

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

Júlio César Gomes Oliveira

**Utilização da plataforma arduino para a
automatização de um circuito RLC acoplado
para coleta de dados**

Sorocaba

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

Júlio César Gomes Oliveira

**Utilização da plataforma arduino para a automatização de
um circuito *RLC* acoplado para coleta de dados**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Licenciatura Plena em Física da
Universidade Federal de São Carlos, *Campus*
Sorocaba, para obtenção do título de Licenci-
ado em Física. Sorocaba, 29 de abril de 2022.

Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

Sorocaba

2022

Júlio César Gomes, Oliveira

Utilização da plataforma arduino para a automatização de um circuito RLC acoplado para coleta de dados / Oliveira Júlio César Gomes -- 2022. 50f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): James Alves de Souza

Banca Examinadora: Marco Aurélio Euflauzino Maria, Tersio Guilherme de Souza Cruz

Bibliografia

1. Automatização. 2. Ressonância. 3. Ensino de física. I. Júlio César Gomes, Oliveira. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979



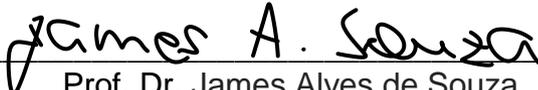
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - *Campus* Sorocaba
Coordenação do Curso de Licenciatura em Física

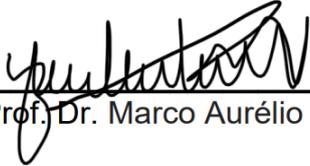
Trabalho de Conclusão de Curso

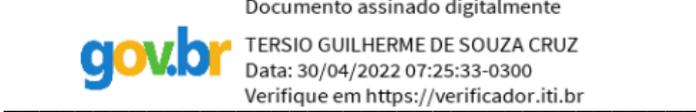
Folha de aprovação

Júlio César Gomes Oliveira

**“UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO PARA A AUTOMATIZAÇÃO
DE UM CIRCUITO RLC ACOPLADO PARA COLETA DE DADOS”**

Orientador 
Prof. Dr. James Alves de Souza

Membro 1 
Prof. Dr. Marco Aurélio Euflauzino Maria

Membro 2 
Prof. Dr. Tersio Guilherme de Souza Cruz

Documento assinado digitalmente



TERSIO GUILHERME DE SOUZA CRUZ

Data: 30/04/2022 07:25:33-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Sorocaba, 29 de abril de 2022.



ATA DA DEFESA PÚBLICA

ATA Nº 07/2022

Aos vinte e nove dias do mês de abril de 2022, por videoconferência pela plataforma do Google Meet, realizou-se a defesa pública do trabalho de Conclusão de Curso do estudante **Júlio Cesar Gomes Oliveira** do Curso de Licenciatura em Física – Sorocaba, devidamente matriculado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, perante a Banca Examinadora, composta pelos Prof. Dr. James Alves de Souza, Prof. Dr. Marco Aurélio Euflauzino Maria e Prof. Dr. Tersio Guilherme de Souza Cruz segundo o estabelecido nas Normas para apresentação de Trabalho de Conclusão do Curso.

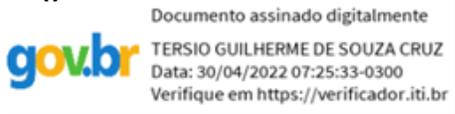
Após a apresentação e arguições, a Banca deliberou, segundo os critérios estabelecidos nas normas do TCC do curso:



Prof. Dr. James Alves de Souza Nota: **10 (DEZ)**



Prof. Dr. Marco Aurélio Euflauzino Maria Nota: **10 (DEZ)**



Prof. Dr. Tersio Guilherme de Souza Cruz Nota: **10 (DEZ)**

Com isso, o Trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota final **10 (DEZ)**.

Sorocaba, 29 de abril de 2022.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, pelo sopro da vida, e pela graça do seu filho amado, o Senhor Jesus Cristo.

Ao meu orientador, professor Dr. James Alves de Souza, por esses anos de amizade, e por ter aceitado me orientar. Muito obrigado por sempre desafiar-nos a ir além e fazer melhor.

Aos meus pais, Acácio Luiz Oliveira e Sara Lins Gomes Oliveira, sem os quais estar aqui não seria possível.

Aos meus irmãos Danilo, Glaucio e Natália, por todos esses incríveis anos de convivência. Agradeço à Deus por tê-los como irmãos.

À todos os meus amigos da UFSCar Sorocaba.

À todos os meus amigos da Fatec Sorocaba, em especial, o Maurício Ribeiro Maciel, pela amizade diária e por ter me ajudado profundamente no desenvolvimento dos experimentos realizados.

À todos os professores e demais pessoas, que de alguma forma, contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico, intelectual e pessoal. Muito obrigado!

*Onde, de pé, se erguia a estátua,
De Newton com o seu rosto prismático, silencioso,
O sinal de mármore de uma mente eternamente,
Viajando por estranhos mares de pensamento, solitário.*

- Wordsworth, William (1770-1850)

The Prelude, or Growth of a Poet's Mind

Resumo

OLIVEIRA. J. C. G. *Utilização da plataforma arduino para a automatização de um circuito RLC acoplado para coleta de dados*. 2022. Trabalho de Conclusão de Graduação (Licenciatura em Física) – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2022.

A crescente integração de tecnologias nos laboratórios de ensino de ciências, através de *softwares* e automatização de experimentos, tem motivado professores e alunos a desenvolverem habilidades técnicas envolvendo computação científica. Neste trabalho apresentamos tal integração através de um experimento simples e de baixo custo. Especificamente, apresentamos como o processo de coleta de dados em um circuito *RLC* ressonante de duas malhas acoplado pode ser automatizado utilizando a plataforma arduino. Para obtenção dos parâmetros do sistema para a implementação do experimento, foi necessário realizar simulações do circuito com o simulador de circuitos eletrônicos Multisim. Após verificar o comportamento do sistema reportado na literatura, o circuito real foi implementado e a aquisição de dados foi feita manualmente utilizando um osciloscópio. Os resultados mostraram que o circuito real exibe a mesma fenomenologia observada nas simulações. Em seguida, a automatização do processo de coleta de dados foi feita no experimento utilizando a plataforma arduino em conjunto com o *software* PLX-DAQ para gerar o gráfico que descreve o comportamento do sistema em tempo real. Os resultados experimentais obtidos manualmente e automaticamente apresentaram excelente concordância, mostrando que o processo de automatização não interfere no comportamento do sistema. A automatização do processo mostrou-se muito vantajosa, pois esta permitiu reduzir o tempo de experimentação do sistema de duas horas para apenas quinze minutos. Isso mostra que a automatização implementada no circuito analisado, além de promover o processo de integração entre experimentação, teoria, uso de tecnologias e simulações computacionais, pode auxiliar o professor a diminuir consideravelmente o tempo técnico de atividades repetitivas em um experimento, como a coleta de dados, de tal forma que o tempo de aula pode ser melhor aproveitado para análises e discussões de resultados.

Palavras-chave: Experimentação. Simulação computacional. Automatização. Ressonância. Ensino de Física.

Abstract

OLIVEIRA. J. C. G. *Use of the Arduino platform for the computerization of a coupled RLC circuit for data collection.* 2022. Graduation Final Work (Degree in Physics) – Federal University of São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2022.

The increasing integration of technology in science teaching laboratories, through software and computerization, has motivated teachers and students to develop technical skills involving scientific computing. In this work we present such integration using a simple and low cost experiment. In particular, we present how the data collection procedure in a coupled two-loop *RLC* resonant circuit can be computerized using the Arduino platform. To obtain the system parameters for the implementation of the experiment, it was necessary to perform simulations of the proposed circuit using the Multisim electronic circuit simulator. After verifying the same behavior of the system reported in the literature, the real circuit was implemented and the data collection was performed manually using an oscilloscope. The results showed that the real circuit exhibits the same phenomenology observed in the simulations. Then, the computerization of the data collection procedure was performed in the experiment using the arduino platform together with the PLX-DAQ *software*, to generate a graph in real time that describes the behavior of the system. The experimental results obtained manually and by the computerized system showed excellent agreement, showing that the computerization process does not interfere with the behavior of the system. Such process proved to be very advantageous, as it reduced the data collection procedure from two hours to just fifteen minutes. Additionally to the process of integration between experimentation, theory, use of technology and computer simulation, the computerization implemented in the analyzed circuit can help the teacher to considerably reduce the time spent for repetitive activities in an experiment, such as data collection, in such a way that the lesson time can be better used for analysis and discussion of results.

Keywords: Experimentation. Computational simulation. Computerization. Resonance. Physics Teaching.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Conceitos Básicos	17
2.2	Circuitos <i>AC</i>	20
2.2.1	Resistores, capacitores e indutores	22
2.2.2	Circuito <i>RLC</i> e o fenômeno de ressonância	23
2.2.3	Circuito <i>RLC</i> acoplado	24
3	SIMULAÇÃO DO CIRCUITO RLC ACOPLADO E COLETA AUTOMATIZADA DE DADOS	26
3.1	O Simulador Computacional Multisim	26
3.1.1	Simulação do circuito <i>RLC</i> acoplado Utilizando o Multisim	28
3.2	Coleta manual de dados no circuito real utilizando um osciloscópio	31
3.3	A Plataforma Arduino	35
3.3.1	Aquisição Automática de dados utilizando-se o <i>software</i> Microsoft Excel e o PLX-DAQ	36
3.3.2	Implementação da plataforma arduino no circuito <i>RLC</i> acoplado para a coleta automática de dados	38
3.3.3	Comportamento do sistema com a variação da capacitância de acoplamento	40
4	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	REFERÊNCIAS	45
A	ALGORITMO IMPLEMENTADO NA PLATAFORMA ARDUINO	47

Lista de ilustrações

Figura 1	– Duas ondas senoidais de mesma frequência (ω) fora de fase por ϕ	21
Figura 2	– Circuito RLC em série alimentado por uma fonte de tensão senoidal $\vartheta(t)$. . .	23
Figura 3	– Circuito RLC acoplado alimentado por uma fonte de tensão senoidal $\vartheta(t)$. O circuito é composto por duas malhas, $R_1L_1C_1$ e $R_2L_2C_2$ acopladas por um capacitor de capacitância C . A chave SW pode ser ligada ou desligada para verificar o efeito do acoplamento na frequência de ressonância medida no resistor R_2	24
Figura 4	– Tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função de $\Delta = f_{in} - f_0$, sendo f_{in} a frequência do sinal de entrada e $f_0 = 28 \text{ kHz}$ a frequência de ressonância (linha vertical) do circuito $R_2L_2C_{eq}$, obtida com a chave SW aberta, sendo $C_{eq} = 32 \text{ nF}$. Os parâmetros utilizados para obtenção desta simulação foram: $R_1L_1C_1(0; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96 \text{ }\Omega; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$ e $C = 47 \text{ nF}$	25
Figura 5	– Imagem de um circuito $RLC(100 \text{ }\Omega; 1 \text{ mH}; 100 \text{ }\mu\text{F})$ idealizado no simulador computacional Multisim, mostrando o seu ambiente interativo com o gerador de frequência (1), o osciloscópio (2), e os seus respectivos painéis (3) e (4) para a configuração de parâmetros. Os pontos marcados com as letras E, F G e H mostram as conexões dos canais A e B do osciloscópio, realizadas para a medição da tensão no resistor (EF) e no indutor (GH), respectivamente. . .	27
Figura 6	– Circuito RLC acoplado projetado no simulador computacional Multisim. Em (1) mostramos o gerador de frequência, (2) o osciloscópio, (3) a ma- lha do circuito acoplado e em (4) o painel de configuração de parâme- tros do gerador de frequência. Os valores dos parâmetros utilizados são $R_1L_1C_1(0; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96 \text{ }\Omega; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$ e $C = 47 \text{ nF}$	28
Figura 7	– Painel do osciloscópio do simulador Multisim mostrando a leitura da tensão de pico a pico V_{pp} em R_2 através do Canal A do osciloscópio para um determinado valor da frequência do sinal de entrada. A linha vertical amarela marca o valor de mínimo T_2 e a linha azul o valor de máximo T_1 da curva senoidal, de maneira que neste exemplo tem-se $V_{pp} = T_2 - T_1 = -80, 769 \text{ mV}$	29
Figura 8	– Tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$ entre a frequência do sinal de entrada f_{in} e a frequência de ressonância do circuito acoplado com a chave aberta, $f_0 = 28 \text{ kHz}$ (linha vertical), cuja capacitância equivalente é dada por $C_{eq} = 32 \text{ nF}$. Os parâmetros utilizados para obtenção desta simulação foram: $R_1L_1C_1(0; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96 \text{ }\Omega; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$ e $C = 47 \text{ nF}$	30

Figura 9 – Superior: esquema da montagem experimental do circuito RLC acoplado para a coleta manual de dados. Em (1) mostramos a representação do gerador de frequência, em (2) o osciloscópio com o canal A conectado em R_2 para a leitura de V_{pp} e em (3) a placa <i>protoboard</i> para a conexão dos componentes do circuito. Inferior: foto da montagem do experimento no laboratório.	32
Figura 10 – Tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$ obtida manualmente com um osciloscópio para o circuito RLC acoplado real com a chave (SW) aberta e fechada. Os parâmetros utilizados neste experimento foram os mesmos utilizados na simulação apresentada na figura 8, ou seja, $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu F)$, $R_2L_2C_2(96\ \Omega; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu F)$ e $C = 47\text{ nF}$. A frequência de ressonância medida com SW aberta foi de $f_0 = 31\text{ kHz}$ (linha vertical).	33
Figura 11 – Comparação da tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$ obtida pela simulação descrita na figura 8 e manualmente com um osciloscópio, conforme figura 10. Em (a) é apresentado o resultado com a chave (SW) aberta e em (b) com SW fechada.	34
Figura 12 – Esquema de uma plataforma microcontroladora arduino, mostrando em (1) entrada USB, (2) botão <i>reset</i> , (3) e (6) GND ou aterramento, (4) entradas e saídas digitais, (5) entradas e saídas analógicas, (7) saída de 5V, (8) saída de 3,5V, e em (9) a entrada para a fonte de alimentação entre 7 a 12V.	35
Figura 13 – (a) Programação da placa arduino por meio da IDE - <i>Integrated Development Environment</i> e (b) planilha do Microsoft Excel com a ferramenta PLX-DAQ, mostrando a plotagem do gráfico através da coleta de dados automática do sistema.	37
Figura 14 – Superior: esquema da montagem experimental do circuito RLC acoplado para a coleta automatizada de dados. Em (1) mostramos a representação do gerador de frequência, em (2) o circuito para acionar a coleta de dados montado em uma mini <i>protoboard</i> , em (3) o botão de acionamento para a coleta automática de dados, em (4) a plataforma arduino e em (5) o circuito montado em uma placa <i>protoboard</i> . Inferior: foto equivalente da montagem do experimento no laboratório.	39
Figura 15 – Tensão de pico a pico V_{pp} do circuito RLC acoplado real medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$. A aquisição de dados foi feita automaticamente com a chave (SW) aberta e fechada através da plataforma arduino. Os parâmetros utilizados neste experimento foram os mesmos utilizados na simulação apresentada na figura 8, ou seja, $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu F)$, $R_2L_2C_2(96\ \Omega; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu F)$ e $C = 47\text{ nF}$. A frequência de ressonância medida com SW aberta foi de $f_0^{(a)} = 30\text{ kHz}$ (linha vertical).	40

- Figura 16 – Comparação da tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia Δ obtida manualmente com um osciloscópio, conforme figura 10, e automaticamente utilizando a plataforma arduino, apresentado na figura 15, para SW aberta em (a) e fechada em (b). 41
- Figura 17 – Tensão de pico a pico V_{pp} do circuito RLC acoplado real medida em R_2 em função da dessintonia Δ obtida automaticamente com a chave (SW) aberta e fechada através da plataforma arduino. Os parâmetros utilizados neste experimento foram $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0,1\text{ }\mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96\text{ }\Omega; 1\text{ mH}; 0,1\text{ }\mu\text{F})$ para quatro valores diferentes da capacitância de acoplamento $C = 47; 100; 147$ e 200 nF 42
- Figura 18 – Valor da janela de tensão V_{pp} medida com SW fechada em função da capacitância de acoplamento C 43

1 Introdução

A Física é uma ciência natural cujo objetivo é encontrar as leis que regem a natureza para a descrição de sistemas e fenômenos pertencentes ao microcosmos e macrocosmos. Esta é baseada nas metodologias de experimentação, observação e análises matemáticas.

