

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO YUKIO OHE

**DISPOSITIVO DE GERAÇÃO E MONITORAMENTO DE SINAIS PARA
AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

CAMPO MOURÃO

2022

LEONARDO YUKIO OHE

**DISPOSITIVO DE GERAÇÃO E MONITORAMENTO DE SINAIS PARA
AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

**Signal generation and monitoring device for evaluation of wireless power
transfer systems**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Ricken Garcia

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO YUKIO OHE

**DISPOSITIVO DE GERAÇÃO E MONITORAMENTO DE SINAIS PARA
AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 18 de novembro de 2022

Leandro Castilho Brolin
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Márcio Rodrigues da Cunha
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lucas Ricken Garcia
Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO
2022

AGRADECIMENTOS

De forma concreta, minhas palavras não serão o bastante para expor todo o meu carinho e agradecimento as pessoas que fizeram parte dessa fase tão importante na minha vida. Peço perdão as muitas delas não estão presentes entre essas palavras, pois caso colocasse provavelmente precisaria de muito mais do que uma página, mas gostaria de ressaltar que estou pensando com muito carinho em cada uma enquanto escrevo este texto.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Lucas Ricken Garcia, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, por toda persistência em dar seu apoio nas dificuldades enfrentadas, compreensão em momentos conturbados e por todo o conhecimento que eu absorvi durante essa caminhada.

A Secretaria do Curso, pela cooperação e todo o suporte.

Aos meus colegas de sala e colegas de faculdade, que sempre estiveram ao meu lado para o apoio nas atividades acadêmicas e também na parte emocional e pessoal.

Aos meus amigos de infância que sempre me apoiaram na busca pelos meus sonhos e objetivos, sem eles seria muito difícil vencer esse desafio, em especial a Fabiana Tiemy que sempre me apoiou e me motivou e tenho certeza que continua me apoiando e me motivando, mesmo não estando mais entre nós.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois sem eles eu não seria absolutamente nada, obrigado por todo o apoio, amor, conforto e por terem se sacrificado tanto pelo meu sucesso.

Deixo aqui também uma homenagem em especial para meu ojichan por sempre ter acreditado em mim e por todo seu amor e carinho que carregarei no peito por toda a eternidade.

A Karen Geovanna pelo apoio e companheirismo durante todos os momentos difíceis.

Por fim, agradeço a todos da AgroFlux por terem me dado o apoio e disponibilizado o local e equipamentos para que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A transferência de energia sem fio é um assunto que teve grande atenção no século XIX, graças ao cientista Nikola Tesla, que realizou experimentos comprovando sua eficácia. O conceito voltou a ter grande atenção nos últimos anos com os avanços da tecnologia, sendo aplicados em sistemas de transportes, dispositivos médicos, entre outros. O presente trabalho é direcionado ao desenvolvimento de um dispositivo de geração e monitoramento de sistemas médicos implantáveis, sem a necessidade de um procedimento cirúrgico para verificar a necessidade de manutenção e de recarga da bateria. Implementando um módulo para a configuração da frequência do sinal eletrônico e utilizando o conceito de acoplamento magnético há a possibilidade de monitorar a corrente que o equipamento consome dentro do paciente, por meio do circuito secundário externo, a partir disso, obter os resultados no dispositivo externo, por meio do circuito primário, onde será realizada a coleta e apresentar em uma interface para o usuário. Com a premissa apresentada, o trabalho proposto conseguiu entregar uma implementação inicial de um dispositivo que integra as funcionalidades básicas de equipamentos eletrônicos, tais como osciloscópio e gerador de funções, comumente utilizados em testes de circuitos de transferência de energia sem fio, ainda que os resultados de aquisição do sinal não apresentaram o resultado esperado.

Palavras-chave: configuração da frequência do sinal eletrônico; aquisição de sinais eletrônicos; implementação inicial; sistema médicos implantáveis.

ABSTRACT

The Wireless Power Transfer is a topic that got a lot of attention in 19th century, due to scientist Nikola Tesla, who conducted experiments proving its effectiveness. The concept has regained great attention in recent years with advances in technology, been applied to transportation systems, medical devices, among others. The present work is directed towards the development of a device to generate and monitor implantable medical devices, without the need for surgical procedure to verify maintenance requirement and battery recharging. By implementing a module for setting the frequency of the electronic signal and using the concept of magnetic coupling, there is the possibility of monitoring the current that the equipment consumes inside the patient, by means of the external secondary circuit, and, from that, obtaining the results in the external device, by means of the primary circuit, where the collection will be performed and presented in an interface for the user. With the premise presented, the proposed work was able to deliver an initial implementation of a device that integrates the basic functionality of electronic equipment, such as an oscilloscope and function generator, commonly used in testing wireless power transfer circuits, even though the signal acquisition results did not present the expected result.

Keywords: frequency setting of the electronic signal; acquisition of electronic signals; initial implementation; implantable medical systems; interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações da tecnologia de transferência de energia sem fio.	13
Figura 2 – Conceito de ressonância em sistemas de transmissão de energia sem fio utilizado em animais.	17
Figura 3 – Comportamento do campo elétrico em uma bobina.	17
Figura 4 – Esquemático representativo de um sistema de transmissão de energia sem fio utilizando duas bobinas indutivas.	18
Figura 5 – Diagrama de um sistema de processamento de dados (CPU).	19
Figura 6 – Sinal analógico convertido para sinal digital.	20
Figura 7 – Seguidor de Tensão (<i>Buffer</i>)	21
Figura 8 – Amplificador Inversor.	22
Figura 9 – Amplificador Somador.	22
Figura 10 – Comunicação Serial Peripheral Interface (SPI).	23
Figura 11 – Estrutura resumida do sistema de monitoramento de um sistema de transferência de energia sem fio.	25
Figura 12 – Raspberry Pi 3 Model B.	26
Figura 13 – Módulo gerador de funções AD9850.	27
Figura 14 – Circuito amplificador e atenuador de ganho ajustável com <i>offset</i>	28
Figura 15 – Módulo conversor analógico para digital ADS1256.	30
Figura 16 – Circuito completo.	31
Figura 17 – Circuito impresso.	32
Figura 18 – Esboço da interface com o usuário.	33
Figura 19 – Sinais provenientes do AD9850	35
Figura 20 – Placa de circuito impresso confeccionada na prática.	36
Figura 21 – Sinais condicionados pelo circuito de amplificação, atenuação e <i>offset</i>	37
Figura 22 – Interface com o usuário.	38
Figura 23 – Sinal obtido pelo conversor analógico para digital.	39
Figura 24 – Integração dos módulos e conexão com a Raspberry Pi.	40
Figura 25 – Sinal de saída do gerador de sinais e da placa de condicionamento do sinal obtido pelo osciloscópio.	40

Figura 26 – Sinal de saída da placa de condicionamento do sinal obtido pelo dispositivo.	41
Figura 27 – Implementação das funcionalidades de alteração da quantidade de amostras e na escala de exibição.	41
Figura 28 – Implementação da correção do ponto zero na aquisição de amostras e o aumento da taxa de comunicação do SPI.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variação dos sinais do SPI.	24
Quadro 2 – Valores de frequência obtidos.	34
Quadro 3 – Valores de frequência obtidos.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ADC	Conversor Analógico para Digital
AOP	Amplificador Operacional
CPHA	<i>Clock Phase</i>
CPOL	<i>Clock Polarity</i>
SMCR	<i>Strongly Coupled Magnetic Resonance</i>
SPI	Serial Peripheral Interface
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	Justificativa	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Transmissão de energia sem fio por acoplamento de indutores	17
2.2	Dispositivos de monitoramento e aquisição	19
2.3	Amplificador Operacional	20
2.3.1	Seguidor de Tensão (<i>Buffer</i>)	21
2.3.2	Amplificador Inversor	21
2.3.3	Amplificador Somador	22
2.4	Comunicação	22
3	METODOLOGIA	25
3.1	Processamento dos Dados	25
3.2	Geração do sinal para excitar o circuito de transferência de energia sem fio	26
3.3	Condicionamento do sinal	27
3.4	Aquisição do sinal	29
3.5	Confecção da placa	30
3.5.1	Conectores	30
3.5.2	Alimentação	31
3.5.3	Circuito Impresso	32
3.6	Interface para o usuário	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Resultados módulo AD9850	34
4.2	Resultados da placa de condicionamento do sinal	35
4.3	Resultados módulo ADS1256 e interface com o usuário	38
4.4	Resultados do sistema completo implementado	40
4.5	Discussões e análises	42

5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Transferência de energia sem fio ou em inglês, *Wireless Power Transfer* (WPT) é o termo que denota diferentes tecnologias de transmissão de energia eletromagnética através de um meio físico eletromagnético. O estudo do WPT pode ser direcionado para duas áreas sendo a de campo distante (*far-field*), constituído de transferência de energia por micro-ondas utilizando uma grande quantidade de energia, e a de campo próximo (*near-field*), que baseia-se nos acoplamentos ressonante magnético, indutivo, capacitivo e magneto dinâmico (JAWAD *et al.*, 2017).

Tem-se observado ao longo das últimas décadas que sistemas que aplicam a tecnologia de transferência de energia sem fio estão ganhando cada vez mais atenção, pela diversidade de uso e pela aplicabilidade em sistemas onde a transferência de energia via condutores não pode ser empregada (DALCIO, 2019).

Uma implementação que evidencia a utilização de tal sistema, é a aplicação de técnicas de transferência de energia sem fio no abastecimento de veículos elétricos. Neste caso, há soluções de carregamento estáticas, aplicadas em estacionamentos e garagens, e soluções dinâmicas, em que o veículo é recarregado enquanto está em movimento, conforme apresentado na Figura 1a, aumentando sua autonomia durante o trajeto (AFRIDI, 2018).

Nos últimos anos, dispositivos portáteis e sem fio tem se tornado predominantes, resultando em uma grande diversidade e quantidade de carregadores de baterias no mundo, aumentando a quantidade de lixo eletrônico que é descartada. Uma premissa para a redução do lixo eletrônico é a tecnologia de carregamento sem fio, como pode ser observado na Figura 1b, a qual permite a unificação do método de carregamento desses dispositivos portáteis (ZHONG; LIU; HUI, 2011).

A utilização de tal tecnologia não se restringe somente aos dispositivos comuns e presentes no dia a dia, uma de suas aplicabilidades é no processo de extração de água congelada na superfície lunar, demonstrado na Figura 1c. Considerando que o gelo só pode existir na sombra dentro de crateras e abismos para que seja possível a sua retirada na superfície lunar, a energia fotovoltaica se torna inviável. Contudo, os raios solares atingem a sua borda, possibilitando, neste caso a utilização da transmissão de energia sem fio para o fornecimento de energia dos equipamentos situados nesses locais (DAVID, 2020).

Outra aplicação de sistemas de WPT é na área médica. Há diversos métodos convencionais de tratamento e monitoramento que ainda são invasivos e restringem a rotina diária de pacientes. A fim de possibilitar o tratamento e o monitoramento de grandezas biomédicas sem gerar grandes limitações à rotina de pacientes, tem sido empregados dispositivos médicos implantáveis como por exemplo o marca-passo (apresentado na Figura 1d), monitoramento cardíaco, estimuladores neurais, entre outros, que utilizam a transferência de energia sem fio para sua alimentação plena ou recarregamento de sua bateria (KIM *et al.*, 2022).

O benefício da utilização é a diminuição do custo para a verificação do equipamento, além de ser um método menos invasivo diminuindo os riscos, já que não há a necessidade de um processo cirúrgico. Estima-se que existam cerca de oito mil tipos de dispositivos médicos implantáveis, sendo um mercado muito abrangente e que necessita de uma alternativa mais viável para o monitoramento de sua bateria (ANS, 2019).

Figura 1 – Aplicações da tecnologia de transferência de energia sem fio.

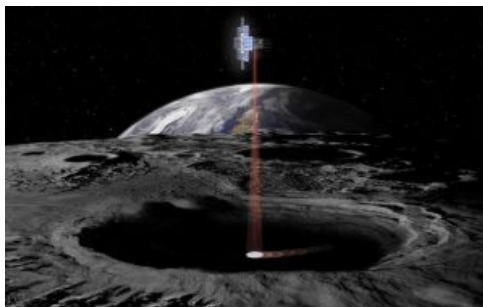
(a) Carro elétrico com carregador aplicado em rodovias



(b) Carregador de celular sem fio



(c) Técnicas de extração de água na superfície lunar



(d) Marca-passo cardíaco implantado em paciente



Fonte: Afridi (2018, p. 1), Tomasco (2020, p. 1), David (2020, p. 1), Oliveira (2014, p. 1).

Neste contexto, a utilização de tecnologias de carregamento sem fio podem solucionar alguns problemas recorrentes, tais como mau contato dos condutores, reduzindo o grau de flexibilidade nas aplicações e riscos a segurança. No entanto, mesmo melhorando estes aspectos, a tecnologia de transferência de energia sem fio ainda está suscetível a falhas em seu funcionamento, alta influência do posicionamento entre transmissor e receptor, e dificuldades em prover uma transferência eficiente ou com uma elevada capacidade de transferência de potência para sistemas cuja distância de operação ultrapassa as dimensões dos transmissores/receptores (MOSCHEN, 2021).

Neste sentido, o monitoramento dos parâmetros elétricos de um sistema de transferência de energia sem fio é parte fundamental para alcançar um adequado desempenho de sistemas de WPT e garantir a operação do dispositivo dentro de suas especificações. Além disso, no processo de desenvolvimento de soluções em WPT, é interessante possuir plataformas de desenvolvimento que auxiliam o projeto e execução de teste a partir da geração de sinais e do monitoramento de parâmetros de um sistema de WPT.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema eletrônico para a aquisição e monitoramento de sinais elétricos provenientes de circuitos para transferência de energia sem fio, provendo tanto o sinal de entrada para este tipo de sistema quanto a aquisição de sinais.

