



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA



Eric Valero Carvalho da Silva

ANÁLISE COMPARATIVA DE OSCILADORES INDUTIVO  
RESSONANTE

DOURADOS-MS  
2018

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]

Eric Valero Carvalho da Silva

ANÁLISE COMPARATIVA DE OSCILADORES INDUTIVO  
RESSONANTE

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à banca examinadora da  
Faculdade de Engenharia da  
Universidade Federal da Grande  
Dourados para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Bessa Gibelli

DOURADOS-MS

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

S586a Silva, Eric Valero Carvalho Da  
Análise comparativa de osciladores indutivo ressonante / Eric Valero  
Carvalho Da Silva -- Dourados: UFGD, 2018.  
53f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Gerson Bessa Gibelli

TCC (Graduação em Engenharia de Energia) - Faculdade de  
Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados.

Inclui bibliografia

1. Oscilador. 2. LTSPICE IV. 3. Transmissão de energia. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

**ANÁLISE COMPARATIVA DE OSCILADORES INDUTIVO RESSONANTE**

Por

ERIC VALERO CARVALHO DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de ENGENHEIRO DE ENERGIA

Aprovado em: 17/07/2018



---

Prof. Dr. Gerson Bessa Gibelli  
Orientador – UFGD/FAEN



---

Prof. Dr. Etienne Biasotto – UFGD/FAEN



---

Mestre Anderson Ross Biasotto – UFGD

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2018



*Para as minhas avós Cleo e Deolinda e em memória de meus avôs Barros e Paulo  
por todo amor e apoio que me deram ao longo de minha vida.*

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]



## AGRADECIMENTOS

---

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades que tive e tenho em minha vida.

Ao meu pai Claudio Antonio Carvalho da Silva, minha mãe Mônica Valero Carvalho da Silva e minha tia Evelina Barbosa da Silva pela dedicação, carinho e amor com que me criaram. Além de estarem comigo tanto nos momentos bons e ruins de minha vida.

A Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, em especial o curso de Engenharia de Energia, pelo suporte do corpo docente, técnico e administrativo que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, pautado nos valores éticos aqui presentes.

Ao professor Jarbas Antônio Guedes que no ensino médio me incentivou a fazer engenharia e cuja extrema dedicação em suas aulas me auxiliaram a ingressar na Universidade.

Ao professor Dr. Orlando Moreira Junior que me colocou em seus projetos de pesquisa desde o meu primeiro ano de Universidade.

Ao meu orientador professor Dr. Gerson Bessa Gibelli, pelo conhecimento transmitido e direcionamento dado, essenciais para o sucesso no desenvolvimento neste trabalho.

Aos meus verdadeiros amigos, irmãos e irmãs afetivos que Deus colocou na minha vida.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]

*“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”*

*(Mahatma Gandhi)*

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]

RESUMO

---

Silva, E. V. C. **Análise Comparativa de Osciladores Indutivo Ressonante.** 52 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.

Este trabalho demonstra o efeito da transmissão de energia sem fio por meio do método de acoplamento indutivo ressonante. A metodologia utilizada considerou o teste de três diferentes modelos de circuitos osciladores sendo simulados no *software* LTSPICE IV, que analisou os parâmetros de: tensão, corrente e potência. O trabalho contou ainda com uma revisão bibliográfica dos conceitos de acoplamento indutivo, e acoplamento indutivo ressonante entre outras formas de transmissão de energia sem fio, e os conceitos dos tipos de osciladores eletroeletrônicos: Hartley, Colpitts e Royer. Os resultados obtidos nas simulações dos osciladores eletroeletrônicos Hartley, Colpitts e Royer por meio do *software* LTSPICE IV registrou que o oscilador Royer apresentou valores superiores de tensão, corrente e potência se comparado com os demais modelos.

**Palavras-chave:** LTSPICE IV, Oscilador, Transmissão de Energia.

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]

ABSTRACT

---

Silva, E. V. C. **Comparative Analysis of Resonant Inductive Oscillators**. 52 p. Monograph (Course Completion Work) – Faculty of Engineering, Federal University of Grande Dourados, 2018.

This work demonstrates the effect of wireless energy transmission through the resonant inductive coupling method. The methodology used considered the test of three different oscillator circuit models being simulated in the LTSPICE IV software, which analyzed the voltage, current and power parameters. The work also included a literature review of the concepts of inductive coupling and resonant inductive coupling among other forms of wireless energy transmission, and the concepts of electric-electronic oscillator types: Hartley, Colpitts and Royer. The results obtained in the simulations of the Hartley, Colpitts and Royer electro-electronic oscillators using the LTSPICE IV software showed that the Royer oscillator presented higher values of voltage, current and power when compared to the other models.

**Keywords:** LTSPICE IV, Oscillator, Power Transmission.

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

FIGURA 1-1: LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA POTÊNCIA. ....	1
FIGURA 1-2: TORRE DE WARDENCLYFFE. ....	3
FIGURA 1-3: HELICÓPTERO DE BROWN ACIONADO POR MICRO-ONDAS. ....	3
FIGURA 1-4: SÍMBOLO DO CONSÓRCIO WPC E DA PADRONIZAÇÃO DA TECNOLOGIA “Qi” ..... 4	4
FIGURA 1-5: CELULAR DA SAMSUNG USANDO A TECNOLOGIA “Qi”. ....	4
FIGURA 2-1: ACOPLAMENTO INDUTIVO. ....	7
FIGURA 2-2: PROTÓTIPO DO MIT PARA ILUMINAR UMA LÂMPADA DE 60 W.....	9
FIGURA 2-3: CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO. ....	10
FIGURA 2-4: CIRCUITO LC – POLARIDADE POSITIVA. ....	11
FIGURA 2-5: CIRCUITO LC – POLARIDADE NEGATIVA.....	12
FIGURA 2-6: FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE REALIMENTAÇÃO POSITIVA.....	13
FIGURA 2-7: FUNCIONAMENTO COM UM DISPOSITIVO DE RESISTÊNCIA NEGATIVA. ....	13
FIGURA 2-8: CIRCUITO HARTLEY. ....	14
FIGURA 2-9: CIRCUITO COLPITTS. ....	16
FIGURA 2-10: CIRCUITO ROYER. ....	17
FIGURA 3-1: INTERFACE DO LTSPICE IV.....	18
FIGURA 3-2: HABILITAÇÃO DA BARRA DE FERRAMENTAS LTSPICE IV.....	19
FIGURA 3-3: LISTA DE COMPONENTES NO LTSPICE IV.....	19
FIGURA 3-4: FONTE DE TENSÃO NO LTSPICE IV.....	20
FIGURA 3-5: AJUSTE DO TRANSISTOR. ....	21
FIGURA 3-6: TRANSISTORES DISPONÍVEIS NO LTSPICE IV.....	21
FIGURA 3-7: CÓDIGO DE ACOPLAMENTO PARA OS OSCILADORES HARTLEY E ROYER.....	22
FIGURA 3-8: CÓDIGO DE ACOPLAMENTO PARA O OSCILADOR COLPITTS.....	22
FIGURA 3-9: CONFIGURAR PONTOS NO CIRCUITO. ....	22
FIGURA 3-10: CONFIGURAR A SIMULAÇÃO.....	23
FIGURA 3-11: OSCILADOR HARTLEY. ....	23
FIGURA 3-12: OSCILADOR COLPITTS. ....	24
FIGURA 3-13: OSCILADOR ROYER.....	24
FIGURA 3-14: CIRCUITO RECEPTOR. ....	25
FIGURA 4-1: TENSÃO NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 10 MS.....	28

FIGURA 4-2: CORRENTE NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	29
FIGURA 4-3: POTÊNCIA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	29
FIGURA 4-4: TENSÃO NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	30
FIGURA 4-5: CORRENTE NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	30
FIGURA 4-6: POTÊNCIA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	31
FIGURA 4-7: TENSÃO NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	31
FIGURA 4-8: CORRENTE NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	32
FIGURA 4-9: POTÊNCIA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	32
FIGURA 4-10: TENSÃO NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	33
FIGURA 4-11: CORRENTE NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	33
FIGURA 4-12: POTÊNCIA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	34
FIGURA 4-13: VALOR DE TENSÃO MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY. ....	34
FIGURA 4-14: VALOR DE CORRENTE MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY. ....	34
FIGURA 4-15: VALOR DE POTÊNCIA MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR HARTLEY. ....	34
FIGURA 4-16: VALOR DE TENSÃO MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY. ....	35
FIGURA 4-17: VALOR DE CORRENTE MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY. ....	35
FIGURA 4-18: VALOR DE POTÊNCIA MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR HARTLEY. ....	35

FIGURA 4-19: TENSÃO NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	35
FIGURA 4-20: CORRENTE NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	36
FIGURA 4-21: POTÊNCIA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	36
FIGURA 4-22: TENSÃO NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	37
FIGURA 4-23: CORRENTE NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	37
FIGURA 4-24: POTÊNCIA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	38
FIGURA 4-25: TENSÃO NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	38
FIGURA 4-26: CORRENTE NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	39
FIGURA 4-27: POTÊNCIA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	39
FIGURA 4-28: TENSÃO NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	40
FIGURA 4-29: CORRENTE NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	40
FIGURA 4-30: POTÊNCIA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	41
FIGURA 4-31: VALOR DE TENSÃO MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS. ....	41
FIGURA 4-32: VALOR DE CORRENTE MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS. ....	41
FIGURA 4-33: VALOR DE POTÊNCIA MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR COLPITTS. ....	41
FIGURA 4-34: VALOR DE TENSÃO MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS. ....	41
FIGURA 4-35: VALOR DE CORRENTE MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS. ....	42

FIGURA 4-36: VALOR DE POTÊNCIA MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR COLPITTS. ....	42
FIGURA 4-37: TENSÃO NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 10 MS.....	42
FIGURA 4-38: CORRENTE NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	43
FIGURA 4-39: POTÊNCIA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 10 MS.....	43
FIGURA 4-40: TENSÃO NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	44
FIGURA 4-41: CORRENTE NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 10 MS.....	44
FIGURA 4-42: POTÊNCIA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 10 MS. ....	45
FIGURA 4-43: TENSÃO NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 1 MS.....	45
FIGURA 4-44: CORRENTE NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 1 MS.....	46
FIGURA 4-45: POTÊNCIA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 1 MS.....	46
FIGURA 4-46: TENSÃO NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 1 MS.....	47
FIGURA 4-47: CORRENTE NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 1 MS. ....	47
FIGURA 4-48: POTÊNCIA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER COM UM TEMPO DE 1 MS.....	48
FIGURA 4-49: VALOR DE TENSÃO MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER. ....	48
FIGURA 4-50: VALOR DE CORRENTE MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER.	48
FIGURA 4-51: VALOR DE POTÊNCIA MÁXIMA NO CIRCUITO TANQUE DO OSCILADOR ROYER. .	48
FIGURA 4-52: VALOR DE TENSÃO MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER.	48
FIGURA 4-53: VALOR DE CORRENTE MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER.....	49
FIGURA 4-54: VALOR DE POTÊNCIA MÁXIMA NO CIRCUITO RECEPTOR DO OSCILADOR ROYER. ....	49

LISTA DE TABELAS

---

TABELA 2-1 – FAIXA DE ATUAÇÃO DE CADA FORMA DE TRANSMISSÃO SEM FIO. ....	10
TABELA 3-1- DENOTAÇÃO DE UNIDADES NO <i>SOFTWARE</i> . ....	20
TABELA 4-1- COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS NO CIRCUITO TANQUE. ....	49
TABELA 4-2- COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS NO CIRCUITO RECEPTOR. ....	49



LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

---

<b>C</b>	Capacitor
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>C<sub>TOT</sub></b>	Capacitância Total
<b>F</b>	Frequência
<b>K</b>	Constante de Acoplamento Magnético
<b>L</b>	Indutor
<b>L<sub>T</sub></b>	Indutância Total
<b>M</b>	Indutância Mutua
<b>MIT</b>	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
<b>R</b>	Resistência
<b>RF</b>	Radiofrequência
<b>WPC</b>	<i>Wireless Power Consortium</i>

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]



## SUMÁRIO

---

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO GERAL.....	5
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....	5
1.3. JUSTIFICATIVA.....	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. FORMAS DE TRANSMITIR ENERGIA SEM FIO .....	7
2.1.1 <i>Acoplamento Indutivo</i> .....	7
2.1.2 <i>Acoplamento Indutivo Ressonante</i> .....	8
2.1.3 <i>Radiação Eletromagnética (Laser e Micro-Ondas)</i> .....	9
2.1.4 <i>Diferenciando As Formas De Transmissão De Energia Sem Fio</i> .....	10
2.2 <i>Osciladores Eletrônicos</i> .....	11
2.2.1 <i>Oscilador Hartley</i> .....	14
2.2.2 <i>Oscilador Colpitts</i> .....	15
2.2.3 <i>Oscilador Royer</i> .....	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA .....	18
3.1. APRESENTANDO O SOFTWARE.....	18
3.2. EQUAÇÕES DE COMPORTAMENTO DOS OSCILADORES .....	25
3.2.1 <i>Oscilador Hartley</i> .....	25
3.2.2 <i>Oscilador Colpitts</i> .....	26
3.2.3 <i>Oscilador Royer</i> .....	27
CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....	28
4.1. SIMULAÇÕES .....	28
4.1.1 RESULTADOS DO OSCILADOR HARTLEY .....	28
4.1.2 RESULTADOS DO OSCILADOR COLPITTS .....	35
4.1.3 RESULTADOS DO OSCILADOR ROYER.....	42
4.2 COMPARANDO OS RESULTADOS.....	49
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO .....	50

5.1. TRABALHOS FUTUROS.....	50
REFERÊNCIAS.....	52

## Capítulo 1. INTRODUÇÃO

---

Atualmente, o uso da energia elétrica se faz presente em nosso dia-a-dia. Contudo, não nos damos conta da sua importância para a execução daquilo que fazemos. Atividades simples como assistir à televisão, deslocar-se em um elevador, carregar o celular ou navegar na internet são possíveis, porque a energia elétrica chega até a sua residência. Além disso, fábricas, supermercados, shoppings e uma infinidade de outros lugares necessitam dela para funcionar (JANNUZZI, 1997).

Obtida a partir de outros tipos de energia, a eletricidade é transportada e chega aos consumidores no mundo inteiro por meio de sistemas elétricos complexos, compostos de quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo (JANNUZZI, 1997).

Para que a energia elétrica saia da unidade geradora e chegue às centrais de distribuição, e desta até os seus consumidores, é fundamental que haja o processo de transmissão, que se baseia no transporte de energia com a utilização de material condutor, como é feito usualmente pelas linhas de transmissão de alta potência (RANGEL, 2009), conforme apresentada na Figura 1-1; ou sem a utilização de material condutor, objeto deste trabalho.

Figura 1-1: Linhas de Transmissão de alta potência.



Fonte: (RANGEL, 2009).

A transmissão de energia sem fios pode ser definida como um processo de transferência de energia elétrica, de uma fonte de energia para uma carga, sem utilizar matérias que conduzem eletricidade (BONIFÁCIO, 2009).

Por mais que a ideia possa soar um pouco futurista, o processo de transmissão de energia elétrica sem fio é bastante similar à transmissão de dados, voz, textos e imagens que são captadas por TV, rádio, Wi-Fi e aparelhos celulares. Em todos os casos, a transmissão é realizada a partir da codificação daquele produto (energia, som, dados, etc) em ondas (frequências distintas) que são captada por um receptor específico, que as decodificam e as transformam naquele produto inicial (FÉLIX, 2016).

Os primeiros estudos da transmissão de energia sem fio foram iniciados no ano de 1820, quando Ampère demonstrou o surgimento de um campo magnético quando uma corrente elétrica circula num material condutor (HALLIDAY, 2012).

Posteriormente, em 1831, Michael Faraday demonstrou uma das leis mais importantes do eletromagnetismo, a Lei da Indução, sendo esta essencial na transmissão de energia sem fios (HALLIDAY, 2012).

Com o conhecimento das leis desenvolvidas até então, James Maxwell, em 1864, conseguiu modelar o comportamento da radiação eletromagnética, através de uma descrição matemática, e descobriu certas correlações existentes em alguns fenômenos, dando origem à teoria de que a eletricidade, magnetismo e óptica são, de fato, manifestações diferentes do mesmo fenômeno físico; ou seja, ondas eletromagnéticas (HALLIDAY, 2012).

No ano de 1893, Nikola Tesla, cientista sérvio-americano, demonstrou que era possível transferir energia sem a necessidade de um condutor elétrico através da indução eletromagnética; realizando um trabalho, com o qual obteve êxito ao acender lâmpadas de baixa potência com a adoção dessa metodologia (VELOSO, 2012).

Mais tarde, em 1901, Tesla construiu um laboratório e uma torre de 60 m de altura, conhecida como Torre de Wardenclyffe, numa fazenda de batatas em *Long Island*, NY, EUA (Figura 1-2). Através desta torre, pretendia-se transmitir energia para carros, aviões e até mesmo cidades sem utilizar nenhuma fiação elétrica.

Infelizmente, seus estudos nessa área foram interrompidos, pois o principal financiador do projeto resolveu cortar gastos (TESLA, 2014).

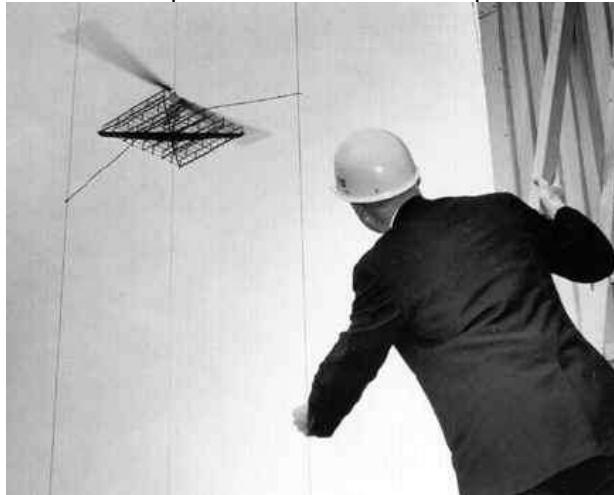
Figura 1-2: Torre de Wardenclyffe.



Fonte: (TESLA, 2014).

Durante décadas, o estudo da indução magnética elaborado por Tesla ficou, praticamente, esquecido. Somente em 1964, os trabalhos de Tesla foram utilizados por William C. Brown, em uma demonstração na “*CBS News*”, que construiu um pequeno helicóptero (Figura 1-3), que era acionado por um feixe de micro-ondas, sendo esta energia convertida por um conjunto de “rectennas”, que são um tipo especial de antena receptora que é usada para converter energia eletromagnética em corrente contínua (CC). (BONIFÁCIO, 2009).

Figura 1-3: Helicóptero de Brown acionado por micro-ondas.



Fonte: (BONIFÁCIO, 2009).

No ano de 2008, foi instituída a WPC (*Wireless Power Consortium*), que tinha como finalidade desenvolver, padronizar e disponibilizar ao grande público esta tecnologia ao qual foi nomeada e simbolizada por 'Qi' sendo demonstrada na Figura 1-4 (NÓBREGA, 2012).

Figura 1-4: Símbolo do consórcio WPC e da padronização da tecnologia "Qi".



Fonte: (NÓBREGA, 2012).

Em 2011, foram lançados os celulares que podem ser carregados através da tecnologia Qi (NÓBREGA, 2012), conforme apresentado pela Figura 1-5.

Figura 1-5: Celular da Samsung usando a tecnologia "Qi".



Fonte: (SILVEIRA, 2017).

Com isso, neste trabalho será abordado o princípio de acoplamento indutivo ressonante, utilizando uma tensão contínua chaveada por um circuito eletrônico

(fonte), no qual determina o aumento do campo magnético, gerado em alta frequência, que alimenta uma bobina primária (transmissor), a qual induz uma tensão na bobina secundária (receptor), fornecendo energia para uma carga.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é demonstrar o efeito do princípio do acoplamento indutivo ressonante por meio da modelagem de circuitos osciladores.

