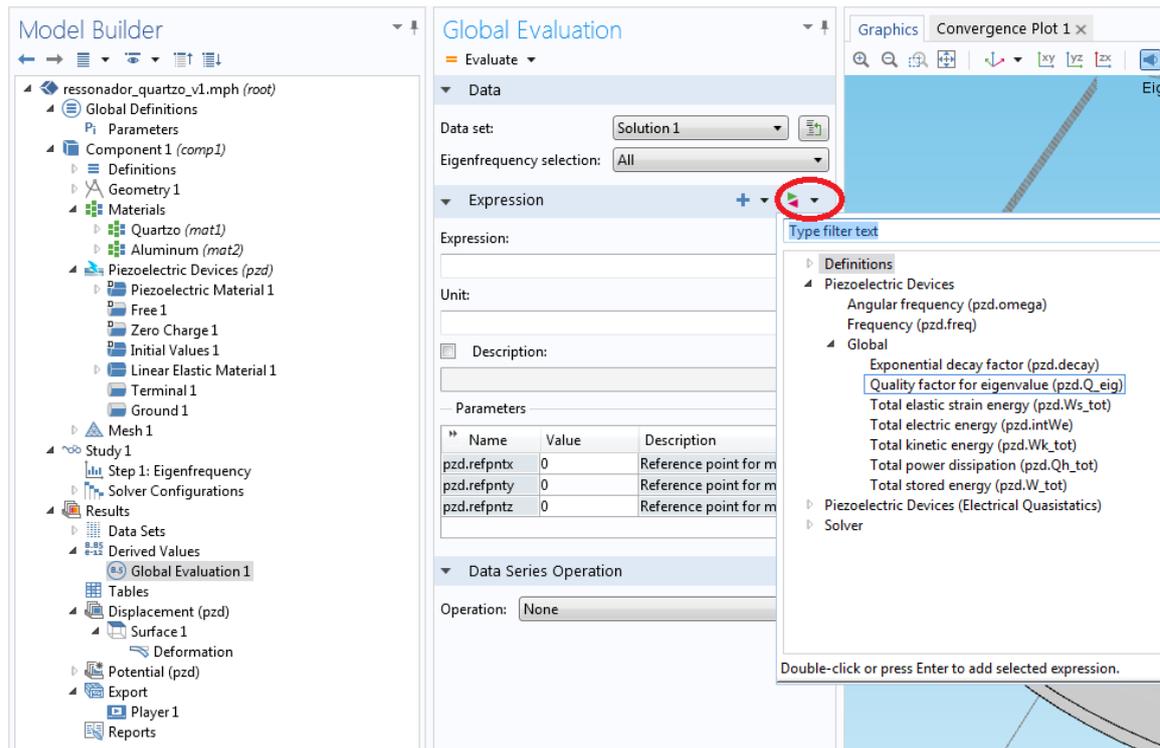


Figura C.26: Configuração para visualizar o fator de qualidade.

O fator de qualidade pode ser visualizado clicando-se com o botão direito do mouse em *Derived Values* e escolhendo-se a opção *Global Evaluation*. Dentro das configurações de *Global Evaluation 1* configurar o campo *Expression* conforme Figura C.26. Os resultados são apresentados após clicar em *Evaluate*, o resultado é apresentado em forma de tabela e o fator de qualidade para o modo de cisalhamento de espessura corresponde a valor da segunda linha, ver Figura C.27.

Eigenfrequency	Quality factor for eigenvalue (1)
7.22474e6+75620.93033i	47.76945
7.23544e6+31.26243i	1.15721e5
7.25448e6+58.62383i	61873.13521
7.25845e6+156.65859i	23166.45762
7.2786e6+601.30624i	6052.3275
7.28007e6+651.38904i	5588.11142
7.28851e6+1113.14273i	3273.84386
7.29986e6+2855.50577i	1278.20857
7.30097e6+4445.21841i	821.216
7.30214e6+8130.48295i	449.05954

Figura C.27: Valores para o fator de qualidade em cada uma das frequências.

## C.10 Configuração do estudo *Frequency Domain*

Um novo estudo é adicionado clicando-se com o botão direito do mouse em “ressonador\_quartzo\_v1.mph (root)” e escolhendo-se a opção *Add Study*. Em seguida a opção *Frequency Domain* é adicionado, conforme a Figura C.28. Na Figura C.29 mostra-se como o ocorreu a configuração do estudo. Para dar início a simulação clicar em *Compute*.

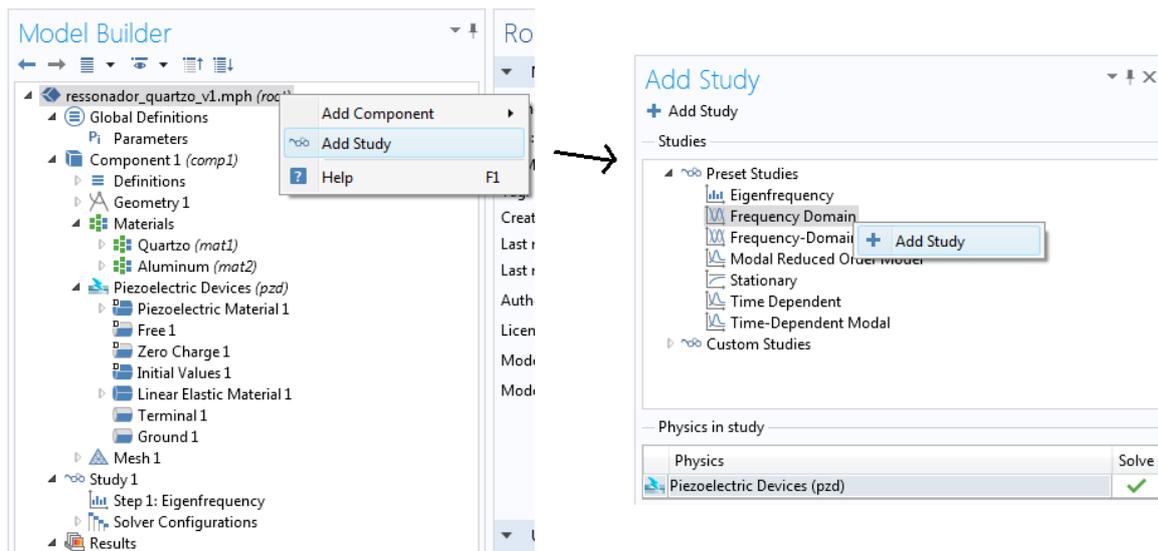


Figura C.28: Inserção de um novo estudo.