1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos:

- Configurar um gerador de funções atendendo as especificações da aplicação do sistema de transferência de energia sem fio;
- Projetar e confeccionar um circuito para o condicionamento do sinal aplicando ganho, atenuação e *offset*;
- Manipular um conversor analógico para digital com a finalidade de realizar a aquisição das amostras;
- Aplicar uma interface gráfica com o intuito de possibilitar uma forma de visualização, análise e controle de parâmetros para o usuário;
- Manipular um sistema para processar todas as informações e integrar todas as funcionalidades.

1.2 Justificativa

O sistema de transferência de energia sem fio é uma tecnologia que vem crescendo visando reduzir a quantidade de fios utilizados e solucionar problemas com aplicações para casos onde não há a possibilidade de carregamento utilizando fios. Dentre as diversas aplicações, pode-se citar em carregadores de celulares, sistemas de transportes públicos, em carros e em dispositivos relacionados a medicina.

Dentro desse contexto, com o aumento da diversidade de uso para tal tecnologia, situações semelhantes a quaisquer outras aplicações na eletrônica são encontradas em sua implementação, sendo elas a exigência em estar dentro de parâmetros de qualidade durante seu funcionamento e a necessidade de se encontrar falhas ou mau funcionamento dos equipamentos. As manutenções periódicas são essenciais para a prevenção de possíveis interrupções e melhorar a qualidade do processo, minimizando custos e riscos de acidentes (COLORTEL, 2019).

Para que sejam feitas as análises e inspeções dos equipamentos, existem ferramentas desenvolvidas para tal fim, como o osciloscópio que permite a aquisição de sinais elétricos e eletrônicos (a variação na diferença de potencial ou tensão entre estes pontos no decorrer do tempo) de um circuito, exibindo em uma tela gráficos que facilitam a interpretação de informações e parâmetros (CHIPTRONIC, 2021). No entanto, nem sempre o uso de equipamentos de bancada são práticos para realização de testes mais complexos, testando soluções da literatura especializada, como é apresentado de acordo com (ABOUALALAA; MANSOUR; POKHAREL, 2022) sobre o estudo de eficácia da metasuperfície visando a melhoria da eficiência de transferência de energia e os efeitos de desalinhamento do sistema, em que o sinal elétrico de entrada é alterado propositalmente enquanto que parâmetros de saída devem ser monitorados em tempo real.

Por isso, se faz importante o desenvolvimento de soluções que integrem a geração e o monitoramento de sinais, possibilitando realizar monitoramentos específicos a partir de entradas controladas por um sistema computacional.

Este trabalho tem a intenção de desenvolver uma solução inicial para realização destes testes, visando gerar o sinal de entrada e realizar o monitoramento, ao menos de tensão contínua, de sinais de saída de circuitos provenientes da transferência de energia sem fio.

De acordo com o exposto, o estudo daria abertura para uma série de aplicações futuras, além da possibilidade de tornar-se uma ferramenta de testes para o aprimoramento da tecnologia. Ao ter o controle do sinal de entrada e a apresentação dos parâmetros da leitura em um mesmo software, é possível implementar testes e obter análises de diferentes soluções da literatura, conseguindo uma maior qualidade na transferência de energia e possibilitando ajustar, por exemplo, a frequência de ressonância para o valor ideal em determinada aplicação

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A história da eletricidade na concepção da ciência não apresenta um marco inicial, isto devido a falta de documentos e a perda da grande parte dos que restaram. Em 600 a.c, os filósofos gregos relataram os primeiros experimentos envolvendo a eletricidade, por exemplo Tales de Mileto, que utilizou um âmbar e fitas de pele animal para atrair pedaços de palha (OKA, 2000).

Em meados de 1729, Stephen Gray efetuou experimentos, comprovando a condução de energia através do metal. A partir deste fato, a ideia de transferência de energia utilizando fios surgiu e foi implementada para levar energia de um lugar para outro, além de possibilitar a transmissão de informações, tal como o telefone (OKA, 2000).

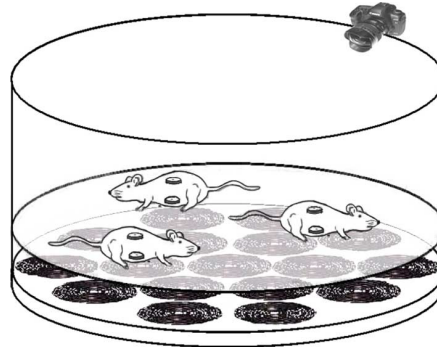
Em 1890, Nikola Tesla apresentou a ideia da transferência de energia sem fio utilizando circuitos ressonantes que emitiam ondas eletromagnéticas, com a proposta de enviar energia para qualquer lugar no mundo (CARLSON, 2007).

Na década passada, equipamentos eletrônicos com diversas funcionalidades, sejam elas pessoais ou profissionais (notebooks, celulares, robôs, etc), surgiram e a partir disso o interesse na tecnologia WPT voltou a crescer, por apresentar uma solução em aplicações que utilizam fios. O professor Marin Soljacic (2007) através de um experimento comprovou que para transferir uma potência de 60 W para uma carga que está a mais de 2 metros de distância é necessário oferecer uma potência de 400 W com uma eficiência de 15%. Isso mostra os desafios que esse tipo de transmissão pode apresentar, contudo, ainda assim é uma amostra das diversas possibilidades de utilização dessa tecnologia. (SOLJACIC *et al.*, 2007).

Uma aplicação de enorme interesse para a tecnologia WPT é em dispositivos biomédicos implantáveis com a tecnologia de microssistemas. Esses dispositivos são utilizados na neurociência para obter dados em tempo real, sendo eles de grande relevância para pesquisas na nanomedicina aplicadas em tratamentos de distúrbios cerebrais tais como a epilepsia, mal de Parkinson, entre outros. Equipamentos que se baseiam na tecnologia de transmissão de energia sem fio são implementados com o objetivo de realizar o monitoramento do equipamento implantado sem a necessidade da utilização de fios, diminuindo o risco do paciente (CHANG *et al.*, 2011).

Além da utilização no monitoramento, o mesmo conceito é desenvolvido com o objetivo de realizar a recarga da bateria de tais dispositivos sem a necessidade de uma cirurgia invasiva, o que minimiza os riscos à saúde e soluciona outras limitações e problemas que podem afetar tanto humanos como os animais. A Figura 2 apresenta o esboço de um procedimento experimental para ratos com dispositivos implantáveis, que realizam a recarga do equipamento implantado através da base com bobinas (XU *et al.*, 2013).

Figura 2 – Conceito de ressonância em sistemas de transmissão de energia sem fio utilizado em animais.

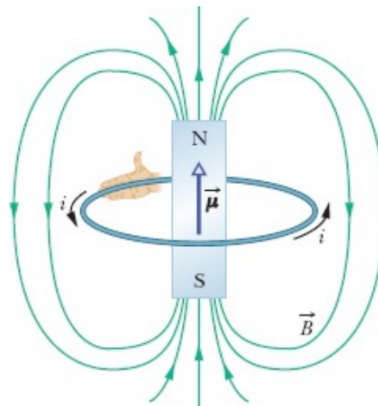


Fonte: Xu et al. (2013, p. 4775).

2.1 Transmissão de energia sem fio por acoplamento de indutores

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2016), uma corrente elétrica produz um campo magnético e vice versa, esse é o princípio da Lei de indução de Faraday. A Figura 3 mostra o comportamento do campo eletromagnético ao redor de uma espira carregada com uma corrente, representada por i . O momento dipolar magnético é representado por μ e o campo eletromagnético é representado por β . Os polos norte e sul magnéticos são representados por N e S, respectivamente.

Figura 3 – Comportamento do campo elétrico em uma bobina.

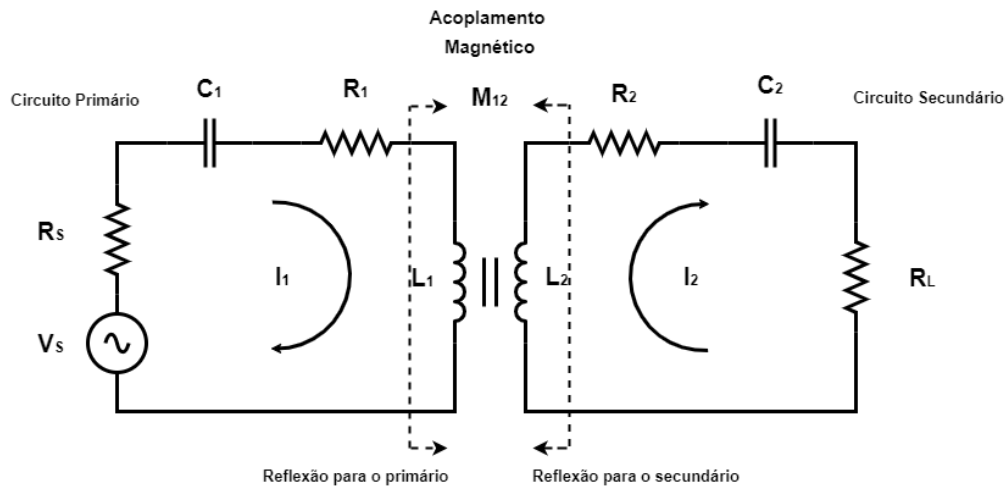


Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 182).

Campos magnéticos que alimentam um ao outro produzem uma perturbação eletromagnética que se propaga como uma onda, assim as ondas produzidas por um campo eletromagnético gerado por um circuito podem influenciar um outro circuito (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

A Figura 4 mostra o exemplo de um sistema com duas bobinas, sendo que R_S corresponde à resistência interna da fonte de tensão, R_1 é a resistência intrínseca do indutor L_1 , C_1 é a capacitância projetada para operar em ressonância com L_1 , R_2 é a resistência intrínseca do indutor L_2 , C_2 é a capacitância projetada para operar em ressonância com L_2 , M_{12} corresponde à indutância mútua entre L_1 e L_2 , e a carga é representada por R_L .

Figura 4 – Esquemático representativo de um sistema de transmissão de energia sem fio utilizando duas bobinas indutivas.



Fonte: Adaptado de Wei, Wang e Dai (2014, p. 4320).

A tecnologia WPT pode ser classificada em três vertentes, que são a radiação eletromagnética, o acoplamento elétrico e o acoplamento magnético (Figura 4) (WEI; WANG; DAI, 2014).

No caso da radiação eletromagnética, a energia elétrica é convertida em eletromagnética como os feixes de lasers e micro-ondas, presente por exemplo no micro-ondas eletrodoméstico, o que é emitido para o receptor que converte de volta para a energia elétrica utilizando uma antena retificadora de silício. Entretanto, ela é muito afetada pelas condições do ambiente, objetos e do clima, além de ser nociva para os humanos por utilizar uma frequência e uma potência elevada (WEI; WANG; DAI, 2014).

O sistema de acoplamento elétrico tem o princípio da redistribuição das cargas na superfície dos objetos. Um gerador de frequência de potências altas excita o transmissor ressonante que gera uma corrente elétrica alternada o que possibilita o acoplamento do receptor. Todavia, ele é suscetível à influência de objetos ao redor e apresenta uma eficiência baixa (WEI; WANG; DAI, 2014).

O acoplamento magnético pode ser classificado como de curta distância para a indução eletromagnética e meia distância para o *Strongly Coupled Magnetic Resonance* (SMCR). Sua eficiência e potência são consideradas altas, contudo, ele trabalha em uma faixa curta de distância, que corresponde a centímetros (WEI; WANG; DAI, 2014).

O SMCR é um regime de operação dos sistemas de transferência sem fio, no qual são classificados os sistemas de ressonâncias que utilizam o acoplamento eletromagnético, elétrico, nuclear ou magnético (SOLJACIC *et al.*, 2007). Nesse regime de operação, o sistema apresenta uma transferência de energia muito eficiente e emprega bobinas em um elevado nível de acoplamento entre elas. A sua ressonância gera um aumento da sua transmissão, ainda que as bobinas estejam desalinhadas, este regime é capaz de manter uma alta eficiência (CORREA, 2018).

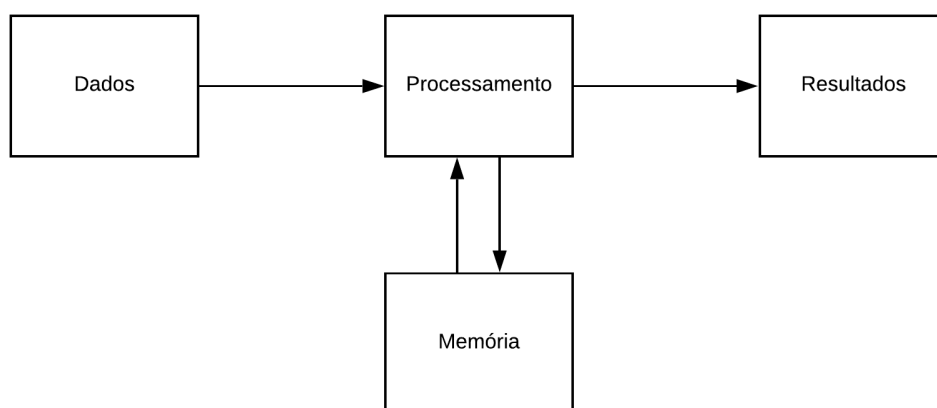
2.2 Dispositivos de monitoramento e aquisição

Um sistema de monitoramento analisa os dados obtidos do sistema de aquisição de dados e informa ao usuário o estado atual dos parâmetros. Eles podem ser aplicados em diversos tipos de dispositivos, por exemplo em equipamentos voltados para a área da saúde e aplicações voltadas para a indústria. Tais equipamentos podem obter os dados e mostrar seu resultado em tempo real, podendo ser valores de temperatura, taxa de respiração, taxa de batimentos cardíacos, entre outros (LEE *et al.*, 2018).