Devido a isso, é sempre importante tentar apresentar e estabelecer a Física na educação, tanto no nível básico quanto no superior, como uma ciência construída e desenvolvida a partir da interação entre teoria e experimentação. Tanto a teoria quanto a experimentação englobam as metodologias de observação e da matemática. Junto à matemática temos também as simulações computacionais, a automatização e automação de sistemas.

Experimentos no ensino de Física são utilizados para demonstrações de fenômenos e leis obtidas teoricamente. Neste método pode-se explorar teorias físicas pela observação do experimento, pela modelagem dos resultados obtidos e pela aplicação de tecnologias (ETKINA et al., 2002). Neste trabalho o método da experimentação é estabelecido pela montagem de um circuito eletrônico, o qual permite explorar todas estas características e também aspectos teóricos da Física através de simulações computacionais.

Simulações computacionais são aplicações de especial interesse no ensino de Física, porque estas podem fornecer ambientes de modelagem muito eficazes envolvendo conceitos e processos da Física (JIMOYIANNIS; KOMIS, 2001; WEBER; WILHELM, 2020). No campo da pesquisa científica as simulações computacionais modificaram substancialmente as relações entre teoria e experimento. Simulações são conduzidas para analisar propriedades de sistemas físicos que geralmente são impossíveis, muito difíceis ou caros de serem estabelecidos e estudados experimentalmente. Estas também fornecem um excelente método de aproximação para problemas que não possuem uma solução analítica prática. Contudo, estes benefícios por si só na área de pesquisa não são suficientes para garantir que as simulações forneçam um aprendizado teórico mais eficiente no ensino de ciências, no que concerne principalmente à modelagem de sistemas, sendo necessário a elaboração de estratégias de ensino para tais aplicações (ANDERSON, 1972; ANDALORO; DONZELLI; SPERANDEO-MINEO, 1991; KING et al., 2009).

Nas últimas duas décadas, as simulações computacionais tornaram-se cada vez mais sofisticadas e disponíveis para os professores, com o intuito de facilitar o ensino e a aprendizagem de conceitos e métodos através da visualização e interação com modelos dinâmicos de fenômenos naturais (JONG; JOOLINGEN, 1998; PERKINS et al., 2006; WIEMAN; PERKINS; ADAMS, 2008). Simulações também foram consideradas durante o desenvolvimento deste trabalho, pois utilizamos um simulador de circuitos eletrônicos,

o qual foi essencial para conseguirmos conceber o experimento e observar os fenômenos característicos do mesmo (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002).

Paralelamente à utilização de simulações computacionais para o ensino de ciências, a pesquisa sobre o uso de tecnologias na educação tem se expandido e se diversificado na medida em que novas tecnologias são desenvolvidas (OSBORNE; DILLON, 2010). Este é outro ponto que é contemplado em nosso trabalho, pois nós utilizamos a plataforma arduino para realizar a automatização da coleta de dados no circuito proposto.

Neste contexto é importante diferenciarmos automação e automatização de sistemas. A automação é uma tecnologia que permite operar um sistema sem que haja uma intervenção humana direta, o que inclui uma simples troca de dispositivo, de acordo com parâmetros específicos, ou mesmo um controle de sistema completo para estabilizar uma determinada propriedade em um sistema físico (MARTINS, 2018). Neste caso os dispositivos de controle tornam o sistema inteligente o suficiente para realizar tarefas de correção, como por exemplo, em um ar condicionado. Este é um sistema automato que corrige a temperatura do ambiente para um determinado valor pré-estabelecido, caso haja variações. Já na automatização a tecnologia é empregada principalmente para auxiliar em operações de processos repetitivos, como na coleta de dados realizada no nosso experimento. Apesar de automatizada, ainda é necessário monitorar o experimento para acionar a coleta de dados para cada valor dos parâmetros desejados. Em um experimento de Física automato, usualmente o experimentalista apenas prepara o sistema a ser analisado, não fazendo qualquer intervenção adicional durante o processo de caracterização.

Tanto o processo de automação quanto o de automatização incluem conceitos matemáticos avançados, mas seus princípios práticos básicos podem ser facilmente demonstrados em sala de aula através de alguns experimentos para alunos do ensino básico ou superior, em áreas do conhecimento como ciências ou engenharias, para promover a integração entre tecnologia e conceitos científicos (MARTINS, 2018; VARGAS et al., 2020).

Com o intuito de promover a integração entre experimentação, teoria, uso de tecnologias e simulações computacionais, apresentamos neste trabalho como o processo de coleta de dados em um circuito composto por elementos básicos, como resistores (R), indutores (L) e capacitores (C) pode ser automatizado utilizando uma plataforma arduino.

Especificamente, o circuito escolhido é composto por duas malhas RLC em série acopladas por um capacitor. Este exhibe um comportamento ressonante muito interessante, podendo apresentar um ou dois picos de ressonância dependendo do conjunto de parâmetros utilizados. Além disso, a fenomenologia observada no mesmo pode ser útil para a introdução de fenômenos quânticos em sala de aula (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002).

Para observação de tal fenomenologia foi necessário conduzir, primeiramente, simulações do circuito para a obtenção dos parâmetros do sistema e para adquirir maior

conhecimento sobre a montagem do circuito. Apesar de estudado e analisado na literatura por Alzar e colaboradores (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002), não foi possível reproduzir os resultados reportados apenas com as informações fornecidas pelos autores. As simulações foram conduzidas com o simulador de circuitos eletrônicos Multisim, o qual é disponibilizado na internet gratuitamente.

Após a verificação da fenomenologia desejada nas simulações, o experimento foi concebido com os mesmos parâmetros. Para fazer a comparação entre o sistema simulado e o experimental, os dados necessários foram coletados manualmente utilizando um osciloscópio. Os resultados obtidos mostram que o comportamento do sistema é o mesmo observado nas simulações. Em seguida fizemos a automatização do processo de coleta de dados utilizando a plataforma arduino. Os resultados experimentais obtidos manualmente e automaticamente para diferentes parâmetros do sistema foram comparados apresentando uma excelente concordância, mostrando que o processo de automatização não interfere no comportamento do sistema. Com isso, foi possível concluir que a automatização implementada no sistema proposto é muito vantajosa, pois permitiu reduzir o tempo de aquisição e tratamento dos dados de 2 horas para cerca de 15 minutos.

Essa diferença de tempo para a condução de um experimento de Física em sala de aula pode diminuir consideravelmente o tempo de execução técnica do experimento, possibilitando ao professor aproveitar melhor o tempo de aula para análises e discussões de resultados. Com o circuito que utilizamos, foi possível mostrar também que é possível explorar assuntos tecnológicos muito presentes no cotidiano dos alunos, como a automatização de processos, através de um experimento simples de ser implementado e de baixo custo.

1.1 Motivação

O desenvolvimento de inúmeras tecnologias que revolucionaram o mundo e estão presentes em larga escala atualmente foi possível devido à realização de pesquisa científica básica. A descoberta da lei da indução eletromagnética pelo físico Michael Faraday (1791-1867), por exemplo, contribuiu de maneira fundamental para o desenvolvimento do primeiro motor elétrico. Outro exemplo, de extrema importância para o desenvolvimento dos computadores, para o processamento e transmissão de informação, como conhecemos hoje, foi a descoberta do efeito transistor em 1947 pelos físicos William Bradford Shockley (1910-1989), John Bardeen (1908-1991) e Walter Houser Brattain (1902-1987) (GERTNER, 2012). A relação íntima entre o conhecimento sobre os fundamentos da Física e a geração de novas tecnologias, foi uma das maiores motivações para o desenvolvimento deste trabalho.

Outro fator fundamental foi o suporte fornecido pelos professores do curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba,

através da realização de experimentos manuais e automatizados nas disciplinas laboratoriais de Física e a relação dos mesmos com os conceitos de Física desenvolvidos nas aulas teóricas.

O desejo de implementar a automatização da coleta de dados no sistema proposto utilizando a plataforma arduino surgiu naturalmente, pois durante a graduação foi estabelecido um contato constante com alguns equipamentos eletroeletrônicos, como multímetros, geradores de frequência, osciloscópios e uma variedade de componentes eletrônicos. O conhecimento gerado nas aulas forneceu o suporte necessário para a realização de pesquisas adicionais relacionadas à circuitos eletrônicos, simulação e programação para o desenvolvimento e concretização, com êxito, do trabalho proposto.

2 Fundamentação Teórica

A indústria eletroeletrônica é responsável pela produção de aparelhos e dispositivos elétricos e eletrônicos que estão presentes em toda parte, em nossas casas, escolas, locais de trabalho, veículos de transporte, etc. Esta tem crescido e inovado de maneira vertiginosa nas últimas décadas.

Os dispositivos elétricos e eletrônicos são compostos por sistemas que visam produzir, transmitir e medir sinais elétricos. Para a descrição de tais sistemas a Física e a Matemática são essenciais. Estes são classificados conforme a área de aplicação como, sistemas de comunicação, sistemas de computadores, de controle, energéticos, de processamento de sinais, entre outros (NILSSON; RIEDEL, 2020).

Os *sistemas de comunicação* são aqueles que geram, transmitem e distribuem informação. Como exemplo temos a televisão, câmeras, receptores, rádio telescópios, satélites, radares, telefones, etc.

Sistemas de computadores utilizam sinais elétricos para processar informação considerando desde as necessidades mais básicas, como edição de textos e operações matemáticas simples, à processos extremamente complexos, como previsões climáticas e simulações de interações atômicas e moleculares. Os sistemas de computadores são compostos por redes de microcircuitos, ou circuitos integrados, que variam de centenas a milhões de componentes que frequentemente operam a velocidades e níveis de energia próximos dos limites fundamentais da Física, incluindo a velocidade da luz e as leis da Termodinâmica. Como exemplo destes sistemas temos desde uma calculadora de bolso e um smartphone à supercomputadores.

Sistemas de controle são sistemas reguladores, como em um carro em que tais sistemas são responsáveis pela regulagem da temperatura, pressão e fluxo da mistura de ar e combustível injetados no motor, por exemplo. Estes também são responsáveis pelo controle em sistemas eletromecânicos, como portas automáticas, elevadores, o tempo e a temperatura em um microondas e o piloto automático de carros e aviões.

Os *sistemas energéticos* geram e distribuem energia elétrica, fundamental para nossa sociedade, que é hoje extremamente dependente de tecnologia. Energia elétrica é gerada em grandes quantidades através de geradores térmicos, nucleares, hidroelétricos, entre outros.

Processamento de sinais é utilizado para descrever uma ampla variedade de sistemas que não possuem sistemas de comunicação, de computação, de controle ou energéticos como funções principais. Como exemplos, podemos citar a radiologia digital, comumente

conhecida como Raios-X, e a tomografia computadorizada, as quais são utilizadas para obter imagens de partes internas do corpo, como ossos, órgãos e outras estruturas. Na área de caracterização de materiais temos, por exemplo, a microscopia eletrônica de varredura, que é uma técnica que produz imagens de alta resolução com aparência tridimensional, úteis para avaliar e analisar tanto a topografia de uma amostra, quanto a composição do material que forma a amostra.

Existe uma interação considerável entre os sistemas citados e outros, ou seja, para realizarmos o processamento e transmissão de informação, por exemplo, são necessários computadores, que contém sistemas de controle, de processamento de sinais e também necessitam de uma fonte de energia. Sistemas com funções tão diversas como estes são concebidos através de algo em comum e que pode ser explorado em uma sala de aula de qualquer nível de ensino, os *circuitos elétricos*. Um entendimento sólido em teoria de circuitos pode proporcionar detalhes para operar e desenvolver sistemas, como os descritos anteriormente. O notável desenvolvimento de sistemas que dependem de fenômenos elétricos pode ser atribuído ao desenvolvimento da teoria de circuitos.

Um circuito elétrico é uma interconexão de dispositivos ou elementos elétricos. Estes são utilizados em vários sistemas elétricos e eletrônicos para efetuar diferentes tarefas. Neste trabalho analisamos o comportamento de um circuito formado por resistores (R), indutores (L) e capacitores (C), para explorar o fenômeno de ressonância observado no mesmo (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002) e para mostrar como a resposta do mesmo para diferentes parâmetros de entrada pode ser obtida a partir de um sistema automatizado utilizando uma plataforma arduino.

A seguir apresentamos alguns conceitos básicos como carga, corrente, voltagem, elementos de circuitos, potência, entre outros, para fornecer melhores condições para o entendimento do que foi desenvolvido neste trabalho. Não fornecemos detalhes sobre cálculos para uma descrição quantitativa do comportamento do circuito analisado, pois o nosso foco é discutir o processo de automatização do sistema para a coleta de dados.

2.1 Conceitos Básicos

O princípio básico para a explicação de todos os fenômenos elétricos é o conceito de *carga elétrica*. Esta é medida em Coulombs (C) pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) e seu efeito pode ser notado em experimentos simples de eletrostática como a força de atração ou repulsão que surge quando atritamos um objeto em outro, o faiscamento observado em um gerador de Van de Graaff ou quando tocamos a lataria de um carro em um dia seco. A carga elétrica é bipolar, ou seja, os efeitos elétricos são descritos em termos de cargas elétricas positivas e negativas e estas existem em quantidades discretas. Isso significa que todas as quantidades de carga Q observadas na natureza equivalem a

um múltiplo inteiro n de uma carga elétrica elementar e dada pela carga do elétron, ou seja, $Q = ne$, sendo a magnitude da carga elementar dada por $e = 1,6022 \times 10^{-19} C$. Observa-se também que a soma algébrica das cargas de um sistema isolado não muda. Esta é conhecida como a *lei de conservação de carga* (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Cargas em movimento produzem um *sinal elétrico*. Este pode ser produzido pelo movimento das cargas em uma antena, por exemplo. Estes sinais se propagam através de um meio, como o ar ou o próprio material que compõe o sistema, à velocidades finitas, usualmente próximas à velocidade da luz, a qual é dada por $c \approx 3 \times 10^8 m/s$ no vácuo.

Uma vez que os sinais elétricos se propagam como ondas eletromagnéticas é necessário considerarmos o comprimento de onda λ e a frequência f do sinal para caracterizá-lo. A frequência de um sinal, formalmente chamada de ciclos por segundo, é medida em hertz (Hz) e nos diz basicamente como o sinal se repete. O comprimento de onda é uma medida espacial do sinal, sendo medido em metros. Para termos ideia das dimensões desses parâmetros e sua importância em um circuito, vamos considerar a frequência de operação da rede elétrica de uma residência no Brasil, dada por $f = 60 Hz$. A relação desta com o comprimento de onda é dada por $\lambda = c/f$. Considerando a velocidade da luz no vácuo como sendo $c = 3 \times 10^8 m/s$, tem-se $\lambda = 5 \times 10^6 m$, ou seja, o comprimento de onda neste caso é da ordem de milhares de quilômetros. Se considerarmos a frequência de uma onda de rádio, por exemplo, da ordem de gigahertz $10^9 Hz$, obtemos um comprimento de onda equivalente de $0,3 m$. Essas dimensões são importantes em um circuito porque se o comprimento de onda do sinal elétrico for da ordem das dimensões físicas do sistema, efeitos de interferência podem aparecer e comprometer o funcionamento do circuito. Isso significa que se tivermos um circuito operando com a frequência de uma onda de rádio, dimensões da ordem de centímetros tornam-se importantes. Como praticamente todos os dispositivos elétricos e eletrônicos que operam com sinais elétricos variáveis no tempo funcionam com uma frequência de operação da ordem de dezenas de hertz, o comprimento de onda da perturbação elétrica é sempre muito maior que as dimensões físicas do sistema, de maneira que efeitos de propagação podem ser negligenciados. Dessa forma, podemos assumir que os efeitos elétricos ocorrem instantaneamente através de todo o sistema (NILSSON; RIEDEL, 2020).