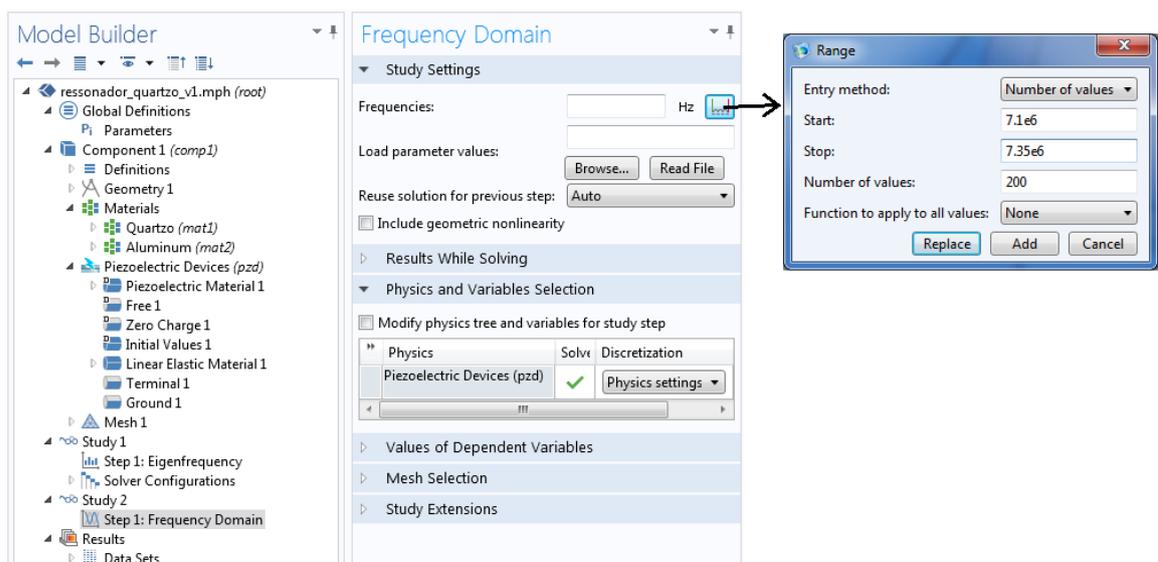


Figura C.29: Configuração do estudo *Frequency Domain*.

### C.10.1 Visualização dos resultados

O gráfico da impedância em função da frequência pode ser visualizado através das seguintes etapas. Primeiramente clicar com o botão direito do mouse em *Results* e escolher a opção *1D Plot Group*. Esse item será incluso na árvore *Model Builder*, pode-se clicar com o botão direito do mouse nele e escolher a opção *Global*. As configurações para este último são apresentadas na Figura C.30. Os resultados gráficos e suas configurações são apresentados nas Figuras C.31 e C.32. Decorreu-se um tempo de simulação de 30510 segundos (aproximadamente 8,5 horas).

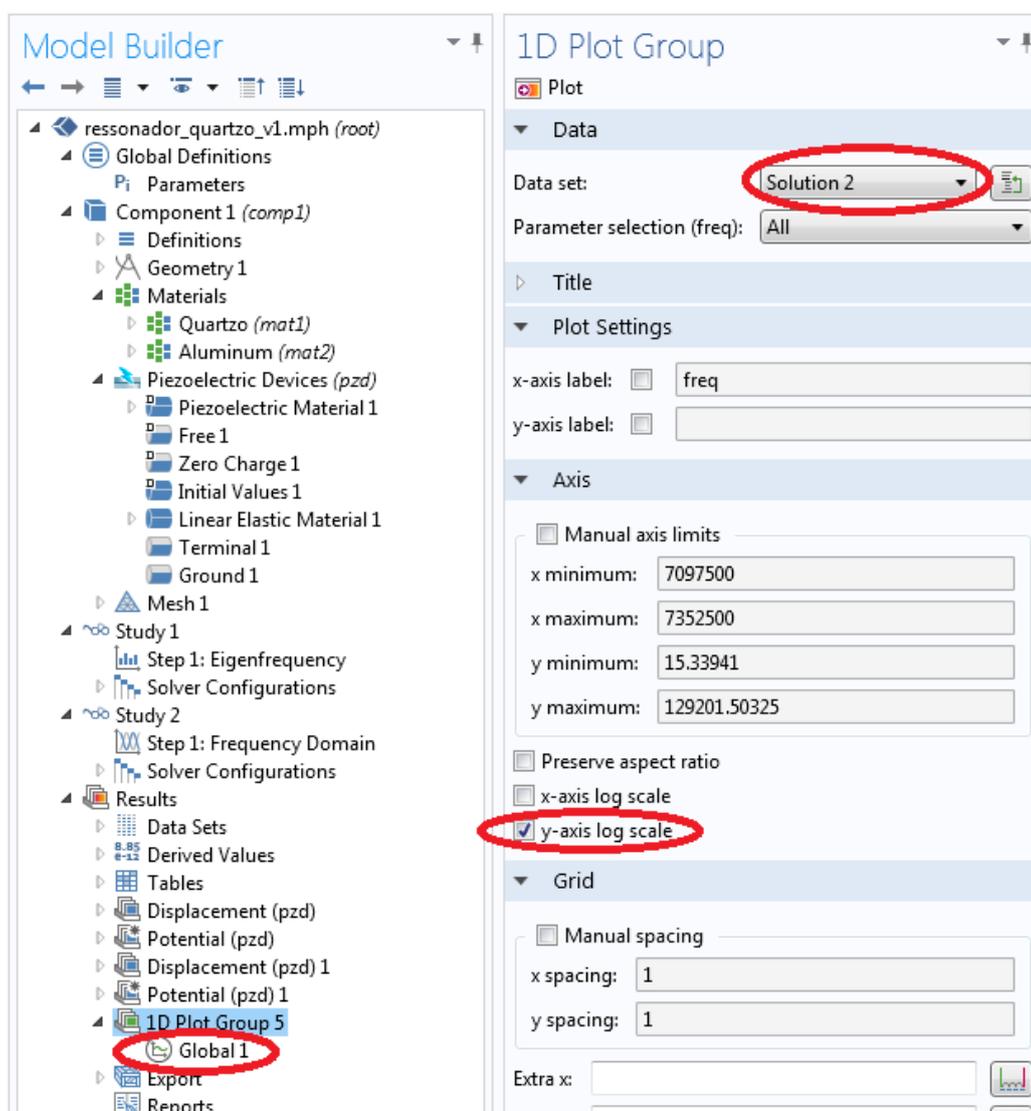


Figura C.30: Configuração para se chegar ao gráfico da impedância.

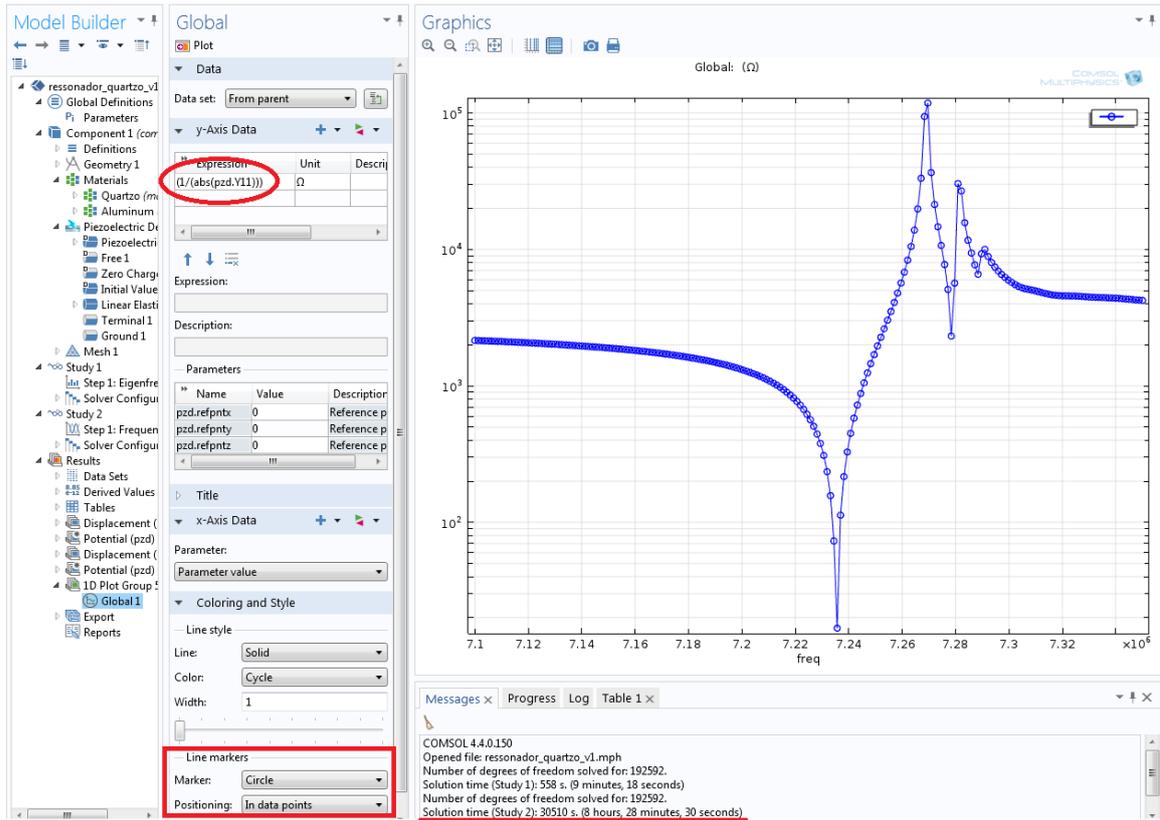


Figura C.31: Gráfico do módulo da impedância.

