

Osciladores Senoidais com Sensores Piezoelétricos na Malha de Realimentação

Sinusoidal Oscillators with Piezoelectric Sensors in the Feedback Loop

Osciladores Senoidales con Sensores Piezoeléctricos en el Bucle de Realimentación

Ícaro Modesto Granja Aguiar¹
Henrique Dantas Silva²
Raimundo Carlos Silvério Freire³

Resumo: Neste artigo são abordados os princípios do efeito piezoelétrico e sua utilização em dispositivos como sensores e osciladores. Os sensores a ondas acústicas de superfície utilizam como substrato materiais piezoelétricos, cujas estrutura e funcionamento são examinadas e discutidas neste artigo, bem como modelos que auxiliam o estudo de suas características. Esses sensores podem ser utilizados em arquiteturas de osciladores senoidais, das quais são abordadas as topologias Colpitts, Pierce e Clapp. No estudo dos osciladores foram evidenciadas suas características, aplicações e a importância da escolha da topologia conforme o contexto.

Palavras-chave: Sensores a ondas acústicas de superfície. Osciladores. Efeito piezoelétrico.

Abstract: This article discusses the principles of the piezoelectric effect and its application in devices such as sensors and oscillators. Surface acoustic wave sensors use piezoelectric materials as a substrate, whose structure and operation are examined and discussed in this article, as well as models that assist in the study of their characteristics. These sensors can be used in sinusoidal oscillator architectures, among which the Colpitts, Pierce, and Clapp topologies are discussed. The study of oscillators highlighted their characteristics, applications, and the importance of choosing the topology according to the context.

Keywords: Surface acoustic wave sensors. Oscillators. Piezoelectric effect.

Resumen: En este artículo se abordan los principios del efecto piezoeléctrico y su utilización en dispositivos como sensores y osciladores. Los sensores de ondas acústicas superficiales utilizan como sustrato materiales piezoeléctricos, cuya estructura y funcionamiento se examinan y discuten en este artículo, así como los modelos que ayudan en el estudio de sus características. Estos sensores pueden utilizarse en arquitecturas de osciladores sinusoidales, de las cuales se abordan las topologías Colpitts, Pierce y Clapp. En el estudio de los osciladores se evidencian sus características, aplicaciones y la importancia de elegir la topología según el contexto.

Palabras-clave: Sensores de ondas acústicas superficiales. Osciladores. Efecto piezoeléctrico.

Submetido 06/03/2024

Aceito 18/08/2024

Publicado 05/09/2024

¹Graduando. Universidade Federal de Campina Grande. <https://orcid.org/0009-0009-1955-0292>. E-mail: icaro.aguiar@ee.ufcg.edu.br

²Doutorando em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. <https://orcid.org/0000-0002-6791-1330>. E-mail: henriquedsilve@ee.ufcg.edu.br.

³Doutor. Universidade Federal de Campina Grande. <https://orcid.org/0000-0002-5395-7143>. E-mail: freire@dee.ufcg.edu.br.

Considerações Iniciais

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos têm impulsionado o desenvolvimento de sensores cada vez mais sofisticados, desempenhando papéis cruciais em diversas aplicações, desde a medicina até a indústria. Entre as inovações notáveis, destacam-se os sensores a ondas acústicas de superfície (Surface Acoustic Wave - SAW), baseados no fenômeno do efeito piezoelétrico.

Neste artigo, é abordada a forma como materiais piezoelétricos podem transformar sinais elétricos em ondas acústicas de superfície e vice-versa, revelando uma gama de aplicações potenciais. Além disso, é destacada a importância da sensibilidade do sensor a ondas acústicas de superfície, discutindo como ela influencia diretamente na exatidão e na confiabilidade das medições.

Também são abordados os osciladores senoidais contendo sensores SAW (Surface Acoustic Wave) na sua malha de realimentação e, conseqüentemente, técnicas de medição baseadas nesses sensores. Nesse sentido, os osciladores desempenham um papel crucial na geração de sinais elétricos periódicos que podem ser usados em arquiteturas sensíveis a parâmetros sob medição com os materiais piezoelétricos (Ceccato e outros, 2023), podendo variar frequência, fase e amplitude. Dentre as topologias de osciladores, neste artigo são analisados os osciladores Colpitts (com TBJ e com par diferencial), Pierce e Clapp, suas características e aplicações específicas.

Efeito piezoelétrico

Em 1880, os irmãos Pierre e Jacques Curie realizaram uma descoberta que lançou as bases para avanços significativos na ciência dos materiais e na tecnologia. Durante suas pesquisas, eles observaram que certos cristais, quando submetidos a compressão ou deformação mecânica, exibiam uma capacidade única de gerar uma carga elétrica em suas superfícies (Ceccato e outros, 2023). Esse fenômeno foi nomeado como "efeito piezoelétrico", caracterizado pela capacidade de um material modificar sua polarização elétrica em resposta a estímulos mecânicos. Além disso, os irmãos Curie também identificaram a manifestação inversa desse fenômeno: ao aplicar um campo elétrico a esses cristais, eles observaram deformações mecânicas correspondentes (Mendonça, 2019). Essa resposta bidirecional entre estímulos elétricos e mecânicos abriu portas para uma série de aplicações práticas.

Os cristais nos quais os irmãos Curie inicialmente observaram esse fenômeno incluíam o quartzo, a turmalina e diversas rochas cristalinas (Ceccato e outros, 2023). Esses materiais cristalinos revelaram-se particularmente propensos à piezoelectricidade, tornando-os pontos focais para estudos posteriores e aplicações práticas em diversas áreas científicas e industriais.

Como propriedade fundamental de alguns materiais cristalinos, a piezoelectricidade é caracterizada pela capacidade de apresentar uma carga elétrica proporcional à aplicação de uma tensão mecânica específica (Suchicital, 1978). A relação intrínseca entre tensão mecânica e carga elétrica descoberta pelos irmãos Curie significa literalmente "eletricidade por pressão", e é derivada do prefixo grego *piezein*, que significa pressionar.

Nos materiais piezoelétricos, a polarização como resposta à aplicação de forças externas decorre da natureza dielétrica dos materiais. Assim, quando a cadeia cristalina do material é comprimida ou expandida por estresse mecânico, a redistribuição espacial dos elétrons faz com que as extremidades do material fiquem com excesso ou com falta de carga elétrica. Dessa forma, da aplicação de uma força externa, decorre uma tensão nas extremidades do material (Padilha, 2007; Ceccato e outros, 2023).