O fluxo de cargas elétricas configuram uma *corrente elétrica*. Esta pode ser estabelecida através de um fio condutor ligado a uma bateria, por exemplo. Convencionalmente, a direção do fluxo de cargas, ou da corrente, é estabelecida como sendo o movimento das cargas positivas do sistema, mesmo que a corrente em um fio, ou qualquer condutor metálico, seja na realidade devido ao movimento dos elétrons, que possuem carga negativa.

Matematicamente, a corrente elétrica i é descrita como a taxa de variação temporal (d/dt) da carga q , ou seja,

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (2.1)$$

e é medida no SI em amperes (A). Apesar das cargas serem consideradas como entidades discretas, nós podemos tratar a corrente i como uma variável contínua, pois na maioria dos circuitos as correntes são compostas por uma quantidade muito grande de cargas.

A carga transferida em um determinado intervalo de tempo $\Delta = t_2 - t_1$ é obtida integrando-se a equação (2.1),

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i dt. \quad (2.2)$$

Se a corrente elétrica não variar com o tempo, esta é chamada de *corrente contínua DC*, do inglês *Direct Current*. Neste caso, a corrente constante é convencionalmente representada por I . Se a corrente é variável no tempo esta é representada pelo símbolo i . Esta variação pode ocorrer de várias formas. No caso em que a corrente varia de maneira sinusoidal ou senoidal, ou seja, na forma de uma função seno ou cosseno, esta é chamada de *corrente alternada AC*, do inglês *Alternating Current*. É esse tipo de corrente (AC) que é utilizada em nossas residências para o funcionamento dos eletrodomésticos e opera com frequência de $f = 60 \text{ Hz}$.

Para que uma corrente elétrica seja estabelecida em um circuito é necessário que uma força eletromotriz externa seja aplicada nas cargas que compõem o circuito. Esta é concebida por uma bateria ou uma fonte de tensão e é também conhecida como *voltagem*, *tensão* ou *diferença de potencial (DDP)*, sendo medida no SI em volts V . A força eletromotriz é responsável por separar cargas positivas e negativas, de maneira que a voltagem ϑ é a energia w por unidade de carga q necessária para estabelecer tal separação. Matematicamente,

$$\vartheta = \frac{dw}{dq}. \quad (2.3)$$

Logo, a voltagem de 1 volt equivale a energia de 1 joule, necessária para mover uma carga de 1 Coulomb através de um elemento de um circuito, ou seja, de um ponto a até um ponto b . Um Coulomb de carga corresponde a uma quantidade muito grande de elétrons. Uma vez que $Q = ne$, sendo e a carga elementar, tem-se para a carga total de $Q = 1 \text{ C}$, $n = 6,24 \times 10^{18}$ elétrons.

Como já discutido, um circuito é uma interconexão de elementos elétricos. Isso significa que um *elemento* é um componente básico para a construção de um circuito. Existem dois tipos de elementos em circuitos elétricos: os *elementos ativos*, os quais são capazes de gerar energia, como geradores, baterias e amplificadores funcionais, e os *elementos passivos*, que não possuem tal capacidade, como resistores, capacitores e indutores. Os elementos ativos mais importantes são fontes de tensão e de corrente que fornecem energia ao circuito. Analisar um circuito é um processo de determinar as voltagens ou correntes que passam nos elementos do circuito.

Apesar da voltagem e da corrente serem duas variáveis básicas para analisarmos um circuito elétrico, precisamos também conhecer o quanto de energia um dispositivo elétrico é capaz de suportar em um determinado intervalo de tempo. A essa propriedade é dado o nome de potência \mathcal{P} , a qual pode ser escrita em função da voltagem e da corrente como,

$$\mathcal{P} = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = \vartheta i, \quad (2.4)$$

sendo medida em joules por segundo ou, mais comumente, em watts W .

Portanto, a energia absorvida ou fornecida a um elemento de circuito a cada segundo pode ser descrita pelo produto da voltagem que o elemento é submetido e a corrente que o atravessa. Se a potência tiver um sinal positivo, significa que energia está sendo fornecida ao elemento ou absorvida por ele. Se o sinal de \mathcal{P} for negativo, energia está sendo fornecida pelo elemento de circuito.

A seguir apresentamos brevemente algumas características de circuitos alimentados por uma corrente alternada (AC) e sobre os elementos de circuito passivos básicos, dados pelo resistor, o indutor e o capacitor, utilizados neste trabalho.

2.2 Circuitos AC

A corrente alternada (AC) foi estabelecida como a forma de corrente mais eficiente e econômica para a realização da distribuição de eletricidade. Os principais contribuidores para isso foram Nikola Tesla (1856-1943) e George Westinghouse (1846-1914) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Uma das principais vantagens da corrente alternada é a possibilidade desta poder ser reduzida ou amplificada com a utilização de transformadores. Isso permite a transmissão da energia elétrica em linhas de alta tensão da estação elétrica até as nossas residências, onde a mesma é convertida em tensões de 100 e 220 V.

O circuito que analisamos neste trabalho é alimentado por uma fonte de tensão ou de corrente que varia com o tempo. Especificamente, o tipo de sinal que utilizamos possui forma de onda senoidal. A corrente alternada é usualmente conhecida como corrente senoidal. Neste tipo de corrente o sinal é invertido em intervalos periódicos de tempo, possuindo valores positivos e negativos alternadamente. Os circuitos que são acionados por fontes de tensão ou de corrente senoidal são chamados de *circuitos AC*.

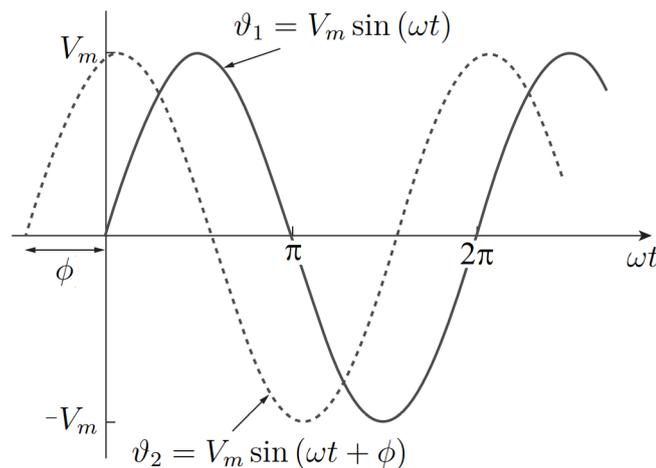
O sinal de uma onda senoidal é caracterizado principalmente por três parâmetros: a amplitude do sinal, sua frequência angular e sua fase. Para entendermos estes parâmetros vamos considerar a tensão senoidal,

$$\vartheta(t) = V_m \sin(\omega t + \phi), \quad (2.5)$$

em que a amplitude da tensão é dada por V_m , a qual fornece o valor máximo da tensão, a frequência angular é descrita por ω , medida em radianos por segundo, e a sua fase é descrita por $(\omega t + \phi)$. O parâmetro ϕ descreve a fase inicial do sinal.

Se considerarmos duas senoides dadas por $\vartheta_1 = V_m \sin(\omega t)$ e $\vartheta_2 = V_m \sin(\omega t + \phi)$, dizemos que as duas estão fora de fase por ϕ . Isso significa que uma está adiantada ou atrasada em relação a outra por ϕ , como ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Duas ondas senoidais de mesma frequência (ω) fora de fase por ϕ .



Fonte: Figura extraída de Alexander e Sadiku (p. 333, 2013).

Considerando o sinal senoidal ϑ_1 na figura 1, nota-se que este se repete a cada T segundos, de maneira que T é chamado de período do sinal. Este pode ser obtido por $\omega T = 2\pi$, o que fornece $T = 2\pi/\omega$. Portanto, o período T do sinal senoidal fornece o tempo de um ciclo completo. A quantidade de ciclos a cada segundo define a *frequência cíclica* f do sinal e é relacionada ao período do mesmo por $f = 1/T$. Como já descrito anteriormente, a unidade de medida que descreve o número de ciclos por segundo é o hertz (*Hz*).

A curva apresentada na figura 1 é o que observamos na tela de um osciloscópio quando medimos a tensão em algum componente do circuito, se o mesmo é alimentado por um sinal senoidal. Um parâmetro usualmente utilizado em análises de circuitos é a tensão de pico a pico V_{pp} do sinal medido. Esta descreve a amplitude total da tensão do sinal, do ponto de máximo até o ponto de mínimo, ou seja, $V_{pp} = V_m - (-V_m) = 2V_m$. O comportamento do circuito utilizado neste trabalho será analisado através da variação de V_{pp} em função da frequência cíclica f do sinal de alimentação do circuito.

Se o circuito em análise estiver sendo alimentado por uma função senoidal, esta produzirá uma resposta transiente e estacionária no sistema. A resposta transiente desaparece à medida que o tempo evolui, dependendo do tempo de resposta do sistema,

de maneira que o circuito permanecerá operando em um regime de resposta estacionário senoidal. É neste regime que os nossos resultados foram obtidos e analisados.

A seguir apresentamos os elementos de circuito utilizados para a montagem do nosso circuito, para a realização da automatização da coleta de dados do mesmo através de uma plataforma arduino.

2.2.1 Resistores, capacitores e indutores

O circuito que montamos neste trabalho consiste na interconexão de elementos passivos dados por resistores, capacitores e indutores. Nossa análise foi feita fazendo-se a medida da tensão nestes elementos.

A habilidade de qualquer material da natureza de resistir à passagem de corrente elétrica é conhecida como resistência R e esta é medida em ohms (Ω). Em circuitos elétricos esta habilidade é modelada através de *resistores*. Portanto, a principal função de um resistor em um circuito elétrico é limitar a passagem de corrente elétrica pelo mesmo, de maneira que a potência fornecida a este componente é dissipada na forma de energia térmica.

O valor de R pode variar de zero a valores muito altos. Os resistores são fabricados com valores fixos e variáveis. Em uma parte do circuito que montamos consideramos o valor fixo $R = 0$. Um elemento de circuito com este valor é conhecido como curto-circuito e na prática ele representa uma conexão realizada apenas com um fio condutor (*jumper*). Para a outra parte do circuito utilizamos resistores fixos com diferentes especificações de potência.

Os *capacitores* são elementos baseados em fenômenos associados com campos elétricos. Diferentemente dos resistores, estes elementos armazenam a energia fornecida a eles, para ser retornada ao sistema quando desejado. Este processo é conhecido como a descarga do capacitor.

A capacidade de armazenamento de um capacitor é medida através de sua capacitância C , cuja unidade é o Farad (F). Quanto maior a sua capacitância, maior é a capacidade de armazenamento do capacitor para a mesma tensão aplicada. Os capacitores utilizados neste trabalho possuem uma capacitância da ordem de nanofarad $10^{-9} F$ (nF).

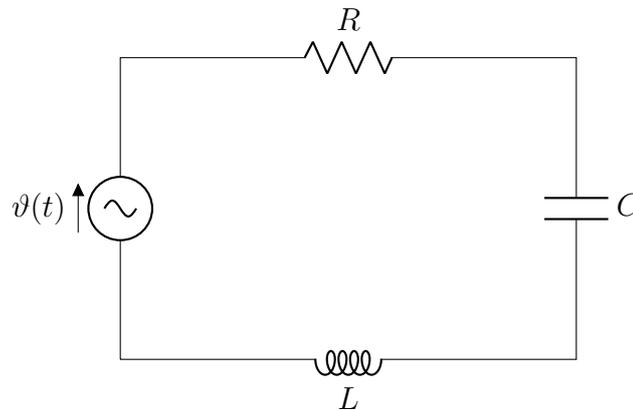
Já os *indutores* são elementos de circuito baseados em fenômenos associados com campos magnéticos. Assim como o capacitor, este elemento armazena energia fornecida a ele, mas através de campo magnético. Um indutor em sua forma mais simples, consiste de uma bobina de espiras, com ou sem um núcleo. Quando uma corrente elétrica passa por esta bobina um campo magnético é gerado. A força deste campo é determinada pela indutância L do indutor e é medida em Henry (H). Para o nosso circuito utilizamos indutores com indutância da ordem de milihenry $10^{-3} H$ (mH).

Estes três componentes básicos aparecem na maioria dos sistemas eletroeletrônicos usados atualmente e são os únicos componentes considerados no nosso circuito. Para saber mais sobre estes elementos, aplicações, associações em série e paralelo e toda a parte quantitativa relacionada, veja as referências (ALEXANDER; SADIKU, 2013; BOYLESTAD; NASHELSKY, 2002; NUSSENZVEIG, 2015; NILSSON; RIEDEL, 2020).

2.2.2 Circuito RLC e o fenômeno de ressonância

Um circuito RLC é um circuito em que é considerado um resistor R e dois elementos de armazenamento de energia, dados por um indutor, de indutância L , e um capacitor, de capacitância C . Na figura 2 mostramos um circuito RLC em série alimentado por uma fonte de tensão senoidal $v(t)$. Este circuito pode ser analisado também com os elementos dispostos em paralelo. Como o circuito que estudamos é composto por duas malhas RLC em série acopladas por um capacitor, nós discutiremos nesta seção, apenas sobre o circuito RLC em série. Devido a esse acoplamento, nos referimos ao nosso sistema como um circuito RLC acoplado.

Figura 2 – Circuito RLC em série alimentado por uma fonte de tensão senoidal $v(t)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um fenômeno característico observado em circuitos RLC é o de *ressonância*. O conceito de ressonância não é limitado a sistemas elétricos e eletrônicos. Esta é uma característica de todo sistema oscilatório e pode ser observada em osciladores harmônicos, moléculas, sólidos, entre outros. Estes sistemas possuem uma frequência natural de oscilação f_0 . Quando o mesmo é estimulado próximo dessa frequência é possível observar um aumento significativo da amplitude de alguma propriedade física associada a esta frequência.

No caso de um circuito RLC em série, essa frequência pode ser monitorada a partir do gráfico da tensão do sistema medida no resistor R em função da frequência do sinal de alimentação do circuito. A medida deve ser realizada no resistor porque na ressonância a resistência total de um circuito, conhecida como impedância, é dada apenas pelo resistor R . Ou seja, quando o circuito é estimulado próximo de sua frequência de ressonância f_0 , é

possível observar um pico de tensão no resistor, pois nesta condição a impedância total é a menor para qualquer frequência.

A frequência de ressonância de um circuito RLC pode ser determinada em termos da indutância L e da capacitância C do mesmo através da equação (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2002),

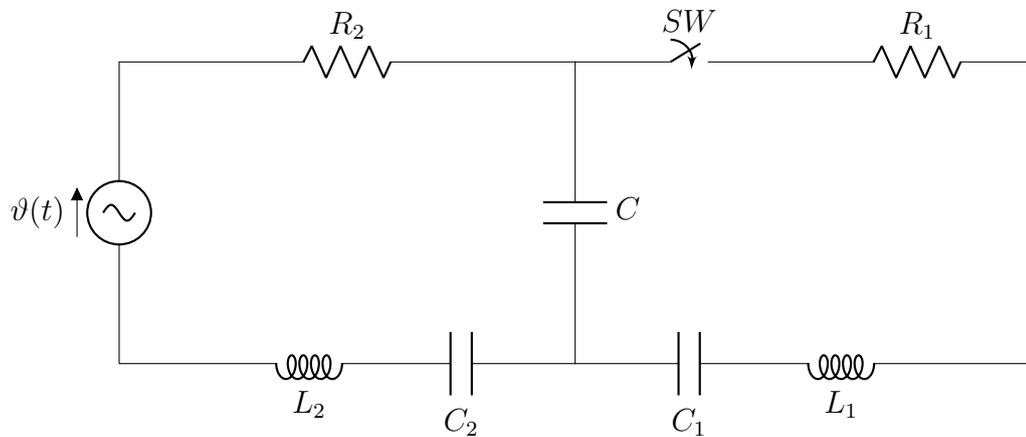
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.6)$$

O resultado (2.6) é obtido para um indutor e um capacitor ideais. Para circuitos reais não é possível obter f_0 de maneira ideal devido a efeitos parasitas nos elementos do circuito, que aparecem quando uma tensão senoidal é aplicada. Contudo, a expressão (2.6) fornece uma boa estimativa para obtenção de f_0 .