O processamento é a forma de manipulação de uma informação a fim de produzir um resultado. O sistema de processamento apresentado na Figura 5 realiza algumas tarefas, tais como operações aritméticas (somar, subtrair, multiplicar, dividir), operações lógicas (AND, OR, XOR, entre outras), comunicação entre a unidade de processamento e a memória (MONTEIRO, 2007).

Como a requisição de operações desses dados aplicados no sistema são de baixo processamento, em relação a dispositivos computacionais, serão utilizados sistemas embarcados. Tais sistemas são utilizados em diversos equipamentos de monitoramento e controle, sendo projetados para usos específicos e para realizar inúmeros acionamentos e leituras de sensores, além de operar em tempo real e sem a necessidade de um usuário. Um exemplo de utilização é a arquitetura implementada em sistemas embarcados conhecida como *Super Loop*, a qual é um laço infinito para obter os dados em tempo real (MOROZ *et al.*, 2012).

Figura 5 – Diagrama de um sistema de processamento de dados (CPU).



Fonte: Adaptado de Monteiro (2007, p. 2).

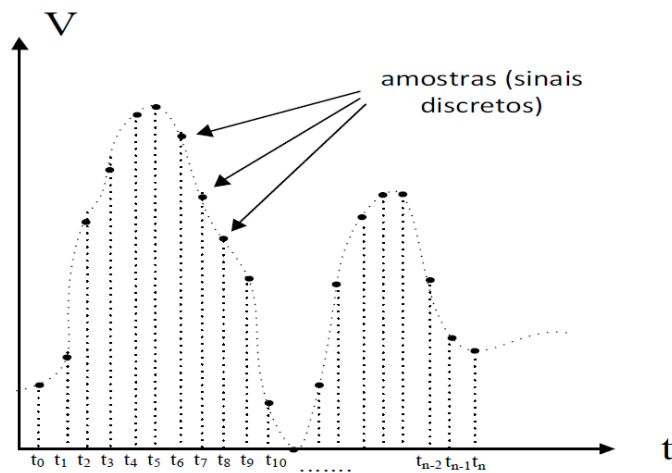
Considerando o acionamento do sistema WPT, o gerador de funções efetua o condicionamento da frequência e tensão de ressonância para realizar sua transmissão de forma mais eficiente excitando a bobina transmissora. O gerador de função tem a característica de injetar sinais periódicos na bobina de forma regulável, sendo possível determinar a frequência produzida (USP, 2017).

Após a obtenção do sinal modulado com a frequência adequada, é realizado o ganho de tensão do sinal. Alguns exemplos são os amplificadores que utilizam transistores, que apresentam um excelente ganho de tensão e fornecem uma alta impedância de entrada, possibilitando obter uma corrente de entrada quase nula. Assim é possível enviar uma potência e uma frequência adequada, condicionando o sinal para uma alta eficiência de transferência (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Para a obtenção dos dados do indutor receptor é necessário efetuar um tratamento dessa informação para que possa ser processada resultando em dados analisáveis. Entretanto, o sinal obtido da bobina é um sinal analógico e a unidade de processamento recebe apenas sinais digitais, necessitando assim, da implementação de um conversor Analógico/Digital. Ele é um circuito responsável pela conversão de sinais A/D e D/A (SILVA, 2016).

O sinal proveniente da bobina é contínuo, ou seja, em um intervalo de tempo podem existir infinitos valores tanto de tensão quanto de corrente, isso impede que seja feita a aquisição de todos os valores infinitos e transformados para digital. E para que o sistema de processamento possa coletar esses dados, o conversor realiza uma amostragem no sinal obtendo amostras (Figura 6), que são chamados de sinais discretos. As informações então são convertidas para bits de acordo com o valor as amostras obtidas, sendo possível efetuar a análise de forma digital (SILVA, 2016).

Figura 6 – Sinal analógico convertido para sinal digital.



Fonte: Silva (2016, p. 1).

2.3 Amplificador Operacional

O Amplificador Operacional (AOP) tem esse nome devido a sua capacidade em realizar operações matemáticas, como adição, multiplicação, integração, diferenciação e também para uma infinidade de funções (CIPELLI, 2008).

As principais características de um amplificador operacional ideal são de apresentar uma impedância de entrada infinita, impedância de saída nula, ganho infinito, atraso nulo, derivada da tensão de saída com a temperatura (*drift*) nula (CIPELLI, 2008).

Para que a amplificação seja viável, inclusive para sinais de baixa amplitude como, por exemplo, sinais provenientes de transdutores ou sensores, é necessário que o amplificador possua um alto ganho de tensão. Idealmente, esse ganho seria infinito. As suas aplicações estão presentes nos sistemas eletrônicos em controle e instrumentação industrial, instrumentação nuclear, instrumentação biomédica, computadores analógicos, equipamentos de telecomunicação, instrumentos de áudio, etc (PERTENCE JUNIOR, 2015).

O amplificador operacional é capaz de realizar operações matemáticas como adição, subtração, multiplicação, divisão, diferenciação, integração e logaritmo. Outras aplicações muito utilizadas também são para realizar comparação e amplificação de sinais eletrônicos. O amplificador inversor tem a sua saída realimentada na entrada inversora, reduzindo o nível de distorção do sinal. (CRUZ, 2008).

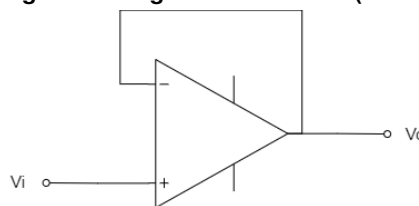
2.3.1 Seguidor de Tensão (*Buffer*)

Este modo de operação, apresentado na Figura 7, tem a característica de ter uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída, sendo muito utilizado para isolamento de estágios e casador de impedâncias (PERTENCE JUNIOR, 2015).

Considerando sua resistência conectada ao terra como infinita (circuito aberto), a resistência de realimentação como zero (curto) e $A_v f$ sendo o ganho do amplificador:

$$A_v f = \frac{V_o}{V_i} = 1 \quad (1)$$

Figura 7 – Seguidor de Tensão (*Buffer*)



Fonte: Autoria própria (2022).

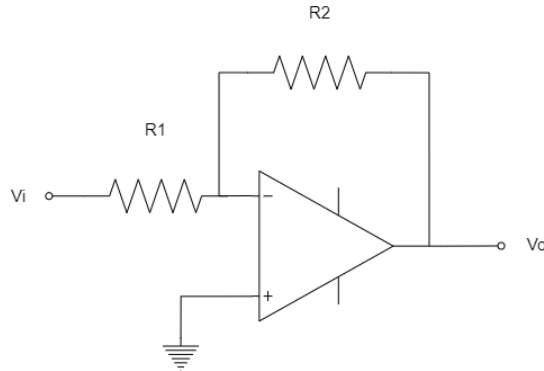
2.3.2 Amplificador Inversor

A denominação de amplificador inversor, apresentado na Figura 8, se deve pelo fato de que o sinal de saída deste circuito estará defasado 180° em relação ao sinal de entrada (PERTENCE JUNIOR, 2015).

O ganho de circuito em malha fechada é dado por:

$$A_{mf} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Figura 8 – Amplificador Inversor.



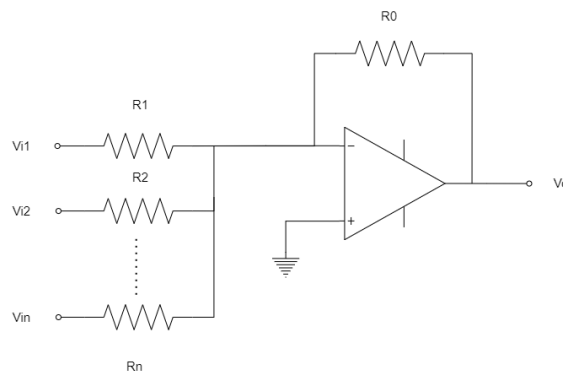
Fonte: Autoria própria (2022).

2.3.3 Amplificador Somador

O amplificador somador realiza a soma das entradas conforme a Figura 9. Considerando a soma das tensões de entrada:

$$V_o = -R_0 * \left[\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right] \quad (3)$$

Figura 9 – Amplificador Somador.



Fonte: Autoria própria (2022).

2.4 Comunicação

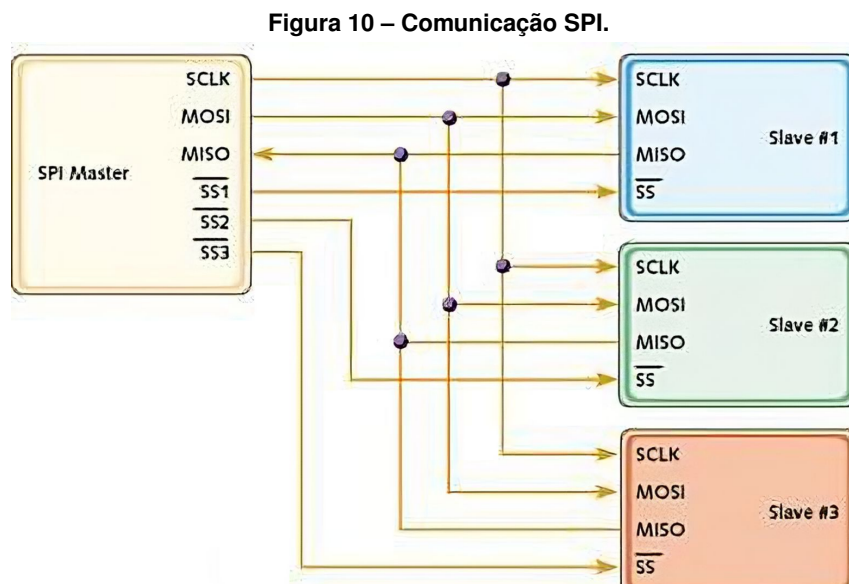
Existem diversos tipos de protocolos para realizar a comunicação entre dispositivos ou periféricos. O protocolo tem a função de trocar informações e compartilhar recursos, interligados por um subsistema de comunicação. Alguns exemplos de comunicação são: ETHERNET, WLAN, WPAN, RS242, USB, I2C e SPI (IDEALI, 2021).

Um dos tipos de comunicação serial é o *Serial Peripheral Interface* (SPI), muito utilizado para comunicações entre circuitos integrados e sensores. O SPI é um protocolo de dados seriais de forma síncrona, que opera de forma *full duplex*, ou seja, os dados trafegam nos dois sentidos simultaneamente (INSTRUMENTS, 2020).

Tais dados trafegam utilizando o conceito de mestre e escravo. Quando o mestre produz o sinal de *clock*, o mesmo envia em um dos dados a informação de qual escravo ele está se referindo no momento (SS ou CS), iniciando assim o envio das informações de ambos os sentidos simultaneamente (INSTRUMENTS, 2020).

Para a comunicação entre o mestre e os escravos são necessários quatro sinais apresentados na Figura 10, sendo eles:

- *clock (SCLK)*: sinal gerado pelo mestre. Os demais sinais de transmissão se baseiam na sincronização das bordas do sinal de clock;
- *master data output, slave data input (MOSI)*: é o envio de dados do mestre para os escravos;
- *master data input, slave data output (MISO)*: é o recebimento de dados do mestre provenientes dos escravos;
- *chip select (CS) or slave select (SS)*: é o sinal de seleção com qual dos escravos o mestre está se comunicando.



Fonte: Instruments (2020, p. 1).

De acordo com Ideali (2021), a maioria dos protocolos utilizados no mundo dos microcontroladores tem uma arquitetura em que um lado é o master, que coordena toda a comunicação, e o outro lado é composto pelos *slaves*, que obedecem a esse controle, por isso o SPI tem se destacado muito dentro dessa área.

O protocolo SPI possui várias características específicas, tais como os sinais usados para comunicação, que possuem por padrão uma única direção. Isto mostra que sempre existem em suas saídas dois transistores, que definirão o estado de um determinado pino, trabalhando como *push-pull*. É possível afirmar que essa característica é o que diferencia o SPI de outras comunicações do tipo serial. A sua forma de onda consiste em configurar as bordas de subida e descida de comunicação do *clock* em sua polaridade e também em fase (IDEALI, 2021).

O *Clock Polarity* (CPOL) realiza a configuração da polaridade do bit durante o estado inativo, sendo caracterizado pelo período em que o CS está em nível alto realizando a transição para o nível baixo no início da transmissão. O estado ativo é definido quando o CS estiver em nível baixo para o nível alto no fim da transmissão (INSTRUMENTS, 2020).

O *Clock Phase* (CPHA) realiza a configuração da fase do clock, o qual é a borda do sinal, podendo ser de descida ou subida, utilizada para amostrar ou mudar os dados (INSTRUMENTS, 2020)

Por exemplo, no modo 1, CPHA esta em 1, indicando que as amostras são aquisitados na borda de descida e os dados são desloados na borda de subida do clock, indicando o nível *idle* como zero (DHAKER, 2018).

O mestre seleciona a configuração de tais bits conforme a exigência do escravo, o qual é apresentado as configurações no Quadro 1.

Quadro 1 – Variação dos sinais do SPI.

Modo	CPOL	CPHA	Borda de troca	Transição	Nível de IDLE
0	0	0	subida	meio do bit	1
1	0	1	descida	começo do bit	0
2	1	0	descida	meio do bit	0
3	1	1	subida	começo do bit	1

Fonte: Adaptado de Ideali (2021, p. 176).