### 1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Conceituar formas de transmissão de energia sem fio.
- Conceituar circuitos osciladores.
- Simular os circuitos osciladores.
- Comparar os circuitos osciladores.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

Sabendo que a energia elétrica encontra-se presente para realizar inúmeras atividades em nosso cotidiano, se tornam de fundamental importância que sejam desenvolvidos estudos em novas formas ecológicas que possibilitem o uso de menos cabos e fios e possam ser disponibilizados para a sociedade.

Um dos setores que na atualidade tem contribuído com pesquisas na área são a indústria automobilística, com os chamados veículos verdes ou carros elétricos, o setor de aviação com os denominados veículos aéreos não tripulados – VANTs (RANGEL, 2009), a área médica no desenvolvimento de baterias para marca-passos, que possam ser recarregadas sem a necessidade de novas cirurgias de substituição e entre muitas outras aplicações no cotidiano da sociedade moderna, tais como eliminação de cabos de energia em ruas ou na construção civil ou fiação para acesso a internet.

Países desenvolvidos como a Inglaterra, utilizam a transmissão de energia sem fios para realizar o carregamento de carros elétricos, reduzindo custos com

cabeamento específico para realizar o carregamento de cada veículo. Em Los Angeles na *Consumer Electronics Show* já é possível carregar eletroeletrônicos e eletrodomésticos sem a necessidade de fios, assim como a *Fulton Innovation* em Michigan (EUA) também disponibiliza o sistema *eCoupled* o acoplamento indutivo para a polícia e corpo de bombeiros.

Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de promover uma maior compreensão sobre o princípio do acoplamento indutivo ressonante de forma a contribuir com o desenvolvimento científico e inovações tecnológicas no segmento de transmissão de energia sem fio.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido conforme se segue:

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos conceitos de acoplamento indutivo, acoplamento indutivo ressonante, radiação eletromagnética, diferenciação das formas de transmissão de energia sem fio e os conceitos relacionados a osciladores eletrônicos Hartley, Colpitts e Royer.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia com base em modelos de simulação dos circuitos osciladores no *software* LTSPICE IV.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da aplicação dos modelos Hartley, Colpitts e Royer e suas comparações.

No Capítulo 5 apresenta-se a conclusão do trabalho e a possibilidade de desenvolvimentos de futuras aplicações.



## Capítulo 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Fundamentado nas fontes pesquisadas, este capítulo apresenta as formas de transmissão de energia sem fio, a definição e os tipos de circuitos osciladores modelados para este trabalho.

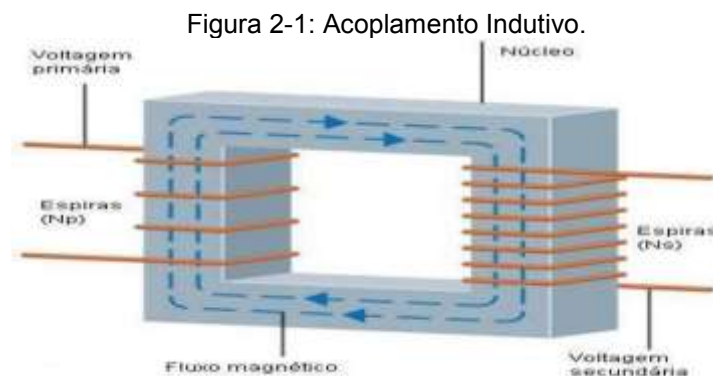
### 2.1. FORMAS DE TRANSMITIR ENERGIA SEM FIO

Há várias maneiras que possibilitam a transmissão de energia sem fio e podem ser divididos em três categorias, sendo (BELO, 2014):

- Acoplamento Indutivo;
- Acoplamento Indutivo Ressonante; e
- Radiação Eletromagnética (Laser e Micro-ondas).

#### 2.1.1 ACOPLAMENTO INDUTIVO

No método de transmissão de energia sem fio do acoplamento indutivo, também conhecido como indução magnética, são criados campos magnéticos com intensidade baixa, por isso é necessário que a distância entre as bobinas seja menor. Se o campo produzido tivesse uma alta intensidade poderia induzir uma corrente maior, tendo como consequência um alcance de transmissão maior, todavia tal processo seria ineficiente, uma vez que haveria perda de rendimento (BELO, 2014). Esse método está demonstrado na Figura 2-1.



Fonte: (ABREU, 2012).

Este método segue o princípio estabelecido pela Lei de Faraday, sendo esta a base de funcionamento dos transformadores que é constituído por um enrolamento de espiras primário (bobina primária), um enrolamento de espiras secundário (bobina secundária) e um material ferromagnético (ABREU, 2012).

Utilizando uma corrente alternada (CA), que ao contornar a bobina primária, gera-se um campo magnético que por sua vez produzirá um fluxo magnético variável na bobina secundária e com isso induzindo uma voltagem no enrolamento secundário (BONIFÁCIO, 2009).

Caso fosse utilizada uma corrente contínua (CC), seria produzido um fluxo magnético contínuo, ou estável, no enrolamento secundário, impossibilitando a geração de uma alta tensão, exceto se a fonte de tensão contínua que é responsável por fornecer a corrente CC do sistema fosse liga e desliga que com isso formaria uma variação no fluxo magnético. Mas como tal forma é inviável para ser utilizada num transformador é preferível que seja utilizada uma fonte alternada no sistema.

Com este método a eficiência do processo é elevada para frequências baixas, na ordem dos 90 a 95 %, devido ao núcleo ferromagnético, que ajuda no acoplamento entre primário e secundário. No entanto, à medida que a frequência aumenta, aumentam as perdas por histerese e pela indução de correntes de *Foucault*, que aumentam proporcionalmente ao quadrado da frequência (BONIFÁCIO, 2009).

### 2.1.2 ACOPLAMENTO INDUTIVO RESSONANTE

Este método baseia-se no princípio de acoplamento ressonante e consiste em ter duas bobinas que operam à mesma frequência de ressonância, pelo que se apresentam fortemente acopladas através de indução magnética ressonante (SILVA, 2017).

A frequência de ressonância pode ser definida como a frequência natural que permite transferência máxima de energia a um sistema oscilante. A ressonância em um sistema composto por dois indutores ocorre quando a frequência natural de oscilação do campo magnético das mesmas é idêntica. (HAYT, 2003).

Logo, a ressonância ocorre quando dois corpos distintos ficam na mesma frequência, fazendo com que um determinado campo magnético interfira em outro.

A Figura 2-2 apresenta um experimento conhecido envolvendo a ressonância que foi demonstrado no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) realizando a alimentação de uma lâmpada de 60 W a uma distância de dois metros, com cerca de 40 % de eficiência (BONIFÁCIO, 2009).

Figura 2-2: Protótipo do MIT para iluminar uma lâmpada de 60 W.



Fonte: (BONIFÁCIO, 2009).

### 2.1.3 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA (LASER E MICRO-ONDAS)

Quando a distância entre o emissor e o receptor é muito maior que o comprimento de onda do sinal, deve ser utilizado o método de transmissão por radiação eletromagnética que é também conhecido como técnica de campos distantes, que se baseia no princípio da propagação de ondas eletromagnéticas, semelhantes ao sinal de rádio e ao feixe de laser. Como esta técnica opera de forma unidirecional, gera-se a um alcance de transmissão de vários quilômetros, operando com altos valores de eficiência, na faixa de 90 % (SILVA, 2017).

#### 2.1.4 DIFERENCIANDO AS FORMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO

Resumidamente, a transmissão de energia sem fio na forma de radiação eletromagnética, que utiliza as técnicas do feixe-laser e das micro-ondas, são ideias para serem aplicadas em transferência de potência em longas distâncias, enquanto a indução eletromagnética é ideal em curtas distâncias. A Figura 2-3 ilustra as classificações mencionadas anteriormente.

Figura 2-3: Classificação das técnicas de transmissão de energia sem fio.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2017).

Em Bonifácio (2009) destaca-se que a diferença entre estas formas de transmitir energia encontra-se na frequência ou comprimento de onda que se utiliza em cada método, sendo demonstrado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Faixa de atuação de cada forma de transmissão sem fio.

FORMA DE TRANSMISSÃO	FAIXA DE FREQUÊNCIA (Hz)
<b>ACOPLAMENTO INDUTIVO</b>	Dezenas de Hz até kHz
<b>ACOPLAMENTO INDUTIVO RESSONANTE</b>	1 a 10 MHz
<b>MICRO-ONDAS</b>	0,3 MHz a 300 GHz
<b>FEIXE-LASER</b>	$10^{12}$ Hz até $10^{15}$ Hz

Fonte: Adaptado de (BONIFÁCIO, 2009).

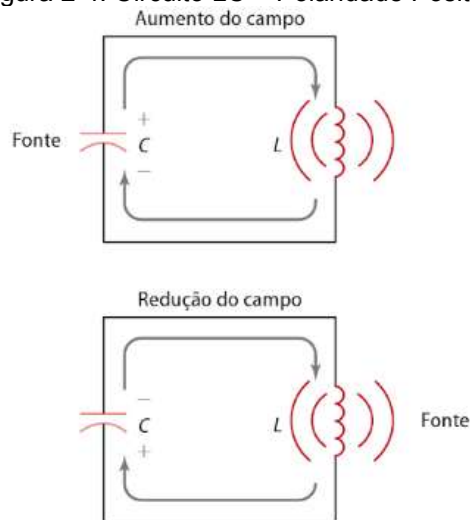
## 2.2 OSCILADORES ELETRÔNICOS

O oscilador eletrônico é um circuito que converte a corrente contínua da fonte de alimentação para uma corrente alternada gerando sinais, geralmente de amplitude constante, cuja frequência e forma de onda dependem da configuração do circuito eletrônico (COATES, 2013).

Tomando como base um oscilador LC que apresenta características reativas, ou seja, armazenam energia, onde o capacitor acumula energia na forma de campo elétrico e o indutor na forma de campo magnético. Esses dispositivos são conectados em paralelo, e com isso a oscilação do sistema ocorrerá através do processo de carga e descarga do capacitor.

Considerando que no circuito LC inicialmente o capacitor está totalmente carregado e a corrente do circuito é zero, tendo assim energia armazenada na forma de campo elétrico. Durante a descarga do capacitor, a corrente aumentará. Até que quando o capacitor encontra-se totalmente descarregado, a corrente no circuito será máxima, tendo energia armazenada na forma de campo magnético no indutor, conforme apresentado na Figura 2-4.

Figura 2-4: Circuito LC – Polaridade Positiva.

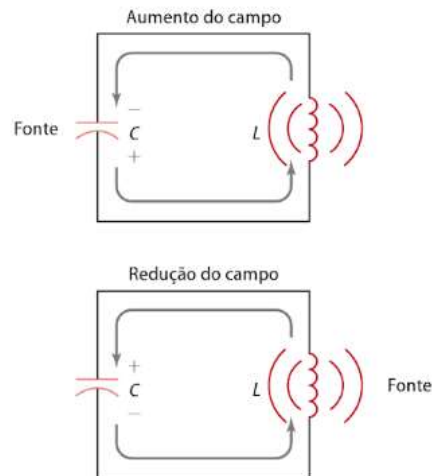


Fonte: (SCHULER, 2013).

O capacitor volta a se carregar, mas com polaridade oposta à condição inicial, com isso a corrente começa a diminuir. Quando o capacitor estiver

totalmente carregado com a polaridade oposta a corrente volta a ser nula (Figura 2-5).

Figura 2-5: Circuito LC – Polaridade Negativa.

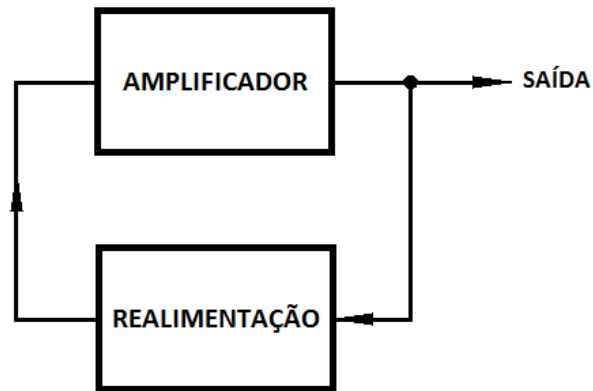


Fonte: (SCHULER, 2013).

Novamente, o capacitor voltará a se descarregar e a corrente aumentará (HALLIDAY, 2012).

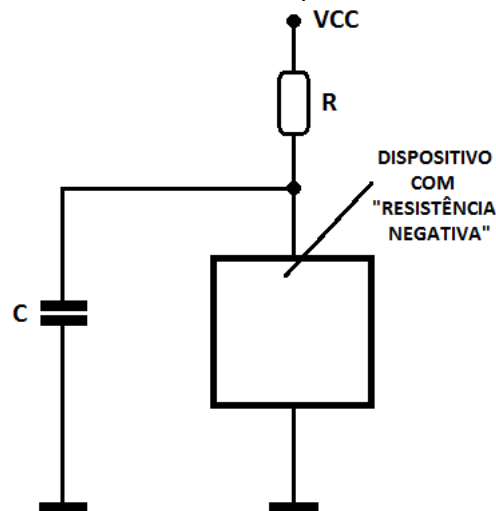
Há duas categorias de osciladores, sendo elas: oscilador com elemento ativo, que são compostos por amplificadores dotados de um sistema de realimentação positiva, conforme a Figura 2-6, e oscilador com dispositivo de resistência negativa (Figura 2-7), que funciona devido ao carregamento do capacitor pela resistência primária do sistema que aumenta a tensão do elemento com resistência negativa, que na maioria dos casos é um transistor, até que a tensão do elemento atinge um ponto de disparo que subitamente reduzirá a elevada resistência do sistema e descarregando o capacitor rapidamente (SILVEIRA, 2017).

Figura 2-6: Funcionamento de um sistema de realimentação positiva.



Fonte: (SILVEIRA, 2017).

Figura 2-7: Funcionamento com um dispositivo de resistência negativa.



Fonte: (SILVEIRA, 2017).

Com base na transmissão de energia sem fio há várias montagens de osciladores eletrônicos que podem ser usados, entretanto, neste trabalho serão analisados os seguintes circuitos:

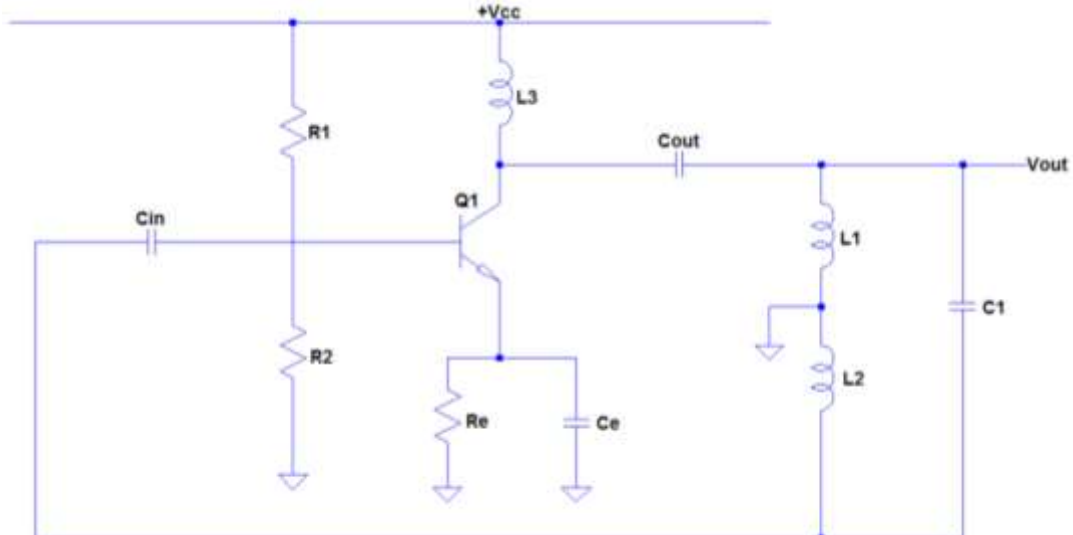
- Oscilador Hartley;
- Oscilador Colpitts; e
- Oscilador Royer.

### 2.2.1 OSCILADOR HARTLEY

O oscilador de Hartley foi inventado em 1915, pelo engenheiro americano Ralph Hartley, enquanto trabalhava para a empresa *Western Electric* (COATES, 2013).

Neste tipo de oscilador a frequência de oscilação é determinada por um circuito tanque que compreende dois indutores conectados em série e um capacitor conectado em paralelo. Os osciladores Hartley são comumente utilizados em aplicações de osciladores de radiofrequência (RF) na faixa de frequência recomendada de 30 kHz até 30 MHz. O diagrama de circuito típico do oscilador Hartley é apresentado na Figura 2-8.

Figura 2-8: Circuito Hartley.



Fonte: Adaptado de (Sinusoidal Oscillators, 2018).

As resistências  $R_1$  e  $R_2$  da Figura 2-8 fazem parte do divisor de tensão na base do transistor  $Q_1$ . O resistor de emissor ( $R_e$ ), cujo trabalho é proporcionar estabilidade térmica para o transistor.  $C_e$  é o capacitor de passagem interligado no emissor, que transmite os sinais CA amplificados. Caso  $C_e$  não esteja interligado ao emissor do transistor, as tensões CA amplificadas cairão no  $R_e$  e serão adicionados à tensão do emissor de  $Q_1$ , onde irão perturbar as condições de polarização.  $C_{in}$  é o capacitor CC de desativação de entrada, enquanto o  $C_{out}$  é o capacitor de desativação CC de saída. A tarefa de um capacitor de desacoplamento CC é evitar



que as tensões de CC atinjam o estágio seguinte. O indutor  $L_1$ ,  $L_2$  e o capacitor  $C_1$  formam o circuito tanque (COATES, 2013).

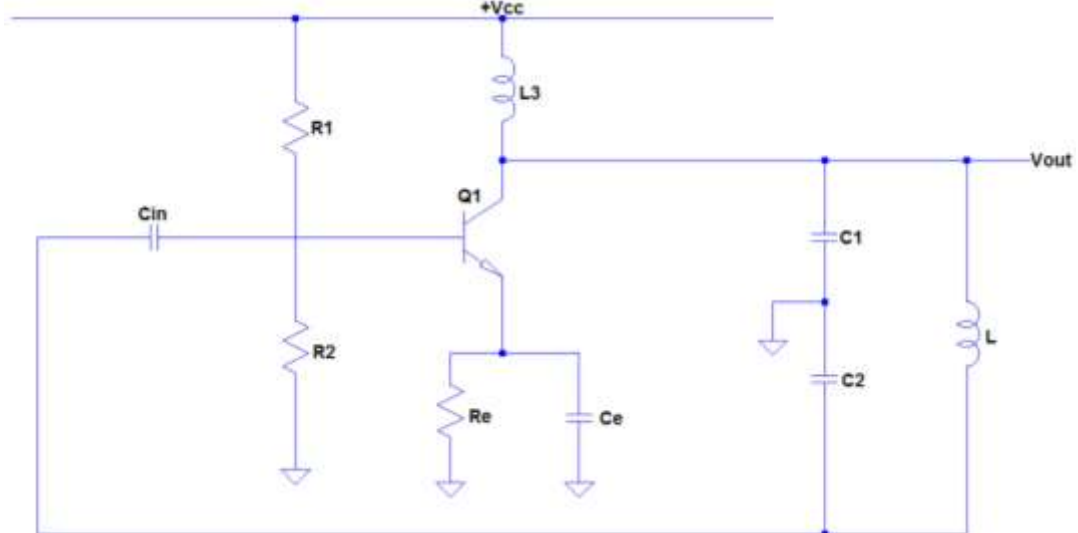
Quando a fonte de alimentação é ligada, o transistor começa a conduzir e a corrente do coletor aumenta. Como resultado, o capacitor  $C_1$  começa a carregar e quando completamente carregado inicia o processo de descarga através da bobina  $L_1$  (COATES, 2013).