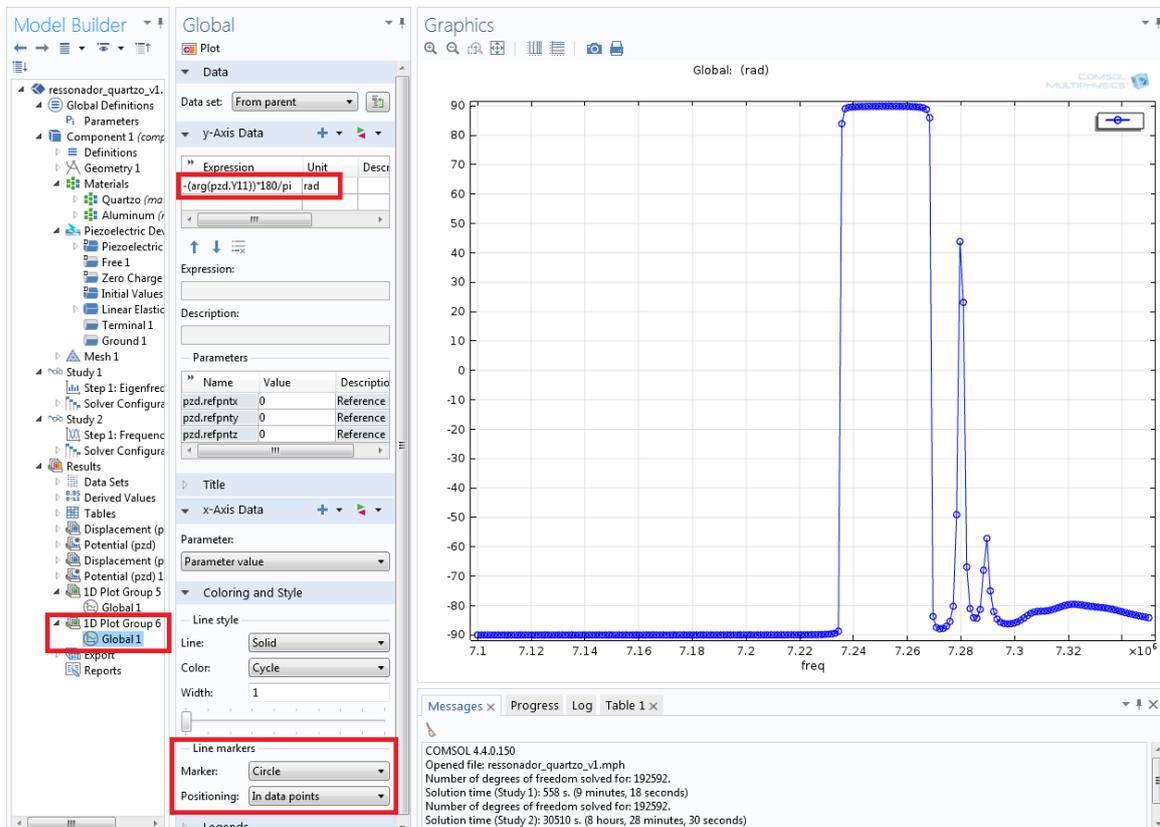


Figura C.32: Gráfico da fase da impedância.

## C.11 Configuração dos estudos com variação de temperatura e pressão

A temperatura do quartzo é facilmente determinada através do parâmetro “temp”, definido em *Parameters* (ver Figura C.3), esse parâmetro modifica as constantes elásticas para a temperatura desejada.

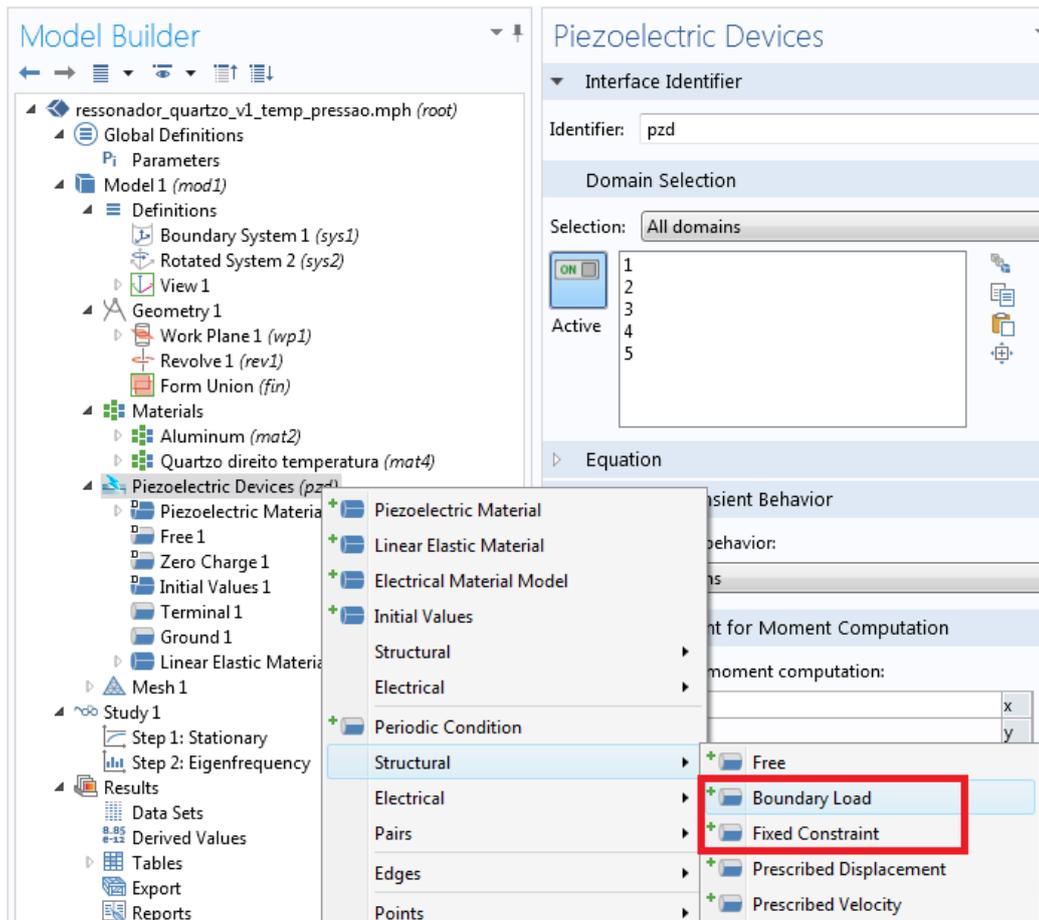


Figura C.33: Configuração da física para aplicação de pressão.