2.2.3 Circuito RLC acoplado

O circuito utilizado neste trabalho consiste de duas malhas de circuitos RLC acopladas por um capacitor de capacitância C , como ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Circuito RLC acoplado alimentado por uma fonte de tensão senoidal $\vartheta(t)$. O circuito é composto por duas malhas, $R_1L_1C_1$ e $R_2L_2C_2$ acopladas por um capacitor de capacitância C . A chave SW pode ser ligada ou desligada para verificar o efeito do acoplamento na frequência de ressonância medida no resistor R_2 .



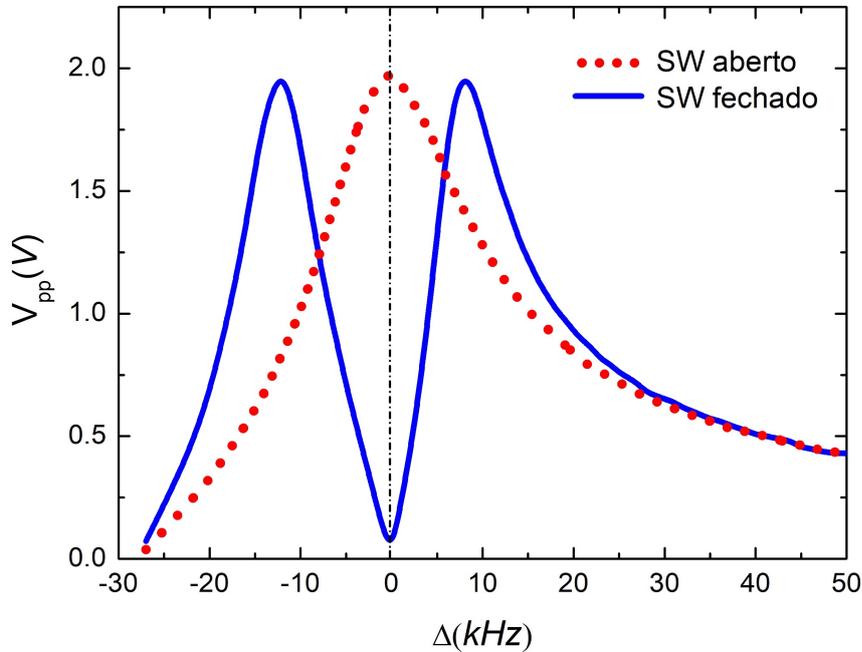
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise deste circuito foi feita pela medida da tensão de pico a pico V_{pp} no resistor R_2 em função da frequência do sinal de alimentação do circuito. Para verificar o efeito do acoplamento da malha $R_1L_1C_1$ em R_2 foi instalada uma chave SW próxima ao resistor R_1 . Quando esta é mantida aberta temos um circuito RLC com capacitância equivalente C_{eq} descrita pela associação em série dos capacitores C e C_2 . Pela lei de Kirchhoff para as tensões ao longo da malha $R_2L_2C_2$ mais o acoplamento C tem-se:

$$C_{eq} = \frac{C_2C}{C_2 + C}. \quad (2.7)$$

O comportamento esperado do circuito acoplado a partir da medida de V_{pp} em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$, entre a frequência do sinal de alimentação do circuito f_{in} e a frequência de ressonância de $R_2L_2C_{eq}$ é apresentado na figura 4, conforme reportado por Alzar e colaboradores (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002). A curva obtida para SW aberta é típica de um circuito RLC com frequência de ressonância $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_2C_{eq}})$, veja equação (2.6). Quando SW é fechada nota-se uma janela de tensão exatamente em f_0 , com o pico de ressonância de $R_2L_2C_{eq}$ dando lugar a dois picos de ressonância.

Figura 4 – Tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função de $\Delta = f_{in} - f_0$, sendo f_{in} a frequência do sinal de entrada e $f_0 = 28 \text{ kHz}$ a frequência de ressonância (linha vertical) do circuito $R_2L_2C_{eq}$, obtida com a chave SW aberta, sendo $C_{eq} = 32 \text{ nF}$. Os parâmetros utilizados para obtenção desta simulação foram: $R_1L_1C_1(0; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96 \text{ }\Omega; 1 \text{ mH}; 0, 1 \text{ }\mu\text{F})$ e $C = 47 \text{ nF}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fenomenologia observada neste sistema é descrita como um análogo elétrico de um fenômeno quântico chamado de Transparência Eletromagneticamente Induzida, cujos detalhes são apresentados no artigo de Alzar e colaboradores (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002). Neste trabalho optamos por este circuito porque a janela de tensão observada para $\Delta = 0$ depende do valor da capacitância C do capacitor de acoplamento. Esta sensibilidade torna este sistema interessante para verificar se o processo automatizado de coleta de dados através da plataforma arduino é eficiente o suficiente para não modificar ou influenciar o comportamento do sistema.

O resultado da figura 4 foi obtido com o simulador Multisim. Todos os detalhes sobre o procedimento desta simulação são discutidos na próxima seção.

3 Simulação do Circuito RLC Acoplado e Coleta Automatizada de Dados

Nesta seção mostramos como o simulador Multisim pode ser utilizado para projetar circuitos elétricos, sendo de extrema utilidade para estimar o valor dos parâmetros utilizados no nosso circuito real, e como a plataforma arduino foi implementada no nosso sistema para automatizar a coleta de dados do mesmo. Adicionalmente, apresentamos como a coleta de dados pode ser feita manualmente utilizando-se um osciloscópio. Essa última abordagem foi importante para verificarmos se a plataforma arduino estava fazendo a coleta automática de dados de maneira adequada sem interferir no comportamento do sistema.

3.1 O Simulador Computacional Multisim

O uso de um simulador para projetarmos o circuito elétrico escolhido foi de extrema importância para conseguirmos estabelecer um conjunto de parâmetros que permitisse observarmos experimentalmente a dupla ressonância no circuito *RLC* acoplado. Apesar deste circuito já ter sido apresentado na literatura (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002), as informações fornecidas sobre o mesmo não nos permitiram reproduzir os resultados reportados.

O simulador que melhor atendeu os nossos propósitos, em termos de recursos e acessibilidade, pois ele é gratuito, foi o *Multisim*. Este consiste de um ambiente de simulação computacional alimentado pelo padrão industrial *SPICE*, do inglês *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* (Programa de simulação com ênfase em circuitos integrados), para a visualização do comportamento do circuito ¹.

O Multisim permite a testagem do comportamento de um circuito com diferentes parâmetros, o que o torna uma excelente ferramenta para a escolha de parâmetros experimentais e demonstrações de aplicação de projetos, podendo ser utilizado tanto para a pesquisa quanto para o ensino de eletrônica analógica, digital e de potência. Por ser um simulador, este contribui também para que projetistas e pesquisadores reduzam as iterações dos protótipos de placas de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*), gerando economia de recursos e, conseqüentemente, dos custos de desenvolvimento, como no nosso caso.

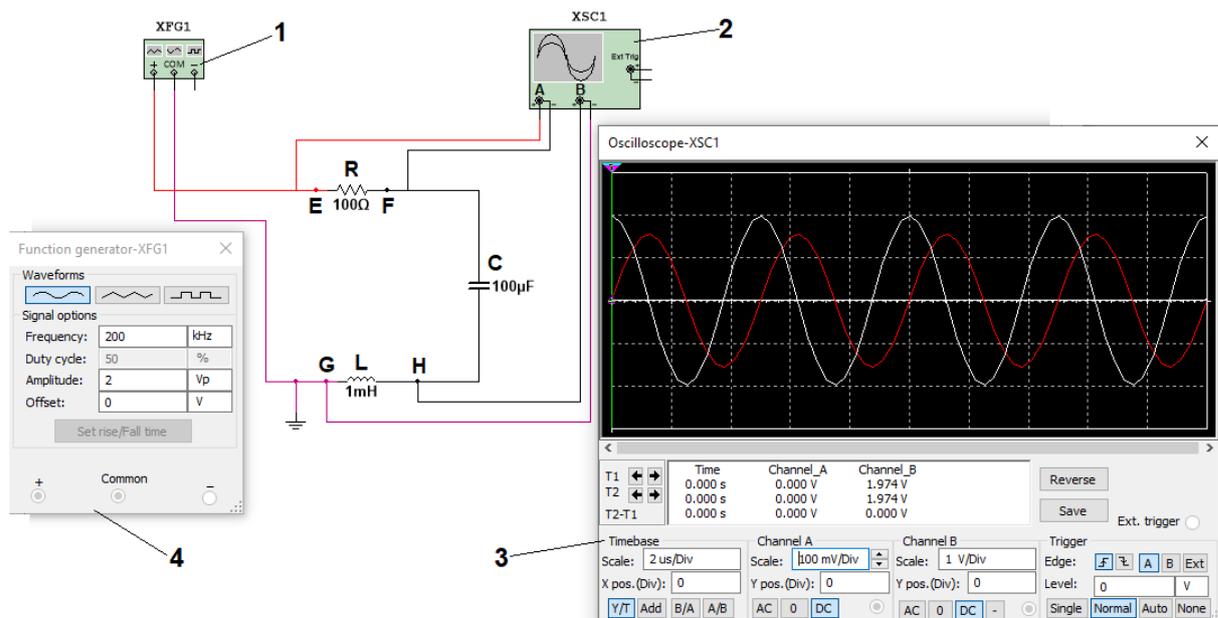
Dentre as várias funcionalidades e vantagens oferecidas pelo Multisim, podemos

¹ O *software* Multisim pode ser baixado gratuitamente no site: <<https://www.ni.com/pt-br/support/downloads/software-products/download.multisim.html>>.

citar a possibilidade de análise e testagem do comportamento de circuitos eletrônicos antes da fabricação dos mesmos, utilização de componentes ideais para isolar as limitações do projeto e do circuito, realização de medições difíceis de serem executadas em circuitos reais, devido a ocorrência de ruídos, falta de equipamento adequado ou mesmo para evitar a ocorrência de danos, às vezes irreversíveis, nos circuitos e monitoramento do comportamento de circuitos em função da temperatura ou sem a influência de elementos parasitários existentes nos componentes reais (BÁEZ-LÓPEZ; GUERRERO-CASTRO, 2011; NOGA; PALCZYNSKA, 2018).

O Multisim possui um ambiente esquemático interativo para a idealização dos circuitos eletrônicos, permitindo visualizar e analisar o comportamento dos mesmos de maneira instantânea. Na figura 5 apresentamos uma imagem do ambiente interativo do simulador obtida para a simulação de um circuito $RLC(100\ \Omega; 1\ mH; 100\ \mu F)$, mostrando todos os componentes utilizados para simular o seu comportamento, como o gerador de frequências, o osciloscópio e os seus respectivos painéis para a configuração de parâmetros.

Figura 5 – Imagem de um circuito $RLC(100\ \Omega; 1\ mH; 100\ \mu F)$ idealizado no simulador computacional Multisim, mostrando o seu ambiente interativo com o gerador de frequência (1), o osciloscópio (2), e os seus respectivos painéis (3) e (4) para a configuração de parâmetros. Os pontos marcados com as letras E, F, G e H mostram as conexões dos canais A e B do osciloscópio, realizadas para a medição da tensão no resistor (EF) e no indutor (GH), respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

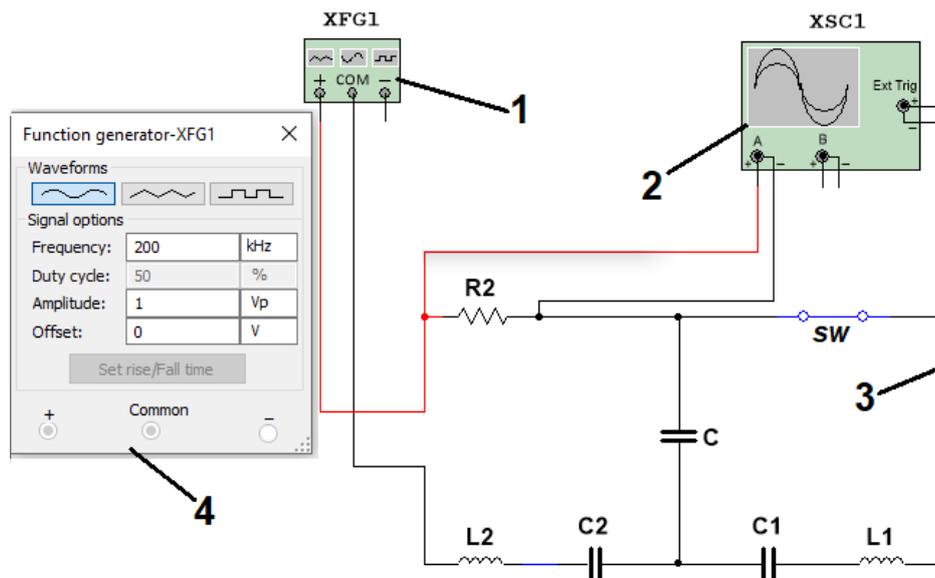
Com o painel do gerador de frequências, item (4) da figura 5, é possível ajustar

os parâmetros de tensão de pico e frequência do sinal da tensão. Para realizar medições, como a tensão no resistor R e no indutor L , por exemplo, conectamos os canais A e B do osciloscópio (2) entre os pontos EF e GH do circuito, respectivamente. As amplitudes desses sinais podem ser observadas no painel do osciloscópio (3). A curva senoidal em vermelho mostra a amplitude da tensão medida no resistor R e a curva senoidal branca, a amplitude da tensão medida no indutor L do circuito RLC considerado. As escalas de tempo e de amplitude do sinal de tensão do osciloscópio podem ser alteradas na opção *scale* do painel do osciloscópio durante a simulação. A seguir mostramos como a simulação do circuito RLC acoplado foi feita utilizando o simulador Multisim.

3.1.1 Simulação do circuito RLC acoplado Utilizando o Multisim

Como já discutido na seção 3.2.3, o sistema escolhido para a realização deste trabalho consiste de um circuito RLC acoplado, descrito especificamente por duas malhas de circuitos $R_1L_1C_1$ e $R_2L_2C_2$ em série, acopladas por um capacitor de capacitância C . Na figura 6 apresentamos uma imagem deste circuito projetado no Multisim, considerando os parâmetros $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96\ \Omega; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$ e $C = 47\text{ nF}$. Note que consideramos $R_1 = 0$, que é a resistência teórica de um fio condutor, como discutido na seção 3.2.1.

Figura 6 – Circuito RLC acoplado projetado no simulador computacional Multisim. Em (1) mostramos o gerador de frequência, (2) o osciloscópio, (3) a malha do circuito acoplado e em (4) o painel de configuração de parâmetros do gerador de frequência. Os valores dos parâmetros utilizados são $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96\ \Omega; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$ e $C = 47\text{ nF}$.