As oscilações produzidas no circuito tanque são acopladas (alimentadas de volta) à base de  $Q_1$  e aparece ampliada por meio do coletor e emissor do transistor. A tensão de saída do transistor (coletor/emissor) estará em fase com a tensão sobre o indutor  $L_1$ . Uma vez que a junção de dois indutores é aterrada, a tensão em  $L_2$  será  $180^\circ$  defasada da tensão em  $L_1$ . A tensão em  $L_2$  é realimentada à base de  $Q_1$ . A partir disso, a tensão realimentada é  $180^\circ$  defasada do transistor e também o próprio transistor criará outra defasagem de fase de  $180^\circ$ . Desta forma, a diferença de fase total entre entrada e saída é de  $360^\circ$ , sendo uma condição muito importante para criar oscilações sustentadas (Sinusoidal Oscillators, 2018).

### 2.2.2 OSCILADOR COLPITTS

O oscilador Colpitts, invenção de Edwin Henry Colpitts (COATES, 2013), é muito semelhante em operação ao oscilador Hartley, mas o circuito tanque é constituído por um único indutor e dois capacitores conforme apresentado na Figura 2-9.

Figura 2-9: Circuito Colpitts.



Fonte: Adaptado de (Sinusoidal Oscillators, 2018).

Os valores individuais de  $C_1$  e  $C_2$  são escolhidos de modo que seus valores produzam a proporção necessária do sinal de realimentação (COATES, 2013).

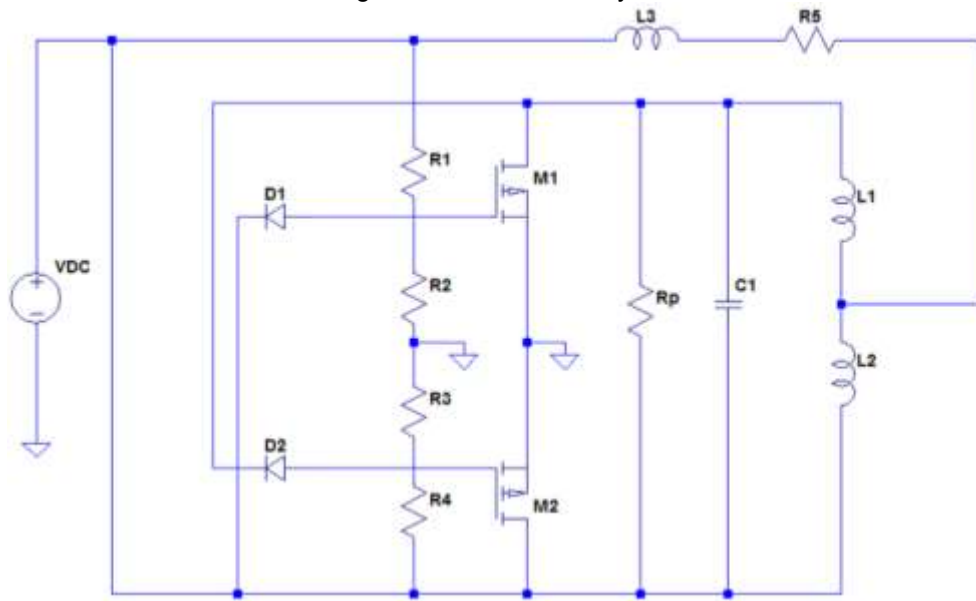
No entanto, a razão das tensões através dos capacitores em série está na proporção inversa da razão dos valores; ou seja, o capacitor menor tem a maior tensão de sinal por meio dele. A principal vantagem do arranjo Colpitts é que o único indutor no circuito sintonizado remove o efeito de qualquer indutância mútua entre duas bobinas, onde o campo magnético alternativo construído em torno de um indutor induz uma corrente no mesmo. Isso afetaria a indutância total das bobinas e, portanto, alteraria a frequência de ressonância do circuito sintonizado (COATES, 2013).

### 2.2.3 OSCILADOR ROYER

No oscilador Royer (Figura 2-10) há 2 transistores do tipo MOSFET que funcionam como elementos chaveadores do circuito para melhorar a oscilação, isto é, mantê-las contínuas num ciclo constante. De forma que a cada meio período da oscilação um transistor fecha o sistema (dando um start) para que o circuito LC funcione sem que ocorram perdas e a oscilação se mantenha estável. A oscilação acontece de forma constante, já que neste tipo de circuito é necessária uma corrente

sem pulso, assim quando um transistor fecha o circuito, é preciso do indutor L3 torna-se responsável em permitir que a corrente flua para o circuito tanque LC em forma de rampa. Além de não permitir que a tensão alternada da saída possa influenciar (voltar) na entrada (SILVEIRA, 2017).

Figura 2-10: Circuito Royer.



Fonte: Adaptado de (SILVEIRA, 2017).

## Capítulo 3. METODOLOGIA

---

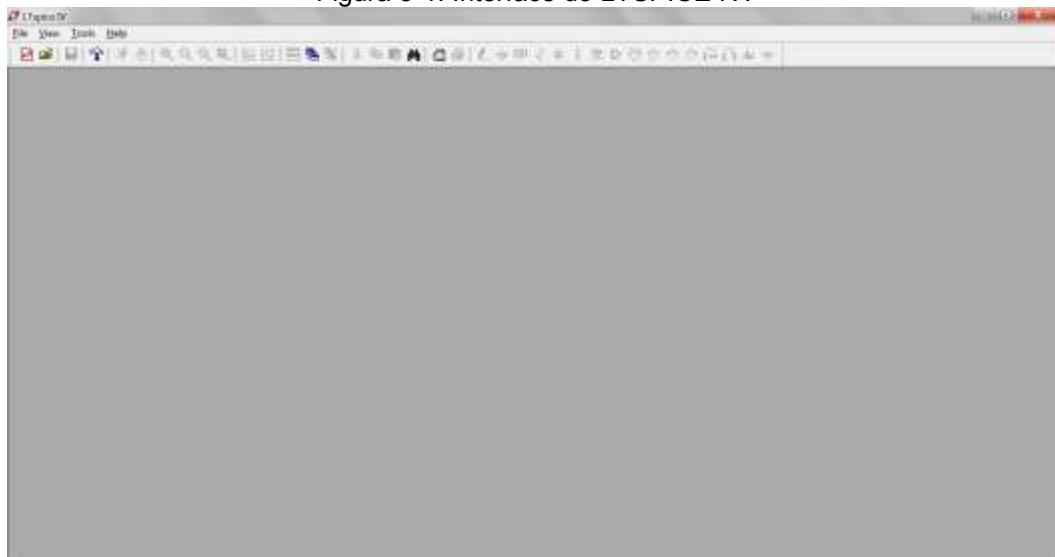
Para elaborar a metodologia deste trabalho é apresentado o *software* de simulação LTSPICE IV dos circuitos osciladores e seus respectivos equacionamentos para cada tipo de oscilador estudado.

### 3.1. APRESENTANDO O SOFTWARE

A análise do comportamento de um circuito exige o estudo de inúmeros parâmetros, sejam eles: corrente, tensão, potência, frequência e etc. E por mais atento que possa ser o engenheiro em sua análise, sempre haverá imprecisões no cálculo e para que esses erros sejam reduzidos, devem-se utilizar *softwares* específicos que além de fornecerem resultados mais precisos reduzem também o tempo gasto com os cálculos.

Neste trabalho, utiliza-se o *software* LTSPICE IV da Linear Technology, sendo um simulador de circuitos baseado no simulador SPICE e disponível para *download* gratuito. Segue a demonstração da interface do programa por meio da Figura 3-1.

Figura 3-1: Interface do LTSPICE IV.




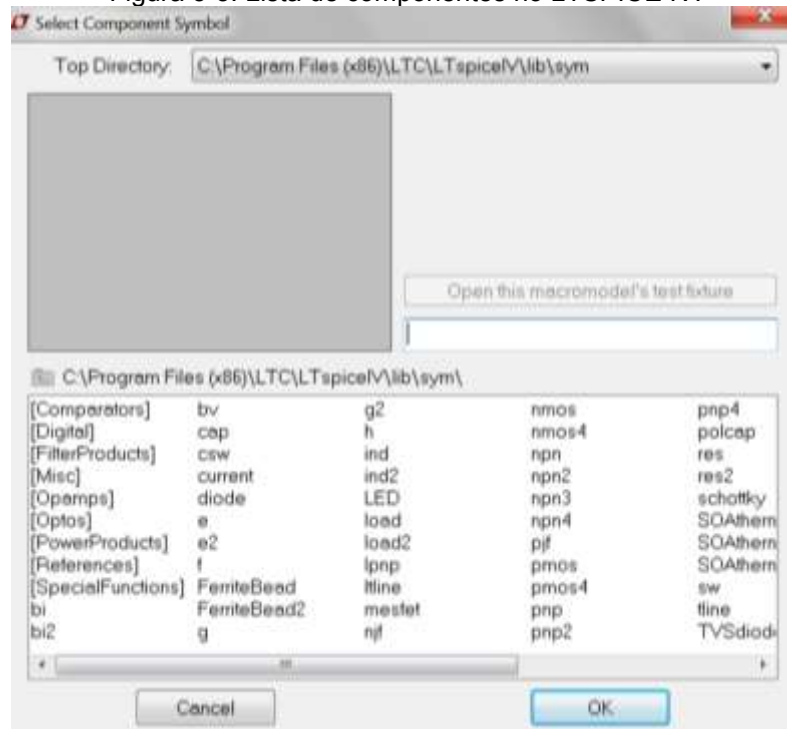
Para criar um circuito neste programa, primeiramente, deve-se clicar na opção *New Schematic* (  ). Ao executar tal procedimento, a barra de ferramentas disponibilizará algumas opções para serem utilizadas, conforme a Figura 3.2.

Figura 3-2: Habilitação da barra de ferramentas LTSPICE IV.



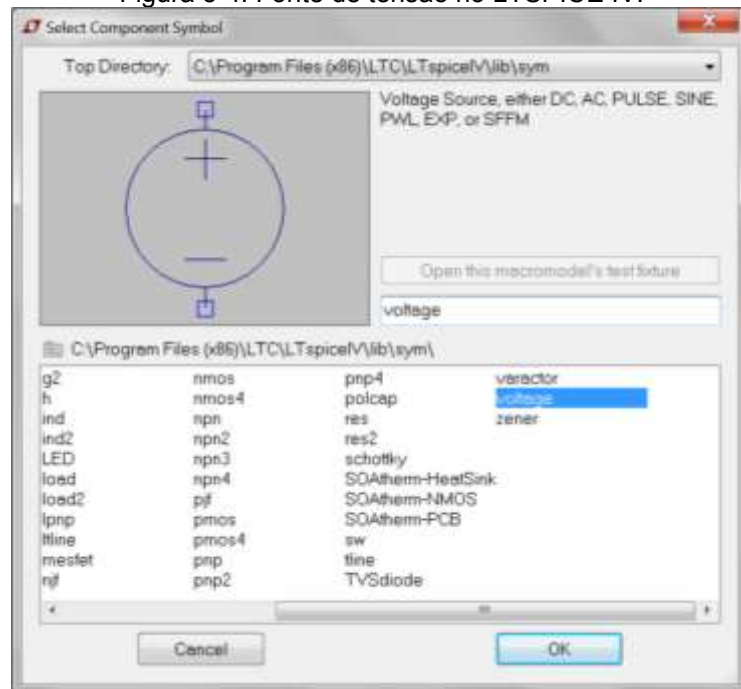
Nota-se que a barra de ferramentas possui a maioria das funções úteis para confeccionar um oscilador, tais como os elementos capacitor (+), resistor (R), indutor (L) e até mesmo o elemento de aterramento (G) para executar a simulação. Entretanto, observa-se a falta da fonte de tensão e do transistor. Tais elementos estão disponíveis ao selecionar a opção *Component* (C) que abrirá a lista de todos os componentes presentes no *software*, conforme demonstrado na Figura 3-3.

Figura 3-3: Lista de componentes no LTSPICE IV.



Digitando a palavra *voltage* aparecerá o elemento que simboliza a fonte de tensão dos circuitos e para utilizá-lo deve clicar no botão *OK*, conforme apresentado na Figura 3-4. O mesmo procedimento deve ser feito para obter o transistor digitando *npr* e o diodo zener digitando *zener*.

Figura 3-4: Fonte de tensão no LTSPICE IV.



Para conectar os componentes deve ser utilizada a opção *Draw Wire*, com o *mouse* clicar nos terminais do componente e arrastar o mouse até interligar o fio no outro componente do circuito. Se for necessário mudar o sentido da linha de conexão do circuito, basta clicar com o botão esquerdo do *mouse*.

Para atribuir valores aos componentes é necessário clicar com o botão direito do *mouse* em cada componente, digitar o valor pretendido e para atribuir a denotação de unidade correta basta seguir a Tabela 3-1.

Tabela 3-1- Denotação de unidades no *software*.

Grandeza	Denotação no <i>software</i>	Valor
<b>Tera</b>	T ou t	$10^{12}$
<b>Giga</b>	G ou g	$10^9$
<b>Mega</b>	MEG ou meg	$10^6$
<b>Quilo</b>	K ou k	$10^3$
<b>Mili</b>	M ou m	$10^{-3}$
<b>Micro</b>	U ou u	$10^{-6}$
<b>Nano</b>	N ou n	$10^{-9}$
<b>Femto</b>	F ou f	$10^{-12}$

No caso do transistor é necessário escolher um modelo, portanto ao clicar com o botão direito do mouse no dispositivo deve ser selecionado a opção *Pick New*

*Transistor* (Figura 3-5) que abrirá a lista de todos os tipos de transistores presentes no *software* (Figura 3-6), ao escolher o transistor desejado deve ser clicado em *OK*.

Figura 3-5: Ajuste do transistor.



Figura 3-6: Transistores disponíveis no LTSPICE IV.

Part No.	Manufacturer	Polarity	Vceo[V]	Ie[mA]	SPICE Model
2N2222	NXP	npn	30.0	800	model 2N2222 NPN(S=1E-14 VAF=100
2N3904	NXP	npn	40.0	200	model 2N3904 NPN(S=1E-14 VAF=100
FZT849	Zetex	npn	30.0	7000	model FZT849 NPN(S=5.8591E-13 NF=
ZTX849	Zetex	npn	0.0	7000	model ZTX849 aka:FZT849 NPN(Vceo=
ZTX1048A	Zetex	npn	17.5	5000	model ZTX1048A NPN(S=13.73E-13 NF=
2N4124	Fairchild	npn	25.0	200	model 2N4124 NPN(Is=6.734E-13 Eg=
2N3391A	Fairchild	npn	25.0	500	model 2N3391A NPN(Is=12.03E-13 Eg=
2N5089	Fairchild	npn	25.0	100	model 2N5089 NPN(Is=5.911E-13 Eg=
2N5210	Fairchild	npn	50.0	100	model 2N5210 NPN(Is=5.911E-13 Eg=
2N2718A	NXP	npn	40.0	800	model 2N2718A NPN(Is=1.474E-13 F=


Para realizar o acoplamento magnético entre as bobinas e demonstrar no *software* a transmissão de energia sem fio foi escolhido a opção na barra de ferramentas *SPICE Directive* () , sendo digitado um código para realizar o acoplamento (Figuras 3-7 e 3-8). O parâmetro *K* é a constante de acoplamento magnético, atribuindo seu valor equivalente a 1, que indica uma distância próxima das bobinas, e *L1*, *L2* e *L3*, os indutores dos circuitos.

Figura 3-7: Código de acoplamento para os osciladores Hartley e Royer.



Figura 3-8: Código de acoplamento para o oscilador Colpitts.




Podem ser rotulados alguns pontos no circuito pela opção *Label Net* () , isso facilita análise do circuito (Figura 3-9).

Figura 3-9: Configurar pontos no circuito.




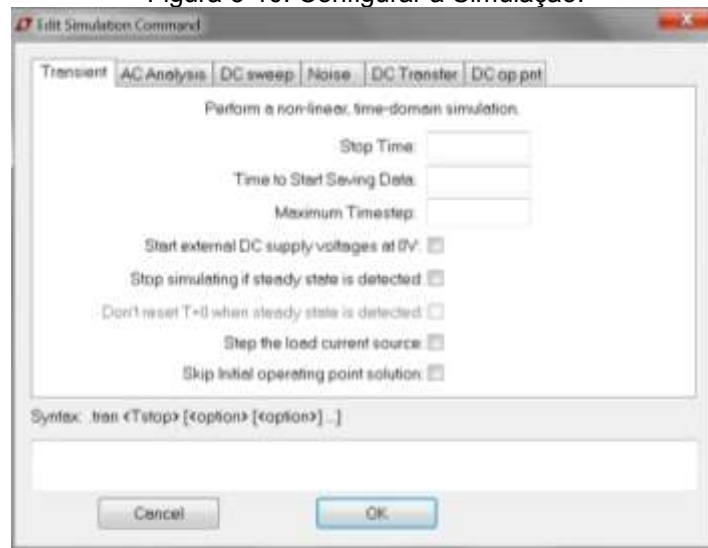
Para efetuar simulações clicar no ícone *Run* () , que em seguida mostrará as opções de simulação existentes no programa (Figura 3-10). Neste trabalho foram efetuadas simulações pela opção *Transient*, nas quais tiveram alterações no tempo (*Stop Time*) em cada simulação.



Figura 3-10: Configurar a Simulação.



Com isso, foram pesquisados três modelos de circuitos osciladores e em seguida modelados no *software* LTSPICE IV, conforme as Figuras 3-11, 3-12 e 3-13.

Figura 3-11: Oscilador Hartley.

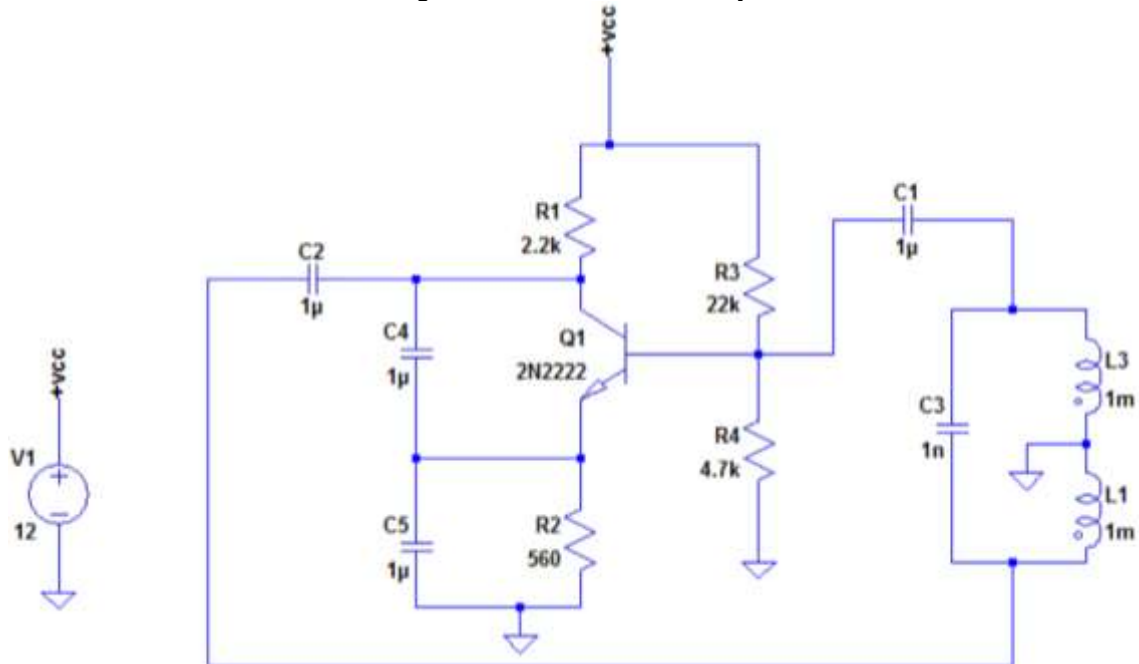


Figura 3-12: Oscilador Colpitts.