Nessa seção será considerada a geometria do disco de quartzo com as capas protetoras, conforme Figura 2.27. As condições de contorno referentes a aplicação de pressão nas superfícies do ressonador envolvido por capas (*Quartzdyne*) foram determinadas conforme a Figura 2.28(a). Exige-se, para a correta modelagem, que pelo menos três pontos da estrutura sejam fixados, de maneira a evitar rotações ou translações da mesma dentro dos seus seis graus de liberdade. Assim, deve-se introduzir na física as opções *Boundary Load* e *Fixed Constraint*, conforme Figura C.33. Cada uma

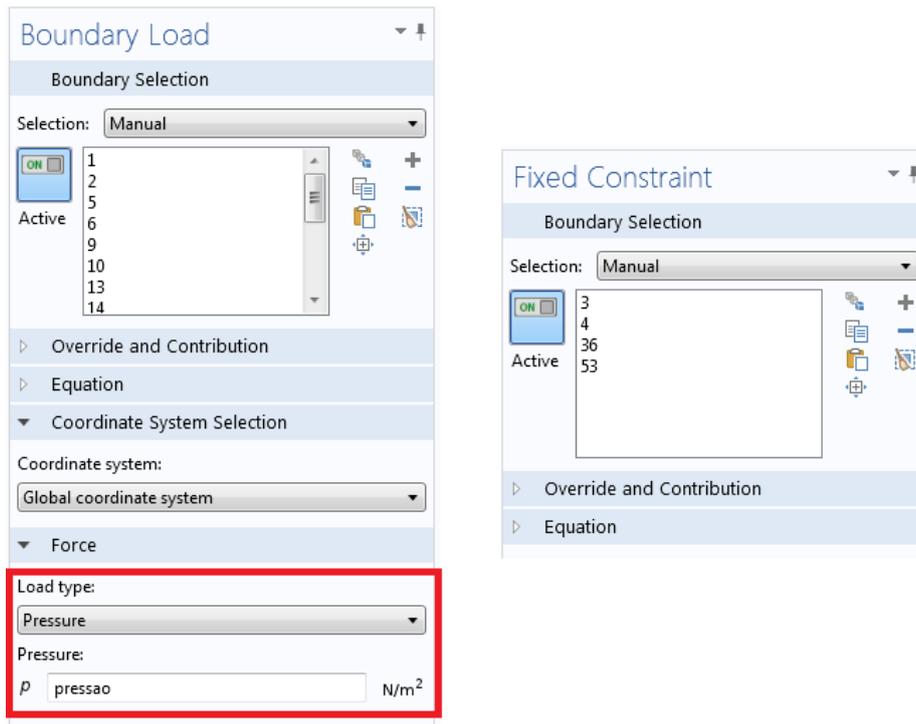


Figura C.34: Configuração de *Boundary Load* e *Fixed Constraint*.

dessas deve ser configurada como mostra-se na Figura C.34. No campo *Active* para *Boundary Load* são indicadas todas as superfícies externas com exceção das que compõem a base do cilindro, já para *Fixed Constraint* são indicadas apenas as superfícies externas que compõem a base do cilindro.

Os estudos devem ser configurados conforme a Figura C.35

### C.11.1 Visualização dos resultados

Para iniciar a simulação clicar em *Compute*. Para o estudo solicitado decorreu-se um tempo de simulação de 8,5 minutos. Os resultados são apresentados na Tabela 2.12.

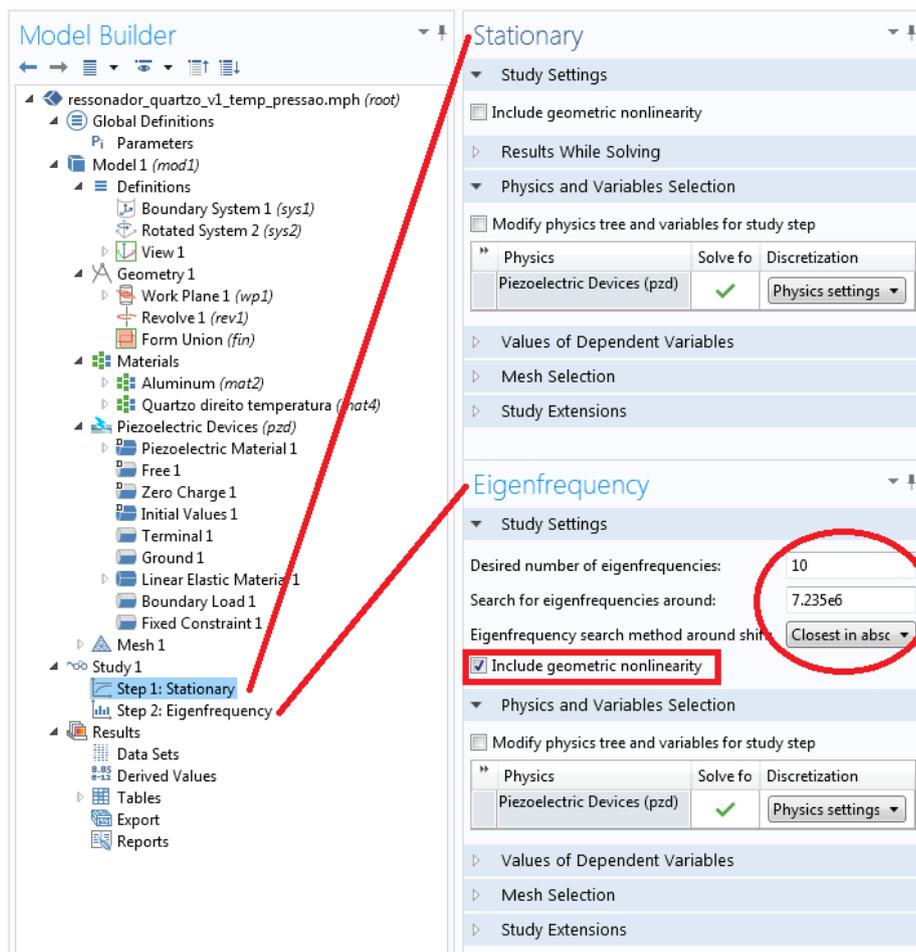


Figura C.35: Configuração para se verificar a frequência de ressonância com pressão aplicada na estrutura.

# Apêndice D

## Operação dos equipamentos

### D.1 Procedimentos de uso da pulverizadora

Os procedimentos para deposição de alumínio na máquina de pulverização foram realizados através dos seguintes passos:

1. Verificar se o filtro está na bomba de vácuo mecânica;
2. Ligar a bomba de água (responsável pelo resfriamento dos alvos);
3. Ligar o compressor de ar (responsável pelos acionamentos pneumáticos);
4. Abrir as válvulas do cilindro de argônio;
5. Posicionar a lâmina de quartzo no interior da câmara;
6. Posicionar o alvo de Al no interior da câmara;
7. Ligar interruptores “*mains power*” e “*vacuum pumps*”;
8. Abrir válvula do medidor de pressão do processo. Esse medidor consiste de um sensor capacitivo, onde a diferença de pressão nas placas do capacitor é sentida e modifica a capacitância;
9. Ligar medidor de pressão de alto vácuo (segurar botão com a seta para cima por alguns segundos);
10. Verificar se a válvula do gás nitrogênio está fechada, pois, ele não será utilizado;
11. Abrir válvula de porta (manivela da bomba turbomolecular) para iniciar o vácuo na câmara;
12. Aguardar até que a pressão da câmara atinja  $5 \times 10^{-5}$  Torr ou menos, essa será a pressão base, ou seja, a pressão mínima alcançada antes da entrada do(s) gás(es) de processo;
13. Injetar o gás argônio no interior da câmara (interruptor “gas1”). Com isso a pressão na câmara deve aumentar;
14. Ajustar o fluxo de argônio na posição 18,00 sccm<sup>1</sup> (botão AJA MFCX);
15. Estabilizar a pressão para 10 mTorr (pressão de processo) utilizando a válvula de porta. Ao colocar o gás de processo observar a pressão no medidor “Terra Nova”, nesse momento fechar um pouco a válvula de porta para não perder todo o gás. O objetivo é fazer com que a deposição aconteça num valor de pressão estável;

---

<sup>1</sup>do inglês *Standard Centimeter Cubic per Minute*.