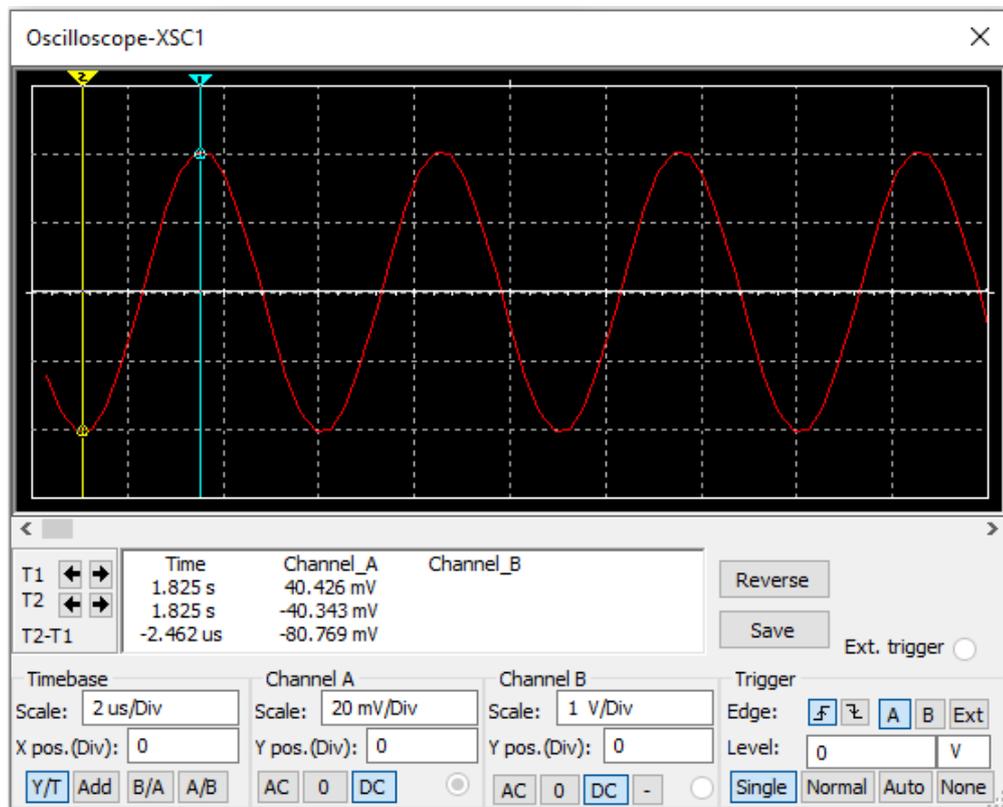
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para executar a simulação do projeto do circuito RLC acoplado apresentado na figura 6 e a coleta de dados no osciloscópio, basta clicar em executar (“Run”) no painel

de controle do Multisim ou apertar a tecla “F5” do teclado. Para aparecer o painel do osciloscópio é necessário clicar duas vezes no osciloscópio simulado, descrito pelo item (2) na figura 6. No gerador de frequência (4) configuramos os parâmetros de entrada do circuito com uma tensão de pico V_p de 1V, ou seja, uma tensão de pico a pico V_{pp} de 2V e a forma de onda senoidal.

Para verificar a resposta do circuito em função da frequência do sinal de entrada, medimos a tensão de pico a pico V_{pp} em R_2 . A variação da frequência no gerador (4) foi feita com passos de 1 kHz, com a coleta do primeiro dado feita em 1 kHz. A frequência foi aumentada até observarmos pouca variação da tensão em R_2 . A obtenção do valor de V_{pp} em R_2 para uma determinada frequência é ilustrado na figura 7. A leitura de V_{pp} é obtida diretamente do gráfico através da diferença entre um ponto de mínimo T_2 (em amarelo) e um ponto de máximo T_1 (em azul) da curva senoidal. O valor aferido no exemplo apresentado foi de $V_{pp} = T_2 - T_1 = 80,769 \text{ mV}$, conforme mostrado no painel do osciloscópio.

Figura 7 – Painel do osciloscópio do simulador Multisim mostrando a leitura da tensão de pico a pico V_{pp} em R_2 através do Canal A do osciloscópio para um determinado valor da frequência do sinal de entrada. A linha vertical amarela marca o valor de mínimo T_2 e a linha azul o valor de máximo T_1 da curva senoidal, de maneira que neste exemplo tem-se $V_{pp} = T_2 - T_1 = -80,769 \text{ mV}$.



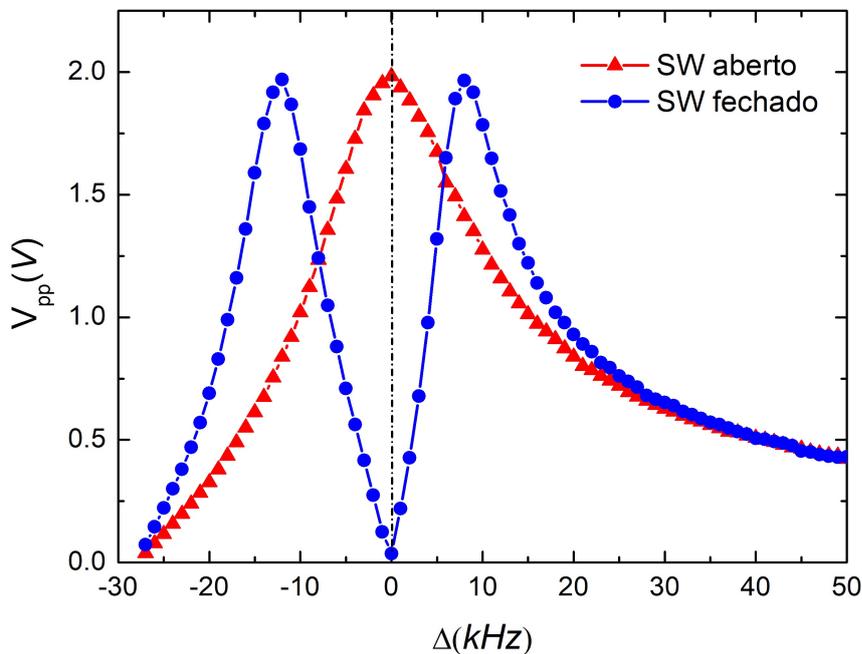
Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os parâmetros descritos na figura 6 simulamos primeiramente o

circuito com a chave (SW) aberta para obter a frequência de ressonância da malha $R_2L_2C_{eq}$. Ou seja, neste caso precisamos considerar a capacitância equivalente $C_{eq} = C_2C/(C_2 + C) = 32 \text{ nF}$, pois as capacitâncias C e C_2 estão associadas em série, veja seção 3.2.3. Dessa forma, quando SW está aberta, o circuito RLC acoplado é reduzido à malha $R_2L_2C_{eq}(96 \text{ } \Omega; 1 \text{ mH}; 32 \text{ nF})$.

A frequência de ressonância f_0 deste circuito pode ser obtida teoricamente pela expressão $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_2C_{eq}})$, a qual fornece o valor de $f_0 = 28,13 \text{ kHz}$. Este valor está em excelente acordo com o mesmo obtido pela simulação, dado por $f_0^{(s)} = 28,00 \text{ kHz}$. Na figura 8 apresentamos a tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$, sendo f_{in} a frequência variável do sinal de entrada no circuito. A curva com triângulos vermelhos foi obtida para SW aberta. Note que, quando a frequência da tensão de entrada é $f_{in} = f_0$, tem-se $\Delta = 0$. A curva com círculos azuis foi obtida para SW fechada. Esta mostra a dupla ressonância observada no circuito acoplado, devido à formação de uma janela de tensão em $\Delta = 0$.

Figura 8 – Tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$ entre a frequência do sinal de entrada f_{in} e a frequência de ressonância do circuito acoplado com a chave aberta, $f_0 = 28 \text{ kHz}$ (linha vertical), cuja capacitância equivalente é dada por $C_{eq} = 32 \text{ nF}$. Os parâmetros utilizados para obtenção desta simulação foram: $R_1L_1C_1(0; 1 \text{ mH}; 0,1 \text{ } \mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96 \text{ } \Omega; 1 \text{ mH}; 0,1 \text{ } \mu\text{F})$ e $C = 47 \text{ nF}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para observação desse fenômeno de dupla ressonância conduzimos inúmeras simulações com diferentes parâmetros, pois este é observado para um conjunto de parâmetros específicos (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002). Nas próximas seções mostramos como o circuito RLC acoplado foi montado experimentalmente, considerando os mesmos parâmetros da simulação apresentados na figura 8, e como os dados foram coletados

manualmente e de maneira automatizada utilizando-se um osciloscópio e a plataforma arduino, respectivamente.

3.2 Coleta manual de dados no circuito real utilizando um osciloscópio

Antes de implementarmos a automatização do sistema para a coleta da tensão de pico a pico V_{pp} em R_2 em função da frequência do sinal de entrada no circuito, nós montamos o sistema em uma placa *protoboard* para testar o circuito *RLC* acoplado simulado na seção anterior. Este teste foi feito através da coleta de dados manual utilizando um osciloscópio e o procedimento foi o mesmo realizado na simulação com o Multisim, fazendo-se a leitura de V_{pp} diretamente na tela do osciloscópio.

Na parte superior da figura 9 apresentamos um esquema da montagem experimental para facilitar a visualização da disposição dos componentes eletrônicos na placa *protoboard* e as conexões do osciloscópio e do gerador de frequência no circuito. A foto da montagem do experimento no laboratório é apresentada na parte inferior da mesma figura. Para enviarmos o sinal da tensão de pico a pico do gerador de funções para o circuito *RLC*, conectamos na placa *protoboard* o fio que sai do polo positivo do gerador de funções (fio vermelho) ao resistor R_2 e o polo negativo do gerador (fio preto) ao indutor L_2 . Para realizarmos as medições de V_{pp} em R_2 , conectamos na placa *protoboard* o polo positivo do osciloscópio (fio vermelho) em um dos terminais de R_2 e o polo negativo do osciloscópio (fio preto) no outro terminal.

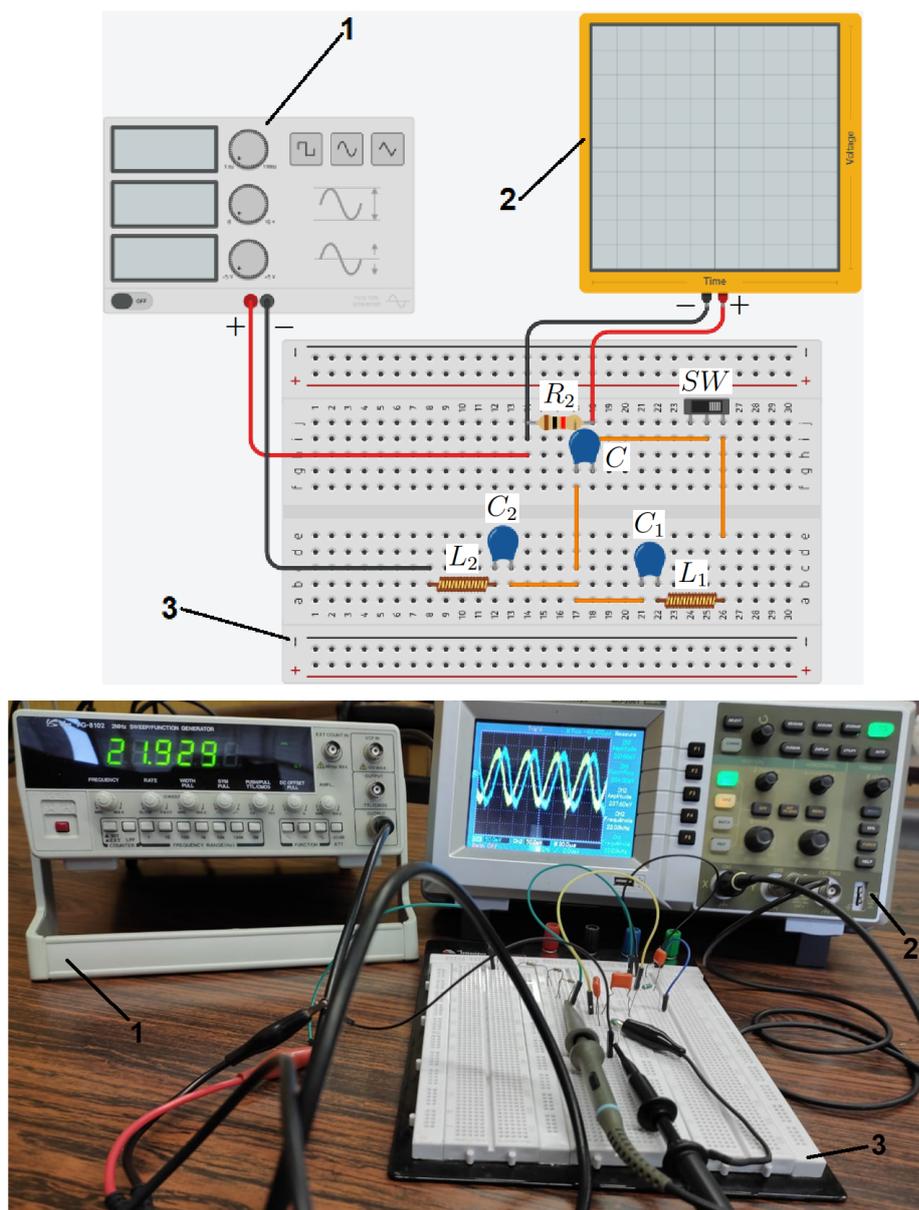
A tensão V_{pp} em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0^{(m)}$ é apresentada na figura 10. Note que o sistema real exibe o mesmo comportamento previsto na simulação, com um único pico de ressonância sendo observado no sistema com a chave (*SW*) aberta e a dupla ressonância com *SW* fechada. A frequência de ressonância obtida neste experimento foi de $f_0^{(m)} = 31 \text{ kHz}$. Note que este valor é um pouco maior do que aquele estimado teoricamente $f_0 = 28,13 \text{ kHz}$ e obtido na simulação $f_0^{(s)} = 28,00 \text{ kHz}$.

A concordância entre resultados obtidos analiticamente e por simulação é geralmente melhor em relação a resultados experimentais. A diferença dos resultados obtidos em uma simulação se deve às aproximações utilizadas devido a truncatura de séries infinitas e de processos iterativos antes da verificação de sua convergência, ou erros de arredondamento quando o algoritmo considerado utiliza uma aritmética de precisão limitada. Diferentemente do resultado analítico obtido pela equação $f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{L_2C_{eq}})$, que é exato.

Conforme já discutido, quando realizamos medidas em um sistema real inúmeros outros fatores influenciam no resultado. No caso do circuito acoplado considerado pode haver a ocorrência de ruídos, dissipação de energia nas conexões dos componentes,

elementos parasitários nos componentes eletrônicos e o próprio fator humano durante a manipulação do experimento. Tais efeitos são muito difíceis de serem monitorados para serem considerados na correção dos resultados obtidos.

Figura 9 – Superior: esquema da montagem experimental do circuito RLC acoplado para a coleta manual de dados. Em (1) mostramos a representação do gerador de frequência, em (2) o osciloscópio com o canal A conectado em R_2 para a leitura de V_{pp} e em (3) a placa *protoboard* para a conexão dos componentes do circuito. Inferior: foto da montagem do experimento no laboratório.

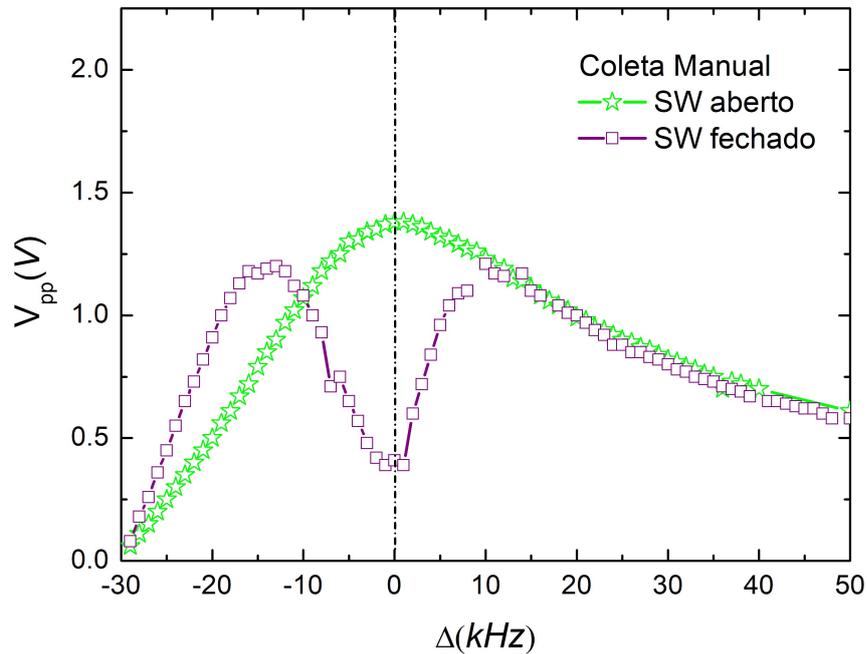


Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, tais influências externas na obtenção das propriedades desejadas de um sistema físico podem ser minimizadas significativamente em laboratórios específicos para determinadas medidas, onde o ambiente e a qualidade dos equipamentos podem ser consideravelmente controlados, se houver disponibilidade de recursos. É por isso que é

tão importante o investimento em pesquisa e na formação de cientistas, pois estes estarão munidos de equipamentos adequados e uma formação especializada para a análise de fenômenos e processos, podendo conduzir ao desenvolvimento de novas tecnologias para a melhoria da nossa qualidade de vida e à cura de doenças.