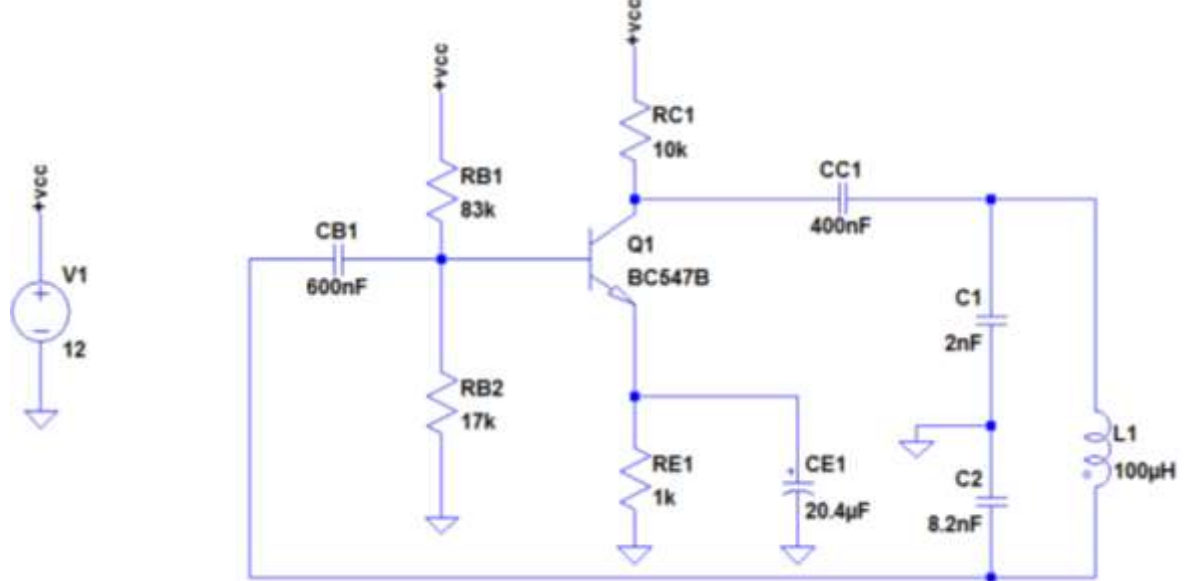
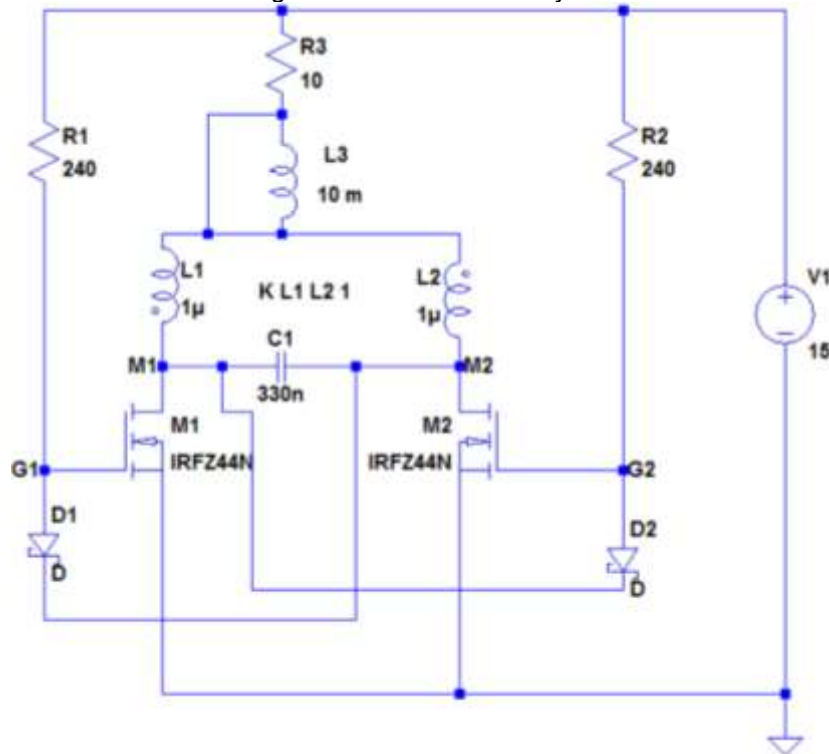
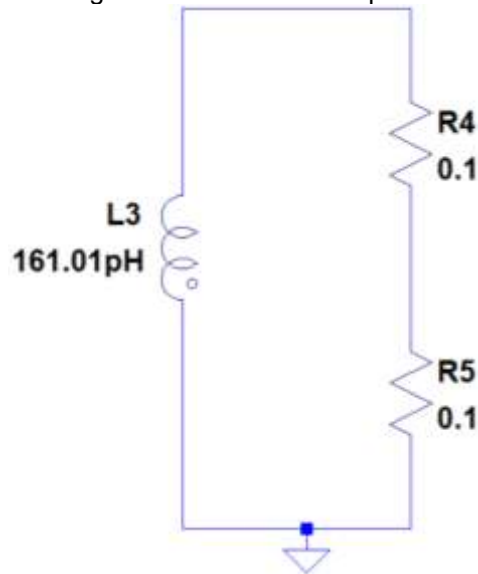


Figura 3-13: Oscilador Royer.



Com o intuito de demonstrar a transmissão de energia sem fio ocorrendo por meio do *software* foi criado um circuito receptor padronizado para os três tipos de osciladores modelados neste trabalho (Figura 3-14).

Figura 3-14: Circuito receptor.



## 3.2. EQUAÇÕES DE COMPORTAMENTO DOS OSCILADORES

### 3.2.1 OSCILADOR HARTLEY

O oscilador Hartley por possuir 2 indutores ( $L_1$  e  $L_2$ ) e 1 capacitor ( $C_3$ ) no circuito tanque, a frequência de oscilação desse circuito é definida por:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_3 L_T}} \quad (1)$$

$L_T$  é definido por:

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M \quad (2)$$

Sendo que  $M$  é a indutância mútua entre as bobinas  $L_1$  e  $L_2$  que é definido por:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

Para simplificação dos cálculos, foi considerado a constante  $k=1$ , que representa um sistema ideal, ou seja, sem perdas.

Com isso temos que:

$$M = 1 * \sqrt{1 * 10^{-3} * 1 * 10^{-3}}$$

$$M = 1x10^{-3} H$$

$$L_T = 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 2 * 1 * 10^{-3}$$

$$L_T = 4x10^{-3} H$$

$$F = \frac{1}{2\pi * \sqrt{1 * 10^{-9} * 4x10^{-3}}}$$

$$F = 79.577,47 Hz$$

### 3.2.2 OSCILADOR COLPITTS

O oscilador Colpitts por possuir 2 capacitores ( $C_1$  e  $C_2$ ) e 1 indutor ( $L_1$ ) no circuito tanque, a frequência de oscilação desse circuito é definida por:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_{TOT}}} \quad (4)$$

No qual, os valores dos dois capacitores (conectados em série) são escolhidos para que sua capacitância total em série ( $C_{TOT}$ ) seja dada por:

$$C_{TOT} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

Com isso temos que:

$$C_{TOT} = \frac{2 * 10^{-9} * 8,2 * 10^{-9}}{2 * 10^{-9} + 8,2 * 10^{-9}}$$

$$C_{TOT} = 1,61x10^{-9} F$$

$$F = \frac{1}{2\pi * \sqrt{100 * 10^{-6} * 1,61 * 10^{-9}}}$$

$$F = 396.649,76 Hz$$

### 3.2.3 OSCILADOR ROYER

O oscilador Royer seguirá o mesmo equacionamento que o oscilador Hartley, pois possui 2 indutores ( $L_1$  e  $L_2$ ) e 1 capacitor ( $C_1$ ) no circuito tanque.

Com isso, temos que:

$$M = 1 * \sqrt{1 * 10^{-6} * 1 * 10^{-6}}$$

$$M = 1x10^{-6} H$$

$$L_T = 1 * 10^{-6} + 1 * 10^{-6} + 2 * 1 * 10^{-6}$$

$$L_T = 4x10^{-6} H$$

$$F = \frac{1}{2\pi * \sqrt{330 * 10^{-9} * 4x10^{-6}}}$$

$$F = 138.526,60 Hz$$

## Capítulo 4. RESULTADOS

---

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações obtidas através do *software* LTSPICE IV, onde possibilita a compreensão do comportamento dos circuitos osciladores.

### 4.1. SIMULAÇÕES

Para cada tipo de circuito oscilador foram realizadas 2 simulações de análise *Transient*, alterando o tempo da análise da simulação, com isso pode ser observado vários comportamentos de oscilação dos parâmetros envolvendo tensão, corrente e potência, sendo analisadas nesta ordem.

#### 4.1.1 RESULTADOS DO OSCILADOR HARTLEY

Realizando a simulação com um tempo de análise de 10 ms o oscilador Hartley apresentou o comportamento de acordo com as Figuras 4-1, 4-2 e 4-3 no circuito tanque.

Figura 4-1: Tensão no circuito tanque do oscilador Hartley com um tempo de 10 ms.

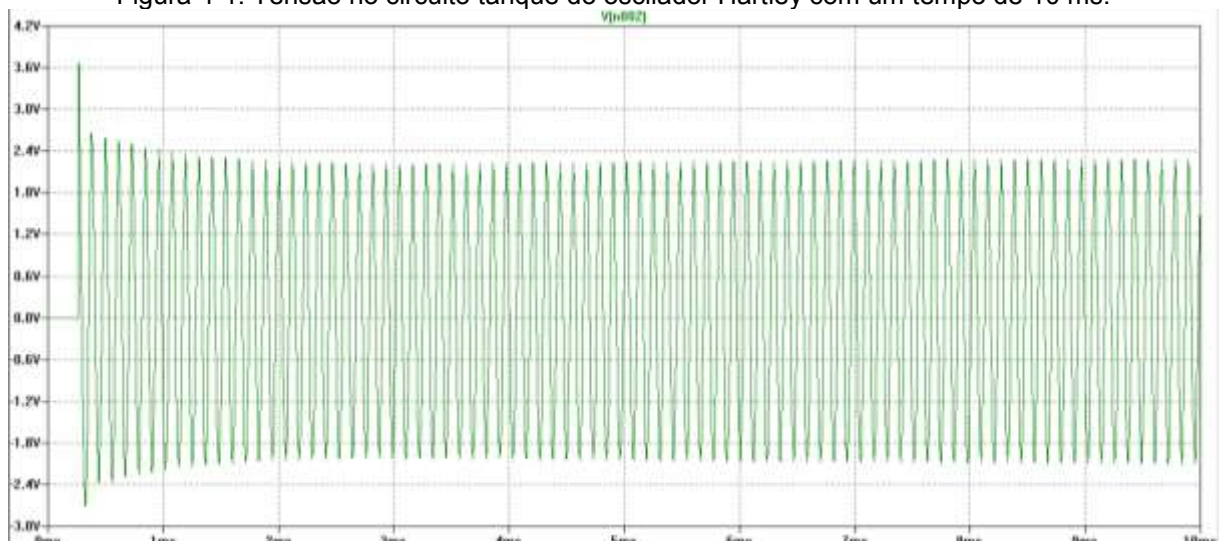


Figura 4-2: Corrente no circuito tanque do oscilador Hartley com um tempo de 10 ms.

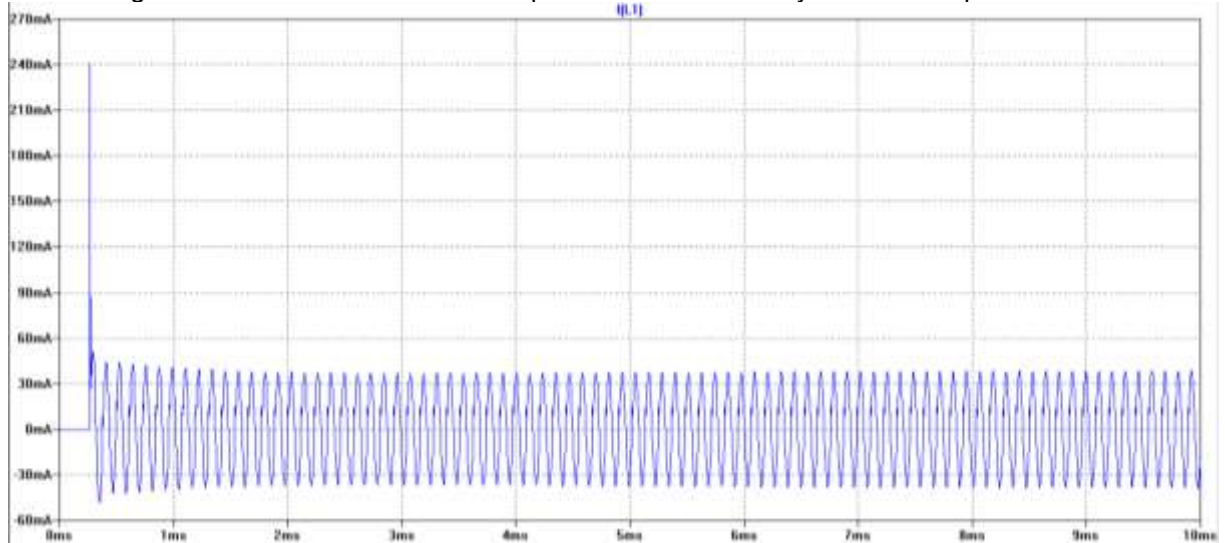
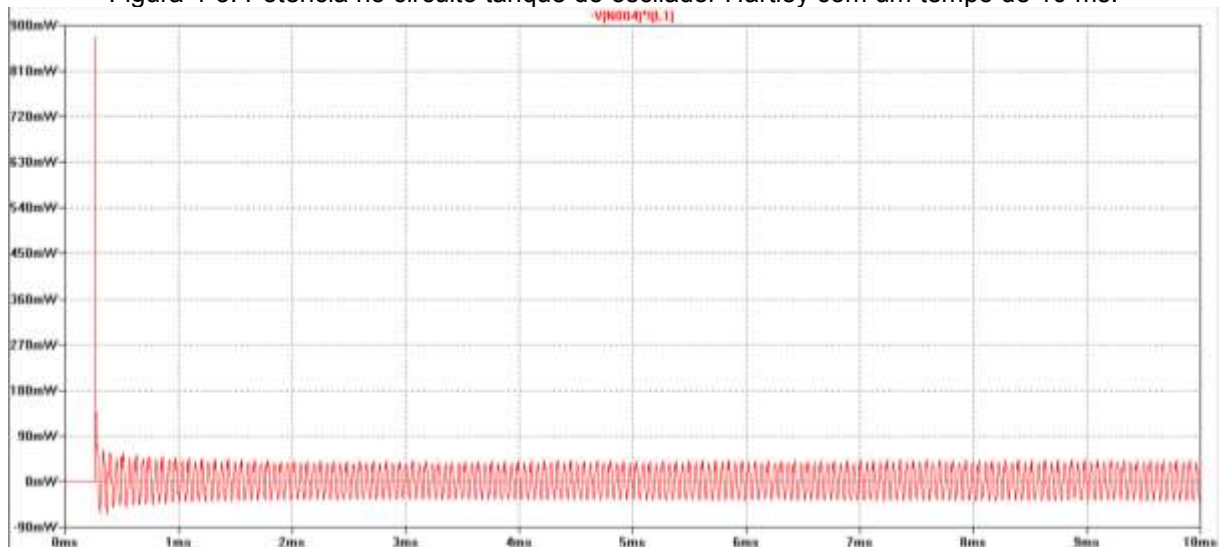


Figura 4-3: Potência no circuito tanque do oscilador Hartley com um tempo de 10 ms.



As Figuras 4-4, 4-5 e 4-6 apresentam a resposta da tensão, corrente e potência no circuito receptor quando excitado pela bobina primária do circuito tanque.

Figura 4-4: Tensão no circuito receptor do oscilador Hartley com um tempo de 10 ms.

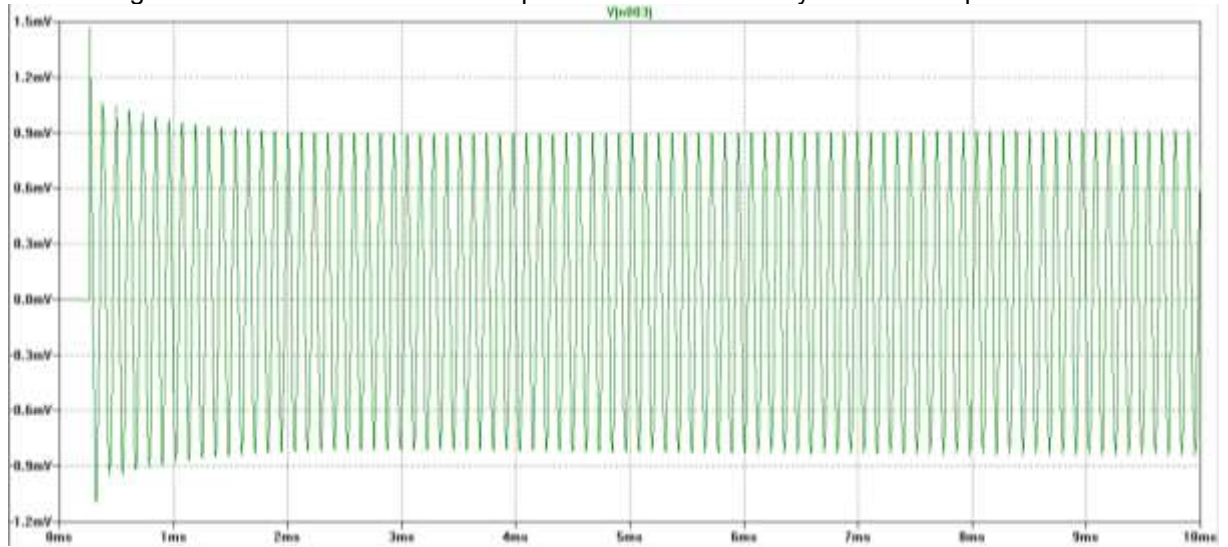


Figura 4-5: Corrente no circuito receptor do oscilador Hartley com um tempo de 10 ms.