A definição proposta por Padilha (2007) conduz a uma compreensão mais ampla da piezoelectricidade direta e inversa, enquadrando-as como formas de conversão entre energia elétrica e energia mecânica, e vice-versa (Tichy e outros, 2010). No efeito piezoelétrico direto, uma polarização elétrica é induzida em resposta a uma deformação mecânica, enquanto no efeito piezoelétrico inverso, um campo elétrico externo é aplicado ao material, resultando em uma deformação mecânica. A expressão matemática para o efeito piezoelétrico direto pode ser formalmente caracterizada pela Equação 1.

$$P = dT \quad (1)$$

Em que T representa a tensão mecânica aplicada a um dado cristal, P simboliza a polarização e d é designado como o coeficiente de piezoelectricidade de tensão, com unidade em Coulombs por Newton (C/N) ou metros por volt (m/V) (Suchicital, 1978).

A relação entre as propriedades piezoelétricas e os cristais abre inúmeras possibilidades para a utilização prática desses materiais em diversas áreas da tecnologia, desde sensores de

pressão até dispositivos piezoelétricos (Ceccato e outros, 2023), destacando o impacto duradouro da descoberta dos irmãos Curie no mundo científico e tecnológico.

Para uma melhor descrição do efeito piezoelétrico direto, os irmãos Curie incorporaram as propriedades elásticas dos materiais em seus cálculos. Dessa análise resultou a Equação 2, que representa a relação intrínseca entre a tensão mecânica aplicada e a polarização gerada (Ceccato e outros, 2023).

$$P_p = dT = dcS = eS \quad (2)$$

Em que a constante elástica c relaciona a tensão gerada pela aplicação de uma tensão mecânica, vide Equação 3; S é o coeficiente de conformidade e s é a constante de tensão piezoelétrica, que caracteriza a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante em um material piezoelétrico, vide Equação 4.

$$T = cS \quad (3)$$

$$S = sT \quad (4)$$

De maneira similar ao efeito piezoelétrico, tem-se o efeito piezoelétrico reverso, e é simples a compreensão de um a partir do outro. Nesse contexto, pode-se aplicar um campo elétrico (E) a esses cristais, resultando em deformações (T_p) devido às forças elétricas que atuam sobre os dipolos presentes (Suchicital, 1978). Essas deformações geram uma tensão mecânica representada por S_p , e esse comportamento pode ser expresso conforme a Equação 5. É essencial destacar que o efeito piezoelétrico reverso, fundamental na compreensão do funcionamento de dispositivos piezoelétricos, permite que o material responda a campos elétricos externos com deformações mecânicas correspondentes.

$$T_p = cS_p = cdE = eE \quad (5)$$

O fenômeno piezoelétrico, descoberto pelos irmãos Curie, ultrapassou os limites de sua descoberta inicial no final do século XIX e floresceu em uma variedade de aplicações vitais nos dias de hoje, permeando diversos setores industriais e científicos. Os materiais piezoelétricos desempenham papéis cruciais em fontes de alta tensão e energia, sistemas de ignição, sensores e dispositivos atuadores (Mendonça, 2019).

Um marco significativo na aplicação prática desses materiais remonta à Primeira Guerra Mundial, quando o cientista francês Langevin desenvolveu um transdutor baseado em cristais piezoelétricos. Esse dispositivo, capaz de detectar sinais mecânicos no cristal e gerar respostas elétricas correspondentes, desempenhou um papel crucial na detecção subaquática, contribuindo significativamente para a localização de submarinos na época (Leo, 2007).

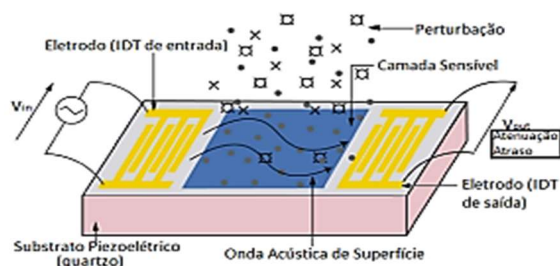
O impacto e a relevância do efeito piezoelétrico não ficaram estagnados no passado, mas continuam a inspirar pesquisas inovadoras e aplicações surpreendentes atualmente (Ceccato e outros, 2023; Perlingeiro, Pimenta, Silva, 2016). Estudos experimentais estão em andamento para explorar novas formas de geração de energia elétrica a partir do fenômeno piezoelétrico, refletindo a busca incessante por soluções sustentáveis e eficientes. Um exemplo dessa pesquisa é a criação de protótipos de escadas que empregam tecnologia piezoelétrica para capturar a energia gerada pelos passos das pessoas, convertendo-a em eletricidade utilizável (Ceccato e outros, 2023). Essas iniciativas não apenas destacam a versatilidade dos materiais piezoelétricos, mas também evidenciam seu enorme potencial para impulsionar a inovação em campos tão diversos quanto tecnologia de construção, transporte e geração de energia.

A compreensão dos princípios do efeito piezoelétrico e piezoelétrico reverso nos leva a explorar aplicações desses fenômenos, como por exemplo, os sensores SAW.

Metodologia

O Sensor a Onda Acústica de Superfície (SAW) é um dispositivo cujo princípio de funcionamento está fundamentado na propagação de ondas mecânicas ao longo da superfície de um substrato piezoelétrico que contém transdutores interdigitados (*IDTs – Interdigitated Transducers*). Na Figura 1 está apresentado um esquemático do funcionamento do sensor SAW.

Figura 01: Princípio de funcionamento do sensor SAW.

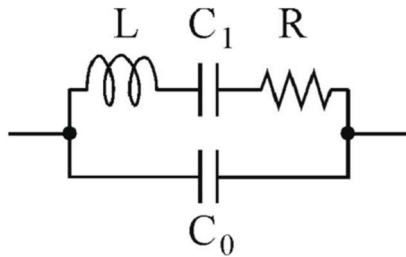


Fonte: Adaptado de (Tamarin, 2020).

O sensor SAW é composto por dois IDTs distintos. O primeiro é o IDT de entrada, no qual é aplicada uma tensão alternada (V_{in}) com frequência próxima à frequência de ressonância do sensor. Essa aplicação desencadeia o efeito piezoelétrico na superfície do substrato. O segundo é o IDT de saída, atuando como receptor para coletar o sinal convertido em formato elétrico (V_{out}). Quando a tensão V_{in} é aplicada, ocorre uma deformação mecânica, e a onda elétrica resultante é convertida em uma onda acústica de superfície.