16. Iniciar plasma de limpeza com valor máximo de potência, 50 W. Sabe-se que o plasma está ocorrendo quando uma luz amarelada surge no interior da câmara. Caso alguma reflexão devido ao descasamento de impedância entre o plasma (carga) e o gerador seja observada no mostrador tentar corrigi-la variando os knobs “*tune*” e “*load*”, com isso varia-se a capacitância de dois capacitores entre a carga e o gerador;
17. Ligar a rotação da mesa do porta substrato (posição 30 RPM);
18. Após 5 minutos desligar a potência do plasma de limpeza;
19. Ligar a potência do plasma de processo;
20. Configurar a potência de plasma de processo para 300 W;
21. Abrir *shutter* do alvo alumínio (interruptor “SH3”);
22. Caso o plasma não se forme imediatamente pode-se tentar aumentar um pouco a pressão da câmara pela válvula de porta até que o plasma dê início;
23. Para anular a potência de reflexão repetir o mesmo procedimento feito no plasma de limpeza;
24. Fechar a janela de visualização do interior da câmara de modo a se evitar deposição no vidro;
25. Aguardar o tempo de deposição;
26. Decorrido o tempo de deposição desligar “SH3” e “gas1”;
27. Desligar a potência do plasma de processo (não desligar toda a máquina de uma só vez para não correr o risco de danificar a bomba de vácuo mecânica);
28. Fechar a válvula do medidor de pressão do processo;
29. Abrir a válvula de porta para elevar a pressão na câmara;
30. Desligar o interruptor “*vacuum pumps*”;
31. Acompanhar a elevação da pressão no medidor “*Conv*”;
32. Quando a pressão da câmara chegar em 150 Torr pode-se abrir a ventilação de nitrogênio e fechar a válvula de porta (fecha-se esta girando a manivela no sentido horário, na última volta da manivela ouve-se um “tic”);
33. Aguardar a pressão voltar à pressão atmosférica ( $\geq 690$  Torr);
34. Fechar a ventilação de nitrogênio na câmara;
35. Desligar o interruptor “*mains power*”;
36. Pode-se abrir a câmara e retirar a lâmina;
37. Fechar as válvulas dos cilindros de argônio e nitrogênio;
38. Desligar o compressor de ar;
39. Desligar a bomba de água;

## D.2 Procedimentos de uso da máquina de usinagem

Os procedimentos de uso na máquina de usinagem SONIC-MILL HD 1000 foram realizados através dos seguintes passos<sup>2</sup>:

1. Preparar na chapa quente a colagem da peça na placa de metal através da cera. A cera começa a derreter-se quando a chapa quente atinge cerca de 180 °C;
2. Conectar a mangueira de ar na máquina de usinagem e ligar o compressor de ar;

---

<sup>2</sup>OBS.: Nesse passo-a-passo não se usou o recurso de elevação da ferramenta (“TOOL LIFT CONTRONS”) para renovação do líquido abrasivo uma vez que a espessura da lâmina usinada (350  $\mu\text{m}$ ) não exige esse procedimento. O movimento de elevação é controlado por um sistema de ar comprimido e o ajuste do taxa de elevação pode ser feito pelo botão “LIFT RATE” e pode ter um período de 10 a 25 s.

3. Posicionar a ferramenta no sonotrodo;
4. Colocar cerca de 3 litros da mistura água + abrasivo no reservatório;
5. Ligar a unidade AUTOPAC IIb (botão "POWER" na posição "ON");
6. Ajustar a pressão do indicador "UP PRESSURE" para 60 psi (recomendação do fabricante);
7. Posicionar a placa de metal logo abaixo da ferramenta;
8. Ligar o eletroímã (pressionar o botão "MAGNETIC TABLE", o led "MAGNETIC ON" ascende);
9. Ajustar o micrômetro:
  - (a) Posicionar o micrômetro alinhado ao parafuso de fim de curso;
  - (b) Colocar a chave "TOOL DOWN" na posição "TEST", a ferramenta começa a descer (acompanhar no indicador de profundidade). A pressão de descida pode ser ajustada para 0 psi, isso fará com que a ferramenta desça com velocidade máxima (aproximadamente 125  $\mu\text{m/s}$ );
  - (c) Durante a descida verificar que a ferramenta irá tocar a peça antes do micrômetro atingir sua posição mais baixa (situação em que o led indicativo de fim de usinagem muda de verde para vermelho);
  - (d) Quando a ferramenta atingir a superfície da peça e consequentemente parar de descer deve-se ajustar o micrômetro de forma que ele encoste o parafuso de fim de curso (led muda para vermelho). Com a chave "TOOL DOWN" na posição "TEST" a ferramenta não sobe automaticamente quando o micrômetro toda o parafuso de fim de curso. Verificar também onde o indicador de descida estacionou e registrar;
  - (e) Pode-se agora girar o micrômetro de maneira que ele suba a mesma distância que se deseja na usinagem da peça. Uma volta do micrômetro corresponde a 500  $\mu\text{m}$ ;
  - (f) Voltar a chave "TOOL DOWN" para a posição "OFF". Assim, a ferramenta sobe para a posição inicial;
10. Ligar o cronômetro. Colocar a chave amarela na posição "ON";
11. No módulo do ultrassom colocar a chave principal na posição "ON". O led "POWER" permanece apagado, pois, a chave "SONIC" deve estar na posição "OFF";
12. Ajustar a potência do ultrassom desejada (o valor é ajustado em porcentagem de 20 a 100%);
13. Apertar o botão "AUTO START", o led "AUTO ON" ascende;
14. Ajustar a pressão de descida da ferramenta;
15. Colocar a chave "TOOL DOWN" na posição "AUTO". A ferramenta começa a descer;
16. Quando a ferramenta estiver próxima da superfície da peça colocar as chaves "SLURRY" e "SONIC" na posição "AUTO", com isso a mistura começa a circular e o ultrassom é ligado, respectivamente;
17. Verificar se o led de "OVERLOAD" ascende, se sim apertar as conexões entre amplificador, sonotrodo e ferramenta. Caso um ruído agudo surja ao ligar o ultrassom é sinal também que essas conexões não estão devidamente apertadas;
18. Reiniciar o cronômetro quando a ferramenta encontrar a superfície da peça. Muito provavelmente isso será difícil de se visualizar devido a mistura abrasiva, mas pode-se usar o valor registrado do indicador de descida;
19. Acompanhar a profundidade da usinagem através do indicador de descida, registros podem ser feitos em intervalos de tempos regulares a fim de se obter a taxa de remoção de material da peça;
20. É comum haver deposição do abrasivo ao redor da placa de metal. Uma espátula apropriada pode ser utilizada para conduzir este pó que se deposita até o ralo da mangueira de retorno do reservatório;
21. A usinagem finaliza-se quando o micrômetro encosta o parafuso de fim de curso. Então, o led indicativo de fim de usinagem muda de verde para vermelho.