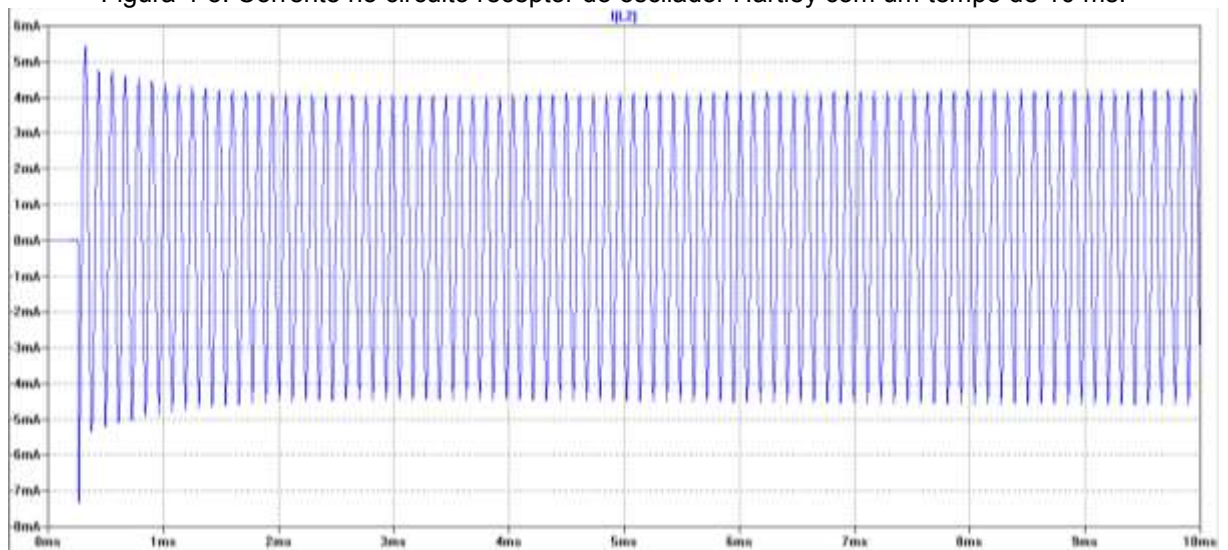
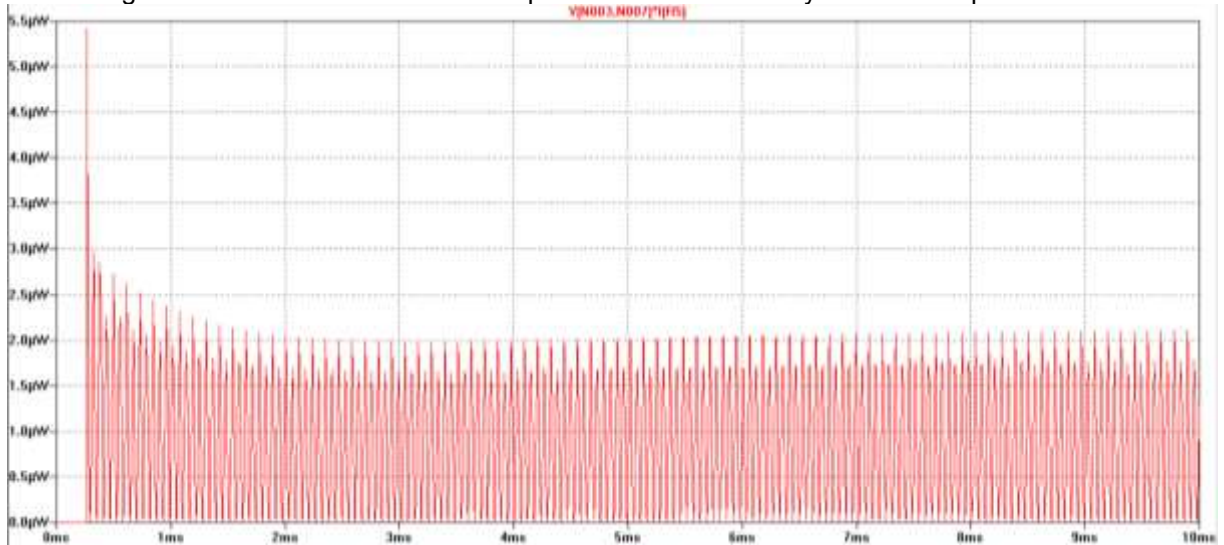




Figura 4-6: Potência no circuito receptor do oscilador Hartley com um tempo de 10 ms.



Nota-se pela simulação que o oscilador Hartley possui um baixo potencial para transmitir energia, pois seus parâmetros de tensão e corrente resultam numa baixa potência de transmissão que ao chegar no circuito receptor resulta num aproveitamento na faixa de micro Watts.

Para uma percepção melhor do efeito da oscilação do circuito oscilador Hartley, alterou-se o tempo de simulação para 1 ms. As Figuras 4-7, 4-8 e 4-9 apresentam a tensão, corrente e potência no circuito tanque.

Figura 4-7: Tensão no circuito tanque do oscilador Hartley com um tempo de 1 ms.

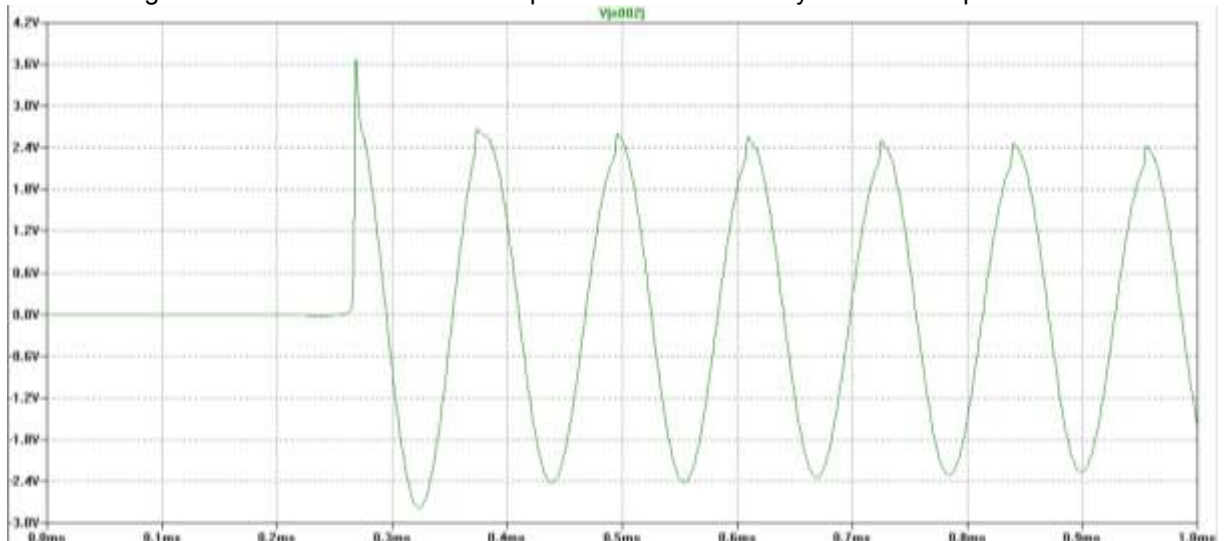


Figura 4-8: Corrente no circuito tanque do oscilador Hartley com um tempo de 1 ms.

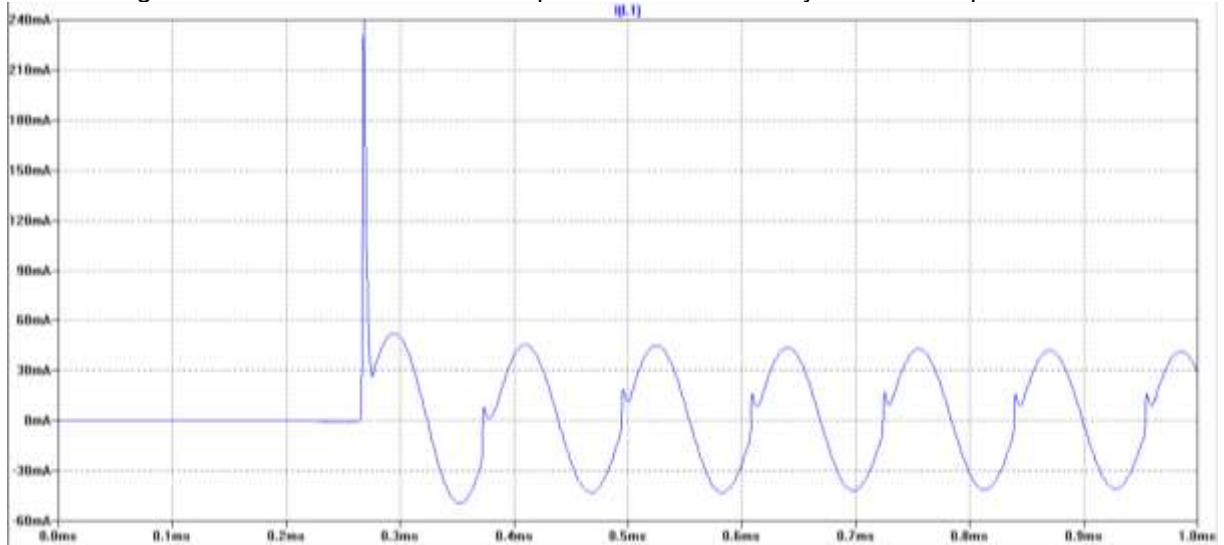
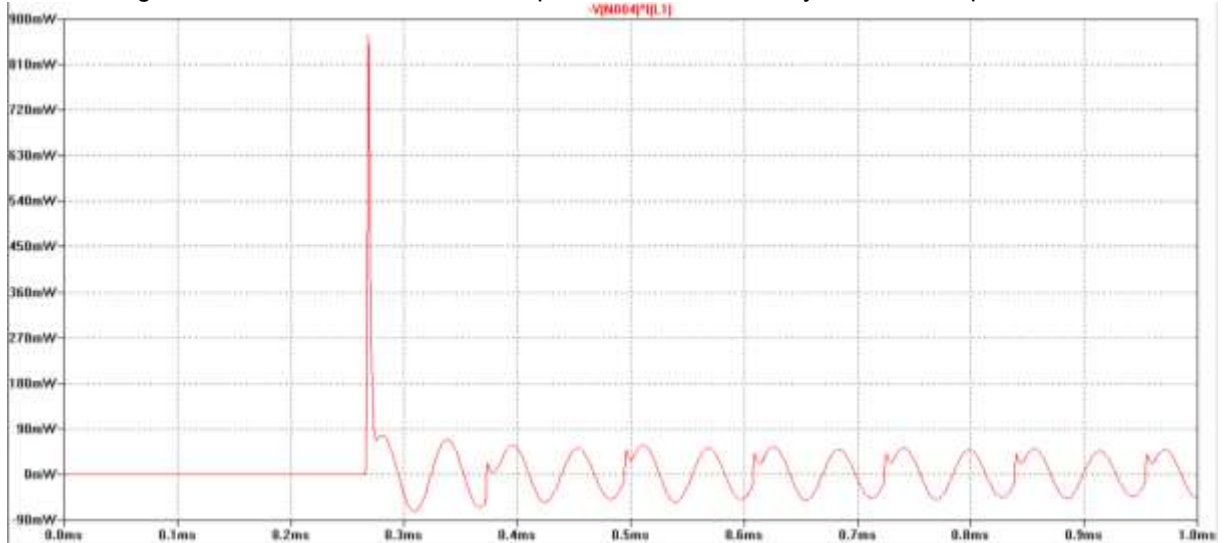


Figura 4-9: Potência no circuito tanque do oscilador Hartley com um tempo de 1 ms.



A resposta do circuito receptor é apresentada pelas Figuras 4-10, 4-11 e 4-12.

Figura 4-10: Tensão no circuito receptor do oscilador Hartley com um tempo de 1 ms.

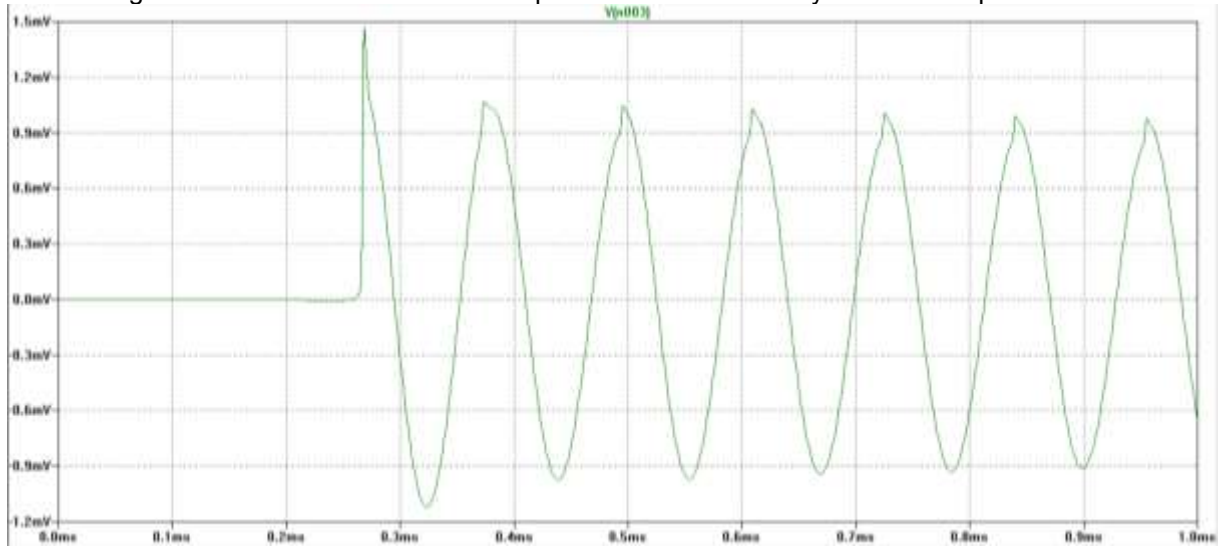


Figura 4-11: Corrente no circuito receptor do oscilador Hartley com um tempo de 1 ms.

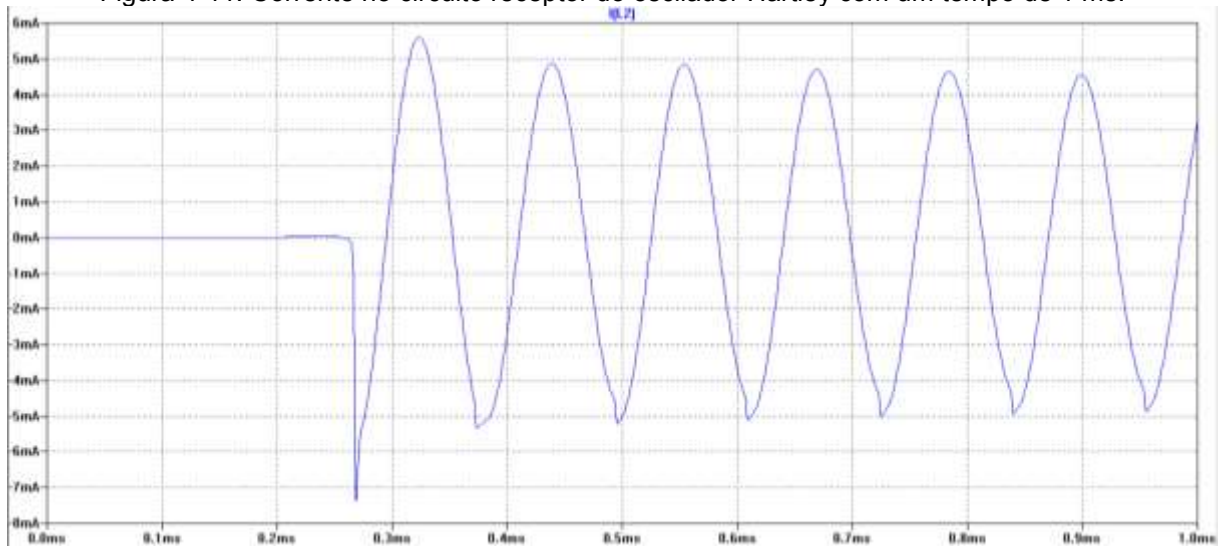
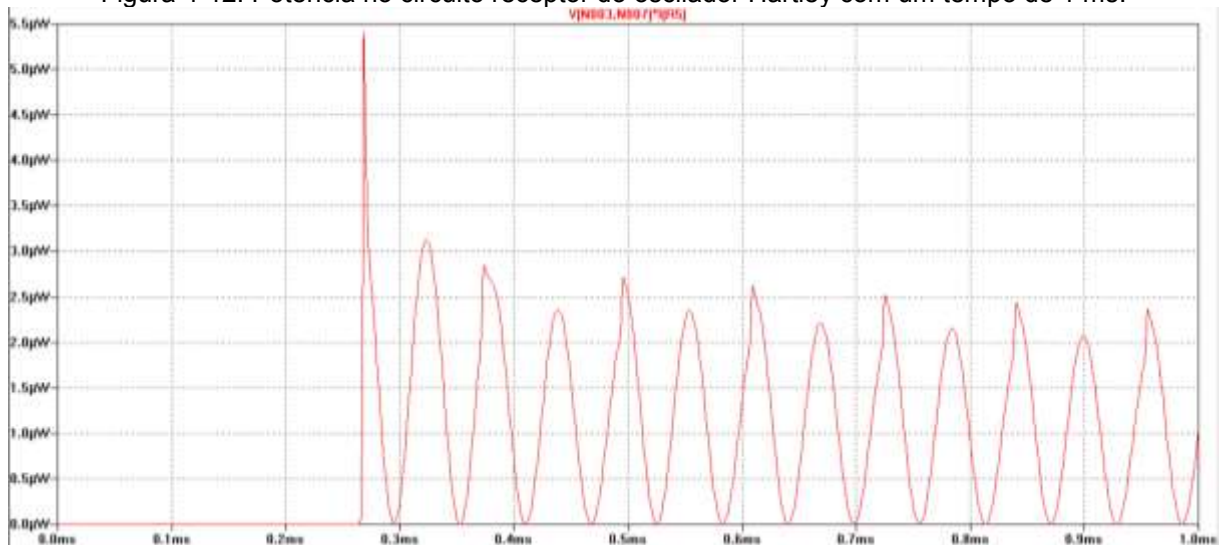


Figura 4-12: Potência no circuito receptor do oscilador Hartley com um tempo de 1 ms.



Analisando os resultados apresentados nas simulações verifica-se que ao longo do tempo os valores dos parâmetros analisados variam tanto no circuito tanque quanto no circuito receptor, sendo assim escolheu-se como valor base o valor máximo obtido em cada análise, conforme as Figuras 4-13, 4-14 e 4-15 para o circuito tanque e as Figuras 4-16, 4-17 e 4-18 para o circuito receptor.

Figura 4-13: Valor de tensão máxima no circuito tanque do oscilador Hartley.



Figura 4-14: Valor de corrente máxima no circuito tanque do oscilador Hartley.

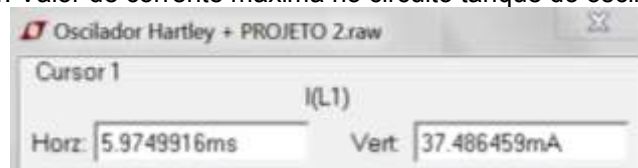


Figura 4-15: Valor de potência máxima no circuito tanque do oscilador Hartley.

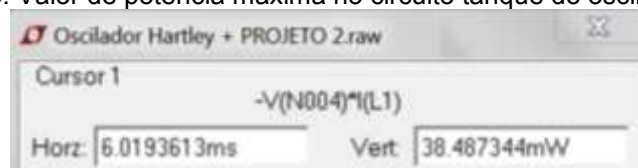


Figura 4-16: Valor de tensão máxima no circuito receptor do oscilador Hartley.

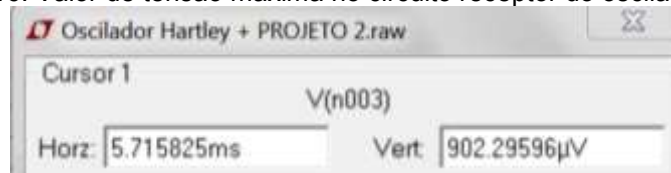


Figura 4-17: Valor de corrente máxima no circuito receptor do oscilador Hartley.



Figura 4-18: Valor de potência máxima no circuito receptor do oscilador Hartley.



#### 4.1.2 RESULTADOS DO OSCILADOR COLPITTS

Realizando a simulação com um tempo de análise de 10 ms, o oscilador Colpitts apresentou o comportamento de acordo com as Figuras 4-19, 4-20 e 4-21 no circuito tanque e no circuito receptor com as Figuras 4-22, 4-23 e 4-24.

Figura 4-19: Tensão no circuito tanque do oscilador Colpitts com um tempo de 10 ms.

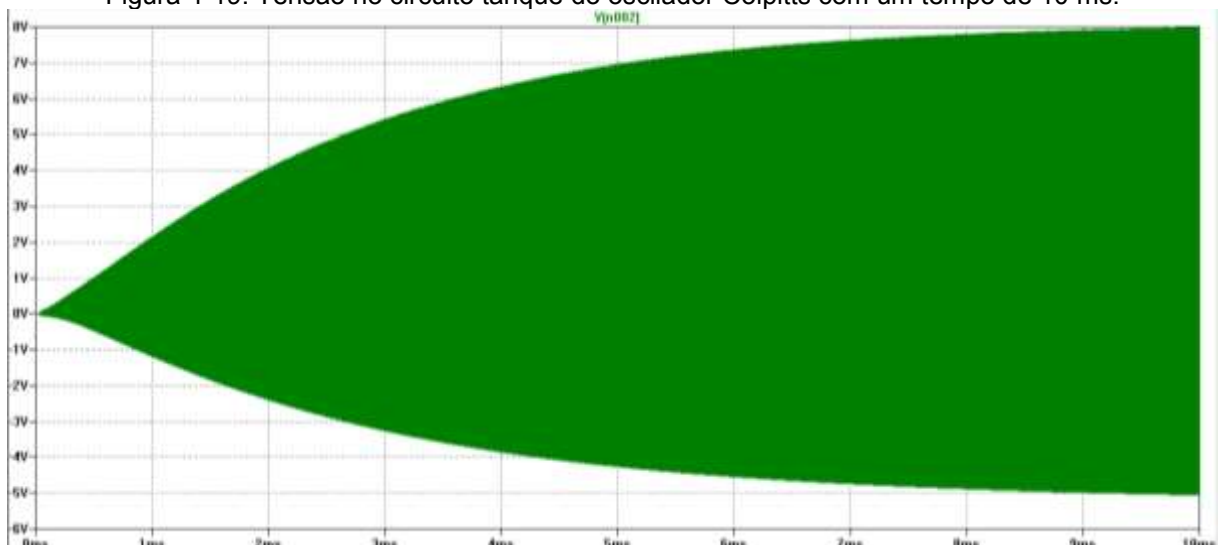


Figura 4-20: Corrente no circuito tanque do oscilador Colpitts com um tempo de 10 ms.