Figura 10 – Tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$ obtida manualmente com um osciloscópio para o circuito RLC acoplado real com a chave (SW) aberta e fechada. Os parâmetros utilizados neste experimento foram os mesmos utilizados na simulação apresentada na figura 8, ou seja, $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96\ \Omega; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$ e $C = 47\text{ nF}$. A frequência de ressonância medida com SW aberta foi de $f_0 = 31\text{ kHz}$ (linha vertical).

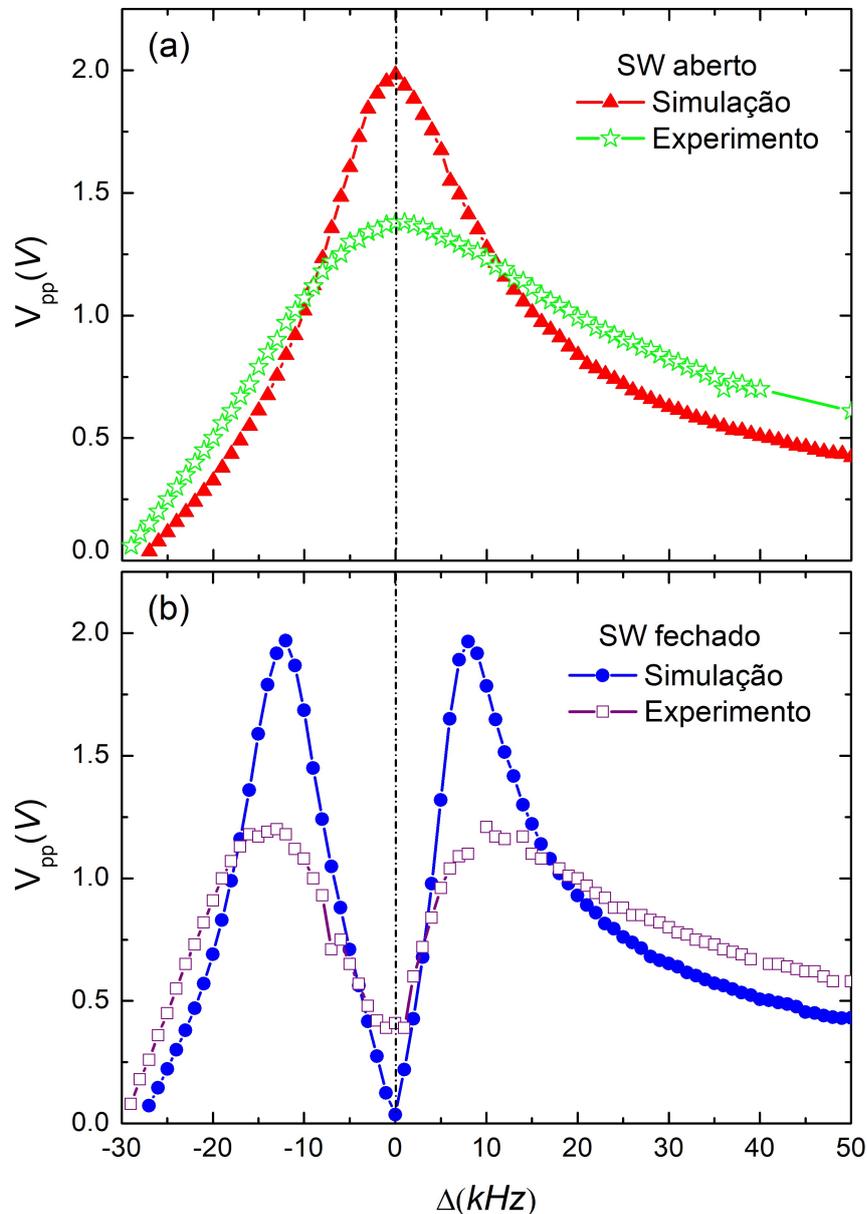


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para apreciar melhor o efeito de elementos espúrios ou parasitas no circuito real, apresentamos na figura 11 uma comparação entre o resultado obtido pela simulação com o Multisim e o mesmo obtido manualmente com o osciloscópio.

Na figura 11(a) apresentamos o pico ressonante do sistema quando SW está aberta e em (b) a dupla ressonância do circuito acoplado quando SW é fechada. Nestes gráficos é possível observar a importância de considerarmos um parâmetro relativo do sistema, como a dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$, pois a frequência de ressonância obtida na simulação e no experimento apresentam uma diferença de quase 10%. A partir de Δ é possível fazer uma comparação direta entre os resultados, pois de outra forma as curvas estariam deslocadas horizontalmente. Com os parâmetros obtidos na simulação foi possível observar o mesmo comportamento do circuito RLC acoplado experimentalmente. Este resultado mostra que o simulador Multisim é uma excelente opção para a realização de projetos de circuitos eletrônicos.

Figura 11 – Comparação da tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$ obtida pela simulação descrita na figura 8 e manualmente com um osciloscópio, conforme figura 10. Em (a) é apresentado o resultado com a chave (SW) aberta e em (b) com SW fechada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os efeitos dissipativos e parasitas no circuito real são evidenciados pela diminuição considerável na intensidade dos picos ressonantes para SW aberta e fechada, em comparação com o resultado obtido pela simulação. O valor esperado de V_{pp} para os picos ressonantes é de $2V$, pois nós configuramos este valor como parâmetro de entrada no gerador de frequência antes da simulação e antes do experimento. Para SW aberta o valor verificado para a simulação foi de $V_{pp}^{(s)} = 1,98 V$ e para o experimento foi consideravelmente menor, dado por $V_{pp}^{(m)} = 1,38 V$, devido aos efeitos dissipativos, conforme já discutido. Quando SW é fechada o valor obtido pela simulação se mantém o mesmo, mas experimentalmente

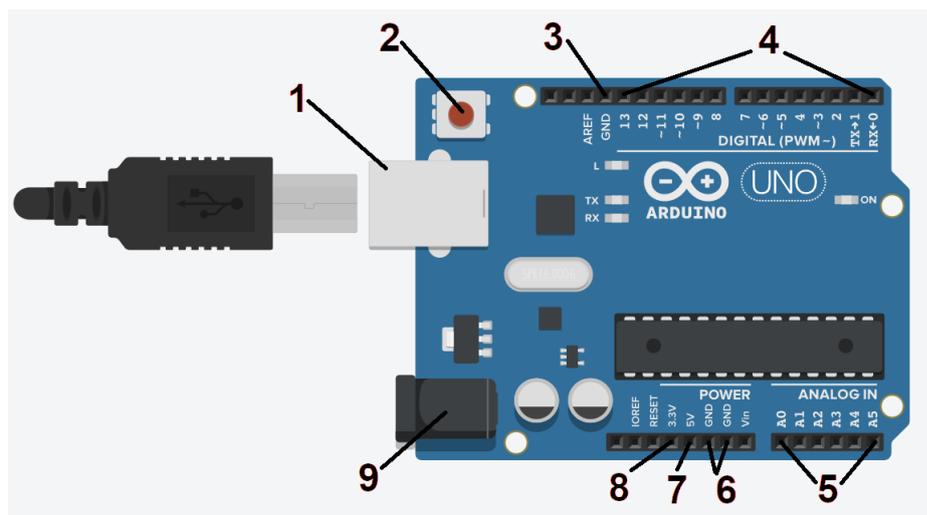
este fica ainda menor $V_{pp}^{(m)} = 1,20 V$. Uma diferença significativa também é observada no valor da janela de tensão em $\Delta = 0$. Para a simulação tem-se $V_{pp} = 0,04 V$, enquanto que para o circuito real o valor medido é dez vezes maior $V_{pp} = 0,40 V$. Os valores de V_{pp} para os dois picos ressonantes, com SW fechada, são menores do que o valor do pico observado para o circuito $R_2L_2C_{eq}$, devido ao acoplamento da outra malha no circuito, adicionando portanto, mais efeitos espúrios, ruídos, etc., ao sistema total, provenientes dos outros componentes eletrônicos.

Na próxima seção apresentamos o que é a plataforma arduino e como esta pode ser implementada no nosso sistema para a realização da coleta automatizada de V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$.

3.3 A Plataforma Arduino

Arduino é uma plataforma microcontroladora embarcada de código aberto, cuja linguagem de programação é baseada em C/C++ e em *hardwares* e *softwares* livres, o que permite a sua utilização para a aquisição de dados via sensores de entrada e saída. Na figura 12 mostramos uma representação de uma placa arduino com suas entradas e saídas analógicas e digitais.

Figura 12 – Esquema de uma plataforma microcontroladora arduino, mostrando em (1) entrada USB, (2) botão *reset*, (3) e (6) GND ou aterramento, (4) entradas e saídas digitais, (5) entradas e saídas analógicas, (7) saída de 5V, (8) saída de 3,5V, e em (9) a entrada para a fonte de alimentação entre 7 a 12V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A programação nesta plataforma é realizada no computador através de um *software* específico, disponibilizado gratuitamente na internet ² pela comunidade desenvolvedora da

² *Download* disponibilizado gratuitamente em: <<https://www.arduino.cc/en/software>>.

plataforma. Após o *download* o *software* é carregado no arduino via porta USB.

O ambiente de desenvolvimento integrado do arduino, IDE, do inglês “*Integrated Development Environment*”, é uma aplicação escrita em Java *cross-plataform*, não necessitando portanto de instalação. Além disso, este é portátil para vários sistemas operacionais e originado da IDE para a linguagem de programação *Processing*.

A plataforma arduino permite realizar a aquisição de dados através da leitura simultânea de dezenas de sensores de entrada e saída, tanto digitais quanto analógicos. Dependendo do conhecimento em eletrônica e programação do operador é possível elaborar uma infinidade de experimentos para a coleta de dados ou controle de sistemas em diversas áreas do conhecimento, principalmente em ciência. Para o ensino de Física, por exemplo, a plataforma arduino surge como uma possibilidade ilimitada para o desenvolvimento e estudo de diversos conceitos e experimentos (GALADIMA, 2014; KINCHIN, 2018). Para o circuito eletrônico que selecionamos para este trabalho, a automatização da coleta de dados realizada com a plataforma arduino é essencial para agilizar o processo de medição e testagem de outros parâmetros do sistema para estudar o seu comportamento. Isso é muito interessante para a realização de experimentação em sala de aula, por exemplo, pois o tempo de execução técnica de um experimento pode diminuir consideravelmente, possibilitando aproveitar mais o tempo de aula para análises e discussões de resultados.

3.3.1 Aquisição Automática de dados utilizando-se o *software* Microsoft Excel e o PLX-DAQ

Planilhas eletrônicas como o *Microsoft Excel* ou *LibreOffice Calc* são ferramentas computacionais e gráficas simples, versáteis, mas repletas de recursos. Devido à facilidade em sua utilização, estas são amplamente empregadas na execução de todo o tipo de tarefa, variando desde a organização de gastos para o estabelecimento de economia doméstica à organização de dados e resultados para a realização de pesquisa científica avançada.

Para o ensino de ciências as planilhas também tem sua importância, sendo muito úteis para a organização de dados teóricos e experimentais através de tabelas e gráficos. Como exemplos de aplicações e fenômenos estudados com planilhas no ensino de Física podemos citar a elaboração de figuras de Lissajous, a distribuição Weibull para a velocidade do vento e o oscilador harmônico amortecido (GONZÁLEZ, 2018).

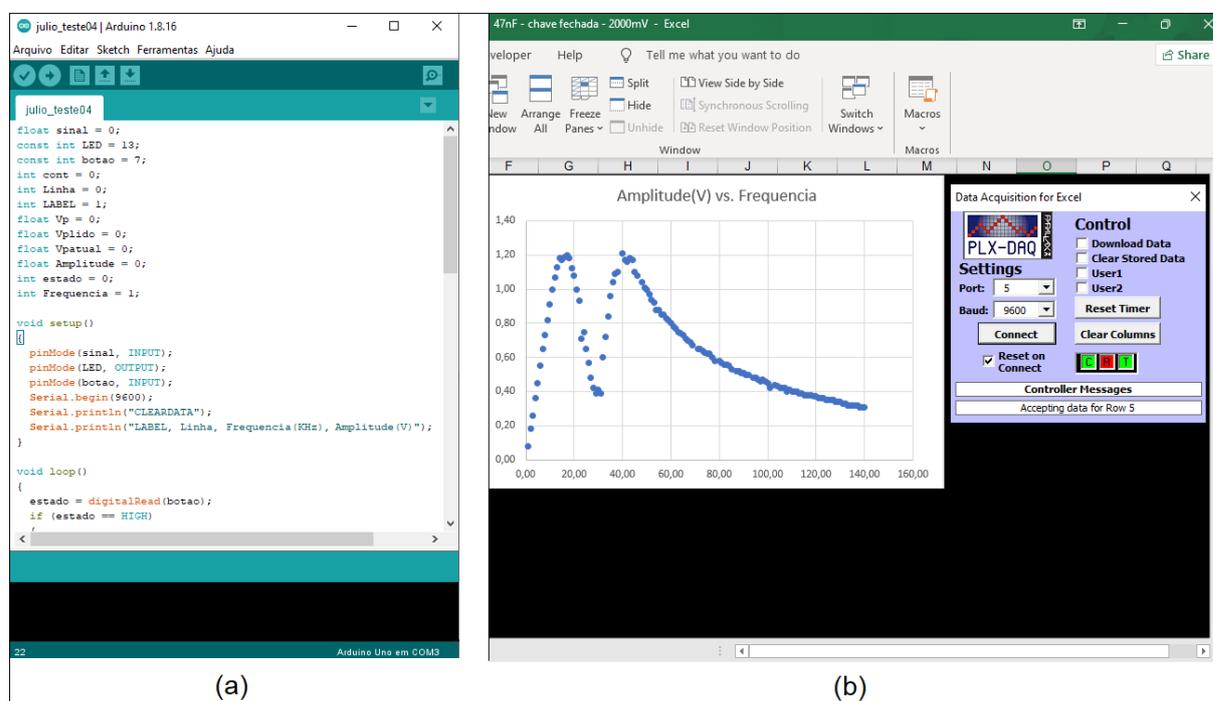
Para a visualização automática dos dados coletados do nosso circuito via arduino, utilizamos a planilha do Excel. A transferência dos dados da plataforma arduino para a planilha é feita através da ferramenta PLX-DAQ, do inglês *Parallax Data Acquisition tool* (Ferramenta de aquisição de dados de paralaxe), também disponibilizada gratuitamente para *download* na internet ³.

³ *Download* no site: <<https://www.parallax.com/package/plx-daq/>>.