Um modelo amplamente utilizado para descrever o comportamento do sensor SAW é o cristal piezoelétrico, especificamente o modelo de Butterworth Van-Dyke. Esse modelo opera como um filtro passa-faixa, destacando a capacidade do sensor de sintonizar e processar frequências específicas. A representação esquemática desse modelo é apresentada na Figura 2.

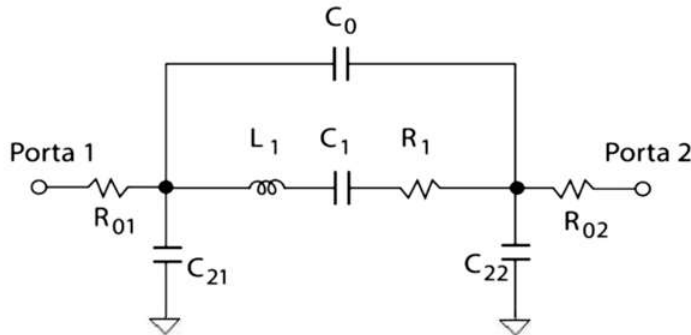
Figura 02: Modelo de Butterworth-VanDyke.



Fonte: (Butterworth, 1914; Vandyke, 1925; Vandyke, 1928).

O modelo de cristal piezoelétrico, como apresentado na Figura 2, foi adaptado por Bernardes (2020) para melhor refletir as perdas resistivas e as características capacitivas do sensor SAW. Essa modificação é evidenciada no modelo de circuito elétrico apresentado na Figura 3.

Figura 03: Modelo de circuito elétrico do sensor SAW baseado no cristal piezoelétrico.



Fonte: Adaptado de (Bernardes, 2020).

Na Figura 3, os componentes L_1 , C_1 , C_0 e R_1 representam o cristal piezoelétrico e determinam a frequência de ressonância do modelo do sensor SAW proposto por Bernardes (2020), denotada como f_s na Equação 6. Por outro lado, os componentes C_{21} e C_{22} são responsáveis por representar a característica capacitiva do sensor, cuja análise é conduzida por meio da Carta de Smith (Bernardes, 2020). As perdas resultantes de perturbações adicionadas ao sensor são quantificadas pelos componentes R_{01} e R_{02} .

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (6)$$

A elaboração desse modelo permite uma compreensão mais refinada das complexas interações elétricas e mecânicas do sensor SAW em comparação com o modelo do cristal piezoelétrico. O detalhamento das características resistivas e capacitivas destaca a capacidade do modelo de simular com melhor exatidão o comportamento do sensor em diversas condições.

Ao explorar esses aspectos elétricos é possível aprimorar a compreensão do sensor SAW não apenas como um dispositivo físico, mas como um sistema dinâmico sujeito a influências externas. Essas influências são representadas pelas resistências R_{01} e R_{02} , que capturam as perdas associadas a perturbações externas ao ambiente.

No entanto, a compreensão integral do sensor SAW vai além da modelagem elétrica detalhada. A sensibilidade desses sensores torna-se um ponto crucial a ser abordado, pois é essencial para avaliar seu desempenho e sua eficácia na detecção. O estudo aprofundado da

sensibilidade em sensores SAW destaca-se como uma ferramenta para contextualizar e otimizar a aplicação desses dispositivos em uma variedade de cenários práticos.

Sensibilidade do Sensor a Ondas Acústicas de Superfície

A sensibilidade do sensor SAW está inerentemente ligada à sua habilidade de converter variações sutis em grandezas físicas, como pressão, temperatura, umidade, entre outras, em alterações mensuráveis em sua saída elétrica. Esse aspecto fundamental da operação dos sensores SAW é crucial para a compreensão de sua eficácia em diversas aplicações.

O estudo minucioso da sensibilidade dos sensores oferece uma visão de como eles respondem a estímulos externos, sendo um indicador de seu desempenho. Portanto, é pertinente analisar os valores dos componentes presentes no modelo elétrico do sensor, conforme apresentado na Figura 3, considerando uma frequência de ressonância de 117,6 MHz, conforme destacado na Tabela 1.

Tabela 01: Valores dos componentes para o modelo de SAW baseado no Cristal Piezoelétrico.

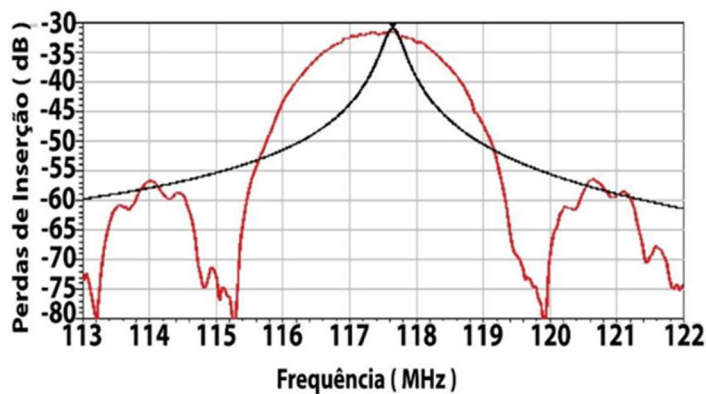
Componentes	Valor
R_{01}	500 Ω
R_{02}	500 Ω
R_1	250 Ω
L_1	192,5 μ H
C_0	9,53 fF
C_1	9,53 fF
C_{21}	7,3 pF
C_{22}	7,3 pF

Fonte: Bernardes, 2020.

Além disso, é apresentada na Figura 4 uma perspectiva gráfica comparativa das perdas de transmissão entre o modelo de circuito elétrico do sensor SAW baseado no cristal piezoelétrico, representado em preto, e o sensor real, destacado em vermelho. O modelo exibe

uma frequência de ressonância de 117,6 MHz, perdas de inserção de 33 dB na frequência de ressonância e uma banda de passagem de 4 MHz. É importante observar que a banda de passagem do modelo é aproximadamente 75% menor em relação ao sensor real, o que ressalva limitações do modelo em relação à realidade.

Figura 04: Perdas de inserção do modelo de circuito elétrico do sensor SAW baseado no cristal piezoelétrico (preto) e do sensor real (vermelho).