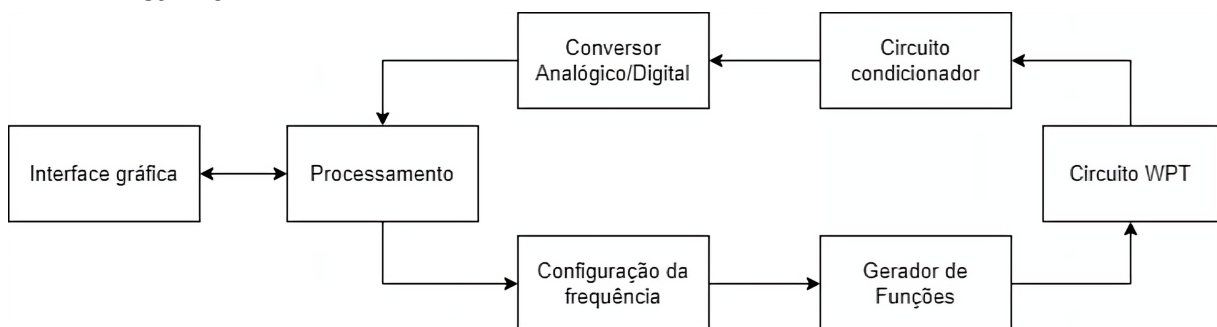
3 METODOLOGIA

O presente trabalho baseou-se no diagrama em blocos do sistema, apresentado na Figura 11, composto pelo processamento dos dados, interface gráfica, o gerador de sinais, o sistema de transmissão de energia sem fio, o circuito que efetua o condicionamento do sinal e o conversor A/D (Conversor Analógico para Digital (ADC)) que converte o sinal para digital e envia a coleta ao sistema de processamento. Os equipamentos necessários para o desenvolvimento e para efetuar todos os testes foram disponibilizados pelo laboratório do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão (UTFPR-CM).

A Figura 11 apresenta o sistema completo estruturado para o fluxo de atividades realizadas pelo dispositivo.

O bloco de processamento concentra todo o controle sobre a configuração da frequência e tratamento das informações providas do conversor A/D. O gerador de funções produz um sinal com a frequência definida pelo bloco de processamento, realizando assim a excitação do circuito WPT. Com o circuito primário condicionado é efetuado o acoplamento ao circuito secundário, permitindo assim que haja o consumo de energia pelo secundário. A partir disso, o circuito condicionador realiza o tratamento do sinal, do circuito primário, para que o mesmo possa ser lido pelo conversor A/D nos parâmetros corretos. Por fim, o conversor A/D realiza a aquisição das amostras e envia o valor lido para o bloco de processamento que então exibe na interface gráfica.

Figura 11 – Estrutura resumida do sistema de monitoramento de um sistema de transferência de energia sem fio.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1 Processamento dos Dados

O Raspberry Pi 3 apresentado na Figura 12, foi responsável por realizar a comunicação com os periféricos e gerar a interface gráfica manipulável com o usuário. O Raspberry foi estipulado pelo seu baixo consumo de energia e pelo seu alto poder de processamento, apresentando um processador Quad Core de 1.2 GHz, sendo o seu chip um BCM2837 de 64 bits,

memória RAM de 1 GB, o mesmo conta com conectividade *Wireless*, *Bluetooth*, portas USB e HDMI (INSTRUMENTS, 2019).

Tendo em vista a implementação da interface gráfica para o usuário, a Raspberry traz consigo a possibilidade de implementar diferentes sistemas operacionais baseados em Linux, por exemplo o Raspbian. Nele é possível desenvolver uma aplicação simples e de fácil entendimento para o usuário, além disso, como citado acima, a Raspberry apresenta entradas HDMI e USB, possibilitando a utilização com um monitor ou televisão, teclado e mouse, sendo itens comuns para a grande parte dos usuários. Sendo assim, observa-se que há diversos recursos para desenvolver o protótipo de uma tecnologia embarcada.

Figura 12 – Raspberry Pi 3 Model B.



Fonte: Instruments (2019, p. 1).

3.2 Geração do sinal para excitar o circuito de transferência de energia sem fio

O gerador de função precisa fornecer uma boa qualidade de sinal, tendo uma boa resolução e um sinal confiável, dessa forma, foi escolhido o módulo AD9850, como apresentado na Figura 13. Este dispositivo foi definido pela sua alta performance em gerar sinais completos, com frequências e geração de *clock* digitalmente programáveis. Tal equipamento fornece 32 bits de frequência ajustável, que fornece uma saída de até 40 Mhz (DEVICES, 2004).

O AD9850 é um dispositivo que utiliza tecnologia avançada DDS (*Direct digital synthesis*), técnica que utiliza blocos de processamento de dados digitais para gerar um sinal de saída ajustável em frequência e fase, baseando-se em um sinal de *clock* de precisão com frequência fixa, acoplado a um conversor digital-analógico de alta performance e rapidez e um comparador para formar um sintetizador digital de frequência completo.

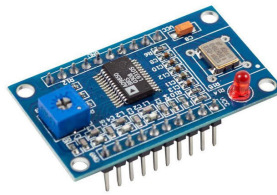
O sinal gerado pode ser uma onda senoidal analógica de espectro puro, além de ter a frequência e fases programáveis, acessíveis por meio das saídas ZOUT1 e ZOUT2. Este sinal pode ser utilizado como uma fonte de alimentação ou convertido para uma onda quadrada, dispostas nas saídas QOUT1 e QOUT2.

Para o controle do dispositivo pode-se utilizar uma comunicação paralela ou serial. No formato paralelo são utilizados os pinos de D0 até D7, os quais enviam palavras de 8-bit de forma a definir a frequência de saída do dispositivo. No modo serial são utilizados os pinos

W_CLK, FQ_UD, DATA e RESET, sinal de *clock*, atualização da frequência, dados seriais e a reinicialização, respectivamente.

A comunicação escolhida no desenvolvimento deste projeto foi a serial, devido a utilização de menos portas de entrada e saída necessários para a transferência de dados e sendo uma forma mais simples de implementar o protocolo, visto que ele não segue nenhum padrão comercial, sendo descrito e implementado utilizando o *datasheet* (DEVICES, 2004).

Figura 13 – Módulo gerador de funções AD9850.



Fonte: Eletronica (2022, p. 1).

3.3 Condicionamento do sinal

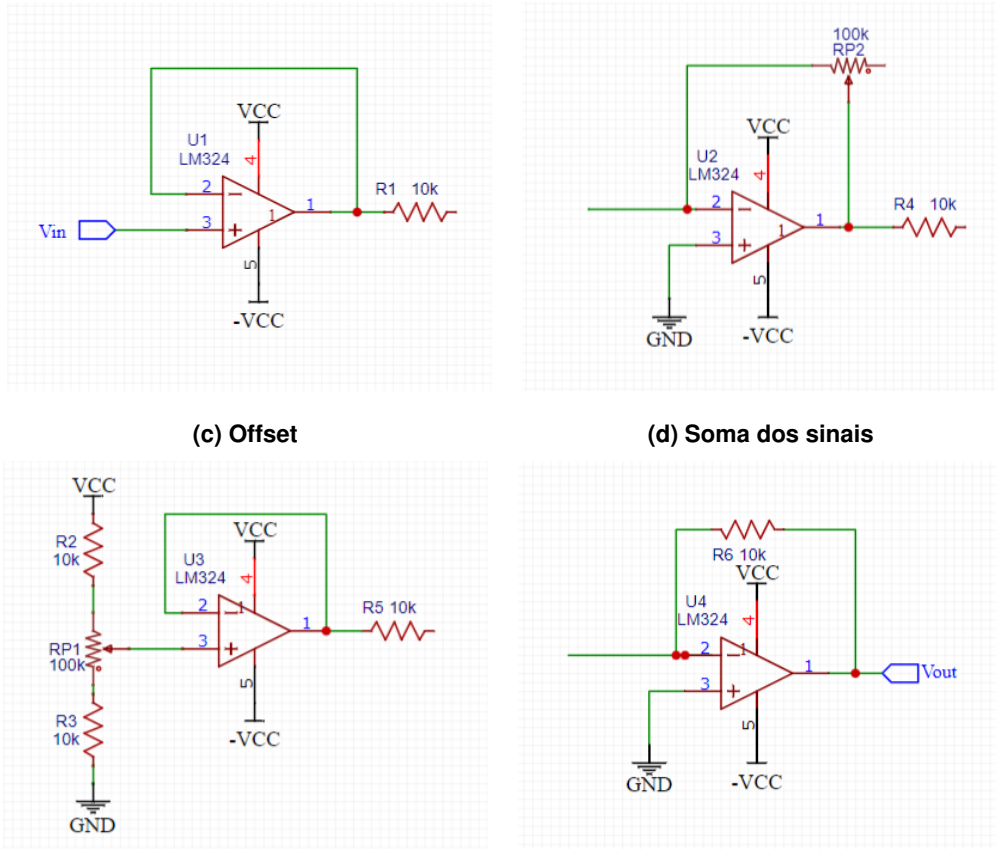
Antes da etapa de aquisição do sinal, foi pensado em um circuito de condicionamento e amplificação/atenuação utilizando amplificadores operacionais LM324. O circuito tem a função de possibilitar o condicionamento, para a leitura do conversor analógico para digital, de qualquer tipo de sinal de entrada. Seu funcionamento consiste na amplificação ou atenuação do sinal de forma regulável, além de realizar o ajuste de *offset* do sinal caso o mesmo se apresente fora da faixa de tensão desejada.

Na Figura 14a é possível notar a configuração de seguidor de tensão ou *buffer*, tal circuito tem o objetivo de apresentar uma alta impedância de entrada, reduzindo o consumo de corrente, não afetando a potência do circuito anterior e apresentando ganho igual a 1, sendo que, a entrada tem o mesmo valor de tensão da saída. Foi utilizada a topologia apresentada na Figura 7 e a Equação 1.

Em seguida, há uma etapa de ganho regulável, a Figura 14b que apresenta a atenuação máxima de 0 e ganho máximo de 10, sendo realizada por um amplificador inversor, que tem o objetivo de amplificar/atenuar o sinal de acordo com a necessidade e tipo de sinal proveniente do circuito WPT. Este circuito foi projetado de acordo com a Figura 8 e a Equação 2.

De forma a realizar o desenvolvimento dos circuitos, foi definido, primeiramente, os valores das resistências, sendo de 10 k Ω (resistor fixo) e 100 k Ω (resistor variável). Tais valores foram escolhidos pelos seguintes fatores: disponibilidade de compra, coerência com os parâmetros de ganho de tensão e redução do valor da corrente no circuito.

Figura 14 – Circuito amplificador e atenuador de ganho ajustável com *offset*
(a) Seguidor de tensão **(b) Ganho regulável**



Fonte: Autoria própria (2022) .

O circuito da Figura 14c tem a função de realizar o ajuste de *offset* do sinal, sendo um divisor de tensão regulável junto a um seguidor de tensão. A tensão proveniente do divisor de tensão varia proporcionalmente de acordo com as razão das resistências, apresentado na Equação 4.

Considerando V_o sendo o valor da tensão de saída, V_i o valor da tensão de entrada, R_2 a resistência ligado a alimentação e R_3 a resistência ligada ao terra:

$$V_o = V_i * \left(\frac{R_3}{R_2 - R_3} \right) \quad (4)$$

Por fim, o circuito responsável por realizar a soma do sinal proveniente da etapa de amplificação e do divisor de tensão é o somador inversor, apresentado na Figura 14d. A tensão de saída é a relação entre os valores da entrada negativa com o valor da referência da entrada positiva. Desta maneira pode-se testar diferentes características de sinais apenas ajustando os parâmetros no circuito de forma simples e fácil, adequando para cada caso. Este circuito foi desenvolvido seguindo a topologia da Figura 9 e a Equação 3.

3.4 Aquisição do sinal

A aquisição dos dados é realizada por meio do módulo conversor de sinais analógicos para digitais ADS1256, apresentado na Figura 15, um equipamento com baixo ruído, apresenta uma alta resolução de 24 bits e uma taxa de amostragem de mais de 30 kSPS (*sample per second*). Ele é ideal para conversão de sinais em alta qualidade e precisão. A comunicação entre o sistema de processamento e o conversor foi realizada de forma serial utilizando o protocolo SPI (INSTRUMENTS, 2013). De fato, para o desenvolvimento de uma solução completa seria interessante a utilização de um ADC com taxa de amostragem na faixa de 1 MSPS a 10 MSPS. Entretanto, dois fatores foram importantes para esta tomada de decisão. Primeiro, para uma primeira versão desta solução o monitoramento de sinais de corrente contínua e de baixa frequência já possibilitou observar os desafios na implementação deste tipo de dispositivo integrando interface gráfica. E segundo, a disponibilidade e custo de um ADC com esta alta capacidade de amostragem também se demonstrou inviável para este estágio de desenvolvimento.

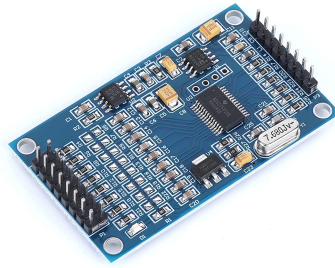
Para o interfaceamento do ADS1256 são utilizados cinco pinos, sendo eles DRDY, SCLK, DIN, DOUT e CS. Conforme citado anteriormente e apresentado na Figura 10 os pinos de entrada e saída são:

- DRDY: Pino responsável pela identificação caso os dados de saída do módulo estejam prontos para serem enviados ao processador da Raspberry;
- SCLK: Responsável pelo comando de *clock* da comunicação;
- DIN: Responsável pela comunicação serial de entrada do módulo ou também chamado de MOSI;
- DOUT: Responsável pela comunicação serial de saída do módulo ou também chamado de MISO;
- CS: Pino responsável pela seleção do escravo.

O módulo apresenta 8 entradas de sinais analógicos sendo elas AIN0, AIN1, AIN2, AIN3, AIN4, AIN5, AIN6 e AIN7, permitindo a manipulação de diferentes sinais por meio de um multiplexador interno ao circuito integrado, realizando assim a seleção da leitura de cada entrada analógica.