- (a) Quando isso ocorre, automaticamente, a bomba de circulação da mistura e o ultrassom são desligados e a ferramenta sobe para a posição inicial. O led "OUTO ON" apaga-se e o cronômetro é interrompido. Registrar o tempo de usinagem;
- 22. Voltar as chaves "SLURRY", "SONIC" e "TOOL DOWN" para a posição "OFF";
- 23. Desligar o eletroímã (pressionar o botão "MAGNETIC TABLE", o led "MAGNETIC ON" apaga-se);
- 24. Caso deseje-se fazer outra usinagem na mesma peça deve-se reposicioná-la e voltar para o estágio de número 8, caso contrário continuar com o passo-a-passo;
- 25. Retirar a placa de metal;
  - (a) Colocar a placa de metal novamente na chapa quente até que a cera derreta e seja possível desgrudar a peça;
- 26. Desligar a unidade AUTOPAC IIb (colocar o botão "POWER" na posição "OFF");
- 27. Limpar a máquina:
  - (a) Remover todo o pó abrasivo que se depositou ao redor da placa de metal;
  - (b) Retirar o líquido abrasivo do reservatório e guardá-lo para uma próxima usinagem;
  - (c) Pode-se colocar cerca de 3 litros de água no reservatório e ligar a bomba (chave "SLURRY" na posição "TEST") de modo que a água circulando pelas mangueiras e pelo compartimento da placa de metal colabore na remoção do abrasivo;
- 28. Desconectar a mangueira de ar e desligar o compressor de ar.

# Bibliografia

- [1] Günter Sauerbrey. Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung. *Zeitschrift für Physik*, 155(2):206–222, 1959.
- [2] W. H. King Jr. Piezoelectric sorption detector. *Analytical Chemistry*, 36(9):1735–1739, 1964.
- [3] E. Benes, M. Gröschl, W. Burger, and M. Schmid. Sensors based on piezoelectric resonators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 48(1):1–21, 1995.
- [4] Pressure sensor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_sensor), verificado em 01/11/2012.
- [5] General Purpose Sensors. [http://www.expo21xx.com/sensor/14716\\_st2\\_sensor\\_pressure/default.htm](http://www.expo21xx.com/sensor/14716_st2_sensor_pressure/default.htm), verificado em 01/11/2012.
- [6] Transdutor de pressão. <http://www.metrolog.net/transdutores/pressure/msp300.php?lang=ptbr>, verificado em 01/11/2012.
- [7] M. F. Silva Jr., K. M. Muradov, and D. R. Davies. Review, Analysis and Comparison of Intelligent Well Monitoring Systems. *SPE International*, 2012.
- [8] Antonio de Pádua Martins da Silva. Uso do DSP na Instrumentação Associada à Medição Distribuída de Temperatura. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, Dezembro 2008.
- [9] João Paulo Quinteiro Gonçalves da Silva. Uso de Poços Inteligentes em Desenvolvimento de Campos de Petróleo sob Incertezas. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Dezembro 2008.

- [10] Raquel G. Bolea, Antonio Luque, and Jose Manuel Quero. Capacitive pressure sensor and characterization as RF MEMS device. In *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, pages 3267–3272. IEEE, 2007.
- [11] Bishnu P. Gogoi and Dragan Mladenovic. Integration technology for mems automotive sensors. In *IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]*, volume 4, pages 2712–2717. IEEE, 2002.
- [12] Micro Electronic and Mechanical Systems. Editado por Kenichi Takahata <http://www.intechopen.com/books/micro-electronic-and-mechanical-systems>, verificado em 20/01/2014.
- [13] Tetsuhiro Zushi, Yoshinori Inaba, Ai Sato, and Makoto Asai. High reliable characteristics in manufacturing of mems pressure sensor. In *Semiconductor Manufacturing (ISSM), 2008 International Symposium on*, pages 327–330. IEEE, 2008.
- [14] Y. Zhang, R. Howver, B. Gogoi, and N. Yazdi. A high-sensitive ultra-thin mems capacitive pressure sensor. In *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011 16th International*, pages 112–115. IEEE, 2011.
- [15] Q. Li, J. F. L. Goosen, F. van Keulen, and J. T. M. van Beek. Gas Ambient Dependence of Quality factor in MEMS resonators. In *Sensors, 2009 IEEE*, pages 1040–1043. IEEE, 2009.
- [16] K. Bruckner, V. Cimalla, F. Niebelschutz, R. Stephan, K. Tonisch, O. Ambacher, and M. A. Hein. Gas pressure sensing based on MEMS resonators. In *Sensors, 2007 IEEE*, pages 1251–1254. IEEE, 2007.
- [17] Bongsang Kim, Matthew A. Hopcroft, Rob N. Candler, Chandra Mohan Jha, Manu Agarwal, Renata Melamud, Saurabh A. Chandorkar, Gary Yama, and Thomas W. Kenny. Temperature dependence of quality factor in mems resonators. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 17(3):755–766, 2008.

- [18] J. E.-Y Lee, Behraad Bahreyni, Yong Zhu, and Ashwin A. Seshia. A single-crystal-silicon bulk-acoustic-mode microresonator oscillator. *Electron Device Letters, IEEE*, 29(7):701–703, 2008.
- [19] Steven Mahon and Robert Aigner. Bulk acoustic wave devices—why, how, and where they are going. In *CS MANTECH Conference*, pages 15–18, 2007.
- [20] K.M. Lakin. A review of thin-film resonator technology. *Microwave Magazine, IEEE*, 4(4):61–67, 2003.
- [21] F. Gerfers, P. M. Kohlstadt, E. Ginsburg, M. Y. He, D. Samara-Rubio, Y. Manoli, and Li-PengWang. Sputtered AlN Thin Films for Piezoelectric MEMS Devices - FBAR Resonators and Accelerometers, Solid State Circuits Technologies. <http://www.intechopen.com/download/get/type/pdfs/id/6503>.
- [22] L. Mai, J. Lee, V. Pham, and G. Yoon. A new fabrication technique for 2.75 GHz ZnO-based FBAR devices. In *Applications of Ferroelectrics, 2008. ISAF 2008. 17th IEEE International Symposium on the*, volume 3, pages 1–2. IEEE, 2008.
- [23] R. Aigner. MEMS in RF Filter Applications: Thin-film Bulk Acoustic Wave Technology. *Sensors Update*, 12(1):175–210, 2003.
- [24] GaPO4 Factsheet. [http://www.vibro-meter.com/pdf/DS\\_GAP04-e-sep07b.pdf](http://www.vibro-meter.com/pdf/DS_GAP04-e-sep07b.pdf)?, verificado em 24/02/2013.
- [25] F. Krispel, C. Reiter, J. Neubig, F. Lenzenhuber, P. W. Krempl, W. Wallnofer, and P. M. Worsch. Properties and applications of singly rotated GaPO4 resonators. In *Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003 IEEE International*, pages 668–673. IEEE, 2003.
- [26] J. M. Ratajski. Force-frequency coefficient of singly rotated vibrating quartz crystals. *IBM Journal of Research and Development*, 12(1):92–99, 1968.

