



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FERREIRA PEREIRA

**FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR DE ARCO
ELÉTRICO SONORO DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO
MULTIVIBRADOR ASTÁVEL E MODULAÇÃO ASK**

TUCURUÍ

2025

LUCAS FERREIRA PEREIRA

**FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR DE ARCO
ELÉTRICO SONORO DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO
MULTIVIBRADOR ASTÁVEL E MODULAÇÃO ASK**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz.

TUCURUÍ

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

P436f Pereira, Lucas Ferreira.
Fabricação de um Protótipo de Gerador de Arco Elétrico
Sonoro de Alta Tensão Utilizando Multivibrador Astável e
Modulação ASK / Lucas Ferreira Pereira. — 2025.
48 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, , 3, Tucuruí, 2025.

1. Alta tensão. 2. Modulação ASK. 3. Multivibrador
astável. 4. Flyback. 5. Transdução plasma-acústica. I. Título.

CDD 621.3

Lucas Ferreira Pereira

**FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR DE ARCO
ELÉTRICO SONORO DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO
MULTIVIBRADOR ASTÁVEL E MODULAÇÃO ASK**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 02/09/2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÍTULO: FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR DE ARCO ELÉTRICO SONORO DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO MULTIVIBRADOR ASTÁVEL E MODULAÇÃO ASK

DISCENTE: Lucas Ferreira Pereira

MATRÍCULA: 201733940032

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	<i>Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz – FEE/UFPA</i>	<i>Orientador</i>
2	<i>Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen – FEE/UFPA</i>	<i>Membro interno</i>
3	<i>Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma – FEE/UFPA</i>	<i>Membro interno</i>

Data da Defesa: 02/09/2025	Hora Início: 15:00	Hora Término: 15:25
Local:	Auditório do CAMTUC/UFPA	

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,75	9,00	9,0
Linguagem (gramática e semântica)	9,00	8,50	8,5
Conteúdo técnico	9,00	9,00	8,0

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	8,85	9,00	9,5
Administração do tempo	9,00	9,50	10,0
Expressão oral	8,00	9,00	9,0
Domínio do tema	9,50	9,50	9,0

Média por examinador	9,01	9,07	9,00
Média Final	9,03		
Conceito Final	EXCELENTE		

Tucuruí-Pa, 02 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ
Data: 18/09/2025 16:20:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br EWERTON RAMOS GRANHEN
Data: 22/09/2025 23:56:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro interno

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL SUZUKI BAYMA
Data: 23/09/2025 07:40:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro interno

Dedico este trabalho ao meu pai, que me proporcionou a oportunidade de trilhar o caminho dos estudos; à minha mãe, que sempre foi o alicerce de nossa família e o meu maior apoio; e, sobretudo, a Deus, pela presença constante em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a meus pais, Levi e Raimunda, pelo apoio incondicional e pela base sólida que sempre me proporcionaram. Estendo também minha gratidão a toda a minha família — avós, tios e primos — pelo incentivo constante, em especial ao meu avô e grande exemplo, Raimundo Estevão, e ao meu primo e melhor amigo, Ramon Aquino, que ao longo desta jornada nos deixaram, mas que sempre acreditaram em mim e permanecem vivos em minhas lembranças e conquistas. Registro ainda minha sincera gratidão ao meu orientador, professor André Cruz, pela orientação competente, pela partilha de conhecimentos e pelo exemplo de dedicação à docência e à engenharia; à Fabiana, pela parceria e pelo incentivo constantes durante parte desta trajetória; e aos colegas de curso, pela colaboração acadêmica e pelos momentos compartilhados, que tornaram este percurso mais significativo. Por fim, acima de tudo, agradeço a Deus, cuja presença me fortaleceu nos momentos de dificuldade e me sustentou em toda esta caminhada.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, construção e caracterização de um protótipo de gerador de alta tensão com modulação em amplitude por chaveamento digital (Amplitude Shift Keying — ASK). O sistema integra três blocos principais: um oscilador multivibrador astável para geração da portadora de 15 kHz, um transformador Flyback para a elevação da tensão, e um microcontrolador Arduino responsável pela geração do sinal de modulação digital. O circuito permite a reprodução de frequências sonoras específicas através do arco voltaico, caracterizando a técnica de transdução plasma-acústica. Foram realizadas medições experimentais utilizando um osciloscópio digital para análise temporal e espectral dos sinais gerados, bem como experimentos de ruptura dielétrica para estimativa da tensão de saída do transformador Flyback, obtendo-se aproximadamente 22,4 kV. O protótipo demonstrou funcionamento adequado, segurança operacional e fidelidade na modulação da portadora. Os resultados obtidos evidenciam a aplicação integrada de conhecimentos em eletrônica, programação e técnicas de alta tensão, demonstrando as competências desenvolvidas ao longo da formação em engenharia elétrica e consolidadas neste trabalho de conclusão de curso, podendo ser expandido em trabalhos futuros com técnicas de modulação mais avançadas e amplificação de sinais de alta tensão controlada.