As aplicações desse instrumento são direcionadas para a leitura de células de carga de balanças de precisão, equipamentos médicos, instrumentos industriais, entre outros, devido a sua alta resolução. O conversor é composto por um modulador delta-sigma de quarta ordem, seguida de um filtro digital programável. Um circuito interno também provém ganhos programáveis de baixo ruído de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 (INSTRUMENTS, 2013).

Figura 15 – Módulo conversor analógico para digital ADS1256.



Fonte: Amazon (2022, p. 1).

3.5 Confeção da placa

A placa foi desenvolvida utilizando ferramenta gratuita para desenvolvimento de esquemáticos eletrônicos EasyEDA (EASYEDA, 2022). Tal atividade teve a premissa de integrar os componentes e módulos apresentados anteriormente, tais como o Raspberry PI, o módulo gerador de funções AD9850, conectores para entrada e saída de sinais, o circuito responsável pelo condicionamento e aquisição de sinais ADS1256, além da alimentação do sistema de monitoramento.

Conforme apresentado anteriormente e na Figura 14, o circuito foi desenvolvido, seguindo tais topologias, para o condicionamento, amplificação e atenuação de apenas um sinal. Sendo assim, como o dispositivo conta com duas entradas externas e uma interna para a realização de testes e calibrações, implementou-se três circuitos conforme é apresentado na Figura 16.

3.5.1 Conectores

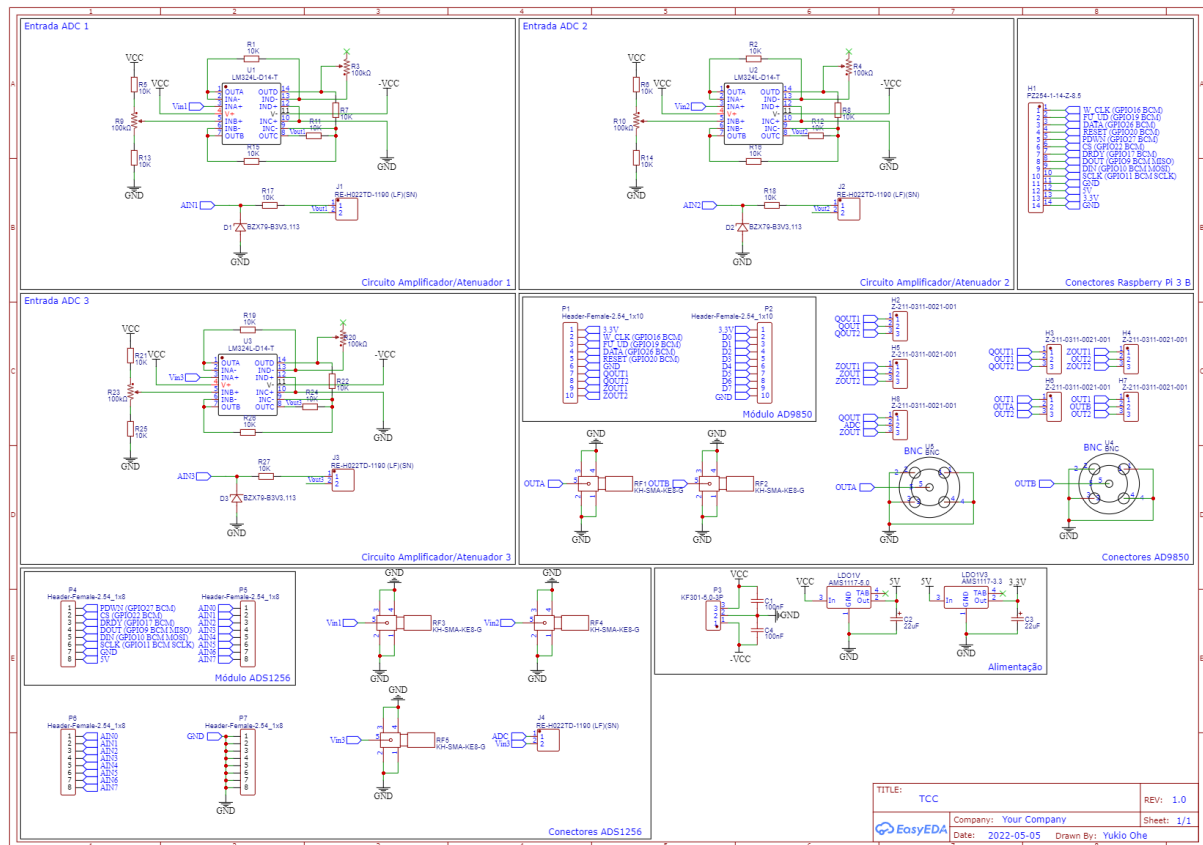
Para a confecção da placa, primeiramente, foi pensado em realizar as conexões dos pinos de transferência de dados dos módulos e da Raspberry, dessa forma é possível obter uma redução considerável de cabos e assim reduzir os ruídos que podem ser gerados utilizando *jumpers*.

Conectores do tipo barra *header* fêmea, utilizados de forma abrangente na eletrônica devido a sua facilidade de conexão e tamanho, foram implementados para o acoplamento dos módulos e para a ligação com os pinos da Raspberry.

Alguns conectores do tipo barra *header* macho, utilizados de forma abrangente na eletrônica, por conta da facilidade de conexão e tamanho, foram implementados como chaves para determinadas funcionalidades do circuito.

Conectores coaxiais do tipo SMA, apresentado na Figura 16, são muito utilizados em sistemas geradores de microondas, sistemas compostos por antena sendo destinados a aplicação

Figura 16 – Circuito completo.



Fonte: Autoria própria (2022).

de radio transmissores, telecomunicações e até mesmo em roteadores de *WiFi*, foram usados como saída dos sinais provenientes do gerador de funções e para a aquisição das medições.

O Conector coaxial BNC, apresentado na Figura 16, utilizado em sistemas de radio-frequência e em instrumentos de medição, foi utilizado também como saída dos sinais proveniente do gerador de funções.

Por fim, o conector do tipo bloco terminal, apresentado na Figura 16, utilizado para diversas finalidades na eletrônica, principalmente para a conexão da alimentação dos circuitos, devido a sua facilidade, fixação e versatilidade em espessura de fios e cabos, foram usados para a alimentação do circuito.

3.5.2 Alimentação

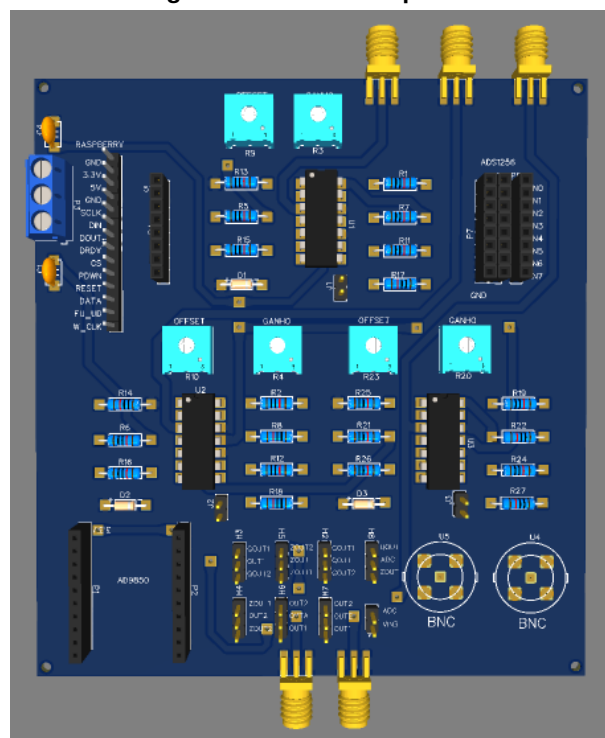
Para que os módulos e o circuito de condicionamento, amplificação e atenuação funcionem, foi desenvolvido um circuito de alimentação, apresentado na Figura 16, utilizando dois reguladores de tensão, o AMS1117-5.0 e o AMS1117-3.3, respectivamente para a regulação de tensão de 5 V, utilizado no ADS1256 e 3,3 V utilizado no AD9850. A alimentação do restante

do circuito conta com a alimentação direta e simétrica de +12 V e -12 V de uma fonte chaveada externa.

3.5.3 Circuito Impresso

Após a realização do circuito apresentado na Figura 16, foi desenvolvida a placa de circuito impresso, apresentada na Figura 17. Ela foi criada para ser funcional e ser capaz de acoplar os módulos utilizados, ter uma fácil conexão com a Raspberry, apresentar um fácil acesso para a alteração de ajustes de ganho, *offset*, dispor os conectores de forma organizada e de fácil acesso. Todo o desenvolvimento do circuito foi realizado utilizando a ferramenta gratuita para automação de projetos de PCB e eletrônicos para placas de circuito impresso, EasyEDA, da mesma forma como foi realizado no desenvolvimento do esquemático do circuito (EASYEDA, 2022).

Figura 17 – Circuito impresso.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.6 Interface para o usuário

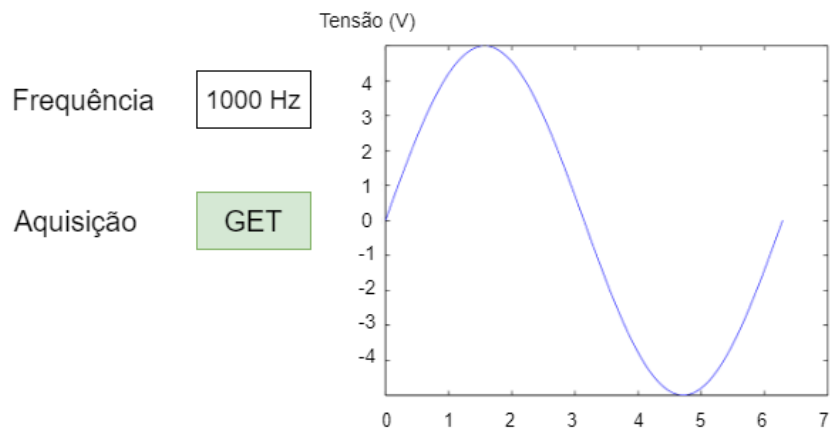
A tela para apresentação ao usuário é composta por uma interface computacional utilizando a biblioteca Matplotlib, a qual é uma biblioteca de programação de fácil compreensão para a criação de visualizações de dados de forma interativas em Python.

Por meio dela é possível gerar gráficos a partir de um conjunto de dados, além de gerar algumas interações como botões para a configuração de alguns parâmetros. A biblioteca foi escolhida devido a sua compatibilidade com a Raspberry, por ser *open source*, ser um sistema mais leve e uma alternativa ao MATLAB.

Conforme descrito na seção de processamento, a interface gráfica com o usuário segue a linha semelhante a de um computador ou notebook, por apresentar dispositivos como monitor, mouse e teclado. A diferença crucial entre estes dispositivos e o que está sendo descrito neste documento é a portabilidade, tamanho, peso e integração com os periféricos.

A utilização de mouse e teclado, gera uma grande interação do usuário com o funcionamento e visualização do usuário, sendo possível realizar a alteração da frequência de acionamento do gerador de funções e futuramente a implementação da modificação de outros parâmetros.

Figura 18 – Esboço da interface com o usuário.



Fonte: Autoria própria (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A abordagem desse capítulo será voltada a mostrar os resultados obtidos da implementação da placa de desenvolvimento Raspberry Pi 3 controlando o módulo AD9850 em conjunto com a placa de condicionamento do sinal e a apresentação da interface gráfica junto da aquisição de amostras do módulo ADS1256.

4.1 Resultados módulo AD9850

Quadro 2 – Valores de frequência obtidos.

Teórico	Frequência	RMS	Pico a Pico
10 Hz	9,970 Hz	658 mV	1,04 V
1 kHz	1 kHz	652 mV	1,04 V
10 kHz	10,02 kHz	648 mV	1,06 V
100 kHz	100,6 kHz	679 mV	1,06 V
1 MHz	1 MHz	691 mV	1,04 V
10 MHz	10 MHz	689 mV	600 mV
40 MHz	40,52 MHz	710 mV	192 mV

Fonte: Autoria própria (2022).