- [27] E. P. Eernisse, R. W. Ward, and R. B. Wiggins. Survey of quartz bulk resonator sensor technologies. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 35(3):323–330, 1988.
- [28] E. J. P. Santos, P. L. Guzzo, A. H. Shinohara, M. V. Gelfuso, J. A. Aguiar, E. Montarroyos, J. M. C. Ferreira, Y. P. Yadava, and A. S. B. Sombra. Sensores inteligentes de vazão, pressão e temperatura para monitoramento de fluxos multifásicos (petróleo, água e gás). Relatório de projeto disponível em <http://www2.ee.ufpe.br/LDN/CTPETRO/multifasico.pdf>.
- [29] E. P. EerNisse. Theoretical modeling of quartz resonator pressure transducers. In *41st Annual Symposium on Frequency Control*, pages 339–343. IEEE, 1987.
- [30] R. W. Ward and R. B. Wiggins. Quartz Pressure Transducer Technologies. Quartzdyne technical paper. <http://www.quartzdyne.com/pdfs/techppt.pdf>, verificado em 05/09/2011.
- [31] N. Matsumoto, Y. Sudo, B. K. Sinha, and M. Niwa. Long-term stability and performance characteristics of crystal quartz gauge at high pressures and temperatures. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 47(2):346–354, 2000.
- [32] Tallita Campêlo Sobral. Transdutor Piezoelétrico para Medição de Pressão em Poços de Petróleo e Gás. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, Março 2012.
- [33] R. W. Ward and E. P. EerNisse. A reduced hysteresis, extended range quartz pressure transducer. In *41st Annual Symposium on Frequency Control. 1987*, pages 344–349. IEEE, 1987.
- [34] E. P. EerNisse and R. B. Wiggins. Review of thickness-shear mode quartz resonator sensors for temperature and pressure. *Sensors Journal, IEEE*, 1(1):79–87, 2001.
- [35] Yook-Kong Yong, Mihir S. Patel, and Masako Tanaka. Theory and experimental verifications of the resonator Q and equivalent electrical parameters due

- to viscoelastic and mounting supports losses. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 57(8):1831–1839, 2010.
- [36] A. Rampal. Experimental and theoretical study of quartz and InP piezoelectric MEMS resonators. Master’s thesis, McMaster University, 2010.
- [37] A. Arnau. *Piezoelectric Transducers and Applications*. Springer Verlag, 2008.
- [38] P. L. Guzzo. Quartzo. Rochas & Minerais Industriais. 2a ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008, v. 1, p. 681-721.
- [39] J. Yang. *Analysis of piezoelectric devices*. World Scientific Pub Co Inc, 2006.
- [40] J. G. Brainerd, A. G. Jensen, L. G. Cumming, R. R. Batchler, S. G. Begun, H. S. Black, G. M. Grown, C. R. Burrows, H. Busignies, W. G. Cady, et al. Standards on piezoelectric crystals. *Proc. IRE*, 37:1378–1395, 1949.
- [41] IEEE Standards on Piezoelectricity ANSI/IEEE Standard No. 176-1987. 1987.
- [42] W. P. Mason. Zero Temperature Coefficient Quartz Crystals for Very High Temperatures. *Bell System Tech. J*, 30:366–380, 1951.
- [43] Cristobalita. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cristobalita>, verificado em 24/02/2013.
- [44] F. Krispel, H. Thanner, P. W. Krempel, C. Reiter, P. M. Worsch, and W. Wallnofer. GaPO<sub>4</sub> resonators with Q factors of some millions in the fundamental mode. In *Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002. IEEE International*, pages 342–346. IEEE, 2002.
- [45] P. Davulis, J. A. Kosinski, and M. Pereira da Cunha. GaPO<sub>4</sub> stiffness and piezoelectric constants measurements using the combined thickness excitation and lateral field technique. In *International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006 IEEE*, pages 664–669. IEEE, 2006.
- [46] Paul Schiopu, Ionica Cristea, Neculai Grosu, and Alexandru Craciun. Comparative study of GaPO<sub>4</sub>, langasite, and LiNbO<sub>3</sub> properties with application in Surface Acoustic Waves microdevices. In *Electronics Technology, 2009. ISSE 2009. 32nd International Spring Seminar on*, pages 1–7. IEEE, 2009.

- [47] Jay Goetz. High temperature electronics for sensor interface and data acquisition. In *Sensors Expo*, pages 1–23, 1998.
- [48] P. C. de Jong and G. C. M. Meijer. A smart accurate pressure-transducer for high-temperature applications [in oil wells]. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference. Proceedings of the 16th IEEE*, volume 1, pages 309–314. IEEE, 1999.
- [49] L. Spicci and M. Cati. Ultrasound Piezo-Disk Transducer Model for Material Parameter Optimization. In *Proceedings COMSOL Conference Paris*, 2010.
- [50] G. Couturier, R. Boisgard, C. Jai, and J. P. Aimé. Compressional wave generation in droplets of water deposited on a quartz crystal: Experimental results and numerical calculations. *Journal of Applied Physics*, 101(9):093510–093510, 2007.
- [51] Y. K. Yong and M. Patel. Piezoelectric resonators with mechanical damping and resistance in current conduction. *Sci China-Phys Mech Astron*, 50(005):650–672, 2007.
- [52] B. N. Johnson and R. Mutharasan. The Origin of Mass-change Sensitivity within Piezoelectrically-actuated Millimeter-sized Cantilever (PEMC) sensors: Vibrational Analysis through Experiment and Finite Element Modeling. In *Proceedings COMSOL Conference Boston*, 2009.
- [53] O. Legrani, O. Elmazria, S. Zhgoon, L. Le Brizoual, and A. Bartasyte. AlN/ZnO/Silicon Structure Combining Surface Acoustic Waves and Waveguiding Layer Acoustic Wave. In *Proceedings COMSOL Conference Paris*, 2010.
- [54] Y. L. Rao and G. Zhang. 3-D Finite Element Modeling of Nanostructure Enhanced SAW Sensor. In *Proceedings COMSOL Conference Users Boston*, 2006.
- [55] M. W. Nygren. Finite Element Modeling of Piezoelectric Ultrasonic Transducers. Master’s thesis, Norwegian University of Science and Technology, January 2011.

- [56] Austin D. Beerwinkle, Raman P. Singh, and Goutham R. Kirikera. Simulating Frequency Nonlinearities in Quartz Resonators at High Temperature and Pressure. In *Proceedings of the COMSOL Conference Boston*, 2011.
- [57] Goutham R. Kirikera, William Patton, and S. Behr. Modeling thickness shear mode quartz sensors for increased downhole pressure & temperature applications. In *Proceedings of the COMSOL Conference Boston*, 2010.
- [58] Leonardo B. M. Silva and Edval J. P. Santos. Quartz transducer modeling for development of baw resonators. *Proceedings of the Comsol Conference 2012 Milan*, 2012.
- [59] Leonardo B. M. Silva and Edval J. P. Santos. Modeling quality factor in AT-cut quartz-crystal resonators. In *Proceedings of the SBMICRO 2013 Curitiba-BR*, 2013.
- [60] Yook-Kong Yong, Mihir S. Patel, and Masako Tanaka. Estimation of quartz resonator Q and other figures of merit by an energy sink method. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 54(7):1386–1398, 2007.
- [61] P. G. Steeneken, J. J. M. Ruigrok, S. Kang, J. T. M. Van Beek, J. Bontemps, and J. J. Koning. Parameter extraction and support-loss in MEMS Resonators. In *COMSOL Users Conference 2007*, 2007.
- [62] J. Lamb and J. Richter. Anisotropic acoustic attenuation with new measurements for quartz at room temperatures. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 293(1435):479–492, 1966.
- [63] A. W. Warner. Design and performance of ultraprecise 2.5-mc quartz crystal units. *Bell Syst. Tech. J*, 39(9):1193–1217, 1960.
- [64] Robert C. Smythe. Material and resonator properties of langasite and langatate: a progress report. In *Frequency Control Symposium, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International*, pages 761–765. IEEE, 1998.