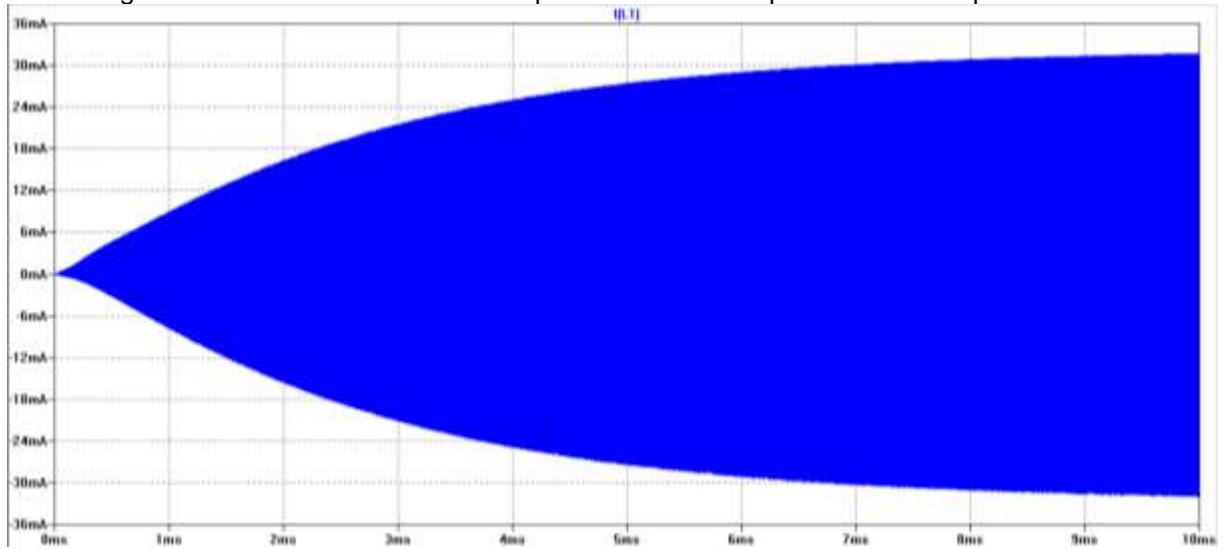


Figura 4-21: Potência no circuito tanque do oscilador Colpitts com um tempo de 10 ms.

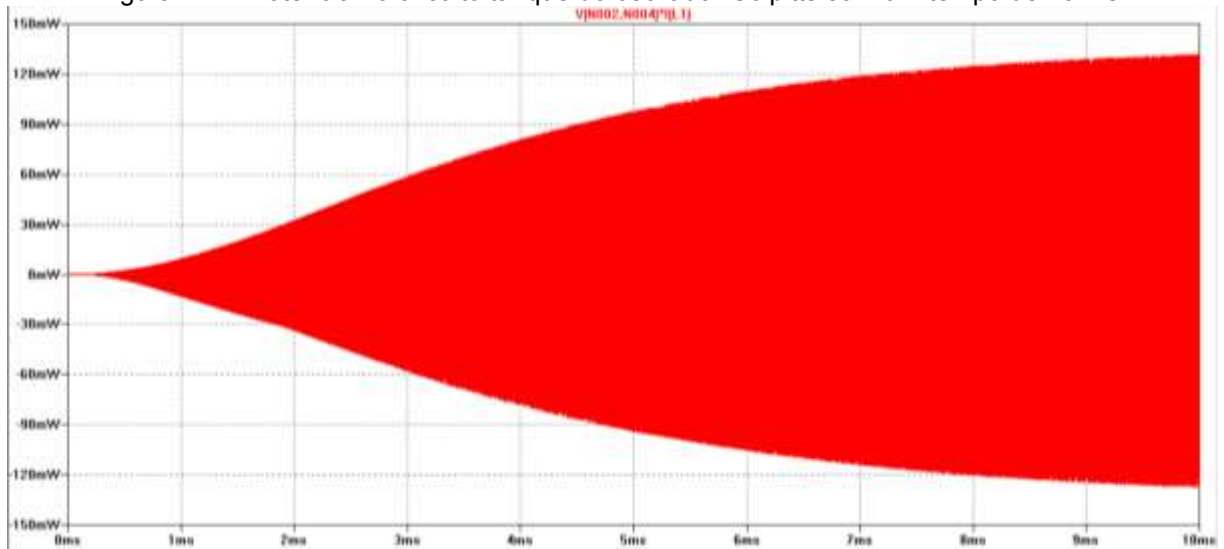


Figura 4-22: Tensão no circuito receptor do oscilador Colpitts com um tempo de 10 ms.

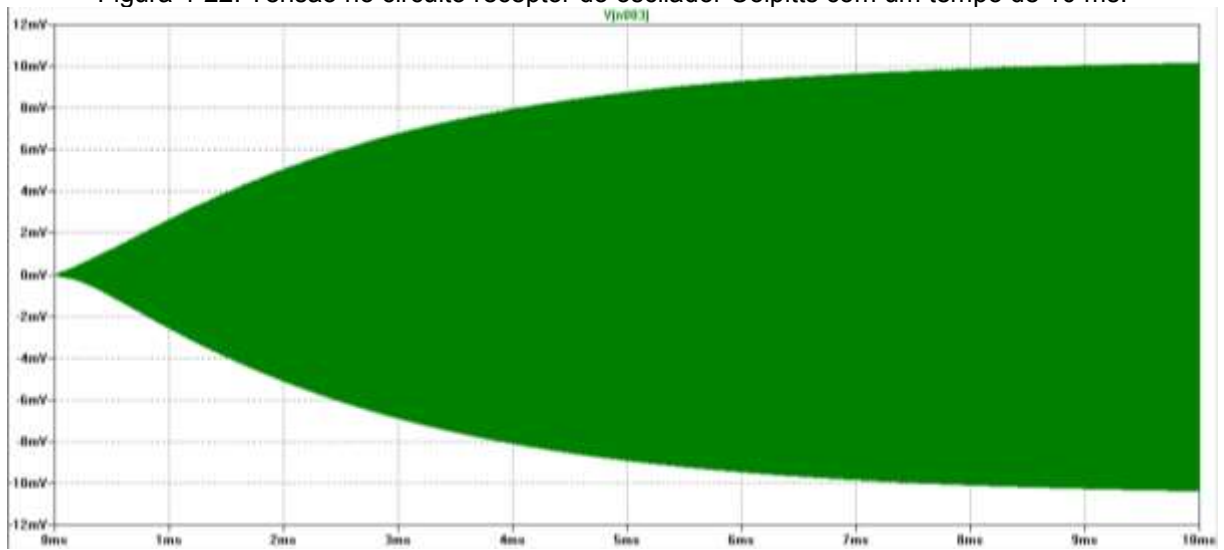


Figura 4-23: Corrente no circuito receptor do oscilador Colpitts com um tempo de 10 ms.

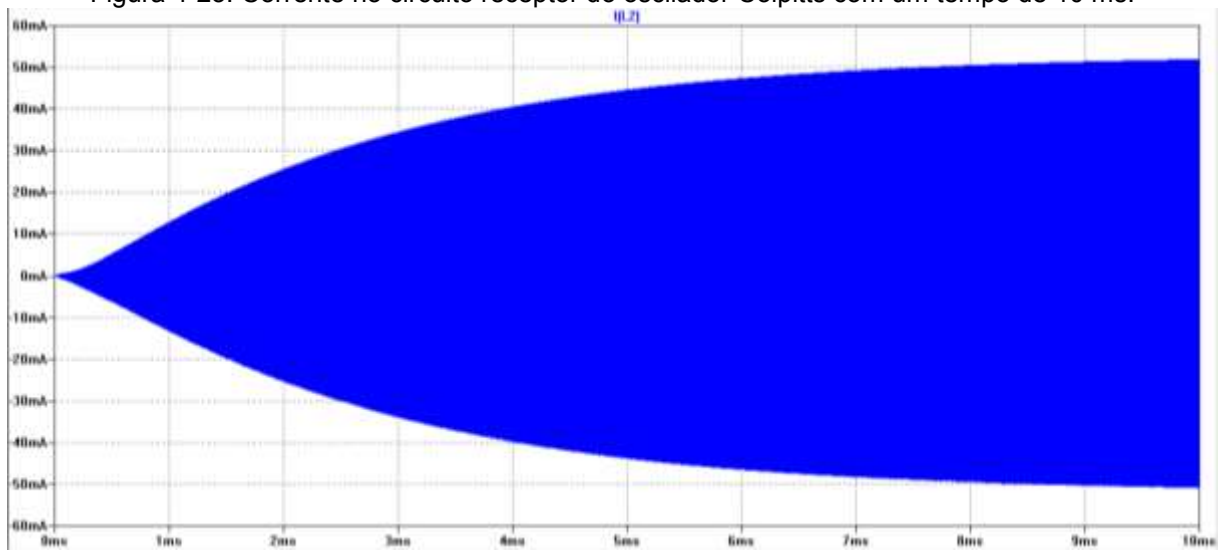
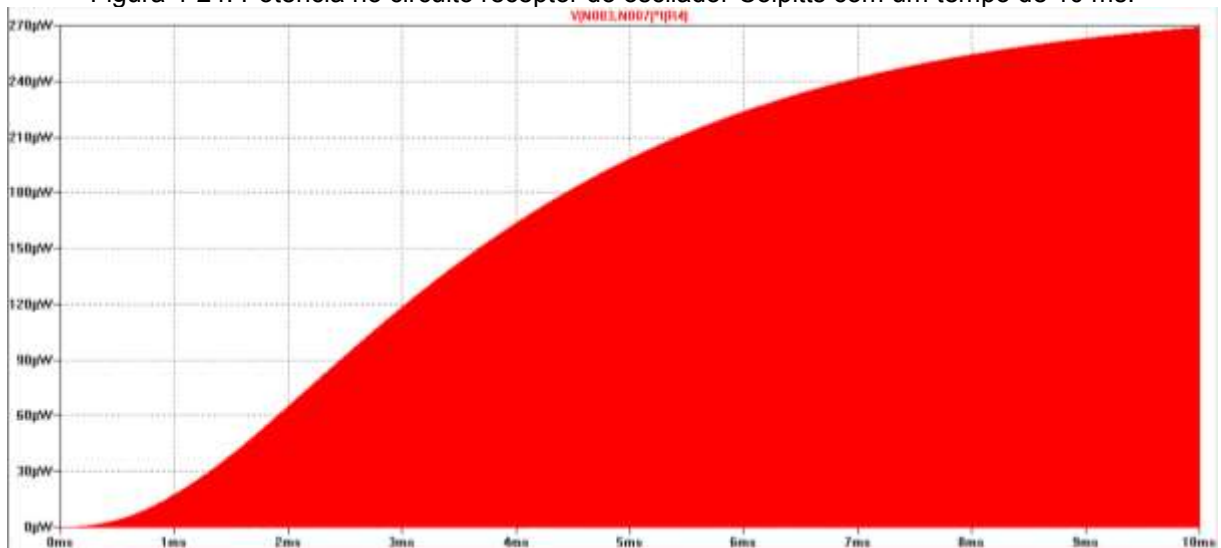




Figura 4-24: Potência no circuito receptor do oscilador Colpitts com um tempo de 10 ms.



Nota-se pela simulação que o oscilador Colpitts possui um baixo potencial para transmitir energia, visto que sua potência de transmissão recebida pelo circuito receptor está na faixa de micro Watts.

Para se ter uma percepção melhor do efeito da oscilação do circuito, alterou-se o tempo de simulação para 1 ms, mostrando o comportamento do oscilador Colpitts através das Figuras 4-25, 4-26 e 4-27 no circuito tanque e no circuito receptor com as Figuras 4-28, 4-29 e 4-30.

Figura 4-25: Tensão no circuito tanque do oscilador Colpitts com um tempo de 1 ms.

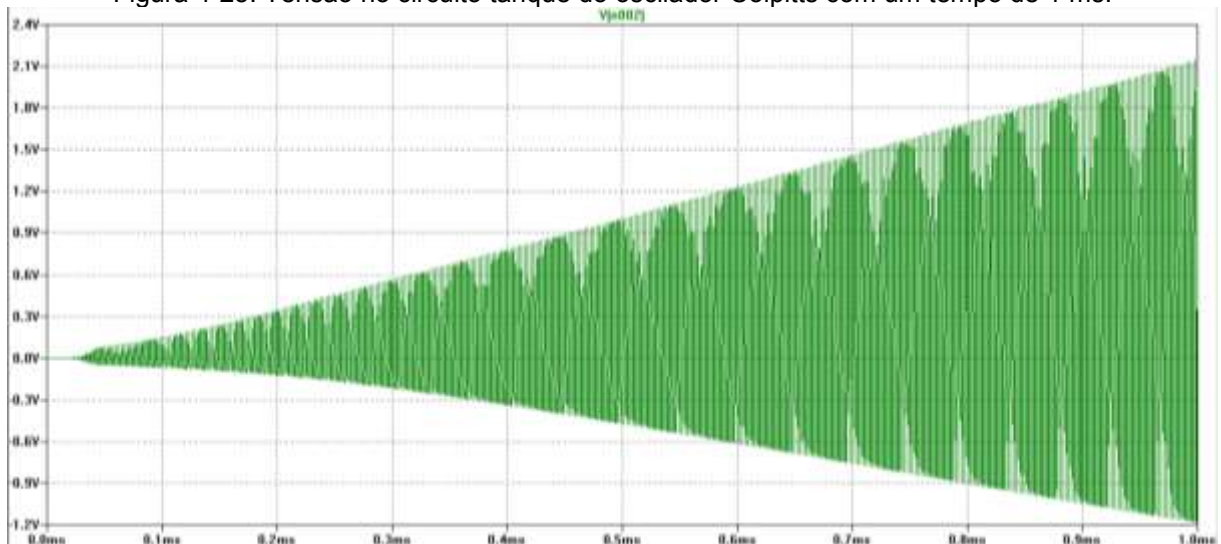




Figura 4-26: Corrente no circuito tanque do oscilador Colpitts com um tempo de 1 ms.

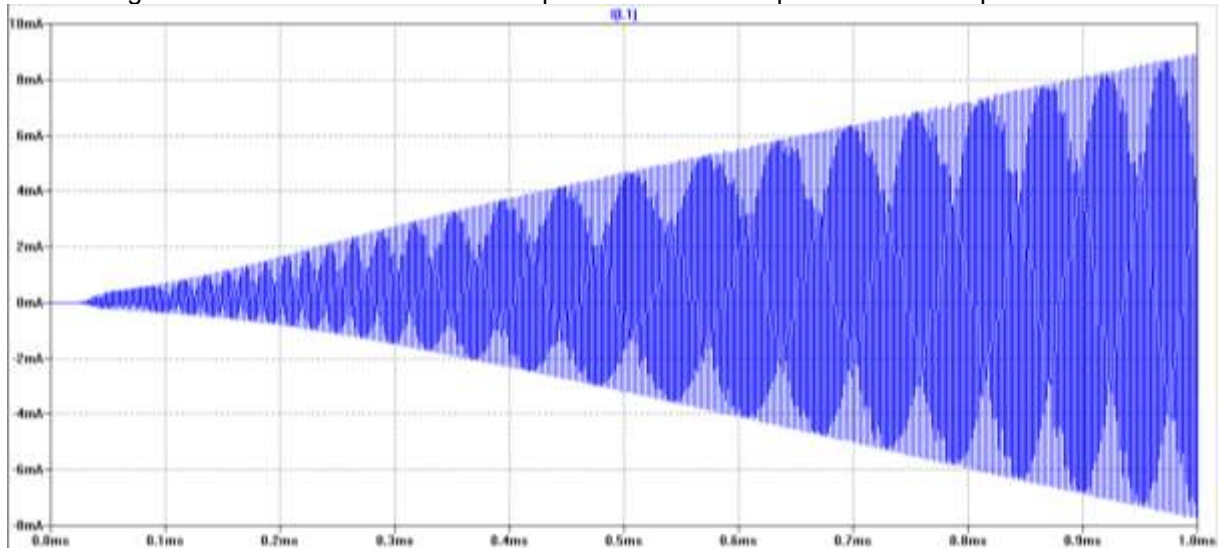


Figura 4-27: Potência no circuito tanque do oscilador Colpitts com um tempo de 1 ms.

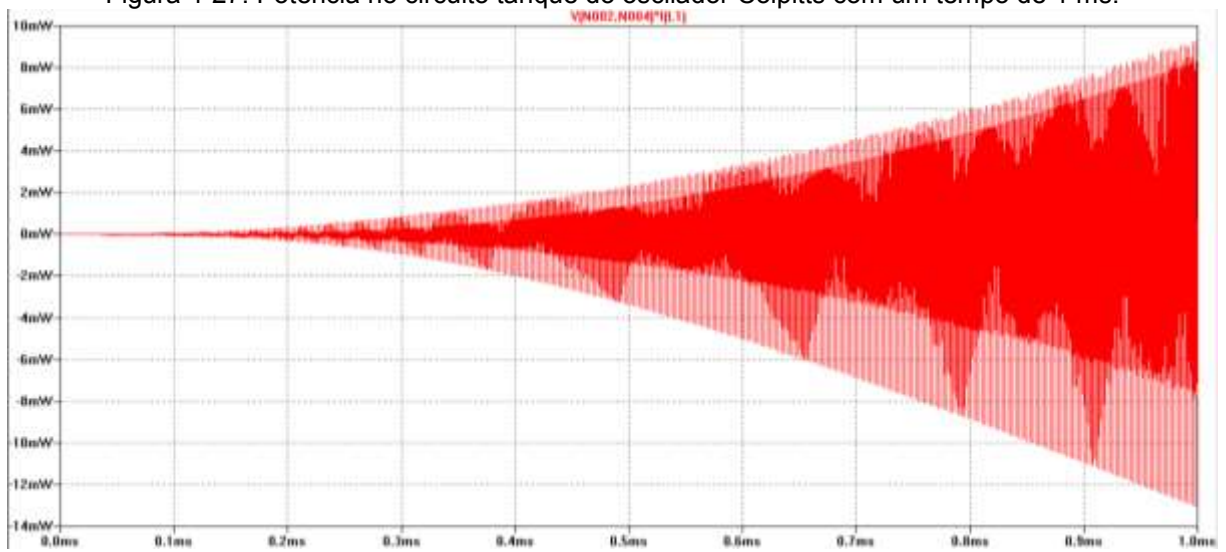


Figura 4-28: Tensão no circuito receptor do oscilador Colpitts com um tempo de 1 ms.