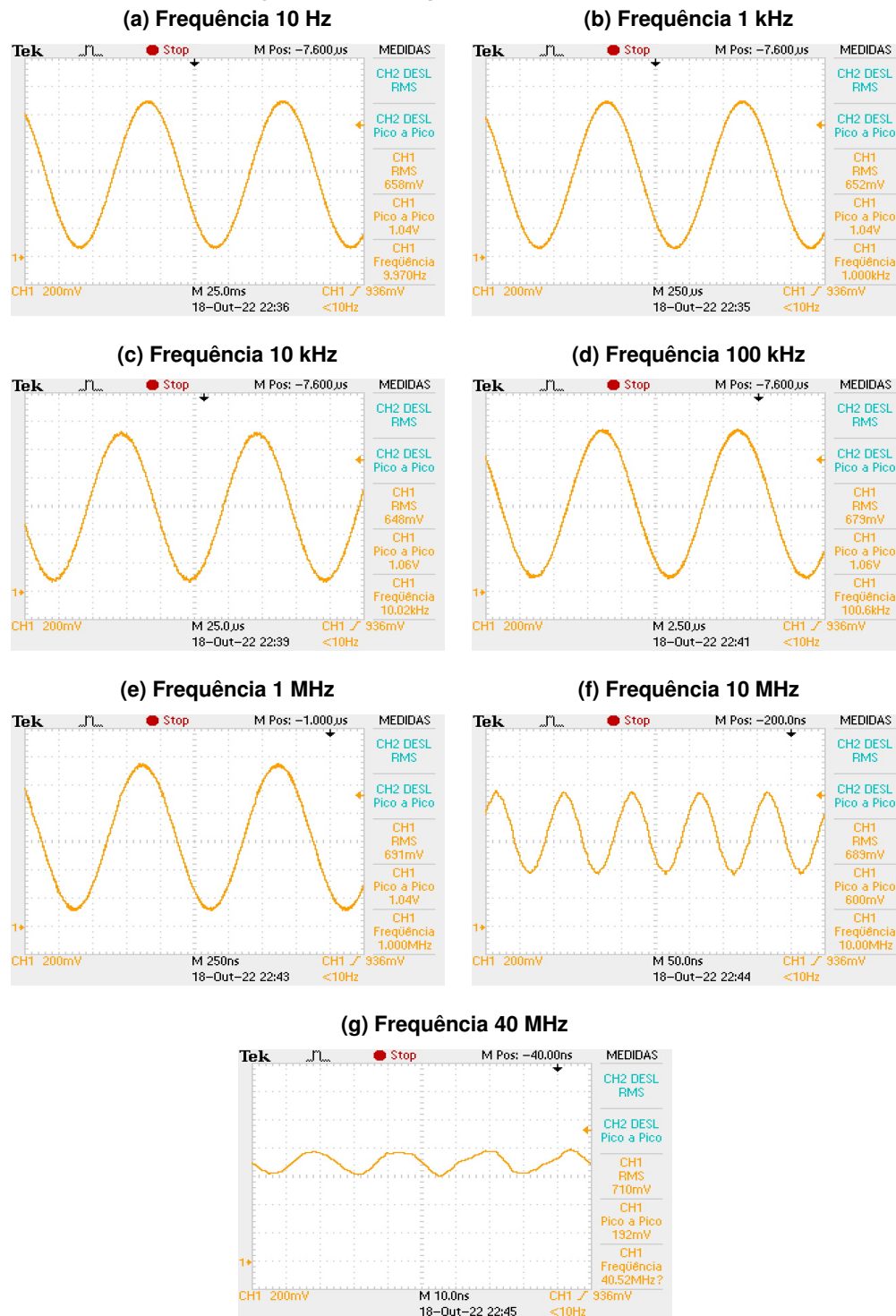
De forma a validar o módulo gerador de sinais AD9850, foram implementados testes utilizando a saída senoidal 1 do mesmo, configurando as frequências via *firmware* para os seguintes valores: 10 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz e 40 MHz. A intenção deste teste é de realizar um comparativo dos valores das frequências de acionamento com o valor teórico, obter os valores de tensão RMS e pico a pico providos do sinal gerado e analisar visualmente a distorção do sinal conforme o aumento da frequência até o seu limite máximo de 40 MHz.

A Figura 19 mostra os sinais proveniente do módulo, os quais foram adquiridos por meio de um osciloscópio, ligado diretamente a saída do gerador de sinais. O Quadro 2 denota os valores teóricos configurados via *firmware*, os valores das frequências, tensão RMS de e a tensão pico a pico de aquisição.

Percebe-se que quando comparado o valor da frequência teórica com a prática, os resultados não extrapolam o valor de erro relativo de 0,6%, expostos na primeira e segunda coluna no Quadro 2.

Nota-se uma atenuação no valor de pico a pico do sinal conforme a frequência chega próxima do limite descrito no Quadro 2. Além disso, uma outra característica que denota a limitação do módulo é a deformação do sinal demonstrado na Figura 19, onde há uma distorção apresentada inicialmente na Figura 19f e o seu aumento na Figura 19g. A atenuação do sinal é gerada pela limitação do dispositivo, não chegando nos parâmetros informados pelo *datasheet*.

Figura 19 – Sinais provenientes do AD9850

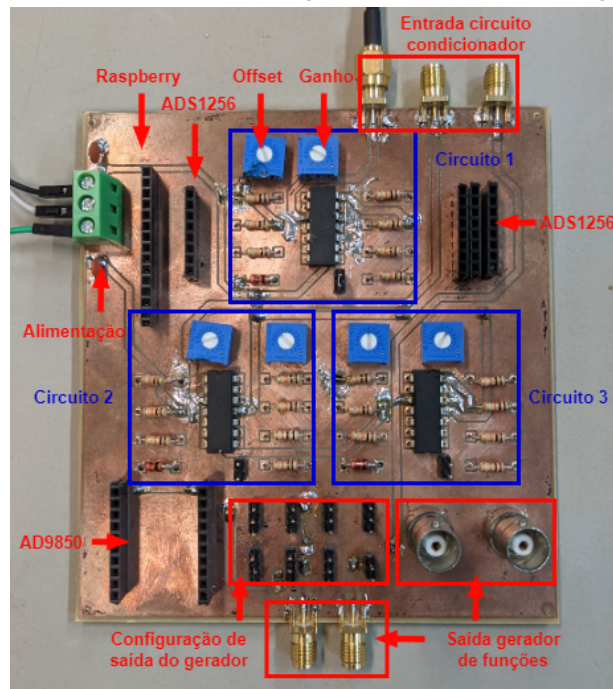


Fonte: Autoria própria (2022) .

4.2 Resultados da placa de condicionamento do sinal

De acordo com o que foi abordado na metodologia, a PCB desenvolvida apresentada na Figura 17 foi feita de forma manual, o qual é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Placa de circuito impresso confeccionada na prática.



Fonte: Autoria própria (2022).

Foram realizados testes da placa de acionamento inserindo o sinal proveniente do módulo AD9850, posto isso foi alterado os valores das resistências de ganho/atenuação e de *offset* para a verificação de seu funcionamento.

Foi considerado uma frequência padrão de 1000 Hz e a partir disso foi realizado, com auxílio do osciloscópio, a comparação do sinal proveniente do gerador de sinais e o sinal de saída da placa de condicionamento. A Figura 21 apresenta os sinais em cada um dos casos, sendo que o canal 1 (CH1) do instrumento representa o sinal original provindo do gerador de funções e o canal 2 (CH2) representa o sinal com o condicionamento.

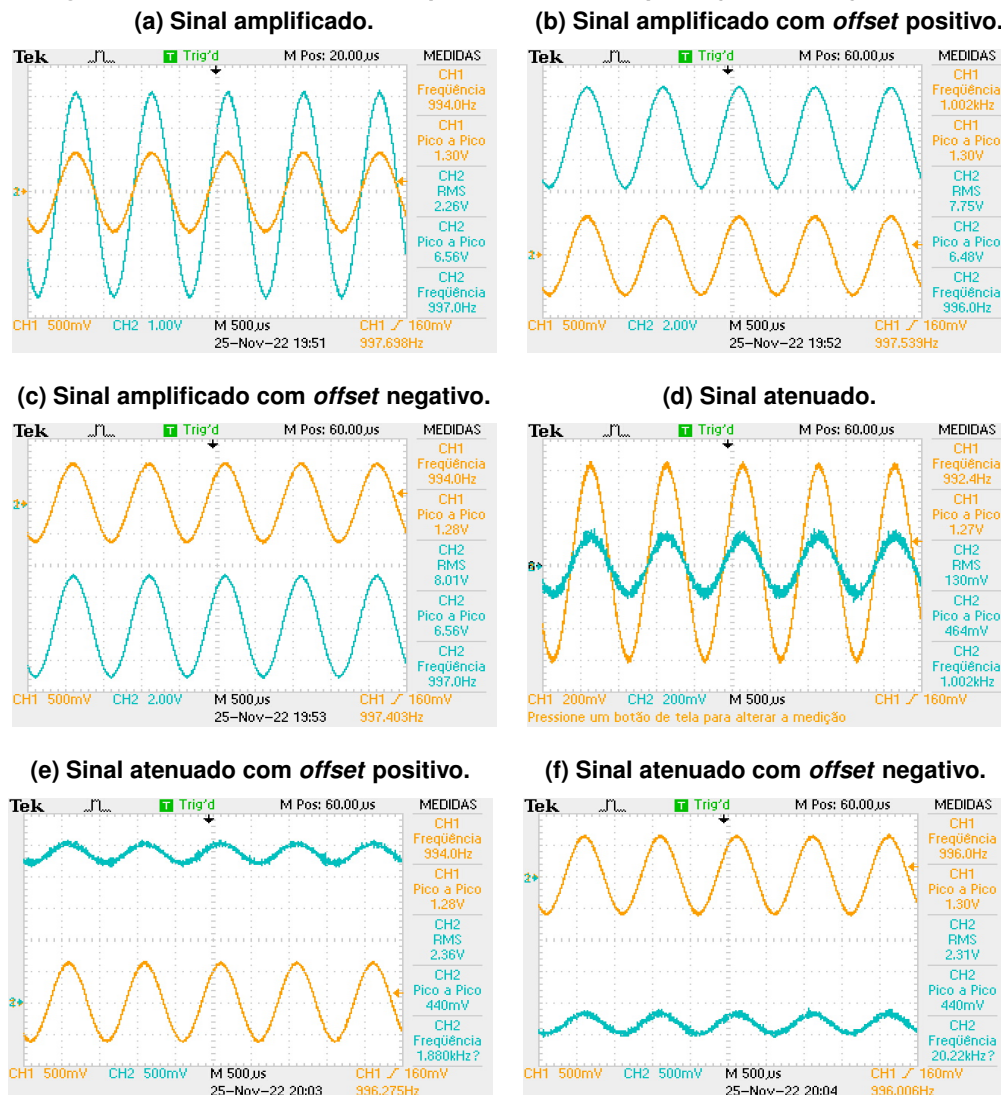
Quadro 3 – Valores de frequência obtidos.

Figura	Vpp CH1	Vpp CH2	Frequência CH1	Frequência CH2
Figura 21a	1,30 V	6,56 V	994 Hz	997 Hz
Figura 21b	1,30 V	6,48 V	1002 Hz	996 Hz
Figura 21c	1,28 V	6,56 V	994 Hz	997 Hz
Figura 21d	1,27 V	0,13 V	992,4 Hz	1002 Hz
Figura 21e	1,28 V	0,44 V	994 Hz	1880? Hz
Figura 21f	1,30 V	0,44 V	996 Hz	20,22? kHz

Fonte: Autoria própria (2022).

O Quadro 3 apresenta as tensões de pico a pico e frequência dos canais 1 e 2. Analisando os valores de tensões pico a pico entre os canais é possível notar o comportamento do ganho na Figura 21a, Figura 21b e Figura 21c, de aproximadamente 5,04 Av, 4,98 Av e 5.125 Av, respectivamente.

Figura 21 – Sinais condicionados pelo circuito de amplificação, atenuação e *offset*



Fonte: Autoria própria (2022) .

Os valores de atenuação ficam evidentes realizando a comparação dos valores das tensões entre os canais na Figura 21d, Figura 21e e Figura 21f, com valores de atenuação de aproximadamente 0,102 Av, 0,343 Av e 0,338 Av, respectivamente.

Já o *offset* é perceptível observando as imagens Figura 21b, Figura 21c, Figura 21e e Figura 21f, que apresentam o sinal do canal 1 deslocado tanto para a parte positiva quanto para a parte negativa considerando a referência GND disposta nas setas de indicação ao lado esquerdo das imagens.

Enquanto que os valores das frequências se mantiveram bem próximas entre os canais, exceto nas medições realizados com a atenuação do sinal. Analisando a frequência obtida no CH2 em comparação com o CH1, é possível observar que, os valores na Figura 21e e Figura 21f, apresentam valores muito divergentes, entretanto, é possível notar, que há junto de seu valor o símbolo de interrogação denotando que o dispositivo não conseguiu realizar uma medição

precisa, podendo ser devido a sua limitação. Isto fica evidente analisando as imagens, no qual é denotado a presença de um ruído no sinal.

Os limites para ganho e atenuação do sinal são correlacionados com o valor proveniente da relação das resistências conforme a Equação 2 apresentada anteriormente.

Os limites de *offset* se restringem ao valor da tensão provinda da relação entre as resistências do divisor de tensão da Equação 4.

4.3 Resultados módulo ADS1256 e interface com o usuário

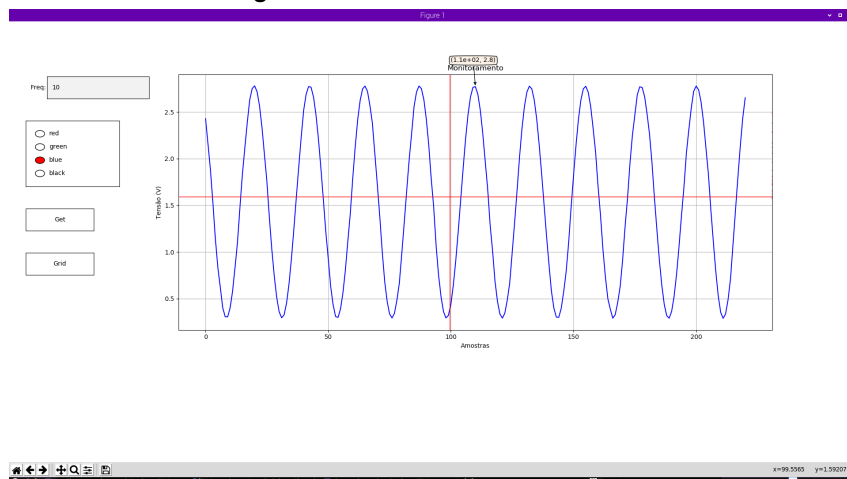
Para a aplicação dos testes foi definido o range de atuação da taxa de amostragem do ADS1256, que é apresentado pelo *datasheet* como sendo 30.000 amostras por segundo, representando uma frequência de 30.000 Hz de aquisição. Pelo teorema de *Nyquist*, a frequência de amostragem deve ser pelo menos 2 vezes a frequência do sinal, assim o valor máximo do sinal de leitura sem perdas em sua reconstrução é de $30k\text{ (sps)}/2 = 15\text{ kHz}$.