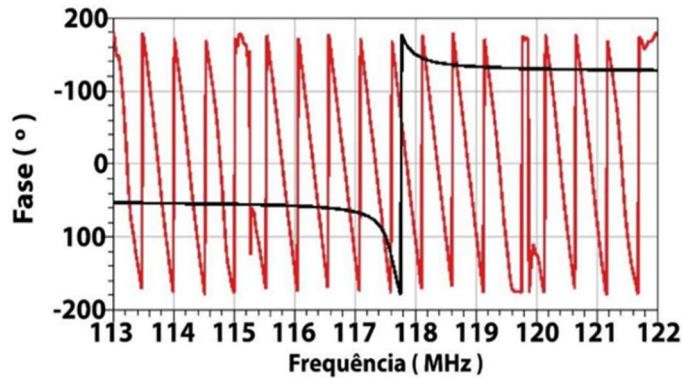


Fonte: Bernardes, 2020.

No contexto da Figura 5 fica evidente que a simplicidade do modelo não o permite reproduzir totalmente as complexidades de fase apresentadas pelo sensor SAW. Essa limitação está diretamente relacionada à falta de consideração do comprimento do percurso acústico pelo modelo, um fator crucial que introduz múltiplas rotações de fase no sinal.

A análise detalhada dos componentes do modelo, aliada à comparação com o sensor real, destaca tanto os desafios quanto os avanços na compreensão da sensibilidade desses sensores. Enquanto é trazido na Figura 4 uma visão comparativa das perdas de transmissão, na Figura 5 destaca-se as limitações do modelo, evidenciando a necessidade crucial de considerar o comprimento do percurso acústico para otimizar a exatidão e o desempenho do sensor.

Figura 05: Fase do modelo de circuito elétrico do sensor SAW baseado no cristal piezoelétrico (preto) e do sensor (vermelho).



Fonte: Bernardes, 2020.

Essa análise não apenas enriquece a compreensão das capacidades e limitações dos modelos de sensores SAW em cenários diversos, mas também proporciona uma base sólida para futuras investigações e otimizações, visando aprimorar ainda mais a eficiência desse dispositivo e dos modelos que o representam. Ao compreender as nuances do sensor, torna-se possível explorar estratégias para sua implementação em diferentes contextos. Esses avanços contínuos não apenas solidificam o papel do sensor SAW na vanguarda da tecnologia de detecção, mas também estimulam a evolução constante da pesquisa em sensores acústicos de superfície.

Neste contexto, uma das aplicações mais comuns de sensores SAW é sua inserção na malha de realimentação de osciladores senoidais.

Osciladores Senoidais

Osciladores são circuitos eletrônicos capazes de gerar sinais periódicos e podem ser classificados de acordo com a forma de onda que produzem: oscilador de onda quadrada, oscilador de onda triangular, oscilador senoidal, etc. As principais características de um oscilador são a forma de onda, frequência de oscilação, amplitude, distorção harmônica, ruído de fase, sensibilidade, estabilidade e potência de saída.

Os osciladores senoidais, como o próprio nome sugere, geram uma onda com forma de um seno/cosseno. Essa capacidade de produzir uma forma de onda contínua e oscilante é fundamental em uma variedade de aplicações. Em sistemas de comunicações, os osciladores

são usados para modular e demodular uma portadora, eles também são usados em instrumentos de medição (osciloscópios, geradores de função, etc), processamento de áudio, geração de sinais de controle em conversores AC-DC e DC-AC, teste de circuitos eletrônicos, etc.

Os osciladores senoidais são compostos de três blocos: uma malha seletiva de frequência que é responsável pela seleção da frequência de oscilação, um elemento ativo para fornecer ganho na frequência de oscilação e um mecanismo para controlar a amplitude do sinal (Silva e outros, 2023).

Existem diversas maneiras de controlar a frequência de oscilação de um oscilador senoidal. As mais usadas são as redes RC, as redes LC e os cristais piezoelétricos (Karris, 2008). Os osciladores RC são os mais simples de serem implementados e consomem pouca energia, em contrapartida eles operam em uma faixa de frequência limitada, também possuem potência de saída baixa, poucas opções de ondas de saída, o que os torna pouco adequados para aplicações que necessitem de formas de onda mais complexas e um ruído de fase significativo (Navid e outros, 2005).

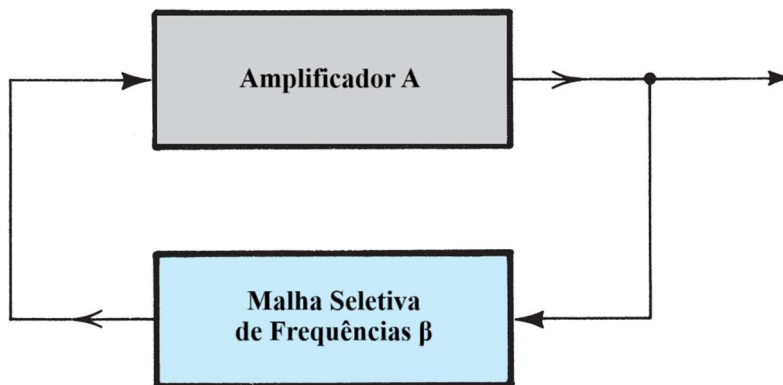
Os osciladores LC são muito usados em aplicações de rádio frequência, eles apresentam ruído de fase baixo, fator de qualidade elevado e são de fácil implementação (Hajimiri; Lee, 1999). Os osciladores LC não são usados em baixas frequências devido ao tamanho dos indutores e capacitores necessários, que se tornam muito grandes, além do preço de se produzir tais componentes. Os osciladores controlados por cristal são menores se comparados aos osciladores RC e LC e têm mais estabilidade de frequência pelo fato das características do cristal não variarem com as condições ambientais (Walls, 1990), ao contrário dos resistores, capacitores e indutores. Apesar disso, esses osciladores têm uma limitação no que diz respeito a mudança da sua frequência de oscilação, uma vez que para tal é necessário mudar o cristal presente no circuito.

Além da malha seletiva em frequência, um oscilador precisa de um bloco de amplificação. A amplificação pode ser feita por meio de diversos dispositivos, como transistor de junção de efeito de campo (JFET), transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET) ou circuitos integrados (Carr, 2002). O outro bloco, o mecanismo de controle de amplitude está dentro do bloco do amplificador.

Para entender o ganho necessário em um oscilador senoidal é necessário entender a dinâmica dos blocos que representam o oscilador. É mostrada na Figura 6 a estrutura básica de

um oscilador senoidal, em que a função de transferência de malha aberta é representada por $A(s)$ e a função de transferência da realimentação é $\beta(s)$.