Palavras-chave: Alta tensão, Modulação ASK, Flyback, Transdução plasma-acústica.

ABSTRACT

This work presents the development, construction, and characterization of a high-voltage generator prototype using Amplitude Shift Keying (ASK) modulation. The system comprises three main blocks: an astable multivibrator oscillator for generating the 15 kHz carrier, a Flyback transformer for voltage step-up, and an Arduino microcontroller responsible for generating the digital modulation signal. The circuit enables the reproduction of specific sound frequencies through the electric arc, implementing the plasma-acoustic transduction technique. Experimental measurements were carried out using a digital oscilloscope for temporal and spectral analysis of the generated signals, as well as dielectric breakdown experiments to estimate the output voltage of the Flyback transformer, reaching approximately 22.4 kV. The prototype demonstrated proper operation, operational safety, and fidelity in carrier modulation. The results highlight the integrated application of knowledge in electronics, programming, and high-voltage techniques, demonstrating the skills developed throughout the electrical engineering program and consolidated in this capstone project, which may be expanded in future works with more advanced modulation techniques and controlled high-voltage signal amplification.

Keywords: High voltage, ASK modulation, Flyback, Plasma-acoustic transduction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquemático do circuito multivibrador astável	17
Figura 2 – Diagrama genérico de um transformador	19
Figura 3 – Transformador flyback	20
Figura 4 – Funcionamento do transformador flyback	21
Figura 5 – (a) Sequência binária do sinal de mensagem; (b) Sinal modulado ASK.	24
Figura 6 – Diagrama de blocos do funcionamento do gerador de alta tensão com modulação ASK.	26
Figura 7 – Esquemático do circuito eletrônico do protótipo.	27
Figura 8 – Layout da placa de circuito impresso desenvolvido no EASYEDA.	28
Figura 9 – Placa fresada e finalizada, pronta para montagem dos componentes.	29
Figura 10 – Protótipo final do gerador de alta tensão com modulação AM por chaveamento digital, mostrando a PCI, o transformador Flyback, o microcontrolador Arduino e a estrutura de proteção.	30
Figura 11 – Sinal de saída do multivibrador astável.	31
Figura 12 – Sinal de modulação gerado pelo Arduino no domínio do tempo.	32
Figura 13 – Espectro de magnitude do sinal de modulação digital gerado pelo Arduino (0–25 kHz).	33
Figura 14 – Espectro de magnitude do sinal de modulação digital gerado pelo Arduino (0–10 kHz).	33
Figura 15 – Distância entre eletrodos fixados em base de madeira, medida com paquímetro digital.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros técnicos típicos do transformador flyback.	22
Quadro 2 – Parâmetros utilizados na usinagem da PCI	28
Quadro 3 – Elementos que compõem o protótipo e suas respectivas funções	30

SUMÁRIO

	1 INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura da Monografia	15
	2 FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS OSCILADORES E MODULAÇÃO	16
2.1	Multivibradores Astáveis	16
2.1.1	Funcionamento básico	16
2.1.2	Cálculo da Frequência de Oscilação	17
2.2	Transformadores e <i>Flyback</i>	18
2.2.1	Conceitos gerais sobre transformadores	18
2.2.2	Transformadores <i>Flyback</i>	19
2.3	Modulação em Amplitude por Chaveamento (ASK)	22
2.3.1	Sinais Envolvidos na Modulação AM Digital	23
2.3.2	Características e Aplicações	23
2.3.3	Representação no Domínio do Tempo e da Frequência	24
	3 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO	25
3.1	Funcionamento do protótipo gerador de arco elétrico sonoro	25
3.2	Construção do protótipo gerador de arco elétrico sonoro	27
	4 RESULTADOS	31
4.1	Sinal do Multivibrador Astável	31
4.2	Sinal da Modulação ASK	32
4.3	Estimativa da tensão máxima de saída do flyback	33
	5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	Referências	36
	APÊNDICES	38
	APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON PARA PLOTAGEM DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39

APÊNDICE B – VÍDEO DEMONSTRATIVO DO PROTÓ- TIPO	41
ANEXOS	42
ANEXO A – CÓDIGO-FONTE ARDUINO PARA GERAÇÃO DE NOTAS MUSICAIS	43