Considerando isso, os testes foram feitos dentro dessa variação para obter a um sinal sem perdas e dentro do acionamento do dispositivo de transferência de energia sem fio.

O conversor analógico para digital nada mais é do que um sensor com a finalidade de coletar os valores de tensão. Para que fosse possível verificar um sinal por meio do ADC foi desenvolvido uma interface gráfica para exibição dos dados obtidos. A Figura 22 apresenta a interface desenvolvida para a exibição dos valores e além disso ela conta com a possibilidade do usuário realizar a manipulação de certas configurações.

A interface conta com as funcionalidades de alterar o valor da frequência de acionamento do módulo AD9850, alterar a cor de exibição do sinal, um botão para realizar a aquisição do sinal e atualizar sua visualização, um botão para inserir grades, visando facilitar a análises dos valores, e por fim, foi implementado a opção de obter o valor da tensão por meio do clique do *mouse*, que é gravado e apresentado no bloco acima da seta de indicação.

Figura 22 – Interface com o usuário.

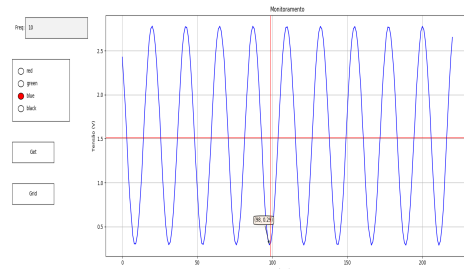
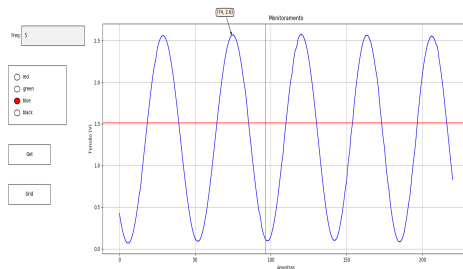


Fonte: Autoria própria (2022).

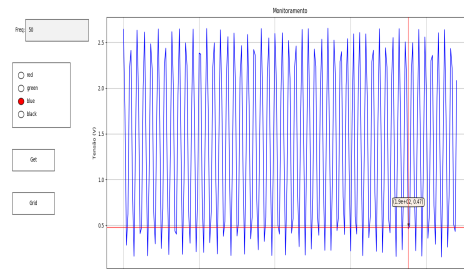
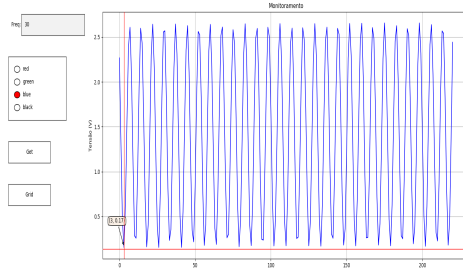
Para a validação do módulo ADS1256, foi realizada a comparação do valor obtido e apresentado pela interface gráfica com o valor obtido pelo osciloscópio. Abaixo são apresentados os valores de frequência de 5 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz e 1000 Hz, sendo respectivamente as Figura 23a, Figura 23b, Figura 23c, Figura 23d, Figura 23e e Figura 23f.

Figura 23 – Sinal obtido pelo conversor analógico para digital.

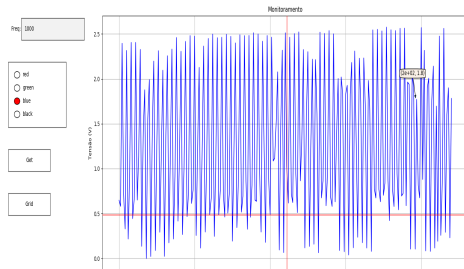
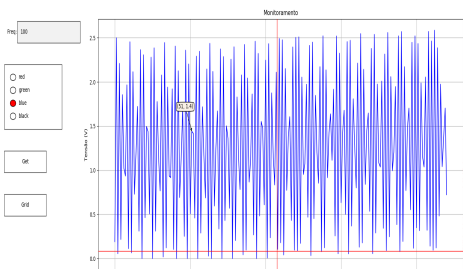
(a) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 5 Hz. **(b) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 10 Hz.**



(c) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 30 Hz. **(d) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 50 Hz.**



(e) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 100 Hz. **(f) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 1000 Hz.**



Fonte: Autoria própria (2022) .

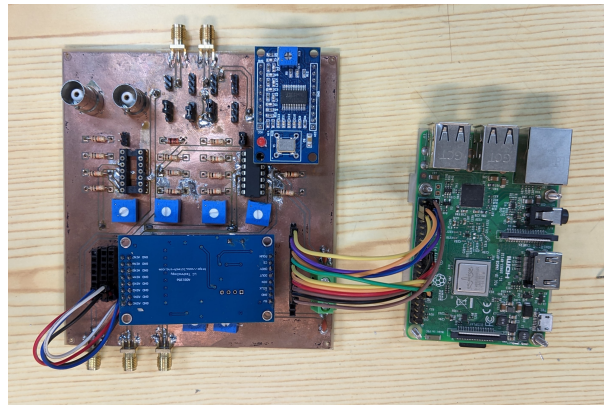
Ao realizar uma análise de forma visual, ficou evidente que conforme a frequência do sinal aumenta, o mesmo sofre distorção demonstrando a limitação na implementação do módulo de conversão analógica para digital, sendo que até o valor de 30 Hz o sinal ainda apresenta a característica de uma senoide com valores e formatos característicos da mesma, após isso é possível notar que em alguns períodos o sinal aparenta obter o sinal de pico com valor abaixo do esperado. Conforme citado, anteriormente, o valor apresentado pelo *datasheet* se mostrou

muito superior, em comparação ao obtido, levando em consideração o parâmetro de taxa de amostragem do sinal, que era de 15 kHz.

4.4 Resultados do sistema completo implementado

Neste procedimento foi realizada a integração dos módulos AD9850 e ADS1256, da Raspberry Pi e a placa de condicionamento do sinal, apresentado na Figura 24, além da configuração do *hardware* para obter a saída do sinal senoidal proveniente do gerador de sinais. A partir disso foram realizadas todas as configurações via *firmware* e então realizado a coleta dos resultados.

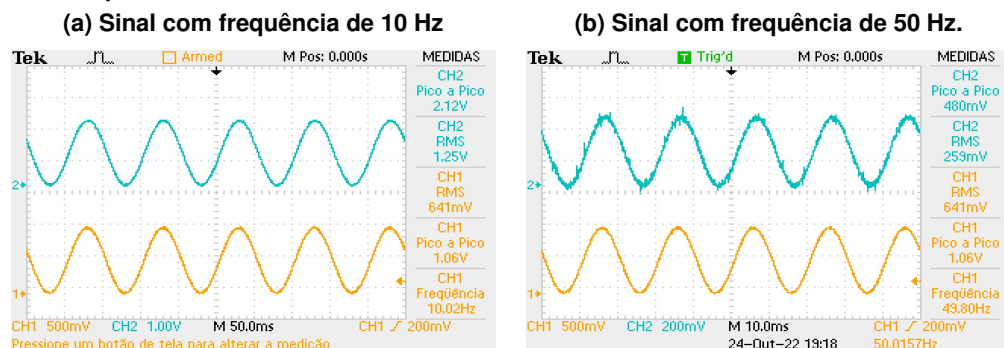
Figura 24 – Integração dos módulos e conexão com a Raspberry Pi.



Fonte: Autoria própria (2022).

Visto que, anteriormente, foi citado as limitações de aquisição de dados, foi definido para os testes, as frequências de 10 Hz e de 50 Hz. A Figura 25 exibe os resultados obtidos por meio da utilização do osciloscópio da saída oriundo do gerador de sinais (CH1) e do sinal após o circuito condicionador (CH2).

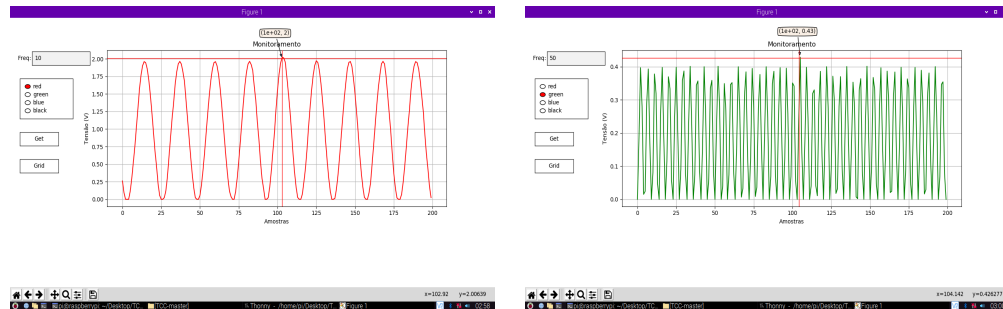
Figura 25 – Sinal de saída do gerador de sinais e da placa de condicionamento do sinal obtido pelo osciloscópio.



Fonte: Autoria própria (2022) .

A Figura 26 expõe os resultados obtidos pelo dispositivo do sinal após o circuito condicionador (CH2), por meio deste resultado é possível realizar uma análise comparativa do desempenho do equipamento projetado.

Figura 26 – Sinal de saída da placa de condicionamento do sinal obtido pelo dispositivo.
(a) Sinal com frequência de 10 Hz **(b) Sinal com frequência de 50 Hz.**



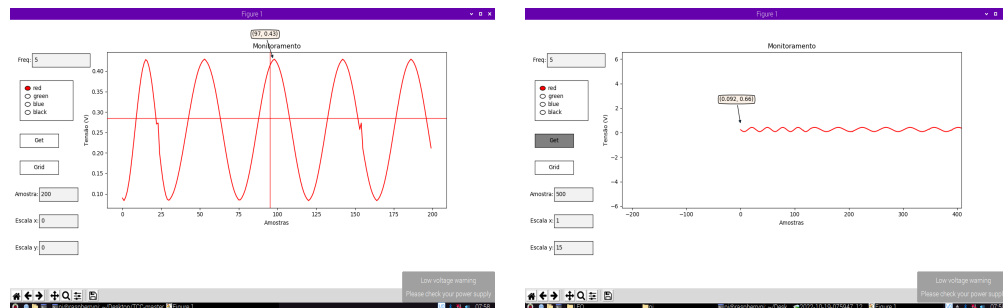
Fonte: Autoria própria (2022) .

De forma a analisar o sinal obtido de modo mais técnico, foi implementado duas funcionalidades, denotadas na Figura 27, sendo elas a de reajustar a quantidade de amostras provenientes da coleta do sinal e o ajuste na escala de exibição da interface, permitindo assim o controle do eixo x e y. A Figura 27a mostra a aquisição do sinal de forma padrão da implementação, enquanto que a Figura 27b mostra o ajuste na escala e na quantidade de amostras obtidas.

Figura 27 – Implementação das funcionalidades de alteração da quantidade de amostras e na escala de exibição.

(a) Exibição padrão da aquisição.

(b) Exibição configurada da exibição.



Fonte: Autoria própria (2022) .

Tais funcionalidades foram incluídas por necessidade de uma análise visual configurável do sinal, além de permitir que um aprimoramento futuro, de aquisição de um segundo sinal, seja implementado. Este aprimoramento permitiria a exibição de dois sinais, por exemplo o sinal de entrada do sistema e o sinal após o seu condicionamento, apresentarem valores de amplitudes diferentes. Dessa maneira a comparação de ambos ficariam muito mais evidentes e assertivos.

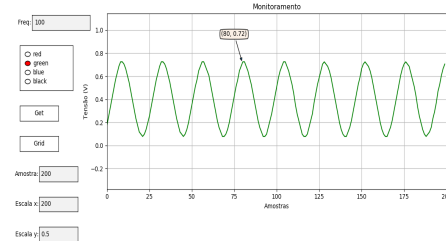
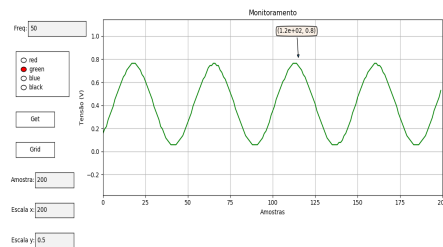
De modo a melhorar os resultados, foi realizada a correção do ponto zero, problema denotado na Figura 27b, o qual apresenta o seu ponto zero deslocado para a direita no momento em que é realizada uma nova coleta de amostras. A Figura 28a, mostra uma coleta realizada utilizando o botão de uma nova aquisição, demonstrando a correção realizada, fixando na origem do gráfico o sinal.

Uma nova alteração implementada, foi o aumento do *clock* da comunicação SPI. A mesma foi elevada para um *clock* de 90 MHz, o qual surtiu efeito positivo como é mostrado na Figura 28. A frequência de aquisição, que antes era de no máximo 10 Hz, para obter uma senoide analisável, agora apresenta uma frequência aceitável de 100 Hz.

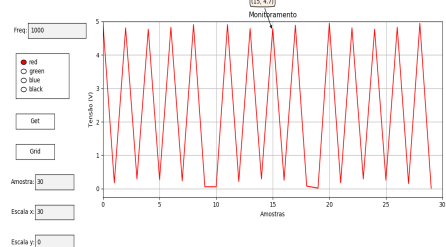
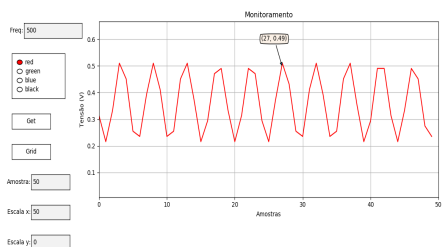
Entretanto mesmo apresentando estas melhorias, a taxa de amostragem desejada ainda está muito distante da obtida, visto que na Figura 28c e na Figura 28d, o sinal se mostra com uma grave distorção. De todo modo, isso denota que há possibilidade de melhorias futuras, mostrando que o dispositivo pode a ser uma ferramenta de análise muito eficiente.