- [65] Fusako Watanabe and Takaya Watanabe. Convex quartz crystal resonator of extremely high Q in 10 MHz-50 MHz. In *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*, volume 1, pages 1007–1010. IEEE, 2002.
- [66] John R. Vig and Fred L. Walls. A review of sensor sensitivity and stability. In *Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International*, pages 30–33. IEEE, 2000.
- [67] Yook-kong Yong, Mihir Patel, John Vig, and Arthur Ballato. Effects of electromagnetic radiation on the Q of quartz resonators. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 56(2):353–360, 2009.
- [68] Bikash K. Sinha. Doubly rotated contoured quartz resonators. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 48(5):1162–1180, 2001.
- [69] Noriyuki Matsumoto, Tsutomu Yamate, Bikash Sinha, Shigeru Sato, Anthony Frank Veneruso, Jimmy Lawrence, Yves Barriol, and Shigeo Daito. Pressure transducer, July 2 2007. US Patent App. 11/772,244.
- [70] Bernd Neubig and Wolfgang Briese. *Das große Quarzkochbuch*. Franzis, 1997.
- [71] Crystal cut and frequency vs. temperature characteristics. <http://cfm.citizen.co.jp/english/crystal/aspect/index.html>, verificado em 09/05/2013.
- [72] J. C. Brice. Crystals for quartz resonators. *Reviews of Modern Physics*, 57(1):105, 1985.
- [73] Pulverização catódica. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Pulveriza%C3%A7%C3%A3o\\_cat%C3%B3dica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Pulveriza%C3%A7%C3%A3o_cat%C3%B3dica), verificado em 01/12/2013.
- [74] Pulverização Catódica em Magnetrão por Radiofrequência. [http://www2.fisica.uminho.pt/Pg\\_pessoais/Mjesus/MNA/Sputtering.PDF](http://www2.fisica.uminho.pt/Pg_pessoais/Mjesus/MNA/Sputtering.PDF), verificado em 01/12/2013.

- [75] José Américo de Sousa Moura. *Filmes nanométricos de FeN e AlN crescidos por sputtering e aplicações do efeito Peltier*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dezembro 2010.
- [76] Beijamin Rodrigues de Souza. *Etapas dos Processo Fotolitográfico*. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [77] Klayout. Programa de edição e visualização de layout. <http://www.klayout.de/>.
- [78] P. L. Guzzo, A. H. Shinohara, and A. A. Raslan. A comparative study on ultrasonic machining of hard and brittle materials. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(1):56–61, 2004.
- [79] P. L. Guzzo, A. A. Raslan, and J. D. B. De Mello. Ultrasonic abrasion of quartz crystals. *Wear*, 255(1):67–77, 2003.
- [80] Y. Nagaura, K. Kinoshita, and S. Yokomizo. High-frequency, plano-convex quartz oscillators made by a dual-face lapping machine. In *Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International*, pages 255–259. IEEE, 2000.
- [81] Máquina de polimento e lapidação dupla-face. <http://www.lapmaster.com/machinery/lapping-polishing-machinery/dual-face/default.html>, verificado em 05/02/2013.
- [82] IntelliSense. <http://www.intellisense.com/>, verificado em 05/02/2013.
- [83] Silvaco. [http://www.silvaco.com/products/tcad/process\\_simulation/athena/athena.html](http://www.silvaco.com/products/tcad/process_simulation/athena/athena.html), verificado em 05/02/2013.
- [84] Daijo Ikuta, Naoyuki Kawame, Shohei Banno, Takao Hirajima, Kazuhiko Ito, John F. Rakovan, Robert T. Downs, and Osamu Tamada. First in situ x-ray identification of coesite and retrograde quartz on a glass thin section of an ultrahigh-pressure metamorphic rock and their crystal structure details. *American Mineralogist*, 92(1):57–63, 2007.

- [85] R. F. Wolffenbuttel. *Silicon sensors and circuits: on-chip compatibility*, volume 3. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [86] D. Dubey. Smart sensors. In *M. Tech. Credit seminar report, Electronic Systems Group, EE Dept, IIT Bombay, submitted November*, 2002.
- [87] Smart transducer. [http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_transducer](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_transducer), verificado em 24/04/2012.
- [88] Smart Sensor. <http://www.triadsemi.com/2008/04/28/smart-sensor/>, verificado em 24/04/2012.
- [89] IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standard. <http://ieee1451.nist.gov>, verificado em 24/04/2012.
- [90] Cableless Telemetry System achieves world first in reservoir monitoring. [http://en.cippe.net/en\\_news\\_sec/310.htm](http://en.cippe.net/en_news_sec/310.htm), verificado em 27/05/2012.
- [91] E.J.P. Santos and L.B.M. Silva. FPGA-based smart sensor implementation with precise frequency to digital converter for flow measurement. In *Programmable Logic Conference (SPL)*, pages 21–26. IEEE, 2010.
- [92] Rana N. Badran and Hani A. Ghali. Geometric Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting System . In *Proceedings COMSOL Conference Users Milan*, 2012.
- [93] R. Cesar. Modelo em Elementos Finitos para Simulação de Geradores Piezelétricos de Energia. Master’s thesis, Universidade de São Paulo, 2010.
- [94] A. Aini Md Ralib, A. Nurashikin Nordin, R. Othman, and H. Salleh. Performance evaluation of mems piezoelectric inertial energy generator. In *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2011 Symposium on*, pages 85–89. IEEE, 2011.
- [95] A. F. M. Raposo. Wireless Communication over NFC with a Constrained Resource Device. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 2010.

- [96] LTC3588-1 - Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply. <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/35881fa.pdf>, verificado em 17/10/2012.
- [97] Operating manual for Quartzdyne - Frequency Output Pressure Transducers. Manual técnico, 2012.
- [98] EV Group (EVG). <http://www.evgroup.com>, verificado em 18/07/2012.
- [99] Piroeletricidade. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Piroeletricidade>, verificado em 02/08/2013.
- [100] C. D. Corso. *Theoretical and experimental development of a ZnO-based laterally excited thickness shear mode acoustic wave immunosensor for cancer biomarker detection*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, May 2008.
- [101] Jeong-Ho Cho, Yong-Hyun Lee, Myung-Pyo Chun, and Byung-Ik Kim. Practical Application of Simulation Technique for the Resonators Using Piezoelectric Ceramics. [http://cdn.intechopen.com/pdfs/5384/InTech-Practical\\_application\\_of\\_simulation\\_technique\\_for\\_the\\_resonators\\_using\\_piezoelectric\\_ceramics.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/5384/InTech-Practical_application_of_simulation_technique_for_the_resonators_using_piezoelectric_ceramics.pdf).
- [102] J. F. Rosenbaum. *Bulk acoustic wave theory and devices*. Artech House Inc., Boston, 1988.
- [103] Austin Dale Beerwinkle. Nonlinear finite element modeling of quartz crystal resonators. Master's thesis, Oklahoma State University, Julho 2011.
- [104] COMSOL Model documentation. Thickness Shear Mode Quartz Oscillator. <http://www.comsol.com>.
- [105] A. H. Meitzler, H. F. Tiersten, A. W. Warner, D. Berlincourt, G. A. Couquin, and F. S. Welsh. Ieee standard on piezoelectricity. *IEEE, New York*, 1988.
- [106] F. J. Ramirez-Fernandez and H. E. M. Peres. Sensores de Gás. Capítulo 6 - Escola Politécnica da USP.
- [107] Raios X. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Raios\\_X](http://pt.wikipedia.org/wiki/Raios_X), verificado em 01/12/2013.

- [108] J. Wang and W. Zhao. The determination of the optimal length of crystal blanks in quartz crystal resonators. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 52(11):2023–2030, 2005.
- [109] Plataformas petrolíferas - Exploração offshore. <http://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>, verificado em 05/09/2011.