O PLX-DAQ é uma Interface Gráfica do Usuário (GUI - *Graphical User Interface*) desenvolvida para ser integrada ao Microsoft Excel. A leitura dos dados é feita através de uma porta serial e estes são enviados pelo arduino para a planilha do Excel (RINALDI; FAUZI, 2019). Adicionalmente, a GUI permite estabelecer uma conexão entre o nó receptor e o computador, para registrar todos os dados recebidos no formato de arquivo padrão para Excel (.xlsx). Outra grande vantagem da GUI é que sua atualização é feita em um intervalo de apenas um segundo, permitindo o recebimento em tempo real de dados atualizados do sistema, agilizando ainda mais o processo de medição e análise dos resultados (ADETYA; HIDAYAT; FANSYURI, 2021).

Para a realização da interface do arduino com o Excel, primeiramente é necessário programar a placa arduino por meio da IDE, como mostrado na figura 13 (a). Após o código do programa ser carregado na IDE do arduino, deve-se clicar no ícone da planilha PLX-DAQ para identificar em qual porta serial do arduino está conectada. Após a seleção da porta serial, basta clicar no ícone conectar. É possível plotar o gráfico dos dados coletados na planilha em tempo real e acompanhar a formação da curva desejada a cada ponto coletado automaticamente, como ilustrado na figura 13 (b) (NICHOLS, 2017).

Figura 13 – (a) Programação da placa arduino por meio da IDE - *Integrated Development Environment* e (b) planilha do Microsoft Excel com a ferramenta PLX-DAQ, mostrando a plotagem do gráfico através da coleta de dados automática do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Implementação da plataforma arduino no circuito RLC acoplado para a coleta automática de dados

Para a coleta de dados automática do nosso circuito, nós implementamos um pequeno circuito junto à placa arduino e o sistema, com um pequeno botão para acionar a coleta de dados sempre que desejarmos, como mostrado no esquema e na foto do experimento apresentados na figura 14. Ao apertarmos este botão, um *LED* é acessado para fornecer uma confirmação visual de que o dado foi realmente coletado no circuito. Este procedimento foi adotado para termos uma liberdade de controle para a coleta de dados do sistema.

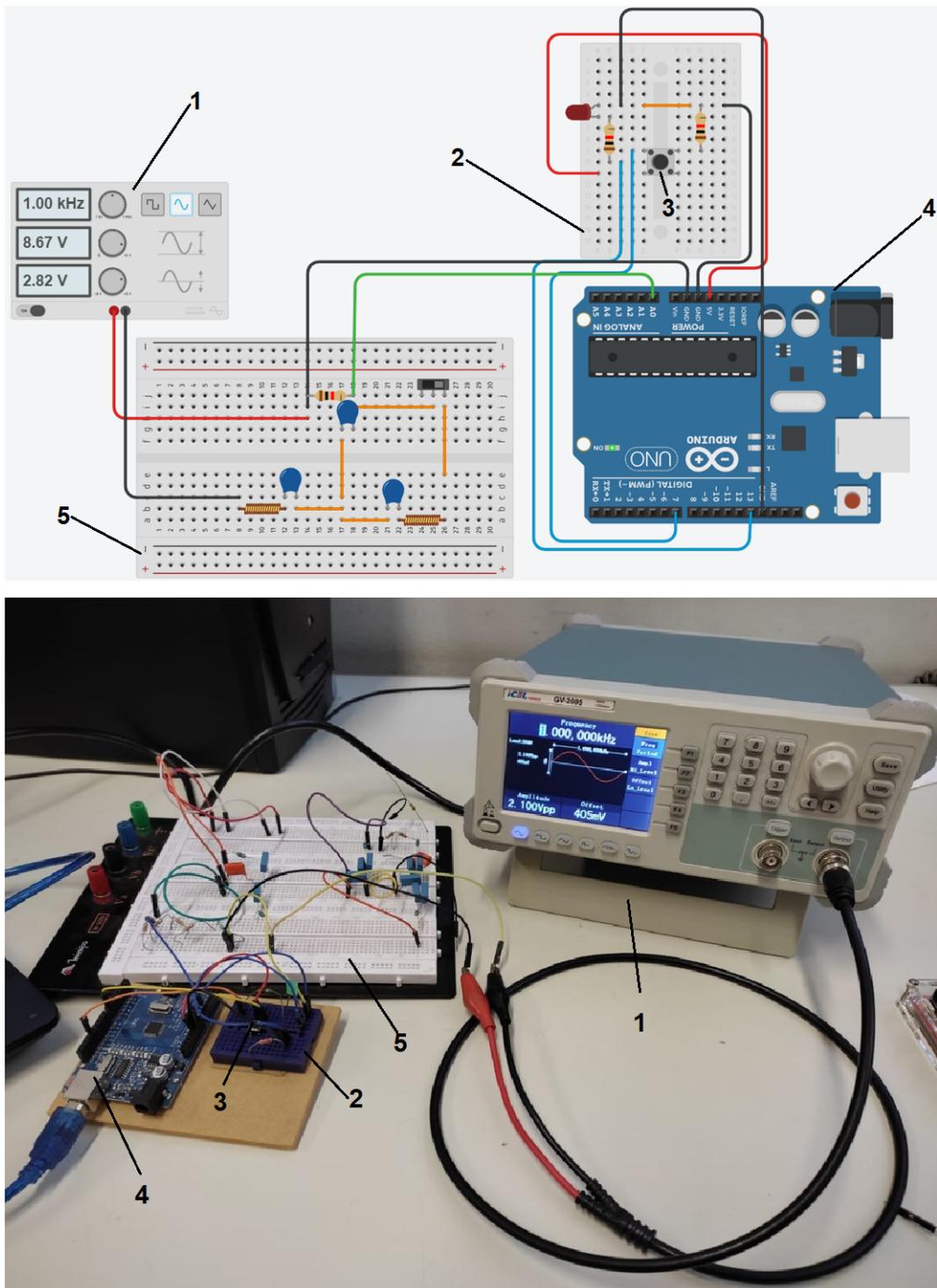
Na parte superior da figura 14 apresentamos o esquema de montagem do circuito junto com o arduino para melhorar a visualização de todos os componentes e conexões realizados no experimento para a automatização do sistema. Uma foto do experimento montado no laboratório é apresentada na parte inferior da figura 14. O gerador de frequência é representado em (1), o circuito de acionamento de coleta de dados com o *LED* é representado em (2), com o botão descrito por (3), a placa arduino junto com suas conexões é mostrada em (4) e o circuito RLC acoplado conectado no arduino e no gerador de frequência é mostrado em (5).

Para a realização da leitura da tensão de pico no resistor R_2 , utilizamos a entrada analógica A_0 da placa arduino. Quando o botão é acionado na mini *protoboard* o sinal de tensão contínua positivo no resistor R_2 é lido na porta A_0 . Após a leitura desse sinal o *LED* acende durante o intervalo de um segundo e concomitantemente a isso, uma varredura de leituras de tensão contínua positiva é lida pelo arduino nesse intervalo. A plataforma arduino não realiza a leitura de tensão alternada, que é o que queremos medir em R_2 , esta lê somente a tensão contínua positiva. Para que o valor de pico da tensão *AC* seja medido dentre as leituras de tensão contínua positiva realizadas pelo arduino durante o intervalo de um segundo, programamos a mesma para selecionar o maior valor de tensão. Dessa forma, a tensão de pico a pico V_{pp} foi obtida multiplicando-se a tensão de pico por dois, conforme descrito no algoritmo do programa apresentado no Apêndice deste trabalho. A transferência dos dados da plataforma arduino para o Excel foi realizada por meio da ferramenta PLX-DAQ, conforme descrito na seção anterior, o que permitiu o acompanhamento da plotagem do gráfico em tempo real.

A tensão V_{pp} em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0^{(a)}$ obtida automaticamente é apresentada na figura 15. Note que o processo de automatização não afetou o comportamento do sistema observado na simulação e no experimento, com os dados coletados manualmente. Ou seja, este exibe o mesmo comportamento previsto na simulação, com um único pico de ressonância sendo observado no sistema para *SW* aberta e a dupla ressonância com *SW* fechada. A frequência de ressonância obtida neste experimento foi de $f_0^{(a)} = 30 \text{ kHz}$, apresentando uma variação de pouco mais de 3% em relação ao resultado

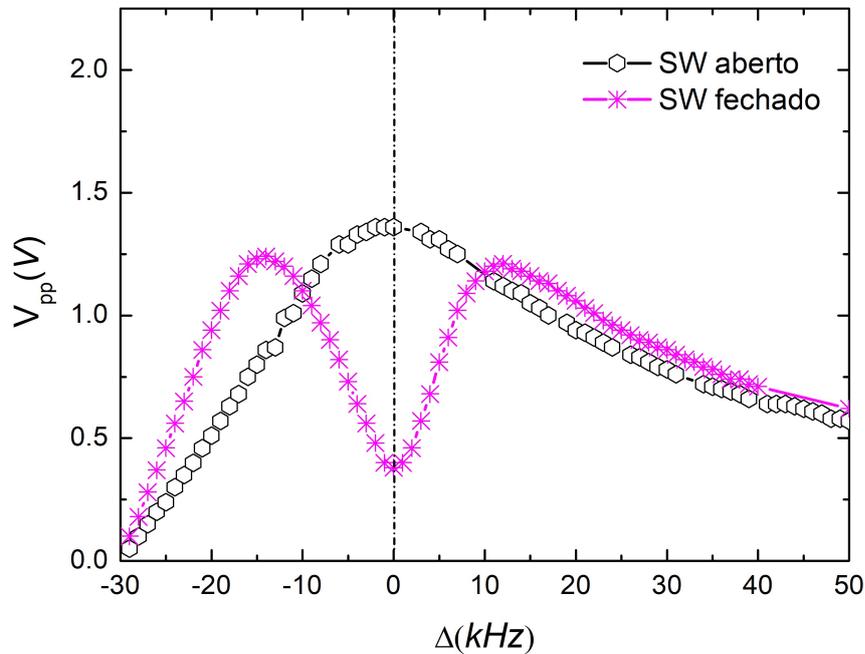
obtido através da coleta manual com o osciloscópio, que foi de $f_0^{(m)} = 31 \text{ kHz}$.

Figura 14 – Superior: esquema da montagem experimental do circuito RLC acoplado para a coleta automatizada de dados. Em (1) mostramos a representação do gerador de frequência, em (2) o circuito para acionar a coleta de dados montado em uma mini *proto-board*, em (3) o botão de acionamento para a coleta automática de dados, em (4) a plataforma arduino e em (5) o circuito montado em uma placa *proto-board*. Inferior: foto equivalente da montagem do experimento no laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Tensão de pico a pico V_{pp} do circuito RLC acoplado real medida em R_2 em função da dessintonia $\Delta = f_{in} - f_0$. A aquisição de dados foi feita automaticamente com a chave (SW) aberta e fechada através da plataforma arduino. Os parâmetros utilizados neste experimento foram os mesmos utilizados na simulação apresentada na figura 8, ou seja, $R_1L_1C_1(0; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$, $R_2L_2C_2(96\ \Omega; 1\text{ mH}; 0, 1\ \mu\text{F})$ e $C = 47\text{ nF}$. A frequência de ressonância medida com SW aberta foi de $f_0^{(a)} = 30\text{ kHz}$ (linha vertical).



Fonte: Elaborado pelo autor.

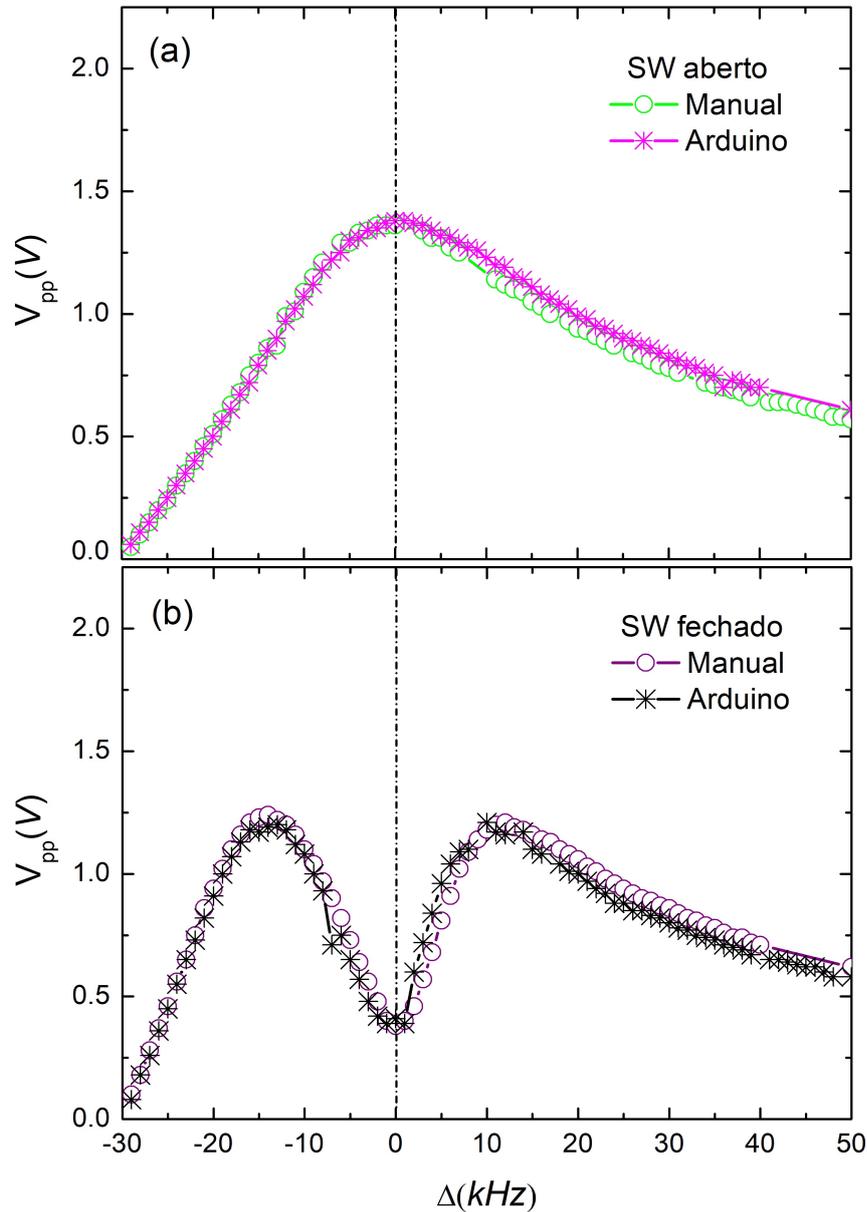
Na figura 16 fazemos uma comparação entre o resultado obtido manualmente e o mesmo obtido automaticamente com a placa arduino, para SW aberta em (a) e SW fechada em (b). Estes resultados mostram que nenhuma diferença significativa é observada entre os dois procedimentos experimentais, que poderia ser atribuída à automatização do sistema devido a erros significativos de leitura do arduino ou mesmo procedimentais durante a coleta manual de dados. Diante disso, foi possível concluir que o procedimento automatizado mostrou-se bem mais vantajoso, devido ao tempo de execução do experimento. Considerando a coleta total de dados e o tratamento dos mesmos, é necessário em torno de 2 horas para a concretização do procedimento manual, enquanto que no automatizado o tempo gasto foi de aproximadamente 15 minutos.

3.3.3 Comportamento do sistema com a variação da capacitância de acoplamento

Como já discutido anteriormente, um dos motivos de escolhermos o circuito RLC acoplado foi a possibilidade de verificação da mudança de comportamento do sistema pela mudança de algum de seus parâmetros. Na figura 17 apresentamos a tensão de pico a pico V_{pp} do circuito medida em R_2 em função da dessintonia Δ para diferentes valores da

capacitância de acoplamento C . Os resultados foram obtidos automaticamente através da plataforma arduino com SW aberta e fechada.

Figura 16 – Comparação da tensão de pico a pico V_{pp} medida em R_2 em função da dessintonia Δ obtida manualmente com um osciloscópio, conforme figura 10, e automaticamente utilizando a plataforma arduino, apresentado na figura 15, para SW aberta em (a) e fechada em (b).