Figura 06: Diagrama de Blocos de um Oscilador Senoidal.



Fonte: Smith; Sedra, 2020.

A função de transferência do diagrama de blocos é dada pela Equação 5.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A(s)}{1 - A(s)\beta(s)} \quad (7)$$

E na Equação 6 está representada a equação característica do diagrama de blocos do oscilador senoidal apresentado na Figura 6.

$$1 - A(s)\beta(s) = 0 \quad (8)$$

Analisando a Equação 6 é possível chegar em dois resultados importantes: o ganho de malha fechada deve ser unitário e a fase deve ser igual a zero ou múltiplo de 2π . Esses dois critérios são conhecidos como critérios de Barkhausen. Os critérios devem ser satisfeitos apenas na frequência de oscilação desejada ou caso contrário a forma de onda da saída não será uma senoide (Smith; Sedra, 2014).

Nas próximas subseções são apresentados quatro dos principais osciladores usados com sensores piezoelétricos: o oscilador Colpitts com *TBJ* (*Transistor Bipolar Junction*), o oscilador Pierce, o oscilador Clapp e o oscilador Colpitts com Par Diferencial. São mostrados os circuitos elétricos de cada um, as equações necessárias para a obtenção da frequência de oscilação, com exceção do oscilador Pierce, no qual que a frequência é definida pelo cristal piezoelétrico, e algumas das suas principais aplicações.

Oscilador Colpitts com TBJ

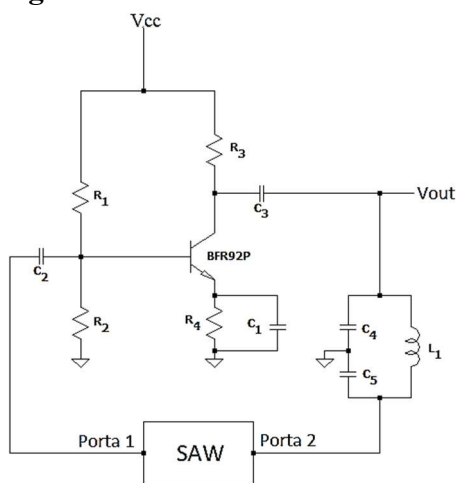
O oscilador Colpitts, que foi proposto em 1918 pelo engenheiro estadunidense Edwin H. Colpitts (Colpitts, U.S. Patent 1624537, 1918), representa um marco na geração de sinais de radiofrequência. Sua simplicidade e eficácia o torna uma escolha popular em uma variedade de aplicações. Composto por um arranjo de dois capacitores e um indutor, o oscilador Colpitts forma um circuito ressonante que desempenha um papel crucial na determinação da frequência de oscilação do sinal de saída (Azadmehr e outros, 2020).

Duas arquiteturas de osciladores Colpitts são apresentadas neste artigo, usando como elementos ativos um TBJ e um Par Diferencial, cada uma. Na Figura 7 é apresentado o circuito básico do oscilador Colpitts com TBJ, ele tem uma rede de alimentação que se configura como um divisor capacitivo, composto pelos capacitores C_4 e C_5 , e um indutor L_1 . Essa configuração não apenas define a frequência de oscilação, mas também contribui para a estabilidade e eficiência do oscilador, fatores cruciais em sua aplicação em sistemas de rádio, transmissão sem fio e equipamentos médicos.

A frequência de oscilação é definida pela frequência de ressonância do circuito tanque e é dada pela Equação 7.

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_4 + C_5}{C_4 \cdot C_5}}} \quad (9)$$

Figura 07: Circuito do Oscilador Colpitts com TBJ.



Fonte: Silva e outros, 2023.

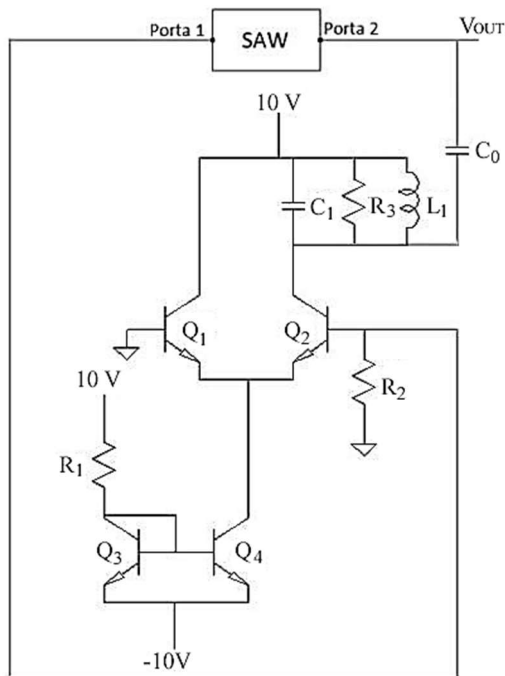
O espectro amplo de aplicações do oscilador Colpitts com TBJ destaca sua versatilidade. De fato, esse dispositivo é comumente empregado na geração de sinais senoidais de alta frequência, sendo integrado, por exemplo, como sensor de temperatura quando combinado com outros dispositivos, como sensores SAW. Além disso, sua utilização em contextos que demandam largas faixas de frequências de operação, como em radiocomunicações, evidencia sua eficiência e adaptabilidade (Shi; Ran, 2006). O oscilador Colpitts com TBJ, assim, continua a desempenhar um papel essencial na vanguarda da engenharia de sistemas eletrônicos, proporcionando soluções confiáveis e eficazes em diversas áreas de aplicação.

Oscilador Colpitts com Par Diferencial

O oscilador Colpitts com Par Diferencial, uma configuração que gera uma onda senoidal por meio da amplificação da diferença entre dois sinais, destaca-se por sua eficácia e versatilidade. Esse processo é habilitado por um componente não linear, como um transistor ou um circuito integrado, que desempenha um papel crucial na geração de oscilações contínuas. A rede de realimentação, essencial nesse contexto, conecta a saída do circuito à sua entrada, estabelecendo um ciclo que sustenta a oscilação persistente do circuito (HEGAZI e outros, 2001).

No diagrama do oscilador Colpitts com Par Diferencial, apresentado na Figura 8, o Par Diferencial é composto pelos transistores Q_{01} e Q_{02} , enquanto a malha seletiva em frequência é constituída pelos elementos R_L , L_1 , L_2 e C . Uma das vantagens distintivas desse oscilador reside na menor distorção harmônica em comparação com osciladores com um único transistor. Além disso, a saída $V_0(t)$ está fora da malha de realimentação, o que implica que variações na carga exercem pouca influência na frequência e amplitude do oscilador (CLARKE; HESS, 1971).

Figura 08: Circuito do Oscilador Colpitts com Par Diferencial com um sensor SAW na malha de realimentação.



Fonte: Bezerra, 2023.

A frequência de oscilação do oscilador Colpitts com Par Diferencial, expressa pela Equação 8, é determinada pelos componentes específicos do circuito e suas interações.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C}} \quad (10)$$

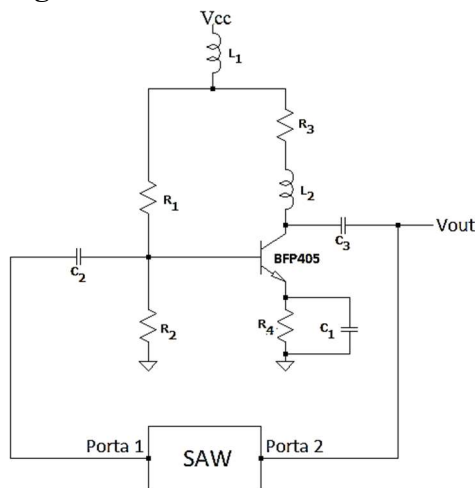
Os transistores Q_3 e Q_4 desempenham o papel de uma fonte de corrente, ou espelho de corrente. Essa configuração é projetada para replicar a corrente elétrica que flui através de um dispositivo ativo (transistor Q_3), regulando a corrente em outro dispositivo ativo do circuito (transistor Q_4). O objetivo é manter a corrente de saída constante, independente da carga. Um espelho de corrente ideal opera como um amplificador de corrente ideal, sendo empregado para fornecer correntes de polarização e cargas ativas a outros circuitos.

Oscilador Pierce

O oscilador Pierce, um desenvolvimento atribuído a George W. Pierce, físico e professor da Universidade de Harvard, surgiu durante a década de 1920, marcando uma

contribuição significativa para a engenharia de sistemas eletrônicos. Ao contrário de muitos osciladores, o oscilador Pierce distingue-se por sua dependência crucial de um cristal piezoelétrico, que nesse caso está representado pelo sensor SAW no circuito elétrico apresentado na Figura 9.

Figura 09: Circuito do Oscilador Pierce.



Fonte: Silva e outros, 2023.

O sensor SAW desempenha um papel fundamental ao definir a frequência de oscilação do circuito. Quando um campo elétrico é aplicado ao cristal, esse entra em vibração em sua frequência de ressonância, que, por conseguinte, determina a frequência de oscilação do sinal de saída. Essa abordagem, utilizando o cristal piezoelétrico, confere ao oscilador Pierce uma melhor estabilidade de frequência em comparação com outros tipos de osciladores. Tal característica é de suma importância em aplicações onde a exatidão na contagem de tempo é crítica, conforme enfatizado por estudos anteriores (Vittoz e outros, 1988).

Devido à sua estabilidade de frequência, o oscilador Pierce é amplamente adotado em uma variedade de dispositivos eletrônicos essenciais. Encontrando aplicação em relógios digitais, computadores, sistemas embarcados, sistemas de navegação por satélite, entre outros, esse oscilador se destaca em cenários onde a consistência e a exatidão temporal são requisitos fundamentais (Tsai e outros, 2008).

A capacidade do oscilador Pierce de proporcionar uma referência temporal estável e confiável o coloca como uma escolha preferencial em sistemas nos quais a sincronização

temporal é crítica para o desempenho e funcionamento adequado. Sua contribuição na garantia da estabilidade de frequência em dispositivos modernos destaca o papel crucial desempenhado pelo oscilador Pierce na evolução e inovação contínua da engenharia de sistemas eletrônicos.

Osciladores Clapp

O oscilador Clapp, uma variante derivada do oscilador Colpitts conforme documentado por Carr (2002), foi desenvolvido em 1948 por James Kilton Clapp, um engenheiro eletricista americano. Esse oscilador se destaca ao introduzir uma modificação crucial no circuito ressonante em comparação com o oscilador Colpitts. Enquanto o oscilador Colpitts adota um circuito ressonante em paralelo, o oscilador Clapp utiliza um circuito ressonante em série, alteração que impacta significativamente o desempenho e as características operacionais do dispositivo. A representação visual do circuito do oscilador Clapp é apresentada na Figura 10.

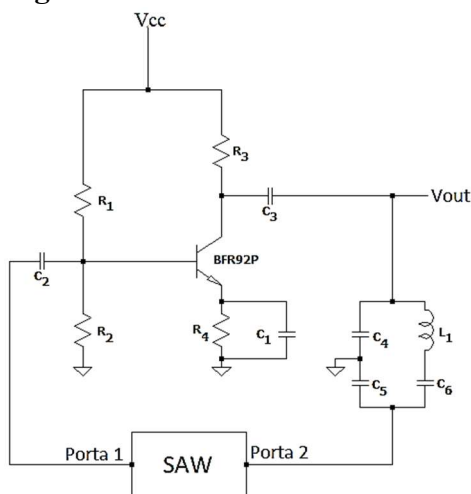
A frequência de oscilação do oscilador Clapp, obtida pela Equação 9, é governada pelas propriedades específicas do circuito ressonante em série.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C}} \quad (11)$$

Em que a capacitância C é dada pela Equação 10.

$$C = \frac{C_4 C_5 C_6}{C_4 C_5 + C_4 C_6 + C_5 C_6} \quad (12)$$

Figura 10: Circuito do Oscilador Clapp.



Fonte: Silva e outros, 2023.

A frequência de oscilação do oscilador Clapp, obtida pela Equação 9, é governada pelas propriedades específicas do circuito ressonante em série.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C}} \quad (11)$$

Em que a capacitância C é dada pela Equação 10.

$$C = \frac{C_4 C_5 C_6}{C_4 C_5 + C_4 C_6 + C_5 C_6} \quad (12)$$

Em contraste com o oscilador Colpitts, que emprega um circuito ressonante em paralelo, o oscilador Clapp demonstra uma grande estabilidade e é particularmente eficaz em operar em frequências relativamente altas. A diferenciação entre essas duas variantes ressalta a flexibilidade e a adaptabilidade dos osciladores na engenharia de sistemas eletrônicos.

A capacidade do oscilador Clapp de operar em frequências elevadas torna-o uma escolha valiosa em uma variedade de aplicações. A Figura 10 destaca a disposição característica do circuito do oscilador Clapp, no qual a presença de C_6 desempenha um papel crucial. Esse componente, com valor significativamente menor em relação a C_4 e C_5 , influencia diretamente a frequência de oscilação do sistema. A manipulação do valor de C_6 possibilita ajustes com exatidão elevada na frequência de oscilação, proporcionando uma versatilidade valiosa em cenários onde a sintonização é fundamental.

Essas características intrínsecas do oscilador Clapp, como sua estabilidade, capacidade de operar em frequências elevadas e a flexibilidade proporcionada por elementos como C_6 , contribuem para sua ampla adoção em diversas aplicações. Seja em comunicações, instrumentação ou outras áreas da engenharia eletrônica, o oscilador Clapp demonstra ser uma ferramenta eficiente na geração de sinais senoidais.

A escolha entre os diferentes tipos de osciladores, como o Colpitts com TBJ, Clapp, Pierce e o Colpitts com Par Diferencial, está intrinsecamente ligada ao contexto específico de aplicação. O oscilador Colpitts é frequentemente utilizado em aplicações de radiofrequência (RF) e em osciladores de frequência baixa. O oscilador Clapp encontra aplicação em sintonizadores de rádio e receptores de TV. O oscilador Pierce é a escolha principal em circuitos de relógio, em sistemas digitais e em qualquer situação na qual a exatidão na contagem de tempo é crucial.

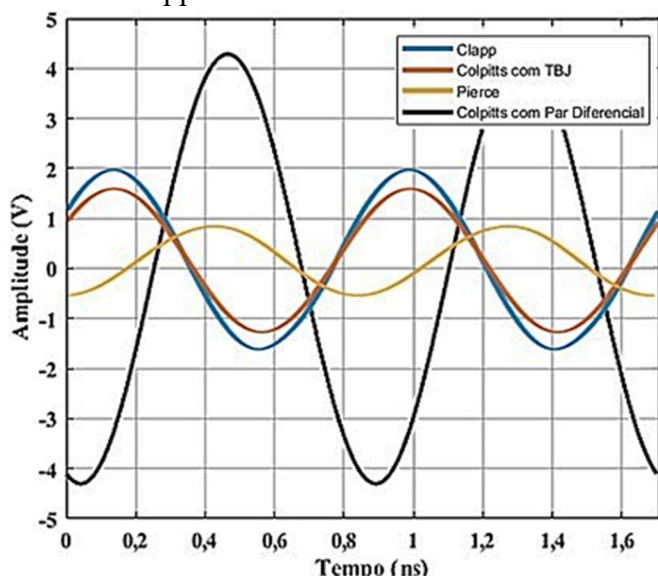
À medida que a tecnologia avança, as topologias e implementações desses osciladores podem se beneficiar de avanços em materiais e técnicas de fabricação. Dispositivos semicondutores de frequência elevada e cristais de qualidade elevada têm permitido osciladores cada vez mais exatos e estáveis, impulsionando o progresso contínuo nesse campo crucial da eletrônica.

Análise de Dados e Resultados

Os osciladores Colpitts com TBJ, Colpitts com Par Diferencial, Pierce e Clapp apresentados nas Figuras 7, 8, 9 e 10, respectivamente, foram projetados para uma frequência de 117,6 MHz e simulados no *Advanced Design System* (ADS). Com os dados obtidos foram feitos os gráficos apresentados na Figura 11. A frequência de 117,6 MHz foi escolhida por ser a frequência de ressonância do modelo utilizado para o sensor SAW.

As simulações foram feitas com o intuito de escolher o oscilador mais adequado a ser usado com o sensor SAW. Os critérios utilizados para definir o melhor oscilador foram a amplitude do sinal de saída e o erro em relação a frequência de oscilação desejada. É apresentado na Tabela 2 os dados obtidos nas simulações.

Figura 11: Tensão de Saída dos Osciladores Colpitts com TBJ , Colpitts com Par Diferencial, Pierce e Clapp.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 02: Valores obtidos na simulação dos osciladores.

Topologia	Amplitude (V)	Frequência (MHz)	Erro – Frequência (%)
Colpitts com TBJ	1,56	116,69	0,78
Colpitts com Par Diferencial	4,29	117,70	0,08
Pierce	0,75	117,63	0,03
Clapp	1,95	116,78	0,70

Fonte: Autoria Própria.

Todos os osciladores propostos apresentaram um erro menor que 1% em relação a frequência de oscilação, assim conclui-se que todos eles podem ser usados em conjunto com o sensor SAW. O erro de frequência do oscilador Colpitts com TBJ foi de 0,78%, o erro do oscilador Colpitts com Par Diferencial foi de 0,08%, o oscilador Pierce apresentou um erro de 0,03% e o oscilador Clapp um erro de 0,70%. Nota-se, portanto, que o oscilador Pierce é o mais indicado para aplicações que necessitem de maior exatidão em frequência.

Em relação a amplitude, o oscilador que apresentou o melhor resultado foi o oscilador Colpitts com Par Diferencial, que apresentou a maior amplitude do sinal de saída, sendo 275% maior em relação ao oscilador Colpitts com TBJ, 572% em relação ao oscilador Pierce e 220% em relação ao oscilador Clapp.

Em seguida foram escolhidas as topologias Pierce, Colpitts com TBJ e Clapp para estudar a sensibilidade do oscilador em relação à variação dos valores dos componentes do sensor pelo método de Monte Carlo. A variação foi feita com um total de 250 iterações para cada componente individualmente e com um total de 1000 iterações para a variação simultânea de todos os componentes do modelo do sensor. Na Tabela 3 está apresentada o estudo de sensibilidade dos osciladores com o sensor SAW na malha de realimentação.

Ao analisar os resultados das variações dos componentes do modelo de sensor de Bernardes (2020) observa-se que os componentes C_0 e L_1 exercem influência significativa na amplitude da tensão de saída nas três topologias de osciladores e influenciam na frequência, com destaque para o oscilador Pierce, com variações superiores a 85%. Nos osciladores Colpitts e Clapp, apesar da variação da frequência ocorrer, essa grandeza é influenciada

significativamente pela variação dos componentes da malha seletiva em frequência desses osciladores (C_0 e L_1). Um outro parâmetro avaliado foi se o circuito continua oscilando com a variação dos parâmetros do sensor (r), nesse caso o oscilador Clapp é o que opera na maior faixa de valores dos componentes, oscilando em 84,5% das iterações.

Assim, se o objetivo for a estabilidade do circuito, ou seja, manter a oscilação ao adicionar perturbações no modelo do sensor de Bernardes (2020), a melhor arquitetura é do oscilador Clapp, que obteve $r = 84,5\%$. Entretanto, se o objetivo é a maior sensibilidade da frequência de oscilação em relação à variação dos parâmetros do sensor, o oscilador Pierce é o mais indicado, uma vez que ele apresenta variações de frequência de 10%.

Tabela 03: Tabela resumo da análise de sensibilidade dos osciladores senoidais simulados.

Variações nos componentes do modelo de sensor SAW de Bernardes (2020)											
Pierce				Colpitts com TBJ				Clapp			
C	%f	%V	r	C	%f	%V	r	C	%f	%V	r
R ₀₁	0,00	97,2	66	R ₀₁	0,10	29,3	60,4	R ₀₁	0,02	1,2	100
R ₀₂	0,01	20,9	100	R ₀₂	0,07	8,9	42	R ₀₂	0,00	0,02	100
R ₁	0,02	80,8	48	R ₁	0,00	0,00	78,4	R ₁	0,00	0,03	100
C ₀	9,28	85,8	55,2	C ₀	0,08	84,7	32	C ₀	0,04	18,9	98
C ₁	0,00	8,4	100	C ₁	0,00	0,00	94,4	C ₁	0,00	0,01	100
C ₂₁	0,01	89,3	58	C ₂₁	0,07	12,6	50,4	C ₂₁	0,04	8,11	100
C ₂₂	0,00	90	52,4	C ₂₂	0,01	0,00	52,4	C ₂₂	0,00	0,04	100
L ₁	9,28	96,1	52	L ₁	0,07	64,3	30,4	L ₁	0,04	17,9	96
Variações simultâneas dos valores de todos os componentes do modelo de sensor SAW											
Todos	29,4	83,1	49,9	Todos	31,0	98,2	56,3	Todos	40,0	95,8	84,5

Fonte: Autoria Própria.

*C - componente; %f – variação máxima de frequência (%); %V – variação máxima de amplitude (%); r – número de vezes em que o circuito oscila em percentagem (%).

Considerações finais

Nesse artigo foram explorados os princípios fundamentais dos sensores piezoelétricos e suas capacidades de converter deformações mecânicas em sinais elétricos. Essa habilidade oferece alta estabilidade em uma diversidade de aplicações, proporcionando uma base robusta para o avanço tecnológico. Paralelamente, foram examinados os osciladores Colpitts (com TBJ e com Par Diferencial), Pierce e Clapp, cada um desempenhando um papel vital no contexto eletrônico.

Os osciladores, com sua versatilidade, demonstraram ser cruciais em inúmeras situações, desde medições até aplicações em comunicações sem fio avançadas. Por exemplo, o Colpitts, pela sua simplicidade e eficácia, destaca-se na geração de sinais de baixa frequência, enquanto o Pierce, com seu cristal piezoelétrico, oferece uma estabilidade crítica, essencial em contextos que exigem exatidão temporal. O Clapp, por sua vez, se destaca por sua estabilidade e operação em frequências elevadas, encontrando aplicação em transmissores, receptores de rádio e sistemas de identificação por radiofrequência.

Essas tecnologias não apenas desempenham papéis essenciais nas aplicações atuais, mas também abrem portas para avanços futuros. À medida que a ciência e a engenharia avançam, é crucial continuar explorando e inovando nestes domínios para impulsionar o progresso tecnológico e alcançar soluções cada vez mais sofisticadas e eficazes, moldando o futuro da eletrônica e da engenharia de sensores.

Referências

BERNARDES, Dailan de Jesus Pereira. **Oscilador Pierce com sensor a ondas de love na malha de realimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

BEZERRA, S. C. **Análise do Desempenho de um Oscilador a Par Diferencial com Sensor SAW na Malha de Realimentação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2023.

BUTTERWORTH, Stephan. On electrically-maintained vibrations. **Proceedings of the Physical Society of London**, Londres, v. 27, n. 1, p. 410, 1914.

CECCATO, C., NUNES, G., MINCACHE, ANUAR., LILIAN, TUPAN. Desenvolvimento de um Protótipo de Escada Empregando o Efeito Piezoelétrico. **Mudi**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 52-60, 2023.

CLARKE, K.; HESS, D. **Communication Circuits: Analysis and Design**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1971. (Addison-Wesley series in electrical engineering). ISBN 9780201010404.

D.D.L. CHUNG, **Applied Materials Science: Applications of Engineering Materials in Structural, Electronics, Thermal, and Other Industries**. USA: CRC Press LLC, 2001, ch. 5.

FRADEN, JACOB. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. 2004.

HEGAZI, E.; SJOLAND, H.; ABIDI, A. A. A filtering technique to lower lc oscillator Phase noise. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, Nova York, v. 36, n. 12, p. 1921–1930, 2001.

LEO, J. D. **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

MENDONÇA, R. J. G., **Desenvolvimento de um Sistema para a Medição do Efeito Piezoelétrico**. FCT. Lisboa. 2019.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: HEMUS, 2007.

PEREIRA, R. S., **Desenvolvimento de Sensor de Pressão para Aplicação Industrial**. São Leopoldo: UNISINOS, 2020.

PERLINGEIRO, A. R.; PIMENTA, G. M.; SILVA, S. E. DA. **Geração De Energia Através De Materiais Piezoelétricos**. Rio de Janeiro: Centro Federal De Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca, p. 62, 2016.

SILVA, H. **Análise comparativa de osciladores senoidais com sensor a onda acústica de superfície na malha de realimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

DE SOUZA, Lucas Ferreira; RIBEIRO, Rosa Maria. Sensores Piezoresistivos e Sensores Piezoelétricos. **VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar**. Maringá, 2013.

SUCHICIAL, C. T. A., **Efeito Piezoelétrico Induzido em Polímeros Sintéticos.**
Dissertação. (Mestrado em Física). Universidade de São Paulo, São Carlos, 1978.

TAMARIN, Ollivier et al. Mobile Acoustic Wave Platform Deployment in the Amazon River: Impact of the Water Sample on the Love Wave Sensor Response. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 1, p. 72, 2020.

TICHÝ, J. ERHART, J; KITTINGER, E; PRÍVRATSKÁ, J. **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials.** Heidelberg: Springer, 2010.