Figura 28 – Implementação da correção do ponto zero na aquisição de amostras e o aumento da taxa de comunicação do SPI.

(a) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 50 Hz. (b) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 100 Hz.



(c) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 500 Hz. (d) Sinal obtido pelo ADS1256 na frequência de 1000 Hz.



Fonte: Autoria própria (2022) .

Fica evidente que o dispositivo não representou de forma fidedigna o sinal quando comparado ao exibido no osciloscópio, entretanto esta aplicação se mostra muito promissora, tendo em vista os valores gastos para a confecção do dispositivo, na possibilidade de melhorias e diferentes abordagens que é possível de serem implementadas futuramente, dando abertura a novas pesquisas nesta área.

4.5 Discussões e análises

Para uma avaliação geral do projeto ficou claro que o funcionamento do gerador de funções e da placa de condicionamento seguiu conforme o que foi proposto, essa análise é

considerada observando os valores de frequências obtidos pelo osciloscópio e realizando a comparação do sinal original e do sinal condicionado.

Entretanto, o resultado obtido pelo módulo ADS1256 não se mostrou aceitável, considerando que a partir do valor de 50 Hz o sinal se mostrou bastante distorcido, como mostram as imagens Figura 23d, Figura 23e e Figura 23f.

Uma das possibilidades levantadas para esse problema foi que a Raspberry Pi 3 não estivesse realizando o processo de forma prioritária, colocando outros processos como prioridade maior. Para isso foi realizado a implementação do comando *nice*, o qual possibilita a alteração da prioridade do sistema. Entretanto, o mesmo se mostrou ineficiente em solucionar tal problema.

Uma solução foi a alteração da frequência de amostragem do módulo, entretanto o dispositivo estava configurado com a frequência mais alta, dessa forma foi realizado o teste com uma de menor valor, mas o problema ainda se manteve.

Uma tentativa de contorno do problema no qual será implementado é a alteração do sinal de *clock* da comunicação SPI, a qual está definida para 20 kHz, está não foi implementada ainda por falta de tempo de testes e experimentos.

Por fim, foi levantada a possibilidade de trocar o módulo por um com uma maior taxa de amostragem. Contudo, não foi implementada devido a falta de tempo para aquisição e testes.

5 CONCLUSÃO

A abordagem deste trabalho tem a motivação em realizar pesquisas em cima da tecnologia de transferência de energia sem fio a fim de melhorar e monitorar os dispositivos já desenvolvidos para a área médica, além de agregar conhecimentos para pesquisas futuras em cima de tal equipamento.

Este tipo de aplicação com toda certeza muda e mudará o rumo da tecnologia voltada para as áreas médicas.

A necessidade de procedimentos não invasivos para o paciente tem sido cada vez mais bem abordada por conta da diminuição efeitos colaterais, riscos de mortes, sequelas e por conseguir resolver problemas que são limitadas pelas tecnologias aplicadas na medicina atual.

Neste trabalho foi discutido uma forma de monitorar a transferência de energia realizada pelo circuito primário acoplado ao secundário, tendo como ênfase a análise externa do sistema. Foi desenvolvido um circuito de condicionamento para efetuar o casamento da impedância do circuito analisado com a etapa de aquisição do sinal de forma a evitar o consumo de corrente do circuito primário analisado.

Além disso o projeto dispõe de uma interface gráfica manipulável para que o usuário visualize de forma simples o sinal e consiga alterar parâmetros como frequência e atualização da medição.

Entretanto, foram encontradas limitações com relação ao acionamento do conversor analógico para digital, no qual o mesmo não apresentou a resposta esperada e desejada.

A interface gráfica poderia ser desenvolvida em um outro *framework* com maiores capacidades de design gráfico da interface e de rapidez. Entretanto, a interface apresentada supre todos os quesitos propostos pelo trabalho, sendo um pontapé inicial no desenvolvimento desse tipo de aplicação.

Uma vantagem do dispositivo é seu custo benefício em comparação a diversos equipamentos médicos, lógico que tal opinião foi dada sem a consideração de diversas normas, validações e certificados que dispositivos médicos apresentam. É possível considerar este projeto sendo um mínimo produto viável com a intenção de futuramente ser refinado e melhorado em todos os quesitos.

Considerando todos os fatos apresentados, de forma geral o trabalho atendeu o objetivo de desenvolver um equipamento para a monitoração de um sistema de transferência sem fio, analisando a eficiência da transmissão de forma externa e entregando ao usuário as informações do sinal.

REFERÊNCIAS

- ABOUALALAA, M.; MANSOUR, I.; POKHAREL, R. K. Experimental study of effectiveness of metasurface for efficiency and misalignment enhancement of near-field wpt system. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 21, n. 10, p. 2010–2014, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815525>. Acesso em: 26 de outubro de 2022.
- AFRIDI, K. **Wireless Charging of Electric Vehicles**. 2018. 1 p.
- AMAZON. **ADS1256 32 Bit 8 Channel Analog-to-Digital ADC Converter, High Precision ADC Converter Support 8 Single-ended/4 differential Inputs Development Board**. 2022. Disponível em: <https://www.amazon.com/Converter-Precision-Single-ended-differential-Development/dp/B09CM7CNF1>. Acesso em: 27 de setembro de 2020.
- ANS, A. N. de S. S. **Dispositivos Médicos Implantáveis (DMI)**. 2019. Disponível em: <http://www.ans.gov.br/temas-de-interesse/dispositivos-medicos-implantaveis-dmi>. Acesso em: 5 de novembro de 2019.
- BOYLESTAD, R.; NASHIELSKY, L. **DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS: E teoria dos circuitos**. 11. ed. [S.l.]: Pearson, 2013. 766 p.
- CARLSON, W. B. Harnessing the earth: Nikola tesla and the idea of broadcasting electric power, 1890–1905. **2007 IEEE Conference on the History of Electric Power**, p. 47, 2007. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez48.periodicos.capes.gov.br/document/4510256/authors#authors>. Acesso em: 11 de setembro de 2019.
- CHANG, C.-W. *et al.* Wireless powering electronics and spiral coils for implant microsystem toward nanomedicine diagnosis and therapy in free-behavior animal. **Nanoelectronics Conference (INEC), IEEE International**, p. 2, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez48.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5991732>. Acesso em: 14 de setembro de 2019.
- CHIPTRONIC. **Osciloscópio automotivo: para quê serve e como usar?** 2021. Disponível em: <https://chiptronic.com.br/blog/osciloscopio-automotivo-para-que-serve-e-como-usar>. Acesso em: 12 de outubro de 2022.
- CIPELLI, A. M. V. **Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos**. Erica, 2008. ISBN 9788571947597. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000009417&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 14 de setembro de 2022.
- COLORTEL. **A importância da manutenção dos equipamentos eletrônicos para a prevenção de acidentes**. 2019. Disponível em: <https://colortel.com.br/a-importancia-da-manutencao-dos-equipamentos-eletronicos-para-a-prevencao-de-acidentes/#:~:text=Realizar%20manuten%C3%A7%C3%B5es%20peri%C3%B3dicas%20e%20planejadas,riscos%20de%20acidentes%20de%20trabalho>. Acesso em: 12 de outubro de 2022.
- CORREA, D. C. **Transmissão de energia sem fio utilizando acoplamento magnético ressonante forte e metamateriais**. 2018. 21 p. Dissertação (Mestrado) — associação ampla entre o CEFET-MG e UFSJ, Belo Horizonte - MG, 2018.

CRUZ, E. C. A. **Eletrônica aplicada**. Erica, 2008. ISBN 9788536505367. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000005400&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 27 de novembro de 2022.

DALTIO, M. L. **Sistema de Transmissão de Energia Sem Fio com Ajuste Automático de Frequência de Ressonância para Maximização da Potência Transferida**. 2019. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, 2019.

DAVID, L. **Nasa acelera busca por água na Lua**. 2020. Disponível em: <https://sciam.com.br/nasa-acelera-busca-por-agua-na-lua/>. Acesso em: 05 de outubro de 2020.

DEVICES, A. **CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer**. 2004. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2022.

DHAKER, P. **Introduction to SPI Interface**. 2018. Disponível em: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>. Acesso em: 27 de novembro de 2022.

EASYEDA. **PCB design simulação de circuitos online**. 2022. Disponível em: <https://easyeda.com/>. Acesso em: 27 de novembro de 2022.

ELETRONICA, B. da. **Módulo Gerador De Funções AD9850 DDS 0-30MHz**. 2022. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/modulo-gerador-de-funcoes-ad9850-dds-0-30mhz.html?gclid=CjwKCAjwzNOaBhAcEiwAD7Tb6NW7MEMDdvByRQ2Yb9htGxS5ur3287T3VwVjPJEUe0AJxsVQsF8sNB0BwE>. Acesso em: 27 de setembro de 20.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 10. ed. São Paulo: LTC, 2016. v. 3. 289 p.

IDEALI, W. **Conectividade em Automação e IoT: protocolos i2c, spi, usb, tcp-ip entre outros. funcionalidade e interligação para automação e iot**. Alta Books, 2021. ISBN 9788550813455. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000024333&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 14 de setembro de 2022.

INSTRUMENTS, N. **Raspberry Pi 3 Model B**. 2019. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. Acesso em: 27 de setembro de 2019.

INSTRUMENTS, N. **Understanding the SPI Bus with NI LabVIEW**. 2020. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/09/understanding-the-spi-bus-with-ni-labview.html>. Acesso em: 26 de junho de 2022.

INSTRUMENTS, T. **24-Bit, 30kSPS, 8-Ch Delta-Sigma ADC With PGA for Factory Automation and Process Control**. 2013. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1256.pdf?ts=1665655156698&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS1256. Acesso em: 13 de outubro de 2022.

JAWAD, A. M. *et al.* Opportunities and challenges for near-field wireless power transfer: A review. **Energies**, v. 10, n. 7, p. 28, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/1022>. Acesso em: 05 de outubro de 2022.

KIM, H. *et al.* Application of wireless power transfer technology to implantable medical devices. **IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)**, p. 299–301, 2022.

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9790118?arnumber=9790118>. Acesso em: 13 de setembro de 2022.

LEE, Y. H. *et al.* Recent advances in organic sensors for health self-monitoring systems. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 32, p. 4316–4341, 2018. Disponível em: <https://pubs-rsc-org.ez48.periodicos.capes.gov.br/en/content/articlelanding/2018/TC/C8TC02230E#IdivAbstract>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

MONTEIRO, M. A. **Introdução à Organização de Computadores**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 699 p.

MOROZ, M. R. *et al.* Requisitos para adoção de sistemas operacionais embarcados. **Revista Visión Electrónica**, v. 32, n. 2, p. 90–97, 2012. Disponível em: <http://web-b-ebshost.ez48.periodicos.capes.gov.br/ehost/detail/detail?vid=0&sid=a15105d0-2bb3-4c66-b60f-e3f5a06eebe8\%40sessionmgr103&bdata=Jmxhbm9cHQYnImc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#db=iih&AN=83539473>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

MOSCHEN, V. **Carregador sem fio pode estragar bateria do celular?** 2021. Disponível em: <https://canaltech.com.br/smartphone/carregador-sem-fio-pode-estragar-bateria-do-celular-194547/>. Acesso em: 15 de outubro de 2022.

OKA, M. M. **História da Eletricidade**. 2000. Disponível em: <http://www.lsi.usp.br/~dmi/manuais/HistoriaDaEletricidade.pdf>. Acesso em: 25 de outubro de 2019.

OLIVEIRA, D. A. A. M. F. e Dra. Vandenise Krepker de. **Marca-passo cardíaco: o que devemos saber sobre ele?** 2014. Disponível em: <https://www.abc.med.br/p/exames-e-procedimentos/569132/marca+passo+cardiaco+o+que+devemos+saber+sobre+ele.htm>. Acesso em: 13 de setembro de 2022.

PERTENCE JUNIOR, A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. Bookman, 2015. ISBN 9788582602751. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmb&AN=edsmb.000005888&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 14 de setembro de 2022.

SILVA, L. M. C. da. **CONVERSORES D/A e A/D**. 2016. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/chiesse/disciplinas/electronica-digital-engenharia-da-computacao/electronica-digital-e-arquitetura-de-microprocessamento/Conversor_A-D_D-A.pdf/view. Acesso em: 14 setembro 2022.

SOLJACIC, M. *et al.* Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, 1890–1905. **Science**, v. 317, p. 83–85, 2007. Disponível em: <https://science-sciencemag-org.ez48.periodicos.capes.gov.br/content/317/5834/83/tab-pdf>. Acesso em: 14 de setembro de 2019.

TOMASCO, G. **Como funciona: Carregador sem fio**. 2020. Disponível em: <https://energiainteligenteufff.com.br/como-funciona/como-funciona-carregador-sem-fio/>. Acesso em: 05 de outubro de 2020.

USP, E. P. da. **Laboratório de Eletrônica Analógica para Mecatrônica**. 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4881177/mod_resource/content/1/apostila-laborat%C3%B3rio-PMR3308-2019.pdf. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

WEI, X.; WANG, Z.; DAI, H. A critical review of wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. **Energies**, v. 7, n. 7, p. 4316–4341, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/7/7/4316>. Acesso em: 10 de setembro de 2019.

XU, Q. *et al.* A novel mat-based system for position-varying wireless power transfer to biomedical implants. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, n. 8, p. 4774–4779, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez48.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6466385>. Acesso em: 14 de setembro de 2019.

ZHONG, W. X.; LIU, X.; HUI, S. Y. R. A novel single-layer winding array and receiver coil structure for contactless battery charging systems with free-positioning and localized charging features. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 9, p. 4136–4144, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5661822>. Acesso em: 05 de outubro de 2022.