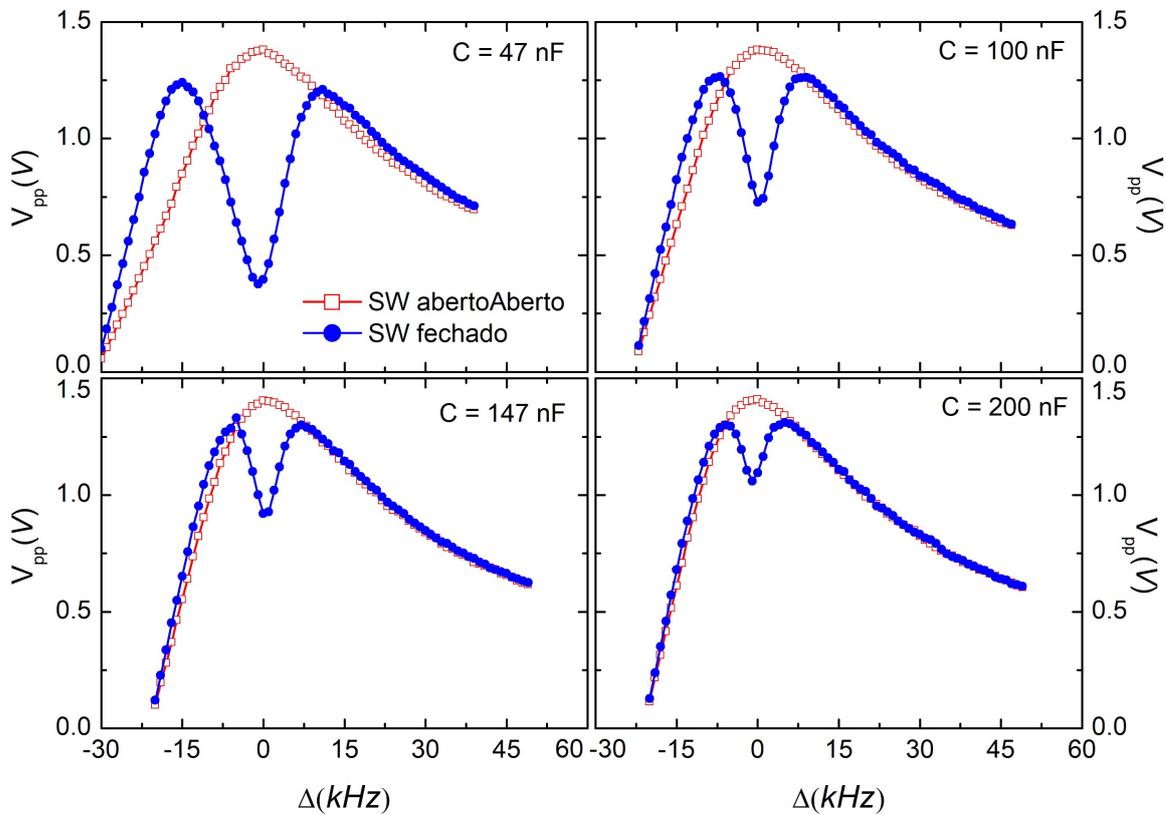
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que a capacitância de acoplamento exerce um papel determinante no aparecimento da janela de tensão em $\Delta = 0$, e conseqüentemente, na transição do comportamento do sistema com uma única frequência ressonante, obtida com SW aberta, para duas frequências ressonantes com SW fechada.

Na figura 18 mostramos que o valor de V_{pp} para a janela de tensão aumenta com o aumento da capacitância de acoplamento. Este resultado sugere que V_{pp} tende

assintoticamente para a mesma tensão obtida na frequência de ressonância para o circuito configurado com SW aberta, ou seja, para $V_{pp}(f_0^{(a)}) = 1,4 V$ (linha horizontal vermelha). Esta parece ser uma boa hipótese, pois na figura 17 é possível verificar que os dois picos ressonantes ficam mais próximos com o aumento de C . Para $C = 200 nF$ a largura da curva obtida para SW aberta e fechada são praticamente as mesmas.

Figura 17 – Tensão de pico a pico V_{pp} do circuito RLC acoplado real medida em R_2 em função da dessintonia Δ obtida automaticamente com a chave (SW) aberta e fechada através da plataforma arduino. Os parâmetros utilizados neste experimento foram $R_1L_1C_1(0; 1 mH; 0, 1 \mu F)$, $R_2L_2C_2(96 \Omega; 1 mH; 0, 1 \mu F)$ para quatro valores diferentes da capacitância de acoplamento $C = 47; 100; 147$ e $200 nF$.



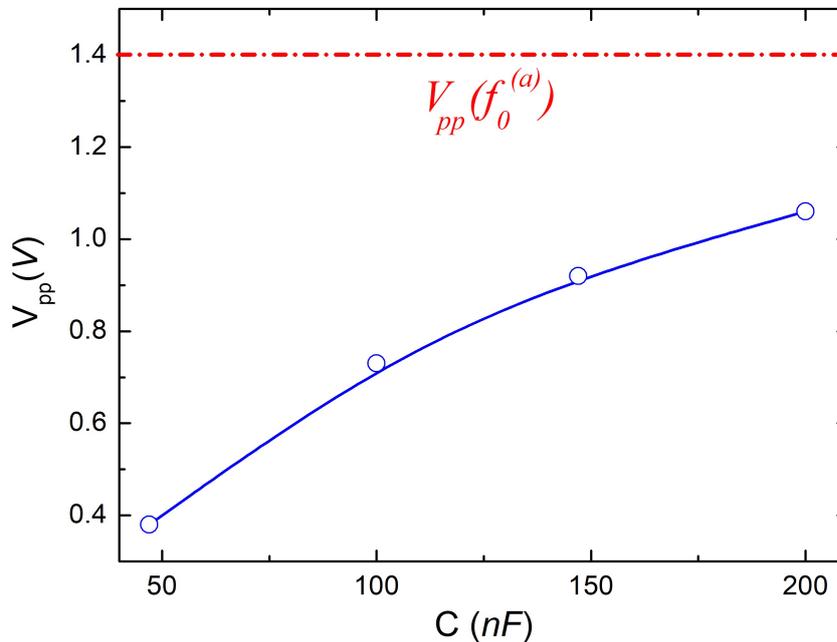
Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de ser empolgante e interessante, esta análise preliminar que fizemos, baseada nos poucos resultados obtidos, ainda é muito superficial e qualitativa para chegar a qualquer resultado conclusivo sobre o comportamento do sistema. Para obtermos uma análise quantitativa mais detalhada, estudos adicionais precisam ser conduzidos para a obtenção de uma expressão analítica, por exemplo, que possa auxiliar a entender o comportamento do sistema experimentalmente e verificar os regimes assintóticos do mesmo.

Várias outras perguntas, hipóteses e análises podem surgir com a obtenção experimental de resultados deste sistema, como: Qual a relação entre os parâmetros do sistema para que a janela de tensão apareça? A janela de tensão no circuito real pode chegar a $V_{pp} \approx 0$, como na simulação? Qual a interpretação física deste fenômeno? Por que os picos

ressonantes observados para SW fechada são assimétricos?

Figura 18 – Valor da janela de tensão V_{pp} medida com SW fechada em função da capacitância de acoplamento C .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas destas perguntas foram abordadas superficialmente no artigo da Alzar e colaboradores (ALZAR; MARTINEZ; NUSSENZVEIG, 2002). O foco deste artigo foi o estabelecimento de um análogo clássico para um fenômeno quântico observado em átomos de três níveis e não no comportamento do circuito RLC acoplado. A rapidez na aquisição de dados com a automatização do sistema utilizando a plataforma arduino, poderia, por exemplo, agilizar consideravelmente uma abordagem de pesquisa sobre o comportamento do circuito elétrico para responder perguntas que ainda permanecem sem resposta. Procedimentos como estes são essenciais para a evolução da ciência.

Outra vantagem que pode ser explorada com o procedimento de automatização aqui apresentado é a simplicidade e o baixo custo do experimento, se considerarmos é claro, que a escola já tenha à disposição um osciloscópio e um gerador de frequência. Estes fatores são muito interessantes para tornar a abordagem do ensino de Física em sala de aula mais científica, permitindo que análises teóricas e experimentais sejam conduzidas para estudar diferentes fenomenologias.

4 Conclusões e Considerações Finais

Neste trabalho apresentamos como o processo de coleta de dados em um circuito *RLC* acoplado pode ser consideravelmente agilizado pela automatização do sistema através da plataforma arduino.

Os parâmetros considerados no experimento foram obtidos a partir da simulação do sistema utilizando o simulador Multisim. Os resultados experimentais obtidos mostram que o comportamento do sistema é o mesmo observado nas simulações. Com isto foi possível constatar a eficiência deste simulador para a realização de projetos de circuitos eletrônicos para serem implementados na prática.

A coleta de dados no circuito real foi realizada manualmente utilizando-se um osciloscópio, em um primeiro momento, e em seguida através da automatização do sistema com a utilização da plataforma arduino, com o objetivo de comparar os resultados e verificar possíveis falhas tanto no procedimento manual quanto no automatizado. Os resultados mostraram que não houve nenhuma diferença significativa em ambos os procedimentos que pudessem ser atribuídas a isso. Dessa forma, concluímos que a automatização do sistema é bem mais vantajosa para a aquisição dos resultados, pois esta reduz o tempo da experimentação e tratamento dos dados de 2 horas para cerca de 15 minutos. Essa diferença de tempo na condução de um experimento é muito importante tanto para a realização de pesquisa científica quanto para o ensino de Física em sala de aula.

A automatização também foi testada na aquisição de dados, considerando a variação da capacitância de acoplamento do circuito acoplado. Os resultados foram comparados com os mesmos obtidos manualmente com o osciloscópio, mostrando que não há nenhuma influência da resposta do sistema em relação ao procedimento adotado. A partir destes resultados foi possível estabelecer novas perspectivas sobre o comportamento do sistema, com análises qualitativas, levantamento de hipóteses e estabelecimento de novas perguntas.

Conseqüentemente, novos estudos experimentais e teóricos serão conduzidos para verificar a influência de novos parâmetros e regimes assintóticos no comportamento do sistema para tentar entender em detalhes a fenomenologia envolvida no mesmo.

Referências

- ADETYA, F. B.; HIDAYAT, S.; FANSYURI, B. A. nrf24l01 distance and error link when operated on orange plant garden. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2021. v. 1825, n. 1, p. 012036.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- ALZAR, C. G.; MARTINEZ, M.; NUSSENZVEIG, P. Classical analog of electromagnetically induced transparency. *American Journal of Physics*, American Association of Physics Teachers, v. 70, n. 1, p. 37–41, 2002.
- ANDALORO, G.; DONZELLI, V.; SPERANDEO-MINEO, R. Modelling in physics teaching: the role of computer simulation. *International Journal of Science Education*, Taylor & Francis, v. 13, n. 3, p. 243–254, 1991.
- ANDERSON, P. W. More is different. *Science*, JSTOR, v. 177, n. 4047, p. 393–396, 1972.
- BÁEZ-LÓPEZ, D.; GUERRERO-CASTRO, F. E. Circuit analysis with multisim. *Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems*, Morgan & Claypool Publishers, v. 6, n. 3, p. 1–198, 2011.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Electronic devices and circuit theory*. [S.l.]: Pearson Educación, 2002.
- ETKINA, E. et al. Role of experiments in physics instruction—a process approach. *The Physics Teacher*, American Association of Physics Teachers, v. 40, n. 6, p. 351–355, 2002.
- GALADIMA, A. A. Arduino as a learning tool. In: IEEE. *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*. [S.l.], 2014. p. 1–4.
- GONZÁLEZ, M. I. Lens ray diagrams with a spreadsheet. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 53, n. 3, p. 035016, 2018.
- JIMOYIANNIS, A.; KOMIS, V. Computer simulations in physics teaching and learning: a case study on students' understanding of trajectory motion. *Computers & education*, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 183–204, 2001.
- JONG, T. D.; JOOLINGEN, W. R. V. Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of educational research*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 68, n. 2, p. 179–201, 1998.
- KINCHIN, J. Using an arduino in physics teaching for beginners. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 53, n. 6, p. 063007, 2018.
- KING, R. D. et al. The automation of science. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 324, n. 5923, p. 85–89, 2009.
- MARTINS, J. P. Automation experiments in physics laboratories. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 53, n. 5, p. 055009, 2018.

- NICHOLS, D. Arduino-based data acquisition into excel, labview, and matlab. *The Physics Teacher*, American Association of Physics Teachers, v. 55, n. 4, p. 226–227, 2017.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Electric circuits*. [S.l.]: Pearson, 2020.
- NOGA, K. M.; PALCZYNSKA, B. The simulation laboratory platform based on multisim for electronic engineering education. In: IEEE. *2018 International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*. [S.l.], 2018. p. 269–274.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Eletromagnetismo (vol. 3)*. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. v. 3.
- OSBORNE, J.; DILLON, J. *Good practice in science teaching: What research has to say: What research has to say*. [S.l.]: McGraw-Hill Education (UK), 2010.
- PERKINS, K. et al. Phet: Interactive simulations for teaching and learning physics. *The physics teacher*, American Association of Physics Teachers, v. 44, n. 1, p. 18–23, 2006.
- RINALDI, R. G.; FAUZI, A. A complete damped harmonic oscillator using an arduino and an excel spreadsheet. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 55, n. 1, p. 015024, 2019.
- VARGAS, S. et al. Team-based learning for scientific computing and automated experimentation: Visualization of colored reactions. *Journal of Chemical Education*, ACS Publications, v. 97, n. 3, p. 689–694, 2020.
- WEBER, J.; WILHELM, T. The benefit of computational modelling in physics teaching: a historical overview. *European Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 41, n. 3, p. 034003, 2020.
- WIEMAN, C. E.; PERKINS, K. K.; ADAMS, W. K. *Oersted Medal Lecture 2007: Interactive simulations for teaching physics: What works, what doesn't, and why*. [S.l.]: American Association of Physics Teachers, 2008.

A Algoritmo implementado na plataforma Arduino

Neste apêndice apresentamos o algoritmo implementado na plataforma arduino para a realização da coleta automatizada da tensão de pico a pico V_{pp} no resistor R_2 do circuito acoplado estudado neste trabalho. A seguir apresentamos as linhas de comando da mesma forma que são descritas no painel de comando da plataforma arduino.

```
float sinal = 0;

const int LED = 13;

const int botao = 7;

int cont = 0;

int Linha = 0;

int LABEL = 1;

float Vp = 0;

float Vplido = 0;

float Vpatual = 0;

float Amplitude = 0;

int estado = 0;

int Frequencia = 1;

}

void setup()

{

    pinMode(sinal, INPUT);

    pinMode(LED, OUTPUT);

    pinMode(botao, INPUT);

    Serial.begin(9600);

    Serial.println("CLEARDATA");

    Serial.println("LABEL, Linha, Frequencia(KHz), Amplitude(V)");

}
```

```
void loop()
{
    estado = digitalRead(botao);
    if (estado == HIGH)
    {
        digitalWrite(LED,HIGH);
        delay(1000);
        Vp = 0;
        Vplido = 0;
        Vpatual = 0;
        for (cont=0;cont<31;cont++)
        {
            Vp = analogRead(sinal);
            Vplido = Vp * 0.00488758;
            if(Vplido>Vpatual)
            {
                Vpatual=Vplido;
            }

            delay(5);
        }

        Linha++;
        Amplitude = Vpatual*2;

        Serial.print("DATA,");
        Serial.print(Linha);
        Serial.print(", ");
        Serial.print(Frequencia);
```

```
    Serial.print(" ");
    Serial.println(Amplitude);
    Frequencia=Frequencia+4;
    delay(200);
    digitalWrite(LED,LOW);
}

else
{

    digitalWrite(LED,LOW);
}

if (Linha>35)
{

    Serial.println("CLEARDATA");
    Serial.println("ROW,SET,2");
    Linha=0;
    Frequencia=1;
    delay(2000);
}
}
```