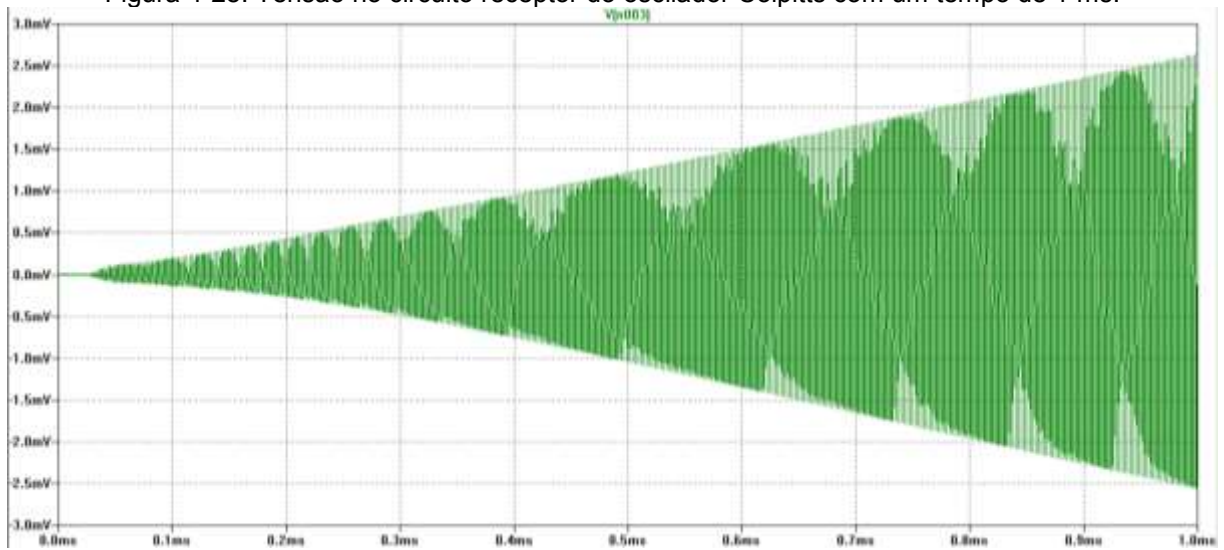


Figura 4-29: Corrente no circuito receptor do oscilador Colpitts com um tempo de 1 ms.

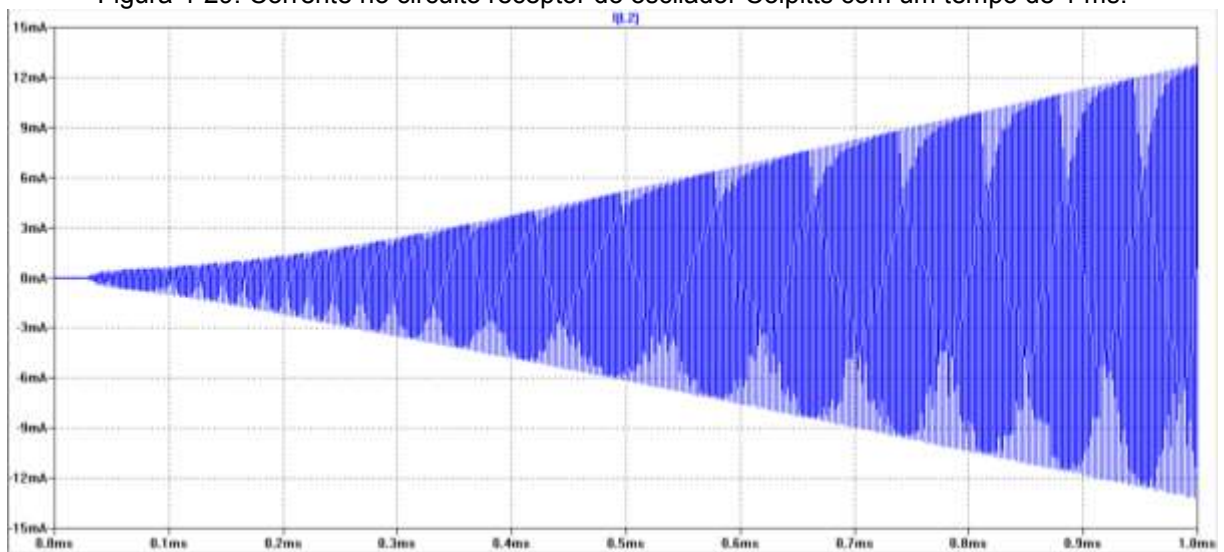
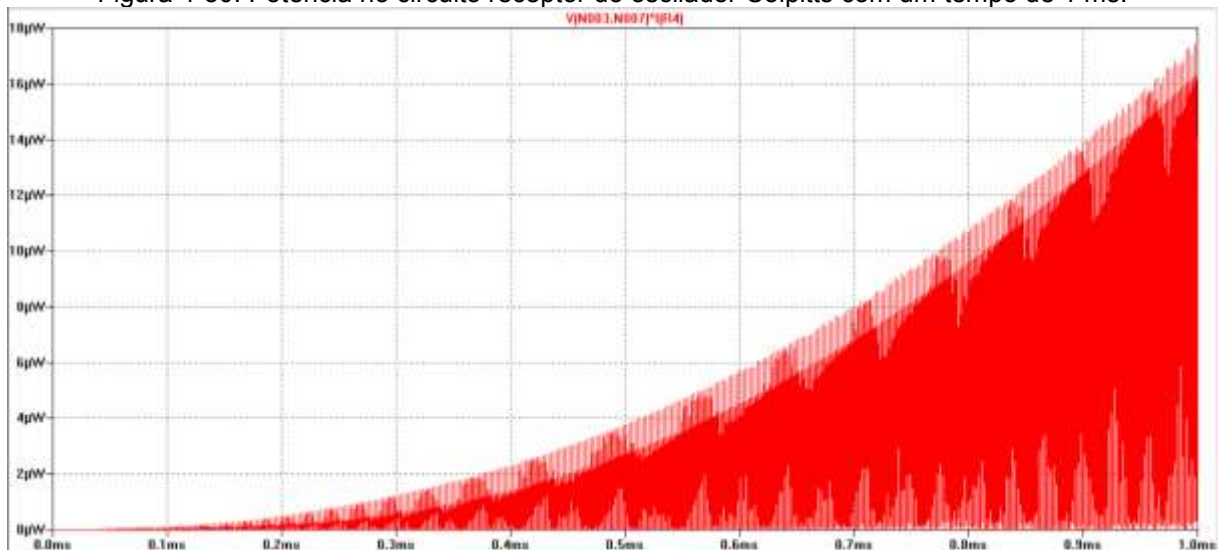


Figura 4-30: Potência no circuito receptor do oscilador Colpitts com um tempo de 1 ms.



Os valores máximos encontrados pelos parâmetros nesta simulação estão expostos nas Figuras 4-31 até 4-36.

Figura 4-31: Valor de tensão máxima no circuito tanque do oscilador Colpitts.

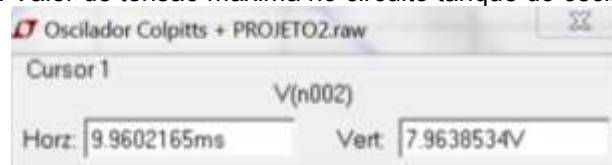


Figura 4-32: Valor de corrente máxima no circuito tanque do oscilador Colpitts.

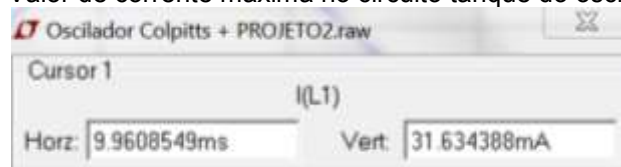


Figura 4-33: Valor de potência máxima no circuito tanque do oscilador Colpitts.

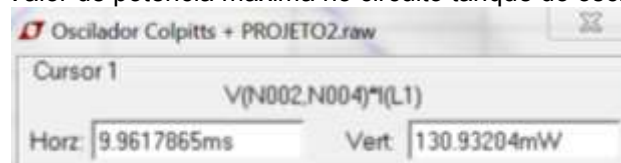


Figura 4-34: Valor de tensão máxima no circuito receptor do oscilador Colpitts.



Figura 4-35: Valor de corrente máxima no circuito receptor do oscilador Colpitts.



Figura 4-36: Valor de potência máxima no circuito receptor do oscilador Colpitts.



### 4.1.3 RESULTADOS DO OSCILADOR ROYER

Realizando a simulação com um tempo de análise de 10 ms o oscilador Royer apresentou o comportamento de acordo com as Figuras 4-37, 4-38 e 4-39 no circuito tanque e no circuito receptor com as Figuras 4-40, 4-41 e 4-42.

Figura 4-37: Tensão no circuito tanque do oscilador Royer com um tempo de 10 ms.

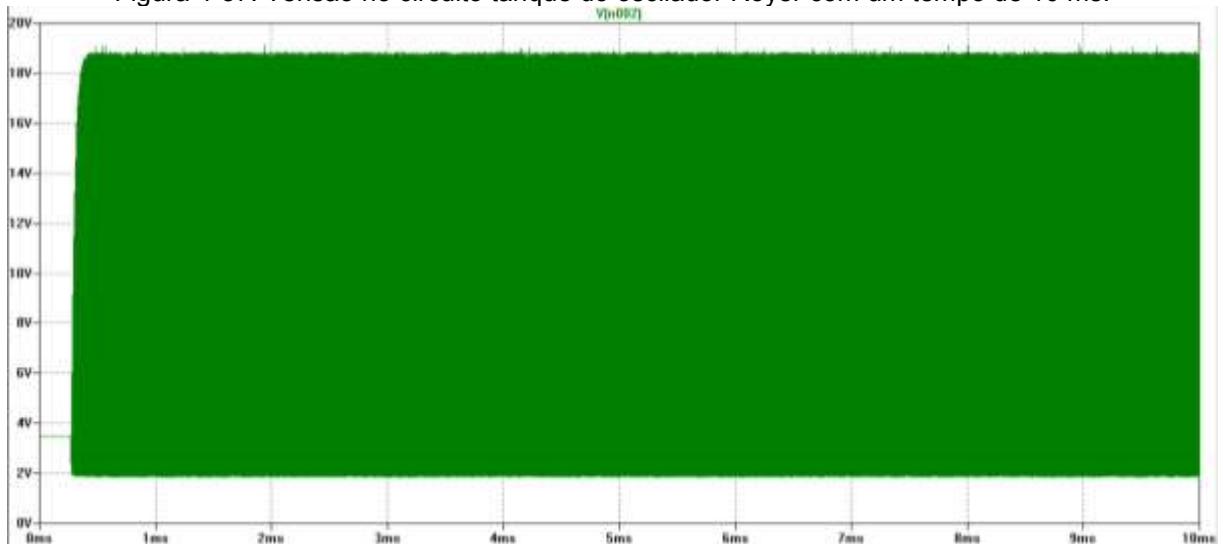


Figura 4-38: Corrente no circuito tanque do oscilador Royer com um tempo de 10 ms.

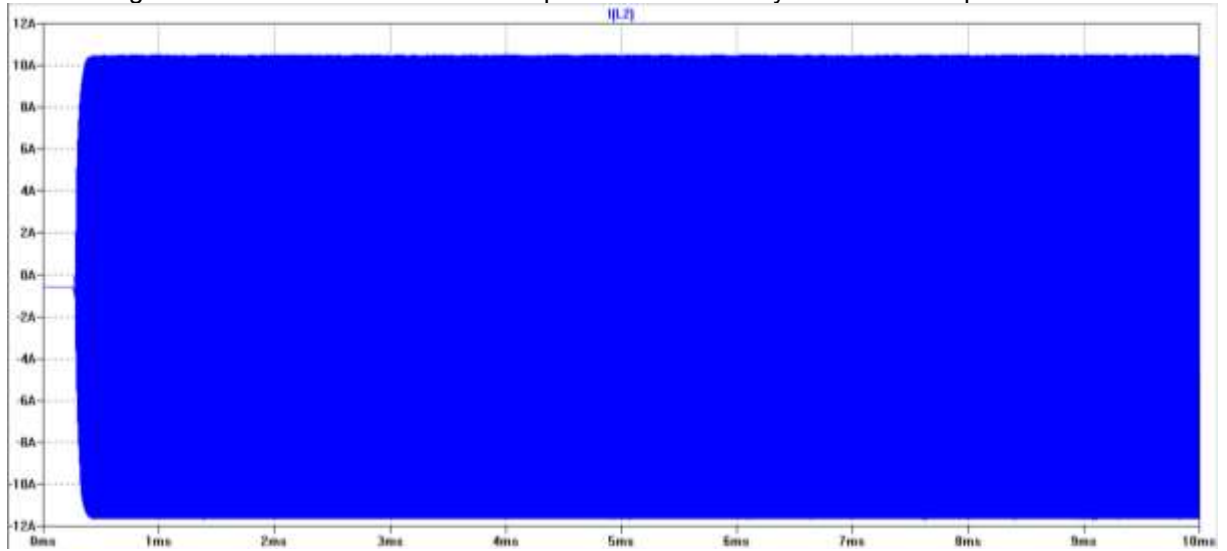


Figura 4-39: Potência no circuito tanque do oscilador Royer com um tempo de 10 ms.

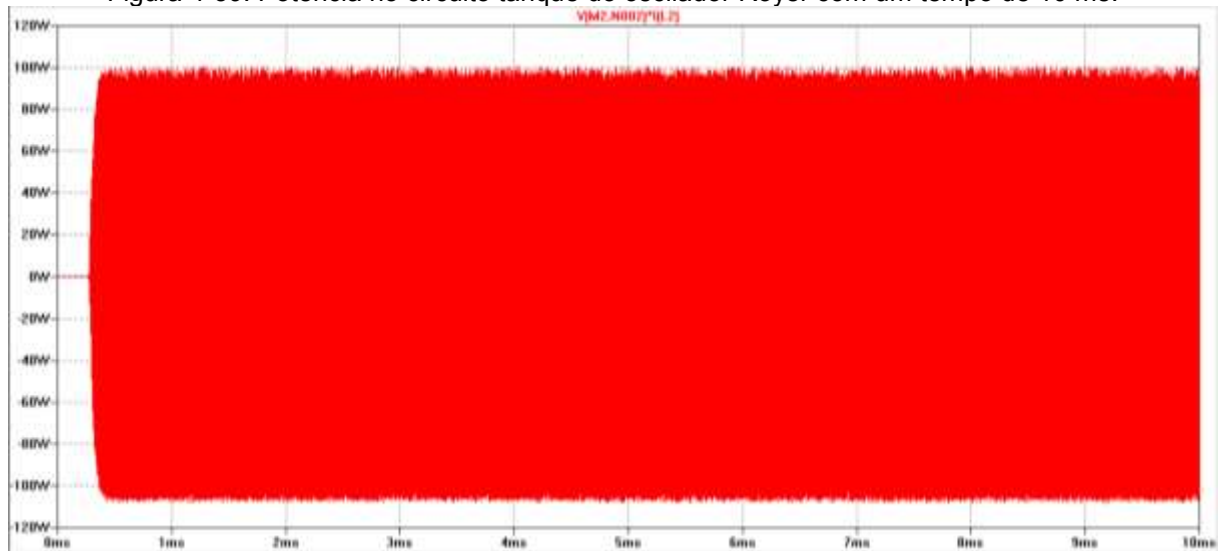


Figura 4-40: Tensão no circuito receptor do oscilador Royer com um tempo de 10 ms.

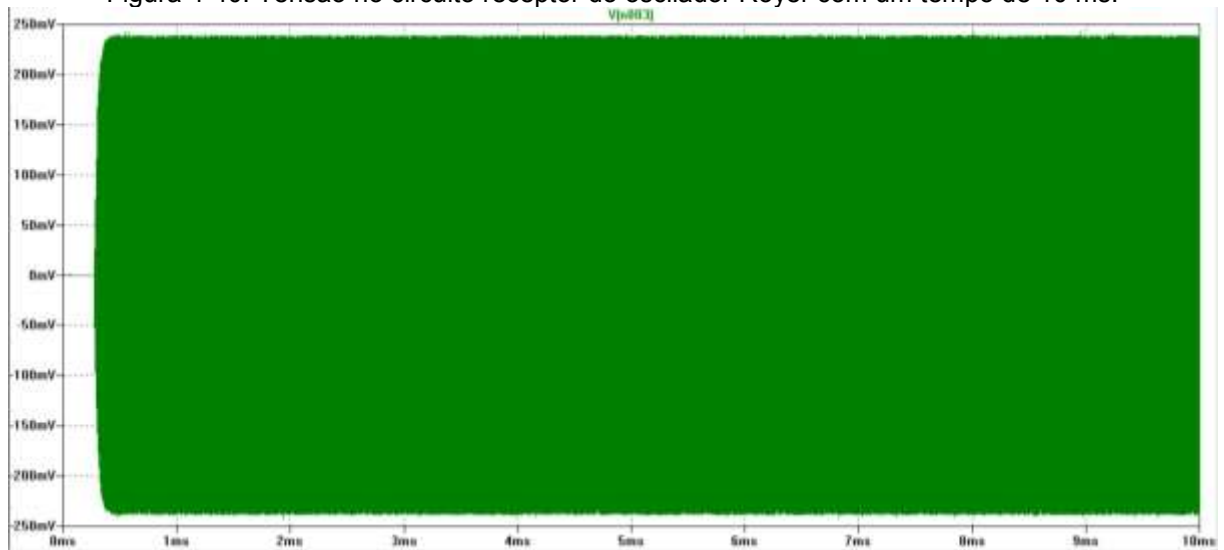


Figura 4-41: Corrente no circuito receptor do oscilador Royer com um tempo de 10 ms.

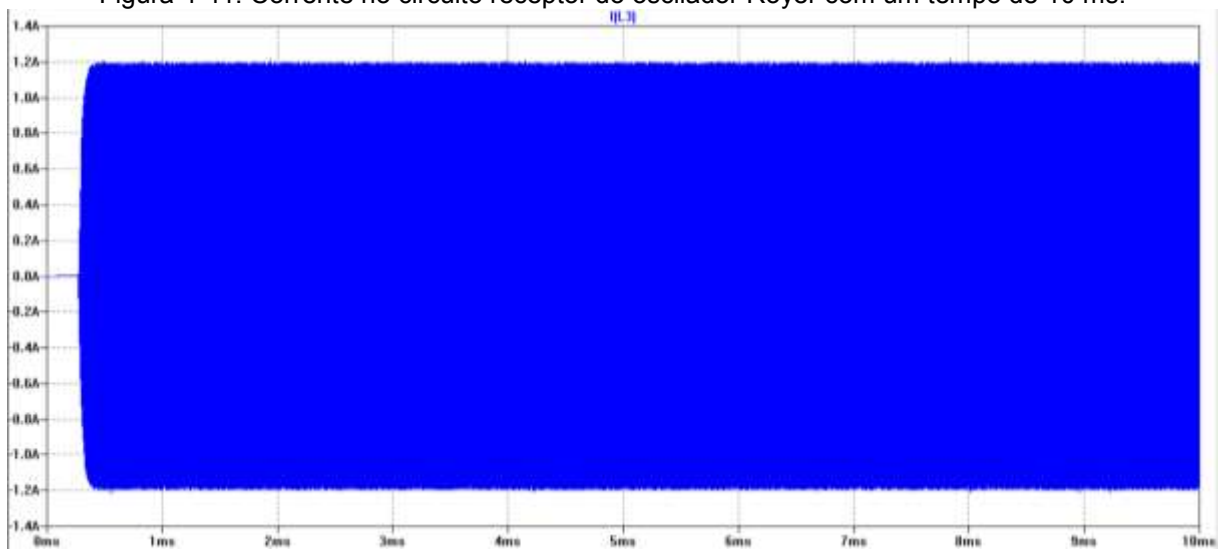


Figura 4-42: Potência no circuito receptor do oscilador Royer com um tempo de 10 ms.



O oscilador Royer apresentou um alto potencial para transmitir energia, fazendo com que a potência recebida pelo receptor seja de mili Watts, ou seja, 1000 vezes maior que os osciladores Hartley e Colpitts.

Para uma percepção melhor do efeito da oscilação do circuito, alterou-se o tempo de simulação para 1 ms, mostrando o comportamento do oscilador Royer através das Figuras 4-43, 4-44 e 4-45 no circuito tanque e no circuito receptor com as Figuras 4-46, 4-47 e 4-48.

Figura 4-43: Tensão no circuito tanque do oscilador Royer com um tempo de 1 ms.

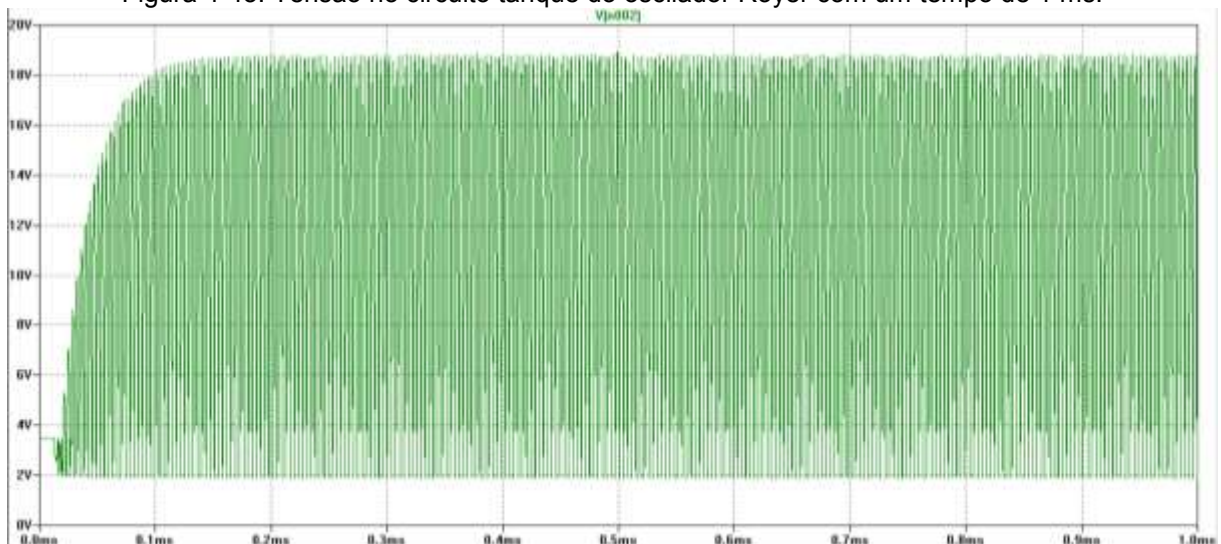




Figura 4-44: Corrente no circuito tanque do oscilador Royer com um tempo de 1 ms.

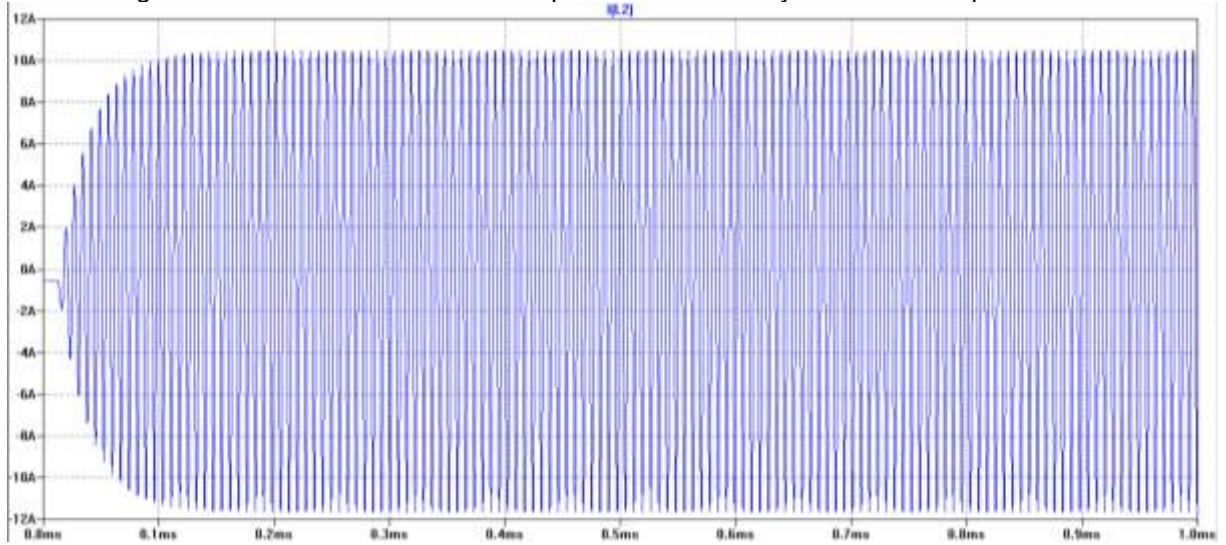


Figura 4-45: Potência no circuito tanque do oscilador Royer com um tempo de 1 ms.

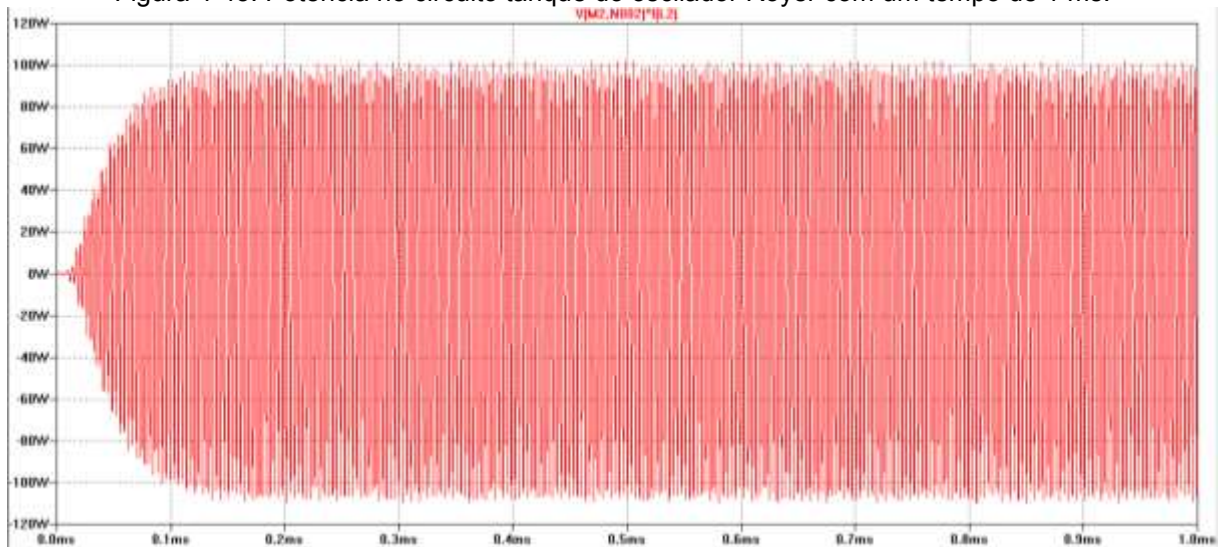




Figura 4-46: Tensão no circuito receptor do oscilador Royer com um tempo de 1 ms.

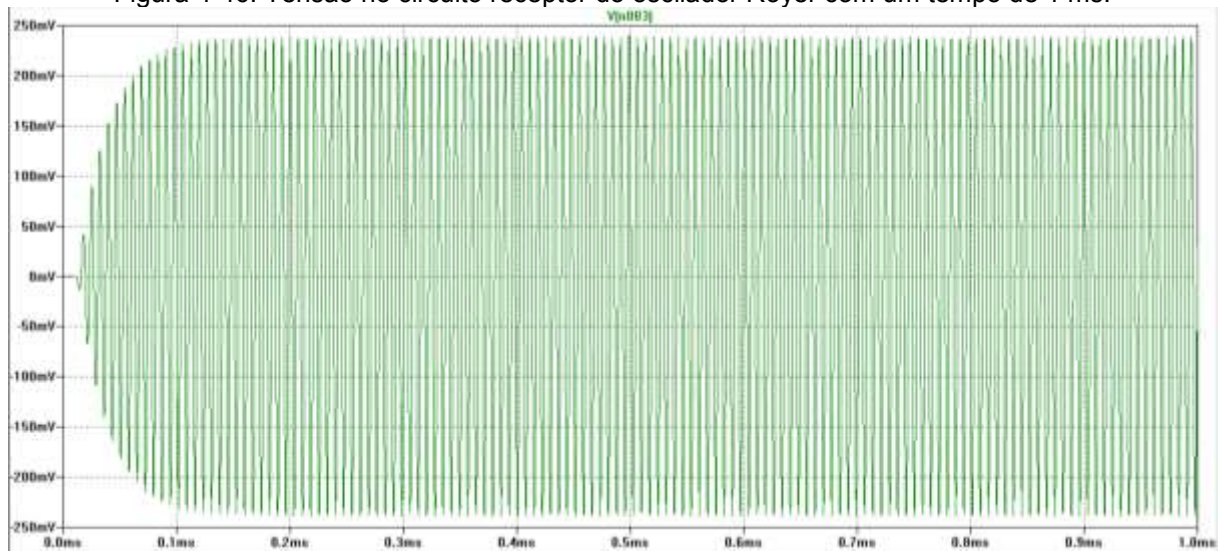


Figura 4-47: Corrente no circuito receptor do oscilador Royer com um tempo de 1 ms.

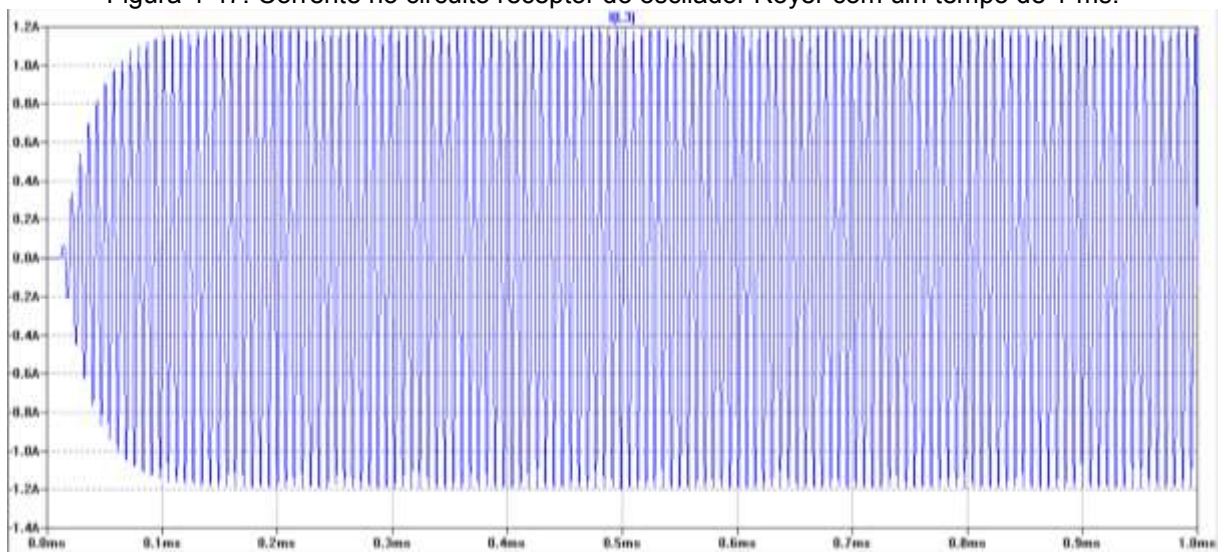
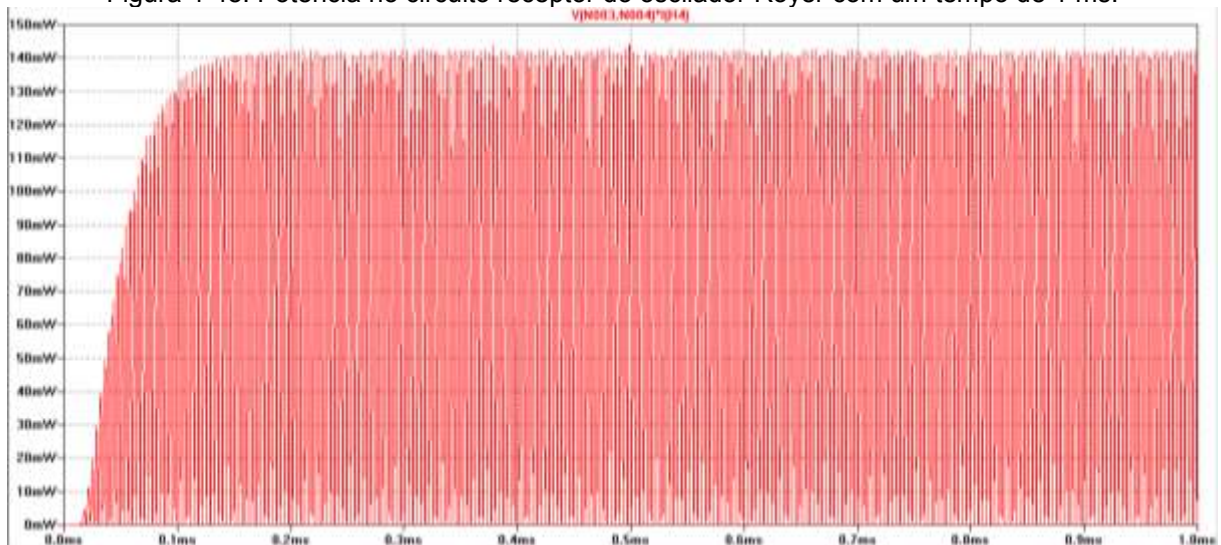


Figura 4-48: Potência no circuito receptor do oscilador Royer com um tempo de 1 ms.



Os valores máximos encontrados pelos parâmetros nesta simulação estão expostos nas Figuras 4-49 até 4-54.

Figura 4-49: Valor de tensão máxima no circuito tanque do oscilador Royer.



Figura 4-50: Valor de corrente máxima no circuito tanque do oscilador Royer.



Figura 4-51: Valor de potência máxima no circuito tanque do oscilador Royer.

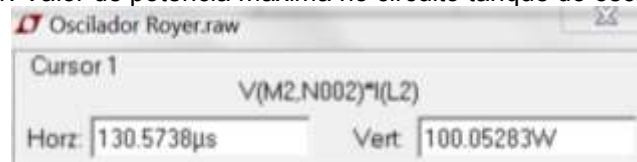


Figura 4-52: Valor de tensão máxima no circuito receptor do oscilador Royer.

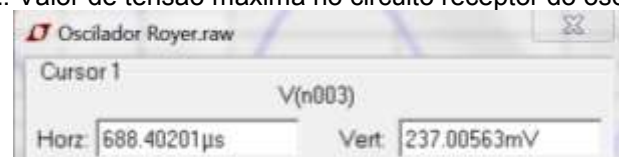
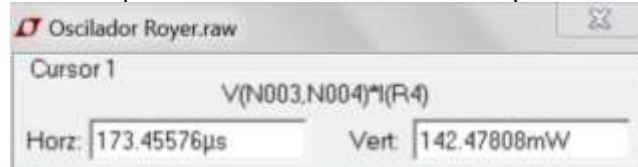


Figura 4-53: Valor de corrente máxima no circuito receptor do oscilador Royer.



Figura 4-54: Valor de potência máxima no circuito receptor do oscilador Royer.



## 4.2 COMPARANDO OS RESULTADOS

Para realizar a comparação do desempenho de cada oscilador através dos parâmetros de tensão, corrente e potência, foram criadas a Tabela 4-1 para o circuito tanque e Tabela 4-2 para o circuito receptor.

Tabela 4-1- Comparação dos Parâmetros no Circuito Tanque.

Hartley			Colpitts			Royer		
Tensão	Corrente	Potência	Tensão	Corrente	Potência	Tensão	Corrente	Potência
2,3 V	37,5 mA	38,5 mW	7,96 V	31,63 mA	130,93 mW	18,91 V	10,42 A	100,0 W

Tabela 4-2- Comparação dos Parâmetros no Circuito Receptor.

Hartley			Colpitts			Royer		
Tensão	Corrente	Potência	Tensão	Corrente	Potência	Tensão	Corrente	Potência
902 μV	4,1 mA	2 μW	10,1 mV	51,8 mA	268 μW	237 mV	1,18 A	142,5 mW

## Capítulo 5. CONCLUSÃO

---

Com base nos resultados obtidos nos três modelos de circuitos osciladores, para realizar a transmissão de energia sem fio, através do método de acoplamento indutivo ressonante registrou-se que o oscilador Royer apresentou um desempenho melhor, ou seja, valores superiores de tensão, corrente e potência do que os osciladores Hartley e Colpitts. Entretanto vale ressaltar que dependendo da aplicação a ser desenvolvida os modelos de osciladores Hartley e Colpitts não podem ser descartados. O *software* LTSPICE IV se mostrou eficiente para testar as modelagens dos osciladores Hartley, Colpitts e Royer.

### 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Demonstrado o efeito de transmissão de energia sem fio pelo método de acoplamento indutivo ressonante através dos osciladores Hartley, Colpitts e Royer, aplicados ao *software* LTSPICE IV sugere-se a realização para trabalhos futuros de um estudo comparativo entre os resultados reais e os teóricos com a finalidade de desenvolver aplicações concretas para tal sistema de transmissão de energia.

[ESTA PAGINA FOI DEIXADA EM BRANCO INTENCIONALMENTE]

---

**REFERÊNCIAS**

---

- ABREU, Reinaldo Lima de. **Projeto e Desenvolvimento de Dispositivo para Transmissão de Energia Elétrica sem Fios por Modos Ressonantes**. 2012.
- BELO, Daniel Gil. **Otimização de sistemas de transmissão de energia sem fios**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- BONIFÁCIO, Nuno Miguel Coluna. **Transmissão de energia sem fios**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- BRAGA, N. C. **Como funcionam os osciladores (ART379)**. Disponível em <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/>> Acesso em: 19.01.2018
- COATES, E. **Oscillators – Module 2**. 2013. Disponível em <<http://www.learnabout-electronics.org/>>. Acesso em: 19.01.2018.
- FÉLIX, Ramon Eustáquio Nunes, et. al. **Sistema Transmissor de Energia elétrica sem fio**. 2016.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- HAYT, W. H. Jr. ; BUCK, J. A. (2003). **Eletromagnetismo**. 6. Ed. Rio de Janeiro: S.A., 2003.
- JANNUZZI, Gilberto De Martino; SWISHER, Joel NP. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. 1997.
- NÓBREGA, Kleber Zuza, VELOSO, Carlos Henrique; COSTA, Cleyton Lima;. Aplicações para a tecnologia de transmissão de energia wireless através da indução magnética e sistemas ressonantes. In: **VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. 2012. Disponível em: <http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/5420/2594>
- RAMOS, André Pires. **Sistemas sem fios para carga de baterias**. Universidade de Aveiro 2013 Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática. Dissertação de mestrado. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/12743/1/Tese.pdf>.
- RANGEL, Rodrigo K.; KIENITZ, Karl Heinz; BRANDÃO, Mauricio Pazini. **Sistema de Inspecao de Linhas de Transmissao de Energia Electrica Utilizando Veiculos Aereos Nao-Tripulados**. 2009.
- SCHULER, Charles. **ELETRÔNICA II**. 7ed: Série Tekne São Paulo: AMGH Editora, 2013. Disponível em: <https://books.google.com.br>. Acesso em: 20 04.2018

- SILVA, Marcio Antonio Pimenta da et al. **Otimização de enlace indutivo ressonante com três bobinas para transmissão de energia sem fio.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- SILVEIRA, M. N. **Protótipo de Circuitos Transmissor e Receptor de Energia Elétrica sem Fio.** 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- Sinusoidal Oscillators. Disponível em:  
<<http://www.talkingelectronics.com/Download%20eBooks/Principles%20of%20electronics/CH-14.pdf>>. Acesso em: 19.01.2018.
- SOUZA, Wanberton Gabriel de. **Análise experimental da transmissão de energia sem fios por modos ressonantes.** 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14616>.
- TESLA. **Nikola Tesla's Electricity Inventions.** Disponível em:  
<<http://www.teslasociety.org/>>. Acesso em: 03.01.2018.
- VELOSO, Carlos Henrique; COSTA, Cleyton Lima; NÓBREGA, Kleber Zuza. Aplicações para a tecnologia de transmissão de energia wireless através da indução magnética e sistemas ressonantes. In: **VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação.** 2012.