1 INTRODUÇÃO

Durante a formação em Engenharia Elétrica, a construção de protótipos é uma prática amplamente utilizada para aplicar os conhecimentos teóricos e desenvolver competências essenciais para a atuação profissional. Segundo (CODÁ; COLABORADORES, 2013), a implementação de protótipos de projetos reais nas aulas de laboratório estimula o interesse dos alunos pela eletrônica digital, permitindo que eles projetem e implementem circuitos semelhantes aos encontrados na prática profissional. Essa abordagem construtivista e construcionista, baseada na interação prática, facilita a compreensão de conceitos abstratos e prepara os alunos para desafios reais da engenharia. Além disso, experiências como a apresentação de protótipos inovadores por estudantes de Engenharia Elétrica, como observado no (PAULO, 2023), evidenciam a eficácia dessa metodologia em despertar o interesse pela profissão e incentivar a criatividade e inovação entre os futuros engenheiros.

Um exemplo clássico da aplicação de conceitos de eletricidade e magnetismo em dispositivos de alta tensão é a Bobina de Tesla, um transformador ressonante inventado por Nikola Tesla no final do século XIX. Esse dispositivo é capaz de gerar tensões extremamente elevadas, produzindo descargas elétricas visíveis e audíveis. A Bobina de Tesla demonstra, de forma prática, a conversão de energia elétrica em alta tensão e a produção de sons a partir de descargas elétricas, servindo como referência conceitual para sistemas que integram eletrônica e efeitos de alta tensão.

No contexto da área de Eletrônica, a construção de circuitos práticos, como placas de circuito impresso (PCIs), possibilita que os projetos simulados em ambiente virtual sejam efetivamente materializados. Essa prática vai além da validação teórica, promovendo a aquisição de competências técnicas e práticas fundamentais para a formação profissional. Por envolver todas as etapas de desenvolvimento físico de um circuito, também contribui para o desenvolvimento de habilidades como montagem, soldagem, depuração e análise de circuitos eletrônicos.

Segundo (VILAR; COLABORADORES, 2018), a utilização da plataforma Arduino nas disciplinas de Introdução à Engenharia Elétrica e Algoritmos e Lógica de Programação do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) possibilita que os alunos desenvolvam habilidades práticas desde os primeiros semestres do curso, promovendo uma aprendizagem ativa e engajamento dos estudantes. A plataforma oferece um ambiente acessível e flexível para o desenvolvimento de projetos, permitindo que os estudantes integrem software e

hardware, testem algoritmos em aplicações reais e adquiram noções de prototipagem rápida e programação de microcontroladores.

Com base nesse contexto, este trabalho propõe a construção de um protótipo de gerador de alta tensão utilizando um transformador flyback acionado por um circuito eletrônico oscilador. O circuito gerador de pulsos de alta frequência no enrolamento primário do transformador induz uma alta tensão no secundário, capaz de ultrapassar o valor de ruptura dielétrica do ar e gerar descargas elétricas visíveis. O protótipo incorpora um microcontrolador Arduino, que gera sinais digitais com frequência variável correspondentes a notas musicais. Esses sinais modulam a presença da portadora de alta frequência, gerada por um multivibrador astável, por meio de modulação por chaveamento de amplitude (*Amplitude Shift Keying* - ASK), mais especificamente em uma versão simplificada conhecida como *On-Off Keying* (OOK), permitindo que o arco elétrico reproduza sons audíveis. Essa abordagem possibilitou explorar de forma aplicada os conceitos de eletricidade e magnetismo, ao mesmo tempo em que integrou os sentidos da visão e da audição na operação do sistema.

1.1 Justificativa

A construção de protótipos em Engenharia Elétrica justifica-se pela necessidade de integrar teoria e prática, permitindo aplicar os conhecimentos adquiridos e desenvolver competências técnicas e profissionais. Experimentos envolvendo eletricidade, magnetismo e eletrônica, como a Bobina de Tesla, que demonstra a geração de campos eletromagnéticos e altas tensões, o uso de placas de circuito impresso (PCIs) na construção de circuitos eletrônicos e o desenvolvimento de projetos com a plataforma Arduino, como o controle de sensores e atuadores, possibilitam colocar em prática conceitos complexos e, ao mesmo tempo, aprimorar habilidades como montagem, soldagem, depuração e análise de circuitos. Nesse contexto, a construção do protótipo de gerador de alta tensão com modulação sonora controlado por Arduino proporcionou a aplicação integrada de princípios de alta tensão, eletrônica e programação, além de favorecer o desenvolvimento de novas habilidades relacionadas ao projeto, fabricação e análise experimental de sistemas eletrônicos.

1.2 Objetivos

Desenvolver e implementar um protótipo de gerador de alta tensão sonoro utilizando transformador flyback, circuito oscilador e microcontrolador Arduino, aplicando de forma prática e integrada conhecimentos de eletricidade, magnetismo e eletrônica. Os objetivos específicos são:

- a) Projetar e construir o circuito oscilador baseado em multivibrador astável capaz de

gerar pulsos de alta frequência para o transformador flyback e viabilizar a geração de alta tensão;

- b) Integrar o microcontrolador Arduino ao circuito para gerar sinais modulados que permitam reproduzir sons audíveis pelo arco elétrico;
- c) Desenvolver a montagem física do protótipo, incluindo o enrolamento do transformador, sistema de segurança e suporte para observação visual do arco elétrico;
- d) Testar e validar o funcionamento do protótipo, verificando a relação entre frequência, modulação e produção de sons audíveis;
- e) Documentar o processo de desenvolvimento do protótipo, incluindo esquemáticos, parâmetros de operação e resultados experimentais, de forma a possibilitar futuras melhorias e replicações do sistema.

1.3 Estrutura da Monografia

Este trabalho está estruturado em seis capítulos.

O capítulo 1 é introdutório, no qual são apresentados a justificativa, os objetivos e a estrutura geral do trabalho desenvolvido.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, abordando conceitos de eletrônica analógica e digital, necessários para o entendimento do funcionamento do protótipo.

O capítulo 3 descreve a metodologia aplicada, detalhando o projeto, construção e integração do protótipo de gerador de alta tensão sonoro, incluindo a análise do funcionamento do protótipo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, bem como os procedimentos de teste e validação do sistema, e a correlação entre modulação, frequência e produção de sons audíveis.

O capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, abordando as contribuições, limitações e perspectivas de aprimoramento do protótipo. Nos apêndices constam um código em Python e um vídeo demonstrativo do protótipo, e nos anexos um código em C++ utilizado no Arduino.

2 FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS OSCILADORES E MODULAÇÃO

Nas seções seguintes, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para compreender o funcionamento do protótipo de gerador de alta tensão. Inicialmente, abordam-se os conceitos relacionados aos multivibradores astáveis, destacando sua função na geração de sinais periódicos que acionam o circuito. Em seguida, discute-se a teoria dos transformadores, com ênfase no transformador Flyback, cuja capacidade de operar em altas frequências e armazenar energia no núcleo magnético o torna essencial para a elevação da tensão. Por fim, explora-se a modulação digital por chaveamento do tipo Amplitude Shift Keying (ASK), especificamente na forma binária conhecida como On-Off Keying (OOK), utilizada para controlar a presença da portadora no circuito e possibilitar a produção de som pelo arco elétrico. Essa base teórica é fundamental para a análise e o entendimento do funcionamento do protótipo.

2.1 Multivibradores Astáveis

Os circuitos osciladores têm como principal função a geração de sinais periódicos, sendo amplamente utilizados na eletrônica em aplicações como temporizadores, moduladores, geradores de clock e fontes chaveadas. De acordo com (MALVINO; BATES, 2011), os osciladores são fundamentais em sistemas que exigem comutação ou a produção de sinais alternados a partir de uma fonte contínua.

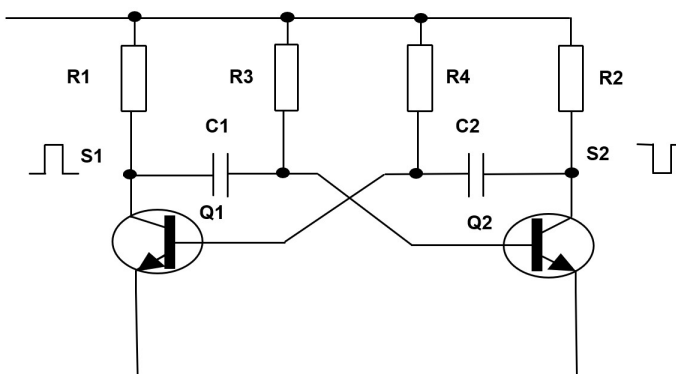
Dentre as diversas configurações de multivibradores, destaca-se o multivibrador astável, caracterizado por não possuir nenhum estado estável. Isso significa que o circuito oscila continuamente entre dois estados temporários, sem permanecer indefinidamente em nenhum deles. Esse comportamento cíclico é gerado por uma realimentação entre dois estágios amplificadores, geralmente implementados com transistores, sendo controlado por componentes resistivos e capacitivos (RC).

2.1.1 Funcionamento básico

Na configuração clássica com dois transistores bipolares de junção (BJTs), os capacitores conectados às bases dos transistores determinam os tempos de condução e corte de cada estágio. O processo de carregamento e descarregamento desses capacitores

promove o chaveamento alternado dos transistores, gerando na saída um sinal em forma de onda quadrada. O período do sinal gerado é diretamente determinado pelos valores dos resistores e capacitores do circuito, sendo possível ajustá-lo para atender às necessidades da aplicação. O circuito típico dessa configuração está ilustrado na Figura 1:

Figura 1 – Esquemático do circuito multivibrador astável



Fonte: Adaptado de (BRAGA, 2025).

Ao aplicar uma tensão contínua na alimentação do circuito, um dos transistores entra em saturação (condução), enquanto o outro permanece em corte. O capacitor conectado à base do transistor em condução inicia o processo de carregamento e, ao atingir determinado nível de tensão, provoca a comutação dos estados dos transistores. Esse ciclo se repete continuamente, gerando a oscilação desejada. A frequência do sinal gerado pelo multivibrador é determinada pelos valores dos capacitores e resistores do circuito, sendo possível ajustá-la variando esses componentes.

2.1.2 Cálculo da Frequência de Oscilação

Tempo de carga do capacitor (meio ciclo 1): O capacitor carrega através do resistor até atingir a tensão de comutação (aproximadamente 0,7 V, valor típico de V_{BE} do transistor). O tempo necessário para atingir esse ponto segue uma curva exponencial, definida pela constante de tempo:

$$T = 0,69 \cdot R \cdot C \quad (1)$$

onde R é o valor do resistor de base e C é o valor do capacitor de base.

Tempo de descarga do capacitor (meio ciclo 2): O capacitor descarrega, invertendo a polaridade e completando o ciclo. Esse processo segue uma dinâmica semelhante ao primeiro meio ciclo.

Tempo total do ciclo: Em um circuito simétrico, em que $R_1 = R_2$ e $C_1 = C_2$, o tempo total de um ciclo completo é a soma dos tempos dos dois meios ciclos:

$$T_{\text{total}} = T_1 + T_2 \quad (2)$$

$$T_1 = 0,69 \cdot R \cdot C, \quad T_2 = 0,69 \cdot R \cdot C \quad (3)$$

$$T_{\text{total}} = 1,38 \cdot R \cdot C \quad (4)$$

Frequência de oscilação: A frequência de oscilação f_{osc} é o inverso do tempo total de um ciclo:

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{T_{\text{total}}} \quad (5)$$

Substituindo T_{total} pela expressão obtida:

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{1,38 \cdot R \cdot C} \quad (6)$$

Dessa forma, é possível projetar o circuito para uma frequência específica escolhendo adequadamente os valores dos resistores e capacitores. Uma das vantagens desse tipo de oscilador é a simplicidade de cálculo e de construção. No protótipo desenvolvido neste trabalho, foram utilizados resistores de base de 4,7 k Ω e capacitores de 10 nF em um circuito simétrico. Substituindo na equação, temos:

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{1,38 \cdot 4700 \cdot (10 \cdot 10^{-9})} \approx 15,42 \text{ kHz} \quad (7)$$

O multivibrador astável é uma configuração amplamente utilizada na eletrônica devido à sua capacidade de gerar sinais periódicos de forma contínua. Entre suas aplicações mais comuns destacam-se os circuitos de piscas-piscas com LEDs, circuitos de temporização, geração de sinais para modulação e osciladores de baixa frequência, como os utilizados em sistemas digitais para amostragem e temporização (FLOYD, 2019; SEDRA; SMITH, 2015). Essas aplicações demonstram a versatilidade do astável, que serve tanto para funções de sinalização visual quanto para fornecimento de clock em sistemas digitais, mostrando sua relevância prática no ensino e na indústria eletrônica.

Além do multivibrador astável, existem outras configurações de multivibradores que atendem a diferentes necessidades de controle de sinais. O multivibrador monoestável possui um único estado estável e, quando acionado por um pulso, retorna automaticamente ao estado estável após um tempo pré-determinado. Já o multivibrador biestável, também conhecido como flip-flop, possui dois estados estáveis e alterna entre eles mediante um sinal externo. A escolha entre essas topologias depende do comportamento desejado: oscilação contínua no caso do astável, resposta a um pulso no monoestável ou comutação controlada no biestável (FLOYD, 2019; SEDRA; SMITH, 2015).

2.2 Transformadores e *Flyback*

2.2.1 Conceitos gerais sobre transformadores

Os transformadores são dispositivos eletromagnéticos fundamentais, utilizados para transferir energia elétrica entre dois ou mais circuitos por meio de acoplamento magnético.

Sua principal função é modificar os níveis de tensão, mantendo constante a frequência da corrente alternada.

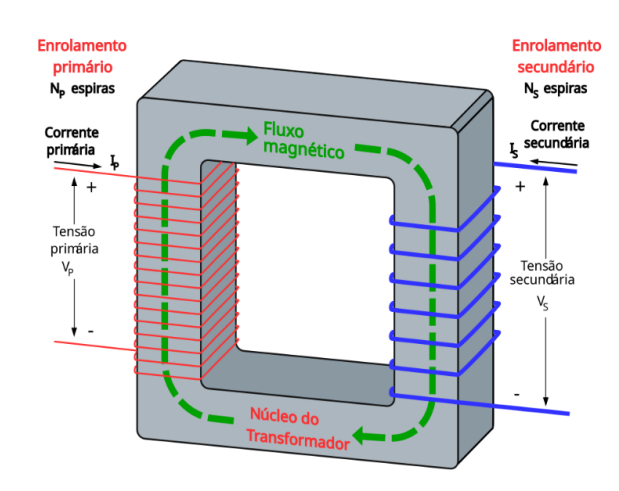
O princípio de funcionamento dos transformadores baseia-se na Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, que estabelece que uma tensão é induzida em um condutor sempre que há variação no fluxo magnético que o atravessa. Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (FITZGERALD; JR.; UMANS, 2006), os transformadores operam por meio da geração de um campo magnético variável no enrolamento primário, que se acopla magneticamente ao enrolamento secundário, induzindo nele uma tensão proporcional à razão entre o número de espiras dos enrolamentos.

A relação entre tensões e espiras é dada pela equação:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

Se o número de espiras do secundário for maior que o do primário ($N_2 > N_1$), o transformador atua como elevador de tensão; se for menor ($N_2 < N_1$), atua como abaixador de tensão. Transformadores são encontrados em aplicações que vão desde redes de distribuição elétrica até fontes de alimentação de equipamentos eletrônicos. A figura 2 mostra o esquema básico de funcionamento de um transformador.

Figura 2 – Diagrama genérico de um transformador



Fonte: Adaptado de (BILLC, 2006).

2.2.2 Transformadores *Flyback*

O transformador *Flyback*, também conhecido como transformador de retorno, é um tipo específico de transformador projetado para operar em circuitos chaveados, especialmente na conversão de energia elétrica em tensões elevadas a partir de fontes de baixa tensão.

A figura 3 mostra um transformador Flyback típico, destacando sua construção e encapsulamento.

Figura 3 – Transformador flyback



Fonte: Adaptado de (GUIDE, 2025).

Diferentemente dos transformadores convencionais, o *Flyback* não transfere energia de forma contínua. Seu funcionamento baseia-se no princípio de armazenamento e posterior liberação de energia magnética no núcleo. Durante o período em que um chaveamento eletrônico mantém o enrolamento primário energizado, o *Flyback* acumula energia no campo magnético do núcleo (fase de carga). Quando o chaveamento é desligado, o colapso desse campo magnético induz uma tensão no enrolamento secundário (fase de descarga), geralmente muito superior à tensão de entrada.

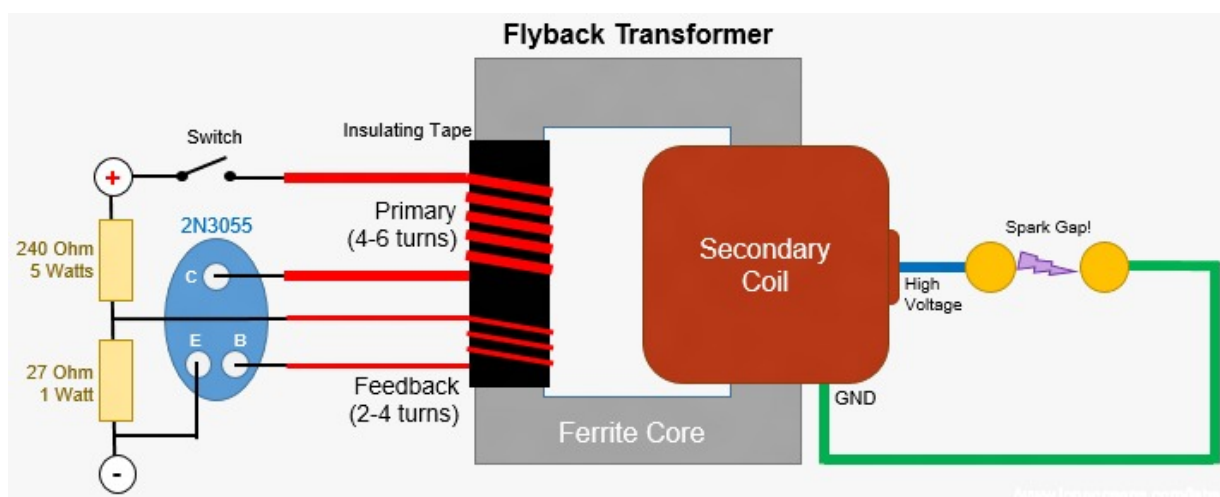
As principais características do transformador Flyback incluem:

- a) **Núcleo de ferrite com entreferro:** O entreferro impede a saturação magnética e permite que o núcleo armazene energia durante a fase de condução;
- b) **Funcionamento em corrente descontínua:** A transferência de energia ocorre apenas quando o interruptor (chave) abre, liberando a energia acumulada;
- c) **Alta tensão de saída:** Capaz de gerar tensões na faixa de 5 kV até 30 kV, dependendo da aplicação;
- d) **Alta frequência de operação:** Geralmente entre 15 kHz e 50 kHz, o que permite a redução no tamanho dos componentes magnéticos;
- e) **Isolamento elétrico:** Os enrolamentos são fisicamente separados e encapsulados para suportar as altas tensões de saída;
- f) **Componentes internos integrados:** Alguns modelos incluem diodos de alta tensão, capacitores e resistores incorporados ao encapsulamento.

O funcionamento básico do transformador *Flyback* pode ser descrito em três etapas principais. Na primeira etapa, **carga**, o transistor de chaveamento conduz, permitindo que a corrente flua pelo enrolamento primário, gerando um campo magnético que é armazenado no núcleo do transformador. Na segunda etapa, **desligamento**, ao interromper a condução (abertura da chave), o campo magnético colapsa rapidamente, induzindo uma tensão elevada no enrolamento secundário, proporcional à taxa de variação do fluxo magnético e à razão de espiras entre primário e secundário. Na terceira etapa, **retificação**, a tensão induzida pode ser aplicada diretamente ou ser retificada e filtrada (por circuitos externos de retificação e filtragem), dependendo da aplicação específica do circuito.

A figura 4 ilustra o funcionamento do transformador Flyback, mostrando o chaveamento no primário e o arco elétrico gerado no secundário.

Figura 4 – Funcionamento do transformador flyback



Fonte: Adaptado de (LABORATORIES, 2025).

Em outras palavras, o funcionamento do transformador *Flyback* depende fortemente do tempo de condução do transistor de chaveamento e das características magnéticas do núcleo. Durante a fase de condução, a energia elétrica é convertida em energia magnética e armazenada no núcleo de ferrite. Quando o transistor é desligado, a rápida reversão do fluxo magnético induz uma tensão elevada no enrolamento secundário, cuja magnitude é determinada pela taxa de variação do fluxo e pela relação de espiras entre primário e secundário. Esse processo permite que o *Flyback* forneça pulsos de alta tensão de forma controlada, sendo possível ajustar a frequência de operação e a duração do pulso para atender às necessidades específicas do circuito, como geração de arcos elétricos audíveis ou alimentação de cargas sensíveis (KEOGH; COHEN, 2016).

O transformador *Flyback* apresenta ampla aplicabilidade em sistemas eletrônicos que requerem elevação de tensão ou isolamento entre primário e secundário. Entre suas aplicações mais comuns estão fontes chaveadas, televisores de tubo (CRT), circuitos de ignição automotiva, geradores de alta tensão, experimentos científicos envolvendo arcos

elétricos e plasma, bem como fontes de alimentação isoladas. A versatilidade do *Flyback* decorre de sua capacidade de operar em altas frequências, gerar tensões elevadas e fornecer isolamento elétrico entre os enrolamentos.

O Quadro 1 apresenta os parâmetros técnicos típicos de um transformador Flyback. Nele são detalhadas grandezas como tensão e corrente de saída, frequência de operação, eficiência, tipo de núcleo e características de isolamento. Esses valores fornecem uma referência prática para o dimensionamento e aplicação do transformador em circuitos chaveados, permitindo compreender os limites operacionais e as condições ideais de funcionamento do dispositivo.

Quadro 1 – Parâmetros técnicos típicos do transformador flyback.

Parâmetro	Valor Típico
Tensão de saída	5 kV – 30 kV
Corrente de saída	0,1 mA – 5 mA
Frequência de operação	15 kHz – 50 kHz
Eficiência	70% – 85% (dependendo do circuito de chaveamento)
Tipo de núcleo	Ferrite com entreferro
Isolamento	Enrolamentos encapsulados com isolamento reforçado

Fonte: (KEOGH; COHEN, 2016)

Devido às tensões extremamente elevadas geradas, o uso de transformadores Flyback exige cuidados rigorosos. Embora a corrente seja geralmente baixa, a energia contida nos pulsos de alta tensão é suficiente para causar choques elétricos perigosos e até fatais, além de danos a equipamentos sensíveis.

2.3 Modulação em Amplitude por Chaveamento (ASK)

A modulação em amplitude por chaveamento (ASK) é uma forma de modulação digital derivada da modulação AM convencional. Uma das implementações mais simples de ASK é o On-Off Keying (OOK), na qual a presença ou ausência de uma onda portadora de alta frequência representa os símbolos binários do sinal digital — “1” quando a portadora está presente e “0” quando está ausente.

Segundo (HAYKIN, 2006), a modulação AM clássica envolve a multiplicação de um sinal de mensagem, tipicamente analógico, por uma portadora senoidal de frequência superior, resultando em uma variação contínua da amplitude da portadora conforme a informação transmitida. Na versão digital OOK, essa variação é substituída por um

chaveamento binário da portadora: o sinal modulado é alternadamente transmitido ou suprimido, de acordo com o valor lógico do bit de entrada.

Apesar de sua simplicidade, a OOK é considerada uma forma de modulação digital por amplitude, pertencente à família ASK (Amplitude Shift Keying), sendo amplamente utilizada em sistemas de comunicação de baixo custo e baixa complexidade, como controles remotos infravermelhos e dispositivos RF de curto alcance. Quando a informação de origem é analógica (como áudio), ela deve ser previamente convertida em níveis discretos, gerando um sinal binário que controla o chaveamento da portadora.

2.3.1 Sinais Envolvidos na Modulação AM Digital

O processo de modulação OOK envolve três sinais principais:

- a) **Sinal de modulação** $m(t)$: contém a informação (áudio, dados digitais, etc.), geralmente com frequência entre 20 Hz e 20 kHz.
- b) **Portadora** $c(t)$: sinal senoidal de alta frequência (acima de 10 kHz) que será controlado pelo sinal $m(t)$.
- c) **Sinal modulado** $s(t)$: resultado do chaveamento da portadora conforme $m(t)$.

Matematicamente, o sinal modulado é descrito por:

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2\pi f_c t), & \text{se } m(t) = 1 \\ 0, & \text{se } m(t) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

onde A é a amplitude da portadora, f_c é a frequência da portadora e $m(t) \in \{0, 1\}$ representa o sinal de modulação digital. Esse chaveamento cria uma “janela” que habilita ou bloqueia a transmissão da portadora, conforme o estado de $m(t)$.

2.3.2 Características e Aplicações

As principais vantagens da OOK incluem sua simplicidade, permitindo implementação com um microcontrolador e um transistor ou MOSFET, o que torna o circuito de fácil construção e operação. Além disso, apresenta baixo custo computacional, sendo ideal para aplicações embarcadas com recursos limitados. Outra vantagem é o chaveamento rápido e direto, pois o controle binário possibilita respostas imediatas do sistema.

Entretanto, a técnica apresenta algumas limitações. A sensibilidade a ruídos é uma delas, uma vez que a ausência da portadora pode ser confundida com perdas naturais no canal de transmissão. Além disso, a OOK possui baixa eficiência espectral, ocupando mais largura de banda em comparação com outras modulações digitais, como PSK.

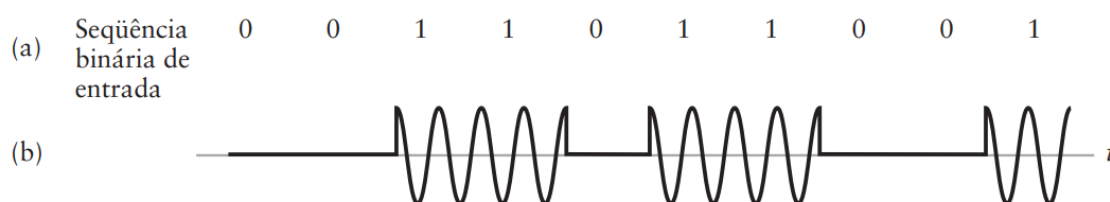
Apesar dessas limitações, a OOK se mostra adequada para sistemas de baixa complexidade, nos quais a robustez à interferência não é o requisito principal, combinando simplicidade de implementação com funcionalidade suficiente para diversas aplicações de comunicação digital.

2.3.3 Representação no Domínio do Tempo e da Frequência

No domínio do tempo, