



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Raimundo Valadares de Sousa Neto

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM OSCILADOR COLPITTS  
COM UM SENSOR CAPACITIVO NA MALHA SELETIVA EM  
FREQUÊNCIA**

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2024

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM OSCILADOR COLPITTS COM UM SENSOR  
CAPACITIVO NA MALHA SELETIVA EM FREQUÊNCIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia  
Elétrica.*

*Raimundo V. de Sousa Neto*

Raimundo Valadares de Sousa Neto  
Orientando

---

Jalberth Fernandes de Araujo, D. Sc.  
Orientador

Campina Grande, Paraíba.

Maio de 2024

## AGRADECIMENTOS

De início, quero agradecer à Deus por ter me dado forças e resiliência para chegar até essa etapa do curso e da minha vida.

Agradeço à minha mãe Ana Valadares, à minha tia Lúcia Valadares e ao meu tio Pedro, por estarem comigo durante toda minha vida e minha árdua jornada durante este curso, sempre me dando força e coragem.

Agradeço à minha namorada Kaline Ariádine por ser uma companheira formidável e que agregou muito à minha vida, se fazendo presente em momentos muito importantes e difíceis dessa trajetória.

Agradeço aos meus amigos, Paulo Ginjo e Batista Marques, os quais foram as companhias necessárias e fundamentais para aguentar tantos anos longe de casa e da família.

Agradeço ao meu orientador, professor Jalberth Fernandes, por todas as orientações e conselhos que me ajudaram a chegar até aqui.

Agradeço aos meus amigos Sávio, Valdinete, Sueldo, José Carlos, Matheus, Felipe, André, Joseilson popularmente conhecido como Mano Joza, Platiny, Gabriel e Alana por serem os melhores amigos que eu podia ter feito em Campina Grande e por todo o apoio e alegrias compartilhadas comigo.

Agradeço também a todos os ótimos colegas que fiz dentro da universidade e que contribuíram nessa minha jornada na graduação: Henrique, Allan, Arthur, Eduarda, Ícaro, José Joseilton, Douglas Sesion, Mayara, Nathalia, Paulo, João Paulo.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada a análise de desempenho de um oscilador Colpitts com um sensor capacitivo na sua malha seletiva em frequência. Os componentes do oscilador senoidal foram selecionados para uma frequência de oscilação de 50 MHz e o sensor capacitivo com geometria planar com transdutor interdigitado. O desempenho do oscilador foi verificado, inicialmente, por meio de simulações utilizando o *software LTSpice*. Os parâmetros analisados foram a amplitude e a frequência do sinal de saída do oscilador de modo a constatar alterações nestes dois parâmetros, devido à alteração na capacitância do sensor ao realizar uma detecção. Nas simulações, o sensor capacitivo foi simulado como um capacitor simples tomando como capacitância de referência 6 pF para a permissividade do ar e 121 pF para a permissividade da água. Esses valores foram obtidos por meio da análise dos parâmetros  $S_{11}$  verificados com o auxílio de um analisador de rede vetorial. Após verificar o funcionamento do circuito nas simulações, o próximo passo foi construir fisicamente o oscilador em uma placa de circuito impresso e analisar seu desempenho. A primeira etapa foi a de análise do oscilador antes de adicionar o sensor na sua malha seletiva em frequência. O segundo passo foi constatar as alterações na amplitude e na frequência do oscilador após adicionar o sensor, e por fim analisar seus parâmetros após submergir o sensor totalmente em água. Ao analisar os resultados obtidos, constatou-se uma variação considerável, tanto na amplitude quanto na frequência, no sinal de saída do oscilador quando comparado o oscilador atuando sem o sensor com o oscilador atuando com o sensor, assim como para o sensor ao ar livre quanto com o sensor submerso em água. Essas variações tanto na frequência quanto na amplitude acontecem a medida em que a capacitância do sensor é alterada, mostra que o oscilador apresenta um bom desempenho quando atuando em conjunto com o sensor capacitivo e pode ser usado como um método alternativo ao analisador de rede vetorial.

**Palavras-chave:** Oscilador, Colpitts, Sensor, Capacitivo, Desempenho.

## ABSTRACT

This work presents the architecture and performance analysis of a Colpitts of a Colpitts oscillator with a capacitive sensor in its frequency-selective loop mesh. The components of the sinusoidal oscillator were selected for a for an oscillation frequency of 50 MHz and the capacitive sensor with planar geometry with an interdigitated transducer. The oscillator's performance was verified, simulations using the LTSpice software. The parameters analyzed were the amplitude and frequency of the oscillator's output signal. oscillator output signal in order to verify changes in these two parameters due to change in the sensor's capacitance when performing a detection. In the simulations the capacitive sensor was simulated as a simple capacitor with a reference capacitance of reference capacitance of 6 pF for the permittivity of air and 121 pF for the permittivity of water. permittivity of water, these values were obtained by analyzing the  $S_{11}$  parameters verified with the aid of a vector network analyzer. After verified that the circuit worked in the simulations, the next step was to physically physically build the oscillator on a printed circuit board and analyze its performance. The first step was to analyze the oscillator before adding the sensor to its frequency-selective loop. The second step was to see the changes in the oscillator's amplitude and frequency after adding the sensor, and finally to analyze its parameters after submerging the sensor completely in water. Analyzing the results obtained showed a considerable variation in both amplitude and frequency in the oscillator's output signal when comparing the oscillator working without the sensor with the oscillator working with the sensor, both for the sensor in the open air and for the sensor submerged in water. These variations in both frequency and amplitude occur as the capacitance of the sensor changes, showing that the oscillator performs well when acting in conjunction with the capacitive sensor and can be used as an alternative method to the vector network analyzer.

**Keywords:** Oscillator, Colpitts, Sensor, Capacitive, Performance.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes utilizados e seus respectivos valores.....	23
Tabela 2 - Instrumentos utilizados.....	29
Tabela 3 - Materiais e componentes utilizados.....	30
Tabela 4 - Amplitude e a frequência de Vout.....	34
Tabela 5 - Valores da amplitude e da frequência de Vout após a inserção do sensor capacitivo no circuito. ....	35
Tabela 6 - Valores de amplitude e frequência de Vout para o sensor totalmente submerso em água. ....	36
Tabela 7 - Valores de amplitude e frequência de Vout.....	38
Tabela 8 - Valores de amplitude e frequência de Vout.....	39
Tabela 9 - Valores de amplitude e frequência de Vout para o sensor totalmente submerso em água. ....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos de um oscilador senoidal.....	12
Figura 2 - Diagrama elétrico do oscilador Colpitts.....	14
Figura 3 - Modelo para grandes sinais para um oscilador Colpitts.....	15
Figura 4 - Esquemático de um sensor capacitivo planar com transdutor interdigitado.....	17
Figura 5 - Ligação entre Oscilador e Sensor.....	18
Figura 6 - Fluxograma que mostra as etapas que descrevem a metodologia aplicada.....	20
Figura 7 - Esquemático do oscilador Colpitts com o sensor capacitivo elaborado no LTSpice.....	21
Figura 8 - Esquemático do oscilador Colpitts elaborado no LTSpice.....	24
Figura 9 - Esquemático do oscilador Colpitts com o sensor capacitivo.....	25
Figura 10 - Esquemático do oscilador senoidal com o sensor capacitivo totalmente submerso em água.....	26
Figura 11 - Esquemático do oscilador Colpitts elaborado no KiCad.....	27
Figura 12 - Layout do oscilador Colpitts elaborado no KiCad.....	27
Figura 13 - Máquina Fiber Laser CNC.....	28
Figura 14 - Oscilador Colpitts montado na placa de circuito impresso.....	28
Figura 15 - Oscilador Colpitts com o sensor capacitivo adicionado a sua malha seletiva em frequência.....	29
Figura 16 - Fonte de Alimentação Minipa MPL - 3303.....	30
Figura 17 - Osciloscópio KEYSIGHT DSO - X2024A.....	30
Figura 18 - Multímetro Digital Agilent – U1252A.....	31
Figura 19 - Estação de solda – TOYO TS - 920.....	31
Figura 20 - Relação entre frequência e capacitância do sensor.....	33
Figura 21 - Forma de onda de tensão na saída do oscilador senoidal sem o sensor capacitivo integrado no circuito.....	34
Figura 22 - Forma de onda do sinal de saída Vout após a inserção do capacitor na malha seletiva em frequência do oscilador.....	35
Figura 23 - Formas de onda de Vout antes e após a adição do sensor capacitivo ao oscilador.....	35
Figura 24 - Forma de onda de Vout para o sensor capacitivo totalmente submerso em água.....	36
Figura 25 - Comparação entre as formas de onda de saída do oscilador para o sensor capacitivo ao ar livre e totalmente submerso em água.....	37
Figura 26 - Forma de onda de Vout sem a adição do sensor capacitivo a malha seletiva em frequência do oscilador Colpitts.....	38
Figura 27 - Forma de onda de Vout após a adição do sensor capacitivo ao oscilador.....	39
Figura 28 - Forma de onda de Vout para o sensor totalmente submerso em água.....	40
Figura 29 - Comparação entre as formas de onda de Vout para o sensor ao ar livre e totalmente submerso.....	41

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	9
1.1	Objetivos .....	10
1.2	Organização do Texto.....	11
2	Fundamentação Teórica .....	12
2.1	Oscilador Colpitts .....	12
2.2	Sensor Capacitivo .....	16
2.3	Conexão entre o Oscilador Senoidal e o Sensor Capacitivo .....	18
3	Metodologia.....	20
3.1	Escolha da Topologia do Oscilador Colpitts .....	20
3.2	Elaboração da Arquitetura do Oscilador Colpitts .....	22
3.3	Análise do Oscilador por meio de Simulações .....	24
3.4	Simulação do Oscilador com o Sensor Capacitivo na Malha Seletiva em Frequência .....	24
3.5	Construção do Oscilador Colpitts em uma Placa de Circuito Impresso .....	26
3.6	Análise de desempenho do Oscilador Colpitts .....	31
4	Análise dos Resultados .....	33
4.1	Análise de Desempenho do Oscilador Colpitts sem o Sensor Capacitivo feita por meio de Simulações 33	
4.2	Análise de Desempenho do Oscilador Colpitts com o Sensor Capacitivo feita por meio de Simulações 34	
4.3	Análise de Desempenho do oscilador Colpitts sem o Sensor Capacitivo na sua Malha Seletiva em Frequência .....	37
4.4	Análise de Desempenho do Oscilador com o Sensor Capacitivo na Malha Seletiva em Frequência com Capacitância de 6 pF .....	38
4.5	Análise de Desempenho do Oscilador com o Sensor na Malha Seletiva em Frequência com uma Capacitância de 121 pF .....	40
5	Conclusões .....	43
5.1	Trabalhos Futuros .....	44
	Referências .....	45



# 1 INTRODUÇÃO

A má qualidade da água em regiões subdesenvolvidas, juntamente com outros fatores como a falta de saneamento e a falta de condições aceitáveis de higiene, é responsável por cerca de 1,7 milhões de mortes em todo o mundo, provocadas por agentes patogênicos microbianos como os da *Campylobacter jejuni* e da *Escherichia coli* (ASHBOLT, 2004). Com isso se faz necessária a detecção desses agentes de forma rápida e precoce, devido ao aumento da frequência de contaminação microbiana de alimentos e fontes de água (IDIL, 2017).

Entretanto, os métodos convencionais e atuais para detecção desses microrganismos são de alto custo, complexos e trabalhosos. Nesse contexto, a tecnologia de sensores capacitivos tem ganhado relevância como uma importante ferramenta para a detecção microbiana e em várias aplicações como diagnóstico clínico, análise de água e alimentos (IDIL, 2017).

Os sensores capacitivos são dispositivos utilizados para aferir e detectar variações de capacitância em um sistema. Capacitância é uma propriedade elétrica que mede a capacidade de um componente ou objeto de armazenar energia sob a forma de uma carga elétrica. Sensores dessa natureza exploram essa propriedade para detectar mudanças no ambiente físico, como a presença ou ausência de objetos, a umidade e a distância entre superfícies (ANDRADE, 2020).

As principais vantagens dos sensores capacitivos são a sua exatidão e alta sensibilidade. Podendo detectar variações mínimas de capacitância o que os tornam adequados para aplicações que exijam medições com alta exatidão. E o fato de não requererem contato com o objeto ou a superfície de análise, o que evita danos ou interferências indesejadas. Essa característica os torna ideais para o uso em sistemas sensíveis ou frágeis (BECKER, 1996).

Entretanto, os sensores capacitivos são suscetíveis a interferências devido a variações ambientais, como temperatura e umidade, que podem introduzir erros na leitura, fazendo com que se façam necessárias técnicas de compensação e calibração para se obter resultados mais exatos e confiáveis (DU, 2014).

Nesse contexto, a maior parte das aplicações que utilizam esse tipo de sensor têm empregado analisadores de redes vetoriais (QIU; TEK; HUANG, 2020). Uma alternativa que possibilita a análise desse dispositivo é a combinação dele com um oscilador senoidal. Essa combinação permite a análise de parâmetros fundamentais como amplitude e frequência mediante às variações da capacitância do sensor ao realizar uma detecção (RAHAMAN; TAE KYU AN; HWA SUNG LEE, 2021). Na bibliografia, os osciladores senoidais comumente

utilizados nesse tipo de aplicação são o Colpitts, o Hartley e o Clapp (SCARDELLETTI, 2016; POP SEPTIMIU SEVER; VLAD, 2021).

O oscilador escolhido para este trabalho foi o oscilador Colpitts, criado por Edwin Colpitts em 1918 e que tem se mostrado de grande importância e relevância entre os osciladores que utilizam circuitos tanque LC na sua malha seletiva em frequência. Devido a sua simplicidade, facilidade de oscilação, ampla faixa de operação de frequência, ausência de indutância mútua, o que permita maior estabilidade em frequência e a geração de ondas senoidais com baixas distorções (WAFO TEKAM; KENGNE; DJUIDJE KENMOE, 2019).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo a elaboração da arquitetura de um oscilador Colpitts com um sensor capacitivo inserido em sua malha seletiva em frequência e a análise de seu desempenho para aplicações envolvendo detecção de variações de capacitância de um sistema, como uma alternativa, de baixo custo, ao analisador de rede vetorial (VNA).

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar a análise de desempenho de um oscilador Colpitts com um sensor capacitivo na sua malha seletiva em frequência.

Além disso, este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar a arquitetura do oscilador senoidal e testar o seu funcionamento por meio de simulações utilizando o *software LTSpice*;
- Analisar os parâmetros amplitude e frequência para o oscilador projetado;
- Analisar a faixa de frequência para que a capacitância do sensor permaneça estável;
- Analisar por meio de simulações o comportamento dos parâmetros amplitude e frequência, após a inserção do sensor capacitivo na malha seletiva em frequência do oscilador;
- Projetar o oscilador no *software KiCad*, que permite a elaboração de *layouts* para a impressão e construção de circuitos em placa de circuito impresso.
- Construir o oscilador na placa de FR4 e testar seu funcionamento por meio de um osciloscópio;

- Analisar o desempenho do oscilador Colpitts com o sensor inserido em sua malha seletiva em frequência por meio dos dados obtidos no osciloscópio.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, como descrito a seguir:

No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica necessária para a elaboração da arquitetura do oscilador senoidal, que irá ser testado via simulações computacionais. Assim como a apresentação da teoria sobre sensores capacitivos e a relação entre permissividade do meio e capacitância.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia adotada para que os resultados fossem alcançados.

No Capítulo 4 são feitas as análises dos resultados.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

E por fim, são apresentadas as referências.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

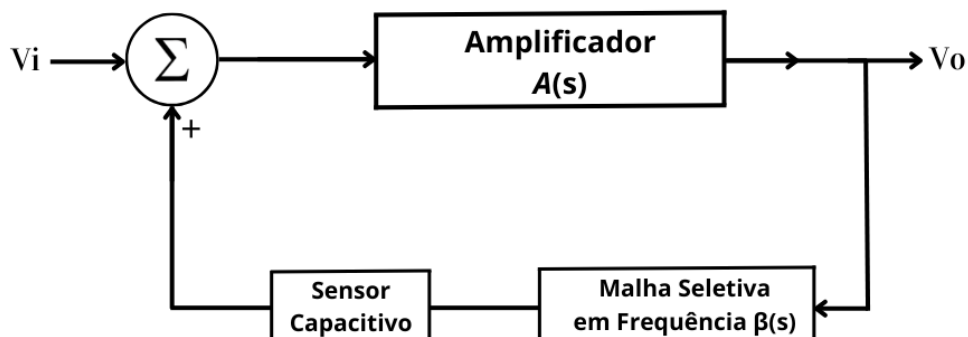
Neste capítulo serão abordados a teoria sobre osciladores senoidais Colpitts e os fundamentos sobre sensores capacitivos planares com transdutor interdigitado que serão utilizados neste trabalho.

### 2.1 OSCILADOR COLPITTS

Osciladores senoidais são circuitos eletrônicos que produzem em sua saída uma forma de onda periódica com característica senoidal sem a necessidade de um sinal de entrada (CLARKE; HESS, 1971). Esses circuitos são utilizados em várias áreas da eletrônica para gerar sinais de frequências com ordens de grandeza variadas em diversas aplicações, como em geradores de sinais, moduladores e demoduladores, misturadores e instrumentos musicais eletrônicos.

O princípio básico para projetar um oscilador senoidal consiste em um elemento oscilante que propicie, por meio de uma rede de realimentação, um par de polos complexos conjugados no semiplano direito responsável por determinar a frequência de oscilação e um mecanismo para mover esses polos em direção do eixo imaginário. Mecanismo, este, que determina a amplitude de oscilação por meio de uma amplificação (CLARKE; HESS, 1971). Na Figura 1 é mostrada uma estrutura básica de um oscilador senoidal.

Figura 1 - Diagrama de blocos de um oscilador senoidal.



Fonte: Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2015).

Na Figura 1 tem-se a representação básica de um oscilador senoidal, onde é possível destacar os blocos da malha seletiva em frequência  $\beta(s)$  e a malha de amplificação  $A(s)$ .

A partir do diagrama apresentado na Figura 1 pode-se encontrar a função de transferência do sistema (1).

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 - A(s)\beta(s)} \quad (1)$$

Em que  $A_f$  é o ganho com realimentação positivo,  $A(s)$  é a função de transferência da malha amplificadora e  $\beta(s)$  é a função de transferência da malha seletiva em frequência.

Assim a equação do ganho de malha aberta do sistema pode ser escrita como:

$$L(s) = A(s)\beta(s) \quad (2)$$

E tem-se também que a equação característica do sistema é dada por:

$$1 - A(s)\beta(s) = 0 \quad (3)$$

Reescrevendo (3) em função de  $\omega_0$ , que é a frequência em que o ganho de malha  $A\beta$  é unitário, tem-se:

$$L(j\omega_0) = A(j\omega_0)\beta(j\omega_0) = 1 \quad (4)$$

A partir de (4) pode-se observar que:

$$Re\{L(j\omega_0)\} = 1 \quad (5)$$

$$Im\{L(j\omega_0)\} = 0 \quad (6)$$

Ou seja, na frequência  $\omega_0$  a fase do ganho de malha será zero ou múltipla de  $2\pi$  e a amplitude do ganho de malha será unitária. Essas condições são conhecidas como Critério de Barkhausen (BARKHAUSEN, 1935).

O critério de Barkhausen é de extrema importância para que se tenha um oscilador senoidal, mas não garante que as oscilações permanecerão. Logo, precisa-se garantir que os polos do sistema estejam do no semiplano direito do plano complexo, ou seja, o ganho de malha

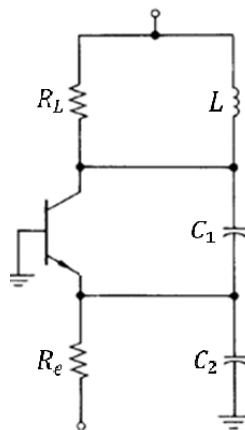
$A\beta$  deve ser um pouco maior que 1 ao atingir a frequência  $\omega_0$ , isso garantirá a oscilação na saída.

Essa condição é usada para manter as oscilações de forma teórica. Na prática vários fatores externos influenciam diretamente em um sistema real, como por exemplo a temperatura, que pode alterar o valor real de algum componente do circuito, tendo em vista que esses osciladores são projetados utilizando componentes como capacitores, resistores, transistores e indutores. Isso influenciará diretamente na condição de Barkhausen e podem causar distorções na forma de onda da tensão de saída, ou até mesmo cessar a oscilação. Para que isso não ocorra é necessário um oscilador que garanta a oscilação para a maior faixa de valores possível para esses componentes, e isso pode ser feito por meio do mecanismo de controle de amplitude proporcionado pela característica não-linear do transistor, o que caracteriza o oscilador como autolimitados (SEDRA; SMITH, 2015).

Os osciladores senoidais são classificados de acordo com a sua malha seletiva em frequência e sua malha de amplificação. Dentre os diversos osciladores que existem, tem-se o oscilador Colpitts, que foi o escolhido para este trabalho.

O oscilador Colpitts consiste em uma malha seletiva em frequência formada por um circuito sintonizado LC com um divisor de tensão capacitivo e uma malha de amplificação formada por transistor bipolar ou por um FET. Esse oscilador tem como principais vantagens alta estabilidade, facilidade de ajuste de frequência e confiabilidade na geração de ondas senoidais puras, entretanto, pode-se necessitar de componentes de alta exatidão para frequências muito específicas. A seguir, na Figura 2, está representado o circuito do oscilador Colpitts.

Figura 2 - Diagrama elétrico do oscilador Colpitts.

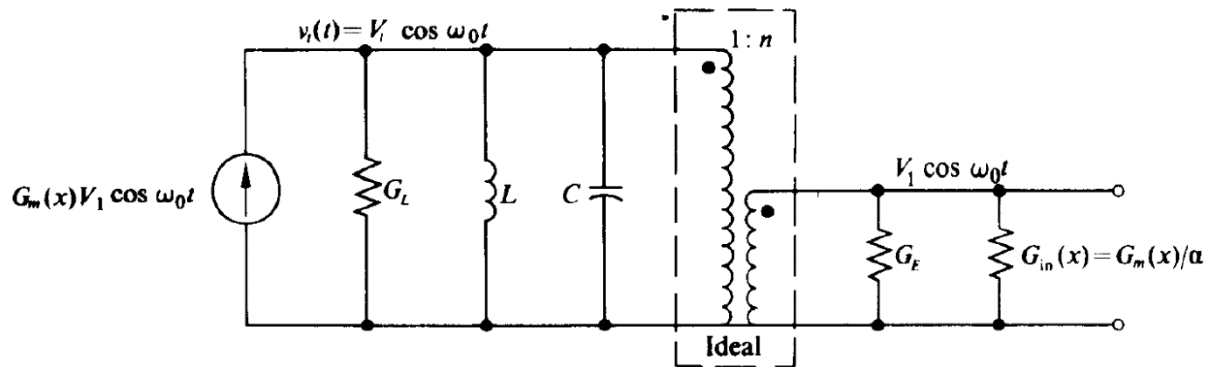


Fonte: Adaptado de (CLARK; HESS, 1971).

A Figura 2 mostra um oscilador Colpitts formado por um transistor bipolar de junção (TBJ) responsável pela amplificação e pela malha seletiva em frequência formada pelo circuito sintonizado  $LC$  composto pelo indutor  $L$  e pelo divisor capacitivo com  $C_1$  e  $C_2$ . Tem-se também os resistores  $R_L$  e  $R_e$  responsáveis pela polarização do TBJ e pela limitação da corrente  $i_e$ .

Para determinar os parâmetros do oscilador é utilizado o modelo para grandes sinais como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Modelo para grandes sinais para um oscilador Colpitts.



Fonte: Adaptado de (CLARK; HESS, 1971).

O modelo apresentado na Figura 3 é válido para quando o transistor mostrado na Figura 2 não está saturado. Para o modelo apresentado, tem-se que  $n$  será dado por:

$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (7)$$

O fator de qualidade será determinado por:

$$Q = CR_L\omega_0 \quad (8)$$

A expressão do ganho de malha unitário é dada por:

$$\frac{G_m(x)}{g_{mQ}} \approx \frac{G_L}{g_{mQ}n} \quad (9)$$

Onde  $G_m(x)$  é a transcondutância para grandes sinais,  $G_L$  é o inverso de  $R_L$  e  $g_m$

é a transcondutância para pequenos sinais e é dada por:

$$g_m = \frac{g_{in}}{\alpha} \quad (10)$$

Onde  $g_{in}$  é a condutância de entrada no emissor e  $\alpha$  é a relação entre a corrente de coletor e a corrente de emissor do transistor.

A frequência de oscilação é dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{eq}}} \quad (11)$$

Sendo  $C_{eq}$  a capacitância equivalente, que é dada por:

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (12)$$

Uma das maneiras de verificar as limitações e o desempenho deste tipo de oscilador é alterando os valores de seus componentes, como por exemplo o valor da capacitância equivalente  $C_{eq}$ , e observar o comportamento da tensão de saída assim como sua frequência de oscilação. Essa variação pode ser provocada ao acrescentar uma capacitância adicional em paralelo com um dos capacitores do divisor de tensão capacitivo. Neste trabalho essa capacitância adicional será a do sensor capacitivo que terá seu princípio de funcionamento explicado a seguir.

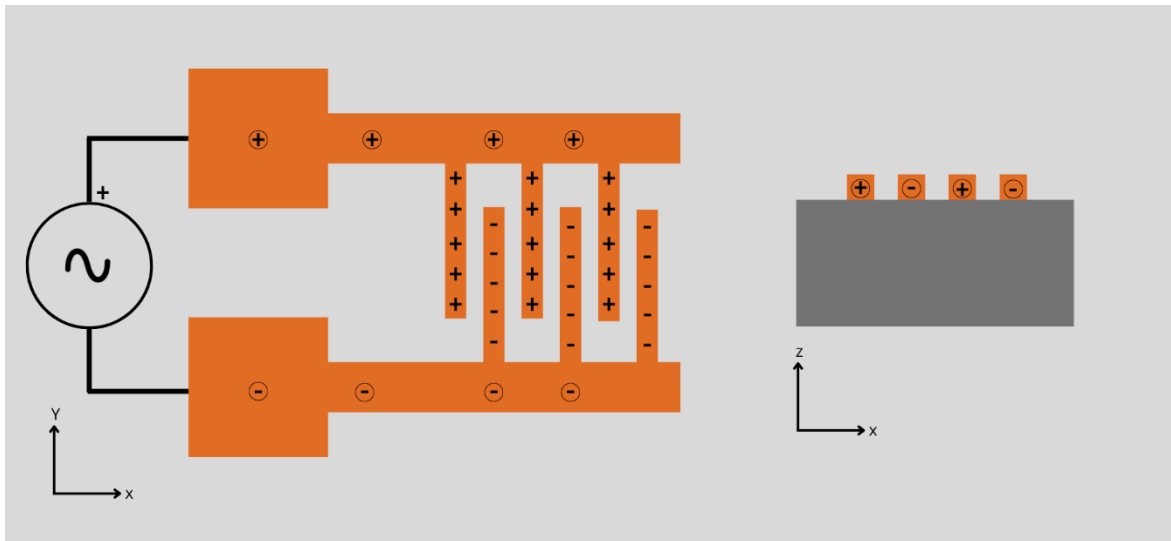
## 2.2 SENSOR CAPACITIVO

Como mencionado no Capítulo 1, os sensores capacitivos têm como princípio de funcionamento a capacidade de detectar e medir variações provocadas na sua capacitância (BECKER, 1996). Porém existem vários tipos de geometrias para esse tipo de dispositivo (SILVA, 2023).

Dentre as geometrias existentes para os sensores capacitivos, a que será adotada nesse trabalho será a geometria planar com transdutor interdigitado como é mostrado na Figura 5.



Figura 4 - Esquemático de um sensor capacitivo planar com transdutor interdigitado.



Fonte: (Autor, 2024).

Os sensores capacitivos planares são amplamente utilizados para detectar a presença e medir a quantidade de uma substância. O seu princípio de funcionamento se baseia na capacidade de armazenamento de cargas elétricas entre eletrodos carregados positivamente e negativamente de forma alternada entre eles e separados por um dielétrico. Essa estrutura do sensor é chamada de transdutor interdigitado. Esses eletrodos, também chamados de hastes, devem ter dimensões precisamente definidas e espaçamento uniforme entre si. O número de hastes pode variar de acordo com o projeto do sensor (BISHOP, 2007).

Ao se aplicar um nível de tensão aos eletrodos do sensor, cria-se um campo elétrico entre eles. Esse campo elétrico gera uma capacitância que está relacionada diretamente à área dos eletrodos e a constante dielétrica do material dielétrico entre eles (BISHOP, 2007).

Quando algum objeto se aproxima do sensor, ocorre uma variação nas propriedades dielétricas do meio entre os eletrodos e conseqüentemente a capacitância do sensor. A partir dessa variação de capacitância pode-se obter informações sobre o objeto ou substância analisada (BISHOP, 2007).

A equação que descreve o comportamento desse tipo de sensor capacitivo planar consiste na capacitância  $C$  em função das suas características geométricas e das propriedades do dielétrico. A capacitância pode ser escrita como mostra a Equação 13:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (13)$$

Em que  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do ar,  $\epsilon_r$  é a permissividade elétrica do dielétrico entre os eletrodos do sensor,  $A$  é a área das placas e  $d$  é a distância entre elas.

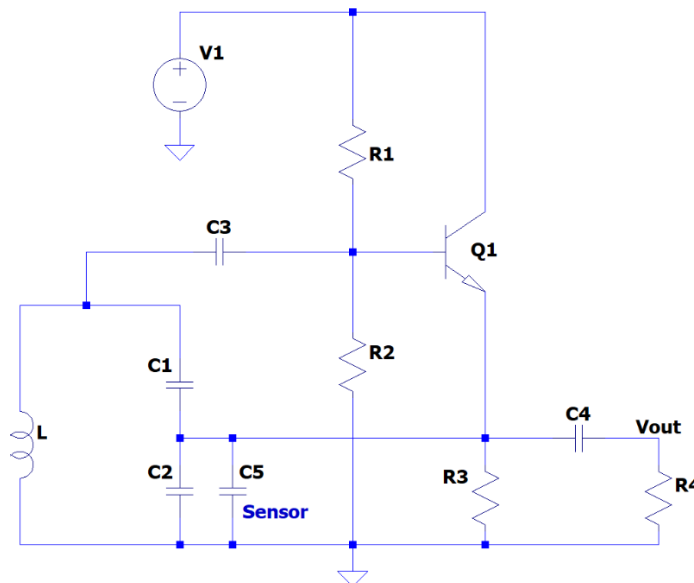
Dentre as grandezas a serem levadas em consideração para que se possa projetar um sensor dessa natureza estão a permissividade elétrica relativa ou constante dielétrica, a condutividade elétrica do material utilizado e a frequência de ressonância do sensor.

Neste trabalho será apresentada uma aplicação envolvendo esses dois assuntos abordados neste capítulo, osciladores senoidais com topologia Colpitts e sensores capacitivos planares, em que o desempenho do oscilador poderá ser analisado por meio de um osciloscópio mediante as variações de capacitância na sua malha seletiva em frequência provocadas por alterações na permissividade do meio detectadas pelo sensor capacitivo.

## 2.3 CONEXÃO ENTRE O OSCILADOR SENOIDAL E O SENSOR CAPACITIVO

A ligação entre o sensor capacitivo e o oscilador senoidal será feita de uma maneira em que a capacitância do sensor influencie diretamente na capacitância equivalente da malha seletiva em frequência, a ligação mais apropriada é em paralelo, como mostra a Figura 6.

Figura 5 - Ligação entre Oscilador e Sensor.



Fonte: (Autor,2024).

A partir da ligação em paralelo entre os capacitores  $C_2$  e  $C_5$ , com  $C_5$  representando a capacitância do sensor, tem-se dessa associação:

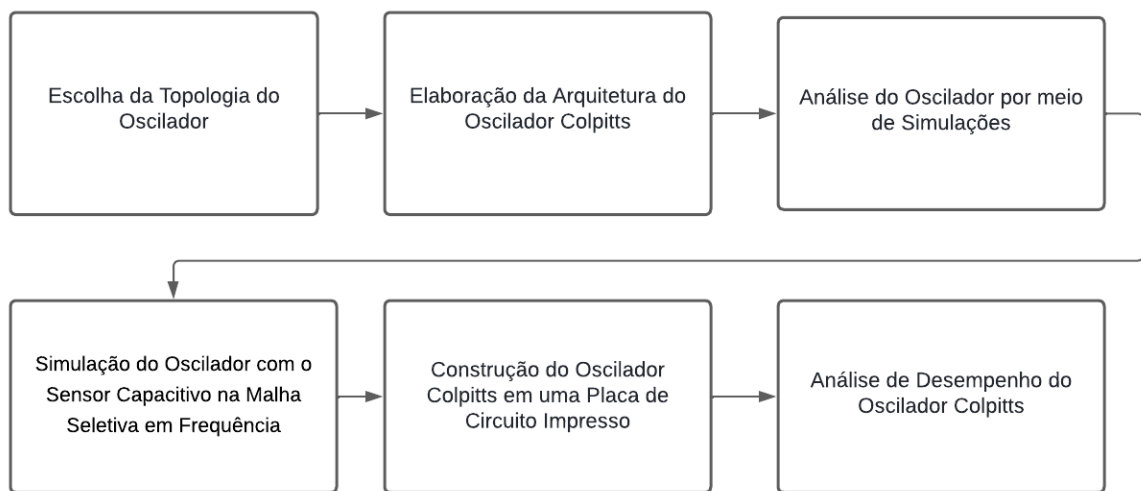
$$C_2 // C_5 = C_2 + C_5 \quad (14)$$

A metodologia aplicada para o desenvolvimento deste trabalho será apresentada no capítulo a seguir.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais, instrumentos e os métodos utilizados para a análise de desempenho e construção do oscilador Colpitts com sensor capacitivo na malha seletiva em frequência. A metodologia adotada neste trabalho é dividida em 6 etapas, como mostrado na Figura 6:

Figura 6 - Fluxograma que mostra as etapas que descrevem a metodologia aplicada.



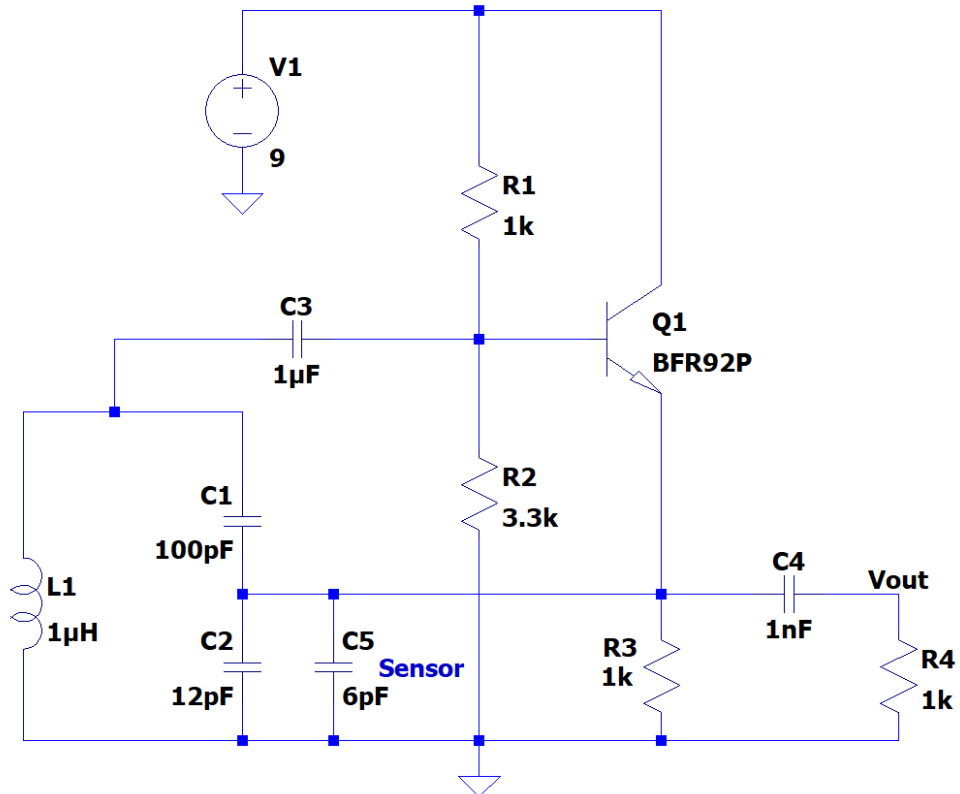
Fonte: (Autor, 2024).

A seguir serão explicados cada um dos procedimentos adotados durante a realização do trabalho em cada uma das etapas citadas na Figura 6.

#### 3.1 ESCOLHA DA TOPOLOGIA DO OSCILADOR COLPITTS

A topologia adotada para a elaboração do oscilador foi escolhida visando a melhor opção para a inserção do sensor de forma que a variação da sua capacitância influenciasse diretamente a frequência de oscilação, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Esquemático do oscilador Colpitts com o sensor capacitivo elaborado no LTSpice.



Fonte: Adaptado de (CLARK; HESS, 1971).

O circuito mostrado na Figura 7 mostra um oscilador Colpitts adaptado em relação a topologia apresentada na Figura 2, pois a sua malha de amplificação tem o transistor atuando como amplificador na configuração de coletor comum com o circuito de polarização utilizando um divisor de tensão formado pelos resistores  $R_1$  e  $R_2$ . A malha seletiva em frequência é formada pelo indutor  $L_1$  em paralelo com os capacitores  $C_1$  e  $C_2$ , tem-se também os capacitores  $C_3$  e  $C_4$  que são capacitores de acoplamento, o resistor  $R_3$  serve para limitar a corrente de emissor e o resistor  $R_4$  é a resistência de carga. O transistor utilizado foi o BFR92P da *Infineon* com uma frequência de transição da ordem de GHz e com encapsulamento do tipo *Surface Mounted Devices* (SMD), pois para componentes que atuam em altas frequências esse tipo de encapsulamento se torna mais viável.

### 3.2 ELABORAÇÃO DA ARQUITETURA DO OSCILADOR COLPITTS

Inicialmente foi necessário escolher a frequência de oscilação adequada para a elaboração da arquitetura do oscilador. Com base nos parâmetros  $S_{11}$  analisados por meio de um NanoVNA conectado ao sensor capacitivo, tem-se que a frequência apropriada para o trabalho é a de 50 MHz, pois ela se encontra em uma faixa de frequência em que a capacitância do sensor se mantém constante para ambas as permissividades dos meios em que ele será testado, o ar e a água, e pelo fato de que nessa frequência os valores dos componentes passivos do circuito não ficam com valores muito pequenos e mais suscetíveis a erros. A faixa de frequência em que essa condição é atendida é entre 10 MHz e aproximadamente 100 MHz.

O próximo passo é projetar o oscilador tomando como referência a frequência de 50 MHz. Partindo do cálculo da frequência de ressonância como mostrado na Equação 1, substituindo  $\omega_0$  por  $2\pi f_0$  e isolando  $f_0$  tem-se a Equação 15.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}} \quad (15)$$

O próximo passo é escolher um indutor com valor relativamente baixo mediante a ordem de grandeza elevada da frequência de ressonância do oscilador. Escolhendo um indutor de 1 uH e substituindo  $f_0$  por 50 MHz:

$$50 \cdot 10^6 = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-6}C_{eq}}} \quad (16)$$

Agora isolando  $C_{eq}$  tem-se:

$$C_{eq} = 10,13 \text{ pF} \quad (17)$$

Com  $C_{eq}$  calculado e adotando  $C_1$  com o valor de 100 pF, pode-se encontrar  $C_2$  por meio da Equação 12:

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (18)$$

$$10,13 \cdot 10^{-12} = \frac{100 \cdot 10^{-12} C_2}{100 \cdot 10^{-12} + C_2} \quad (19)$$

$$C_2 = 11,27 \text{ pF} \approx 12 \text{ pF} \quad (20)$$

Com os valores dos capacitores e do indutor da malha seletiva em frequência determinados resta apenas determinar os valores das resistências da polarização do transistor para que os valores de tensão entre seus terminais e as correntes de base e de coletor fiquem dentro da faixa de operação determinada pelo *datasheet* do fabricante.

Nas informações disponibilizadas pelo fabricante, têm-se que a tensão entre coletor e emissor ( $V_{CE}$ ) deve ser inferior a 20 V, que a tensão entre emissor e base ( $V_{EB}$ ) deve ser inferior a 2,5 V, que a corrente de coletor ( $I_C$ ) deve ser inferior a 30 mA e que a corrente de base ( $I_B$ ) deve ser inferior a 4 mA. Para que essas condições sejam atendidas a resistência de  $R_1$  foi de 1 k $\Omega$ , assim como os resistores  $R_3$  e  $R_4$ , e a do resistor  $R_2$  foi de 3,3 k $\Omega$ .

Os capacitores  $C_3$  e  $C_4$  são capacitores de acoplamento com valores de 1  $\mu\text{F}$  e 1 nF respectivamente.

Tabela 1 - Componentes utilizados e seus respectivos valores.

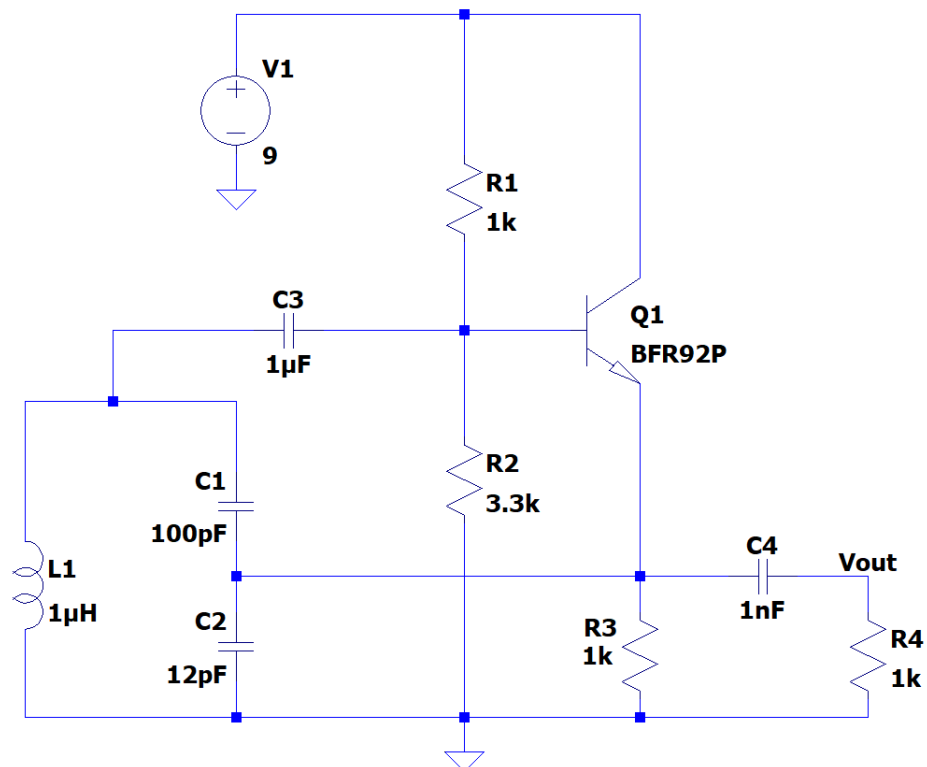
Componente	Valor
$R_1$	1 k $\Omega$
$R_2$	3,3 k $\Omega$
$R_3$	1 k $\Omega$
$R_4$	1 k $\Omega$
$L$	1 $\mu\text{H}$
$C_1$	100 pF
$C_2$	12 pF
$C_3$	1 $\mu\text{F}$
$C_4$	1 nF
TBJ	BFR92P

Fonte: (Autor, 2024).

### 3.3 ANÁLISE DO OSCILADOR POR MEIO DE SIMULAÇÕES

Com os valores dos componentes calculados, o próximo passo foi a simulação do oscilador senoidal no *software LTSpice* para a verificação do seu funcionamento, a Figura 8 mostra o esquemático elaborado na interface do *software*.

Figura 8 - Esquemático do oscilador Colpitts elaborado no LTSpice.



Fonte: (Autor, 2024).

Após a simulação do esquemático da Figura 8, e a verificação de seu funcionamento, o próximo passo foi a simulação do oscilador Colpitts com o sensor capacitivo representado por um capacitor comum na malha seletiva em frequência.

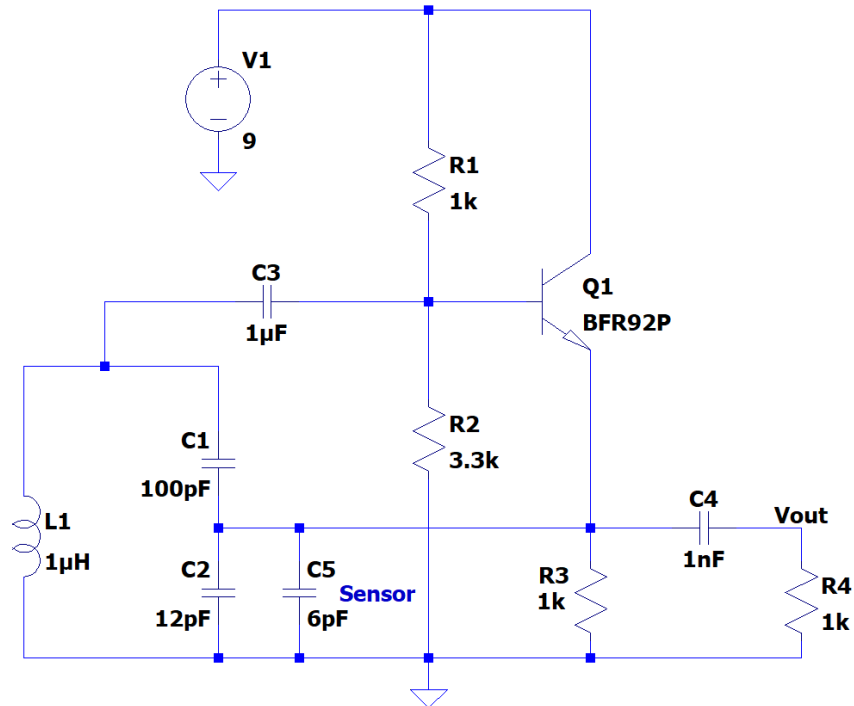
### 3.4 SIMULAÇÃO DO OSCILADOR COM O SENSOR CAPACITIVO NA MALHA SELETIVA EM FREQUÊNCIA

O próximo passo é fazer a simulação inserindo o sensor capacitivo  $C_5$  em paralelo com o capacitor  $C_2$  com uma capacitância de aproximadamente 6 pF, pois essa capacitância foi a



aferida nos testes feitos com esse sensor ao ar livre. O esquemático que simula o oscilador atuando em conjunto com o sensor capacitivo é mostrado na Figura 9.

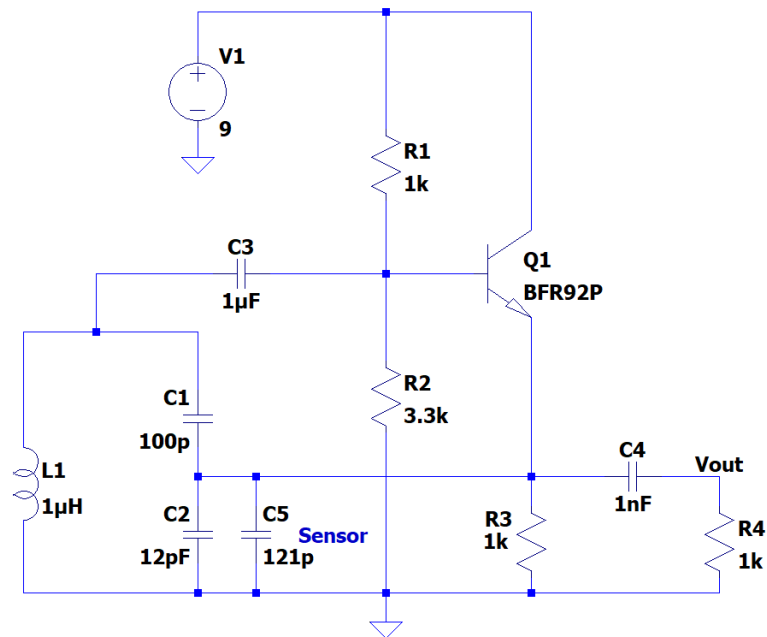
Figura 9 - Esquemático do oscilador Colpitts com o sensor capacitivo.



Fonte: Adaptado de (CLRAK; HESS, 1971).

Agora a simulação será feita para uma capacitância  $C_2$  de aproximadamente 121 pF, que é a capacitância do sensor referente à quando a permissividade do meio entre os eletrodos é a da água como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Esquemático do oscilador senoidal com o sensor capacitivo totalmente submerso em água.



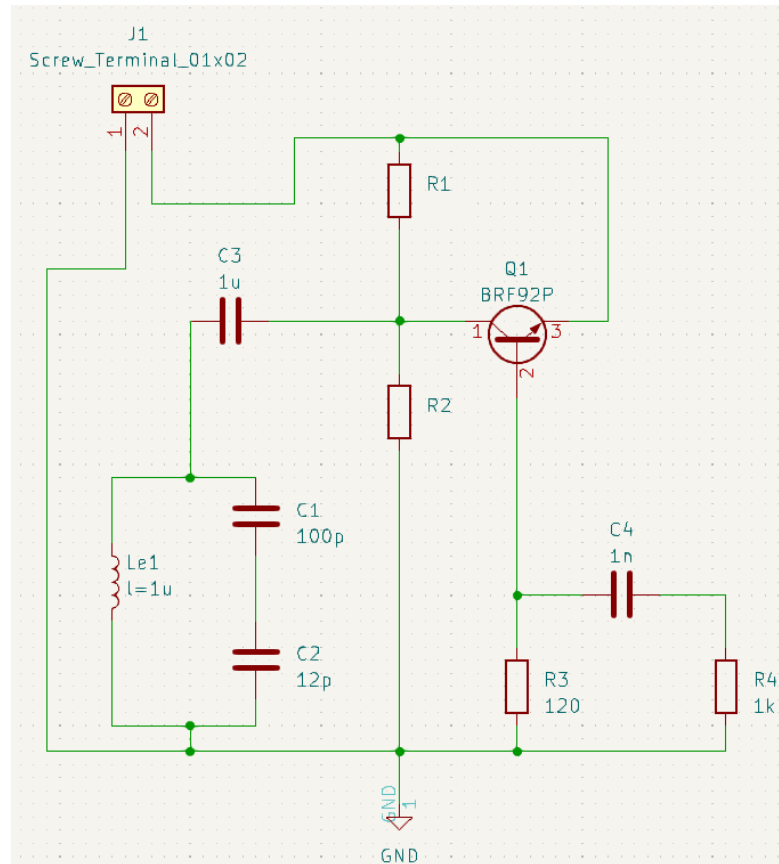
Fonte: Autor (2024).

As simulações são muito importantes para a realização do trabalho, pois servem como ferramenta de teste para analisar possíveis erros ou fazer ajustes sem desperdiçar materiais. Com as simulações realizadas e a próxima etapa é a construção física do oscilador.

### 3.5 CONSTRUÇÃO DO OSCILADOR COLPITTS EM UMA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

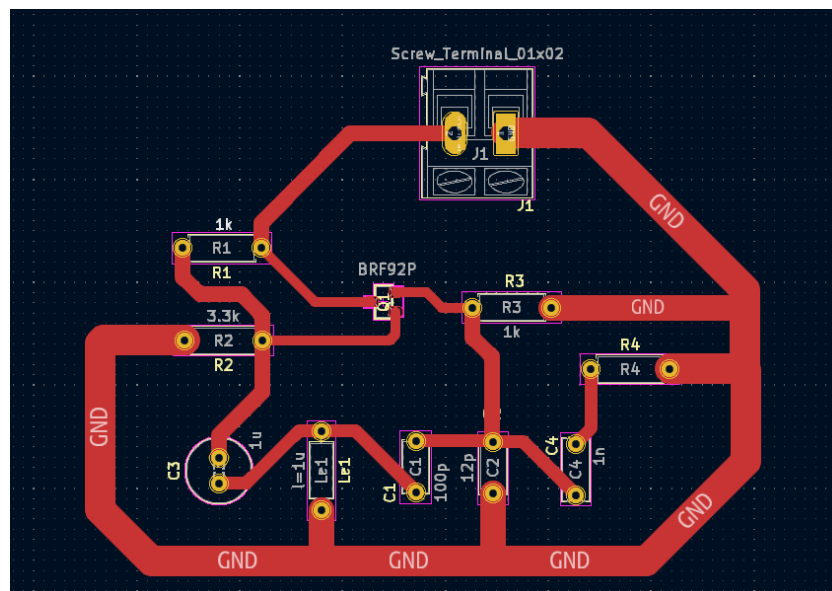
O próximo passo foi elaborar a placa de circuito impresso utilizando o *software KiCad*, o qual propicia a criação do *layout* necessário para a construção do oscilador em uma placa de RF4. A Figura 11, a seguir, mostra o esquemático do oscilador na interface do *KiCad* e a Figura 12 mostra o *layout* das conexões que serão feitas em uma placa de circuito impresso, que possui trilhas condutoras com conexões elétricas estáveis além de reduzir o risco de mal contato entre as ligações (RIGO, 2020).

Figura 11 - Esquemático do oscilador Colpitts elaborado no KiCad.



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 12 - Layout do oscilador Colpitts elaborado no KiCad.



Fonte: (Autor, 2024).

Após o *layout* do oscilador ser criado no *KiCad*, o próximo passo é utilizar uma Máquina *Fiber Laser* para fazer a impressão do circuito em uma placa de RF4.

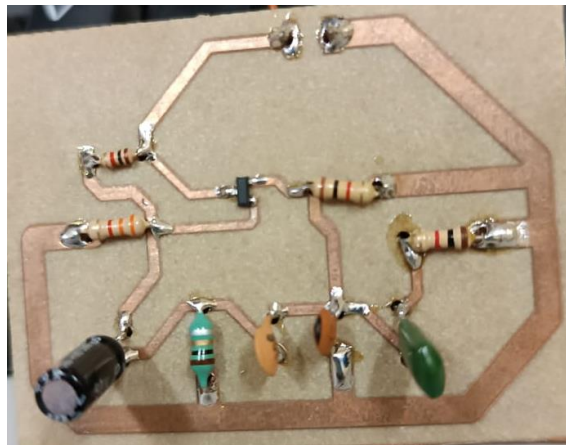
Figura 13 - Máquina Fiber Laser CNC.



Fonte: Adaptado de (*Iron Laser CNC*, 2024).

A Figura 13 mostra a máquina utilizada no processo descrito anteriormente. O próximo passo é conectar, na placa de circuito impresso, os componentes selecionados para o oscilador, como mostra a Figura 14.

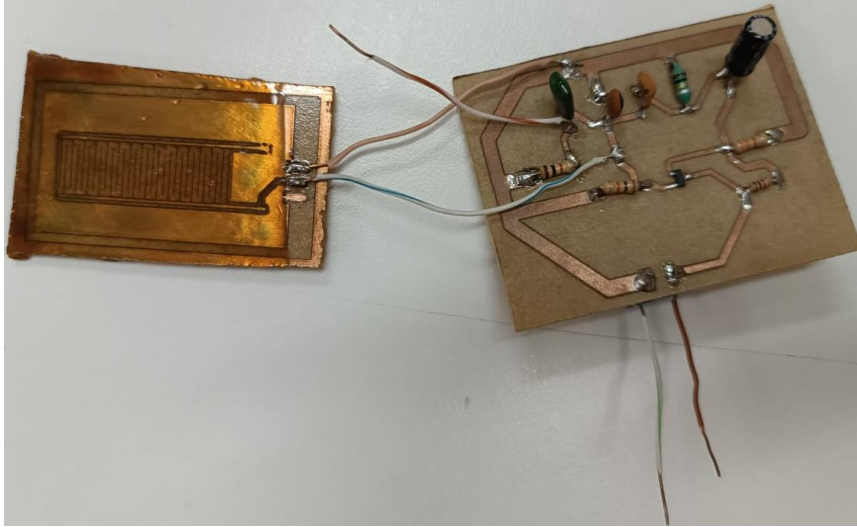
Figura 14 - Oscilador Colpitts montado na placa de circuito impresso.



Fonte: (Autor, 2024).

O passo seguinte é verificar se as conexões estão corretas com o auxílio de um multímetro para o teste de continuidade. Com tudo conectado corretamente, pôde-se inserir o sensor capacitivo em paralelo com o capacitor  $C_2$ . A Figura 15 mostra como fica o circuito completo.

Figura 15 - Oscilador Colpitts com o sensor capacitivo adicionado a sua malha seletiva em frequência.



Fonte: (Autor, 2024).

Como também é mostrado na Figura 15, o sensor foi envernizado para que não houvesse um curto-circuito no momento de fazer a análise com água sobre o sensor. Pois a água utilizada não era água deionizada e contém sais que a tornam condutora.

Com o circuito funcionando, o passo seguinte foi observar a forma de onda na saída do oscilador ao ar livre e registrar as variações de amplitude e frequência ao colocar o sensor com os seus eletrodos totalmente submersos em água.

Para a elaboração do trabalho foram utilizados também os seguintes instrumentos e componentes, como mostram as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Instrumentos utilizados.

<b>Instrumentos</b>
Fonte de Alimentação Minipa MPL - 3303
Osciloscópio KEYSIGHT DSO - X2024A
Multímetro Digital Agilent – U1252A
Estação de solda – TOYO TS - 920

Fonte: (Autor, 2024).

Tabela 3 - Materiais e componentes utilizados.

Componentes/Materiais	
Resistores	3 resistores de 1 k $\Omega$ e 1 resistor de 3,3 k $\Omega$
Capacitores	1 capacitor de 1 $\mu$ F, 1 capacitor de 1nF, 1 capacitor de 100 pF e 1 capacitor de 12 pF
Indutores	1 indutor axial de 1 $\mu$ H
Transistores	1 BFR92P
Conectores	1 conector Borne Kre 2 vias mini de parafuso 5.08 mm
Material para PCB	1 placa de RF4

Fonte: (Autor, 2024).

As Figuras 16, 17, 18 e 19, a seguir, mostram alguns dos instrumentos utilizados para a realização do trabalho:

Figura 16 - Fonte de Alimentação Minipa MPL - 3303.



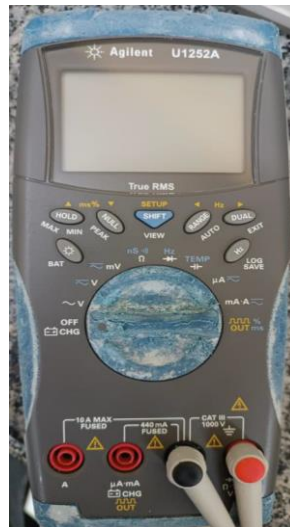
Fonte: Autor, 2024.

Figura 17 - Osciloscópio KEYSIGHT DSO - X2024A.



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 18 - Multímetro Digital Agilent – U1252A



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 19 - Estação de solda – TOYO TS - 920.



Fonte: ACM Eletrônica.

### 3.6 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OSCILADOR COLPITTS

A partir dos resultados obtidos nas simulações e da construção do oscilador na placa de circuito impresso para a frequência determinada, pode-se dar continuidade ao trabalho com a análise de desempenho do oscilador Colpitts com a utilização do osciloscópio mostrado na Figura 17. A análise ocorre de forma comparativa entre os valores de amplitude e frequência obtidos por meio das simulações e os valores obtidos na parte prática, assim como a análise do

comportamento da frequência mediante o aumento da permissividade do dielétrico entre os eletrodos do sensor capacitivo.

No próximo capítulo serão feitas as análises dos resultados obtidos de forma prática e simulada, a partir da metodologia descrita nesta etapa.



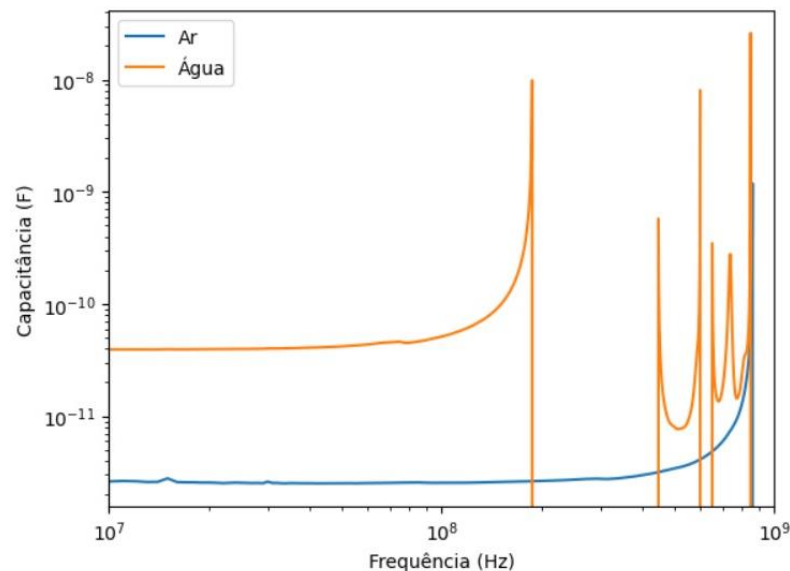
## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos ao se adotar a metodologia apresentada anteriormente.

### 4.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OSCILADOR COLPITTS SEM O SENSOR CAPACITIVO FEITA POR MEIO DE SIMULAÇÕES

O oscilador senoidal foi projetado com base nas informações da faixa de frequência e capacitâncias obtidos a partir da análise do parâmetro  $S_{11}$  que é um dos parâmetros de espalhamento do sensor capacitivo, como citado anteriormente. A Figura 20 mostra a faixa de frequência em que a capacitância permanece constante para ambos os meios para os quais o sensor foi testado.

Figura 20 - Relação entre frequência e capacitância do sensor.

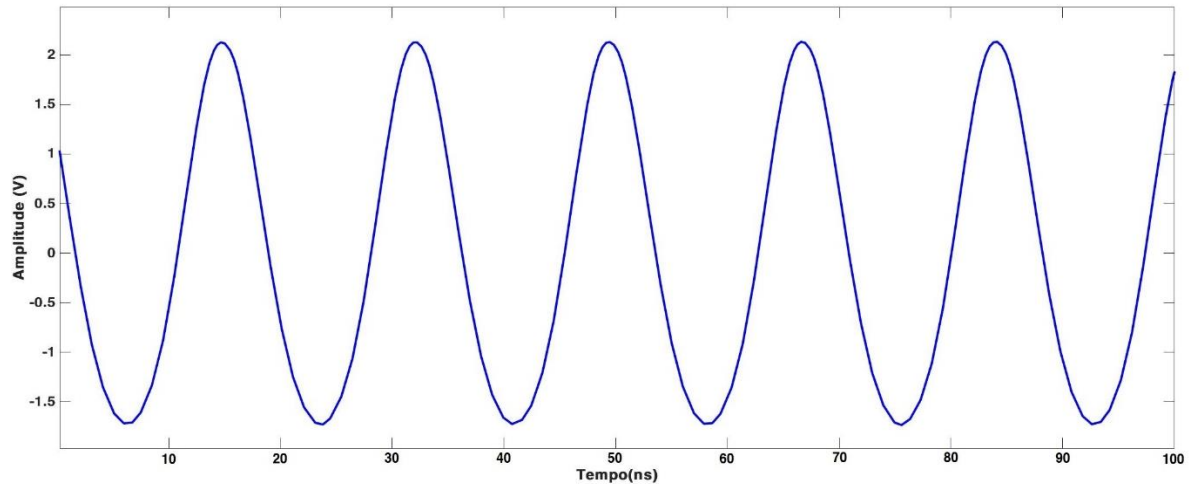


Fonte: (Autor, 2024).

Pode-se constatar, pela Figura 20, que para uma faixa de frequência entre 10 MHz e 100 MHz, tem-se uma capacitância praticamente constante e é com base nisso que foram dimensionados os componentes para a elaboração da arquitetura do oscilador para uma frequência de 50 MHz.

Inicialmente, analisou-se a forma de onda da saída  $V_{out}$ , a partir da simulação do esquemático da Figura 9 feita no *LTSpice*, que é mostrada na Figura 21.

Figura 21 - Forma de onda de tensão na saída do oscilador senoidal sem o sensor capacitivo integrado no circuito.



Fonte: (Autor, 2024).

Pelo Gráfico 2, observa-se que na saída  $V_{out}$  do oscilador tem o formato senoidal com amplitude maior que zero e uma frequência estável. E com valores de amplitude e frequências próximos ao dos valores de projeto. Como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Amplitude e a frequência de  $V_{out}$ .

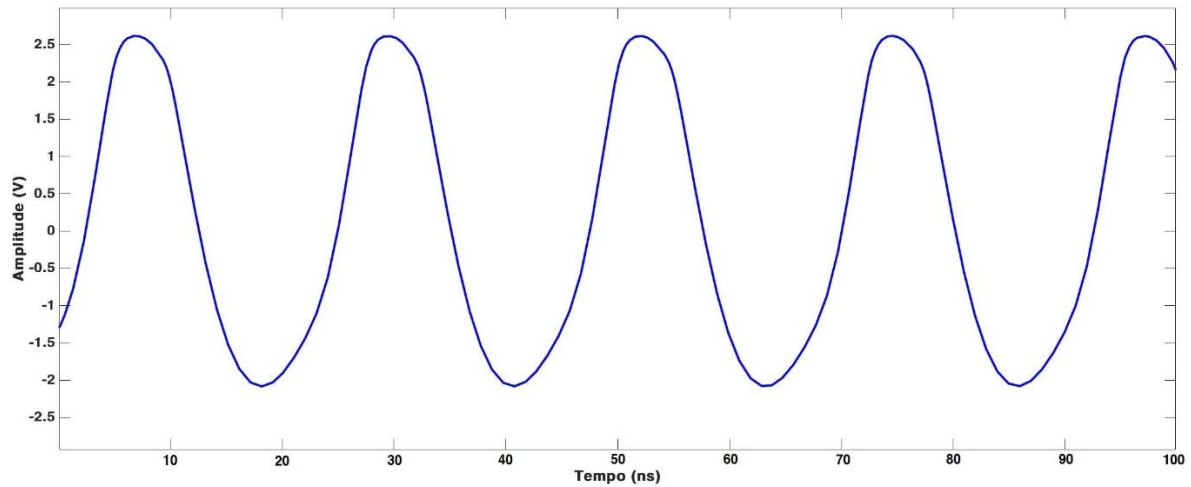
<b>Amplitude (V)</b>	<b>Frequência (MHz)</b>
2,13	55,05

Fonte: (Autor, 2024).

## 4.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OSCILADOR COLPITTS COM O SENSOR CAPACITIVO FEITA POR MEIO DE SIMULAÇÕES

Em seguida, a mesma análise foi feita a partir da simulação do esquemático mostrado na Figura 10, a forma de onda de  $V_{out}$  é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Forma de onda do sinal de saída Vout após a inserção do capacitor na malha seletiva em frequência do oscilador.



Fonte: (Autor, 2024).

Nota-se pela Figura 22 que a forma de onda é senoidal com amplitude diferente de zero e com poucas distorções, mesmo após a inserção do sensor, representado pela capacitância de 6 pF. Os valores de amplitude e frequência são apresentados na Tabela 5.

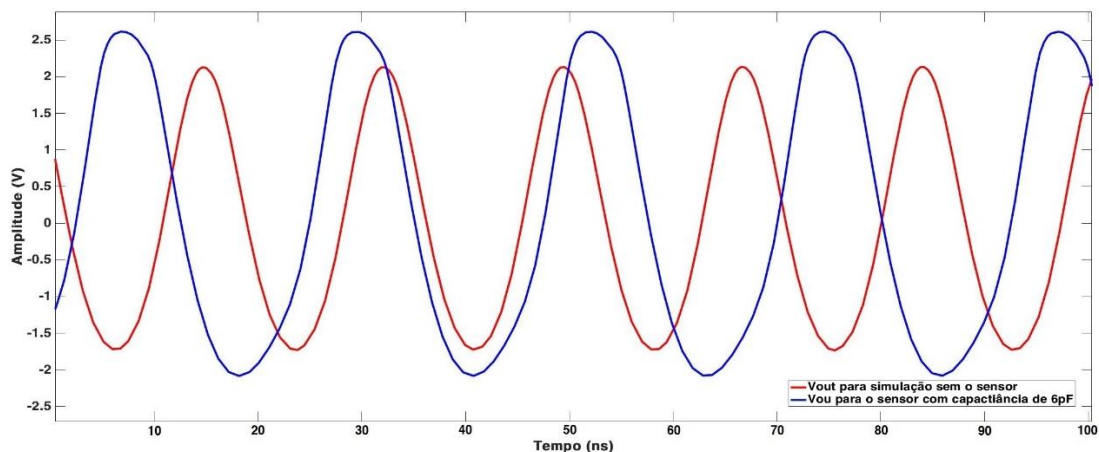
Tabela 5 - Valores da amplitude e da frequência de Vout após a inserção do sensor capacitivo no circuito.

Amplitude (V)	Frequência (MHz)
2,60	44,98

Fonte: (Autor, 2024).

A Figura 23, a seguir, mostra a comparação entre as duas formas de onda de saída para com e sem o sensor inserido na malha seletiva em frequência:

Figura 23 - Formas de onda de Vout antes e após a adição do sensor capacitivo ao oscilador.

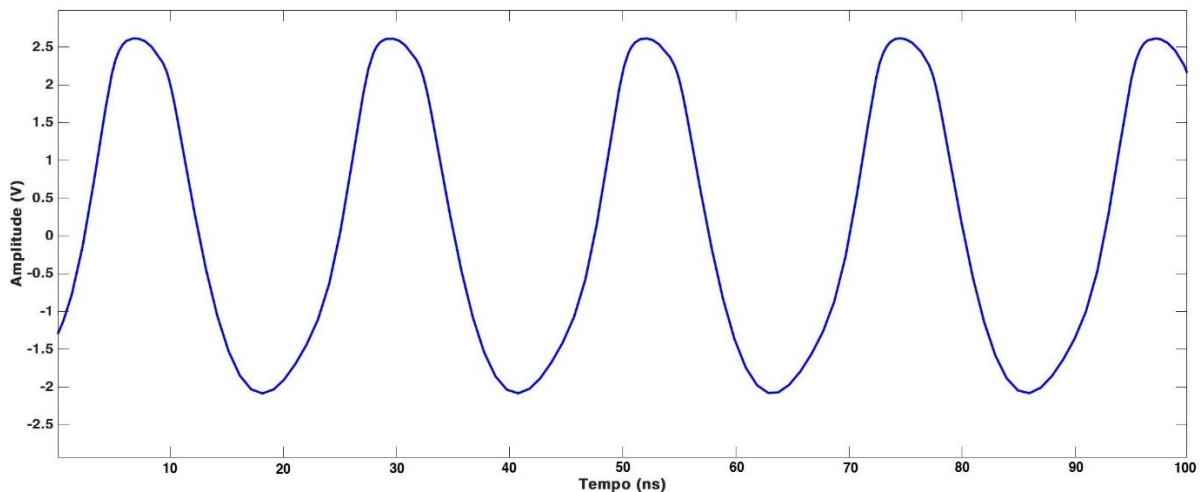


Fonte: (Autor, 2024).

Percebe-se pela Figura 23, uma diferença na amplitude, na frequência e fase entre as duas formas de onda. A forma de onda vermelha a saída  $V_{out}$  para a simulação do oscilador atuando sem o sensor, a forma de onda em azul mostra a saída  $V_{out}$  com o sensor inserido na malha seletiva em frequência do oscilador como uma capacitância simulada de 6 pF. O que condiz com o comportamento esperado mediante ao que foi exposto no Capítulo 3.

A próxima simulação diz respeito à análise da forma de onda de  $V_{out}$  para o aumento da capacitância do sensor quando submerso em água como mostrado na Figura 10. O resultado é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Forma de onda de  $V_{out}$  para o sensor capacitivo totalmente submerso em água.



Fonte: Autor (2024).

Constata-se, pela Figura 24, que a forma de onda é senoidal com amplitude diferente de zero, porém com um pouco de distorção mediante o aumento da capacitância equivalente utilizada para calcular a frequência de ressonância do oscilador. Os valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$  são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$  para o sensor totalmente submerso em água.

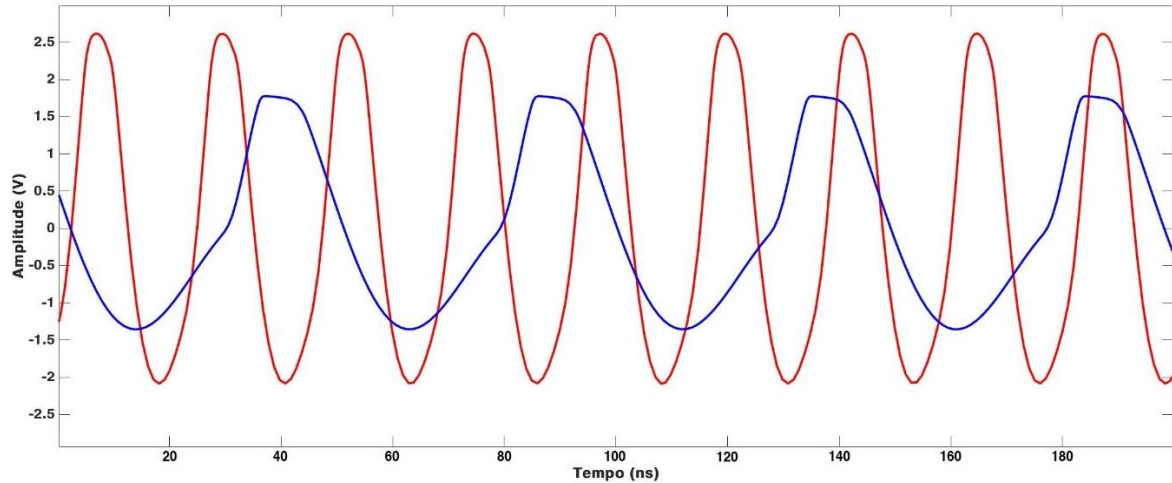
<b>Amplitude (V)</b>	<b>Frequência (MHz)</b>
1,77	20,48

Fonte: (Autor, 2024).

Com isso, pode-se observar uma mudança considerável na frequência e na amplitude da forma de onda de  $V_{out}$  quando o sensor está totalmente submerso em água, ou seja, a variação na permissividade entre os eletrodos pode ser identificada por meio da saída do oscilador. A

Figura 25 mostra o comparativo entre as formas de onda  $V_{out}$  simuladas, com o sensor ao ar livre e o sensor totalmente submerso em água.

Figura 25 - Comparação entre as formas de onda de saída do oscilador para o sensor capacitivo ao ar livre e totalmente submerso em água.



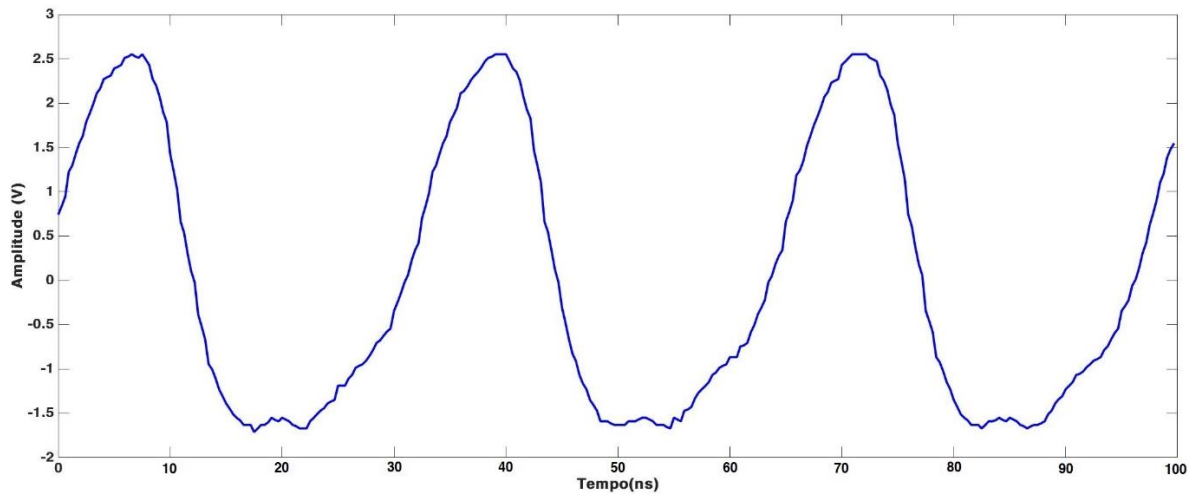
Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 25, nota-se que pelas simulações apresentadas nessa sessão, que existe uma diferença considerável entre os parâmetros amplitude e frequência na saída do oscilador senoidal quando o sensor capacitivo está detectando a presença de substâncias com permissividades diferentes, assim, as próximas análises realizadas neste capítulo são referentes a parte prática com ambos os elementos construídos fisicamente para que os testes finais possam ser realizados.

### 4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OSCILADOR COLPITTS SEM O SENSOR CAPACITIVO NA SUA MALHA SELETIVA EM FREQUÊNCIA

Para a parte prática do trabalho, primeiramente se observou a forma de onda na saída do oscilador com o auxílio de um osciloscópio e com o sensor capacitivo ainda não inserido em sua malha seletiva em frequência. A Figura 26 mostra a forma de onda de saída do oscilador para esse caso.

Figura 26 - Forma de onda de  $V_{out}$  sem a adição do sensor capacitivo a malha seletiva em frequência do oscilador Colpitts.



Fonte: Autor (2024).

A frequência de oscilação inicial e a amplitude foram valores aproximados aos apresentados na Tabela 7, contata-se também um aumento nas distorções na forma de onda, esses resultados diferem de forma considerável dos resultados adquiridos nas simulações. Isso se deve a presença de capacitâncias e indutâncias parasitas, que alteram as impedância do circuito assim como interferem seu ganho, além de ocasionar pequenas distorções harmônicas na forma de onda senoidal na saída do oscilador. Entretanto, mesmo com essas interferências a frequência aferida ainda se encontra dentro da faixa de frequência em que a capacitância do sensor permanece constante como mostrado na Figura 20, o que ainda valida o experimento.

Tabela 7 - Valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$ .

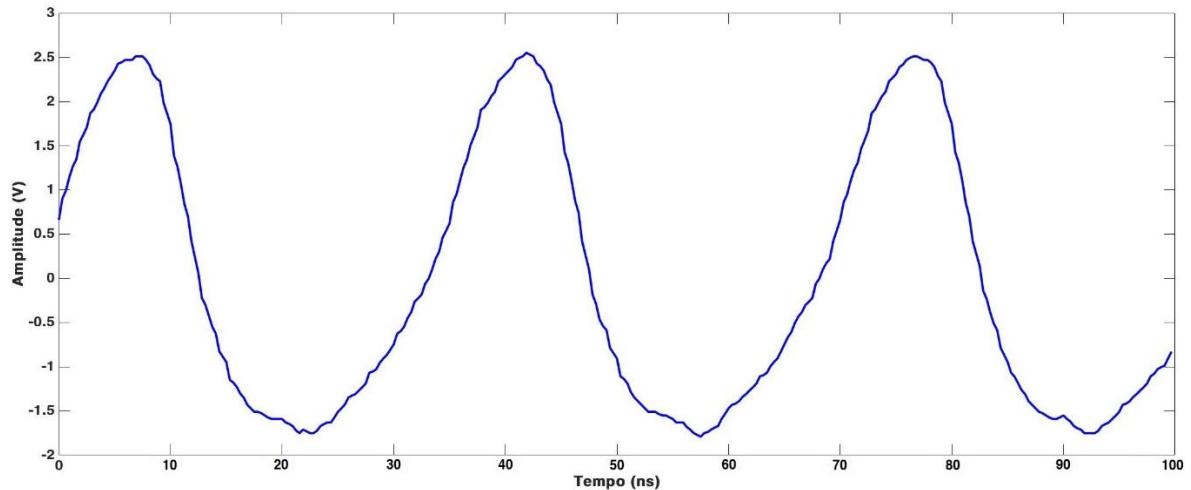
<b>Amplitude (V)</b>	<b>Frequência (MHz)</b>
2,55	32,32

Fonte: Autor (2024).

#### 4.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OSCILADOR COM O SENSOR CAPACITIVO NA MALHA SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM CAPACITÂNCIA DE 6 PF

Após inserir o sensor capacitivo na malha seletiva em frequência do oscilador Colpitts, com a alimentação DC de 9 V para a polarização do transistor e a ponta de prova do osciloscópio em  $C_2$ , dá-se início a análise do sinal de  $V_{out}$ . O gráfico observado da forma de onda senoidal na saída do oscilador, segue na Figura 27.

Figura 27 - Forma de onda de  $V_{out}$  após a adição do sensor capacitivo ao oscilador.



Fonte: Autor (2024).

Nota-se, pela Figura 27, que existe uma diferença entre os valores simulados vistos no Capítulo anterior, essa diferença ocorre devido à variação dos valores dos componentes e às capacitâncias parasitas que existem nos circuitos, que operam em frequências elevadas. Como resultado, tem-se um decréscimo tanto na amplitude quanto na frequência, apresentando um decréscimo de 7,03% na amplitude e um decréscimo de aproximadamente 3,47% para a frequência em relação aos dados levantados com o oscilador sem o sensor inserido em sua malha seletiva em frequência. Porém essa variação não invalida o experimento e está dentro do esperado, devido à relação de proporcionalidade inversa entre  $C_{eq}$  e  $f_0$ , como mostra a Equação 15. Os valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$  são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$ .

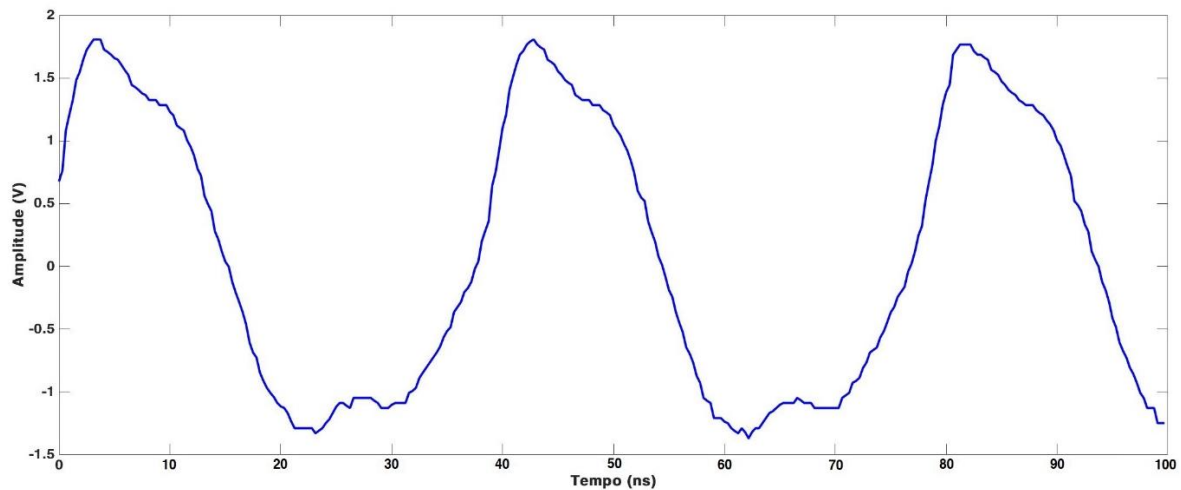
<b>Amplitude (V)</b>	<b>Frequência (MHz)</b>
2,51	28,57

Fonte: Autor (2024).

## 4.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OSCILADOR COM O SENSOR NA MALHA SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM UMA CAPACITÂNCIA DE 121 PF

O segundo teste é com o sensor submerso em água, até que os eletrodos sejam totalmente cobertos. Como a permissividade da água é 80 vezes maior que a permissividade do ar, espera-se que a capacitância aumente ainda mais e conseqüentemente altere ainda mais o valor de  $C_{eq}$ . A Figura 28 mostra o comportamento da tensão de saída  $V_{out}$  para esse novo teste.

Figura 28 - Forma de onda de  $V_{out}$  para o sensor totalmente submerso em água.



Fonte: Autor (2024).

Percebe-se pela Figura 28 que as distorções aumentaram ainda mais, porém os critérios para a oscilação e para uma amplitude diferente de zero continuam sendo satisfeitos. Esse comportamento já era esperando assim como constatados nos resultados analisados por meio de simulações. Os valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$  são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de amplitude e frequência de  $V_{out}$  para o sensor totalmente submerso em água.

Amplitude (V)	Frequência (MHz)
1,76	24,79

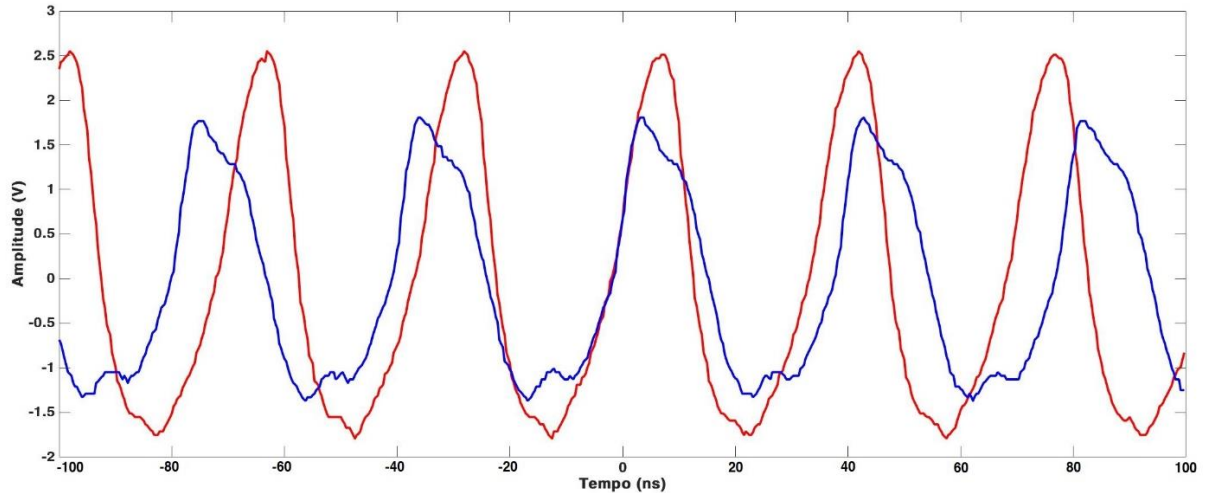
Fonte: Autor (2024).

A Figura 29 mostra o comparativo entre as formas de onda de saída do oscilador para ambas as capacitâncias referentes a diferença de permissividade do meio entre os eletrodos do



sensor. A forma de onda em vermelho mostra  $V_{out}$  para quando o sensor está ao ar livre e a forma de onda em azul mostra  $V_{out}$  para o sensor totalmente submerso em água.

Figura 29 - Comparação entre as formas de onda de  $V_{out}$  para o sensor ao ar livre e totalmente submerso.



Fonte: (Autor, 2024).

Constata-se pelos valores apresentados nas Tabela 8 e 9, que houve uma redução no valor de amplitude do sinal correspondente a 29,88% em relação a amplitude do sinal quando a permissividade entre os eletrodos do sensor era a do ar, que vale 1. Em relação à frequência, houve uma redução de aproximadamente 13,23% do valor aferido nas condições do experimento anterior. Essa variação se deve, novamente, ao aumento da permissividade do meio em que o sensor capacitivo está inserido, o que faz com que sua capacitância aumente e pela relação de proporcionalidade inversa que pode ser observada na Equação 13. Entretanto esses valores se aproximam dos valores simulados anteriormente e mostrado na Tabela 6, apresentando uma margem de erro de aproximadamente 0,56% para a amplitude e 21,04% para a frequência. Essa diferença também pode ser observada na Figura 29.

Outro ponto importante a se analisar é a distorção provocada na forma de onda pelo aumento da capacitância e pela ordem de grandeza da frequência. Isso se deve ao critério de Barkhausen e as variações das impedâncias do circuito, uma vez que para se ter uma onda senoidal pura na saída o módulo da equação do ganho de malha aberta, Equação (2), deve ser igual a 1. Quando o valor desse módulo for maior que 1, ainda haverá oscilação, mas não mais com uma onda senoidal pura, mas sim com distorções.

Embora os resultados levantados na parte prática do trabalho apresentem erros em relação aos resultados constatados nas simulações, eles são suficientes para atingir os objetivos mencionados no Capítulo 1.



## 5 CONCLUSÕES

A partir da análise feita no Capítulo anterior, pode-se concluir que o oscilador Colpitts desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado em conjunto com um sensor capacitivo em sua malha seletiva em frequência como uma alternativa, de baixo custo, para o analisador de rede vetorial (VNA) no que diz respeito a verificar o funcionamento do sensor para variações na capacitância entre os seus eletrodos, provocadas por alterações na permissividade do meio em que o mesmo está inserido como mostrado na Figura 29.

Com base nas simulações que fizeram parte da metodologia aplicada e descrita no Capítulo 3, pôde-se construir fisicamente um oscilador senoidal atuando com uma frequência de oscilação de 32,32 MHz, com uma amplitude de 2,55 V e apresentando uma forma de onda senoidal um nível de distorções aceitável. A diferença entre os resultados das simulações e os levantados com os testes práticos estão relacionadas as interferências e as capacitâncias parasitas e as variações de impedâncias do circuito devido a faixa de frequência de operação do circuito que está na ordem de dezenas de mega-hertz.

Ao inserir o sensor capacitivo e com a permissividade entre seus eletrodos sendo a do ar, que é um valor unitário. Constatou-se uma atenuação tanto na amplitude quanto na frequência do sinal de saída do oscilador, correspondente a 7,03% e a 3,47% respectivamente. E ao colocar o sensor em um recipiente de maneira em que seus eletrodos ficassem totalmente submersos em água, que tem uma permissividade 80 vezes maior que a do ar, constatou-se uma atenuação de 29,88% em relação a amplitude do sensor ao ar livre e uma atenuação de 13,23% em relação a frequência. Comportamento que também pôde ser observado nas simulações, mas com diferenças em seus valores.

Com isso, conclui-se que o oscilador Colpitts, em conjunto com um sensor capacitivo com transdutor interdigitado, apresenta um bom desempenho e pode ser utilizado como um instrumento alternativo ao analisador de redes vetoriais, ao se analisar os parâmetros de amplitude e frequência de saída por meio de um osciloscópio.

Com a apresentação das conclusões obtidas nesse trabalho, são destacadas na seção a seguir, algumas perspectivas para trabalhos futuros.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Algumas linhas de estudos podem ser seguidas a partir da metodologia e dos resultados obtidos com esse trabalho, como:

- Testes utilizando outras topologias de osciladores e outras geometrias para o sensor capacitivo.
- Otimização da construção do oscilador na placa de circuito impresso visando a diminuição das interferências por capacitâncias parasitas.
- Construção do oscilador utilizando componentes em *Surface Mount Devices* (SMD), pois esses componentes apresentam maior precisão para frequências elevadas.
- Realizar análises com o sensor imerso em substancias com permissividades diferentes.

## REFERÊNCIAS

ANDRADAE FILHO, A.; ANDRADE, T. **Sensores capacitivos, especificação em aplicações de processos industriais. Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais**, Uniube, 2020, pp. 1-6. ISSN N° 2675-6358.

ASHBOLT, N. J. **Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. Toxicology**, v. 198, n. 1-3, p. 229–238, maio 2004.

BARKHAUSEN, H. **Lehrbuch der Elektronen-Röhren und ihrer technischen Anwendungen**. 3. Leipzig: S. Hirzel, 1935.

BISHOP, R. H. **Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators: Fundamentals and Modeling**. 2ª. Ed. CRC Press, 2007. ISBN: 9780849392580.

CLARKE, **Kenneth K.**; HESS, **Donald T.** **Communication Circuits: Analysis and Design**. Addison-Wesley Publishing Company, 1971.

DU W. **Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies**. 1ª. ed. CRC Press, 2014. ISBN: 9781439812440.

IDIL, N. et al. **Whole cell based microcontact imprinted capacitive biosensor for the detection of Escherichia coli. Biosensors and Bioelectronics**, v. 87, p. 807–815, jan. 2017.

POP SEPTIMIU SEVER; VLAD, B. **LC Oscillator Design Used in Sensor Measurement Based on Embedded Technology**. 27 out. 2021.

QIU, T.; TEK, C. K. A.; HUANG, S. Y. **A Compact High-Resolution Resonance-Based Capacitive Sensor for Defects Detection on PCBAs**. IEEE Access, v. 8, p. 203758–203768, 2020.

RAHAMAN, R.; TAE KYU AN; HWA SUNG LEE. **A Battery-Free, Chipless, Highly Sensitive LC Pressure Sensor Tag Using PEDOT: PSS and Melamine Foam**. *IEEE sensors journal*, v. 21, n. 2, p. 2184–2193, 15 jan. 2021.

SILVA, C. W. **Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation**. 2<sup>a</sup>. ed. CRC Press, 2015. ISBN: 9781466506817.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic circuits seventh edition**. 2015.

WAFO TEKAM, R. B.; KENGNE, J.; DJUIDJE KENMOE, G. **High frequency Colpitts' oscillator: A simple configuration for chaos generation**. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 126, p. 351–360, set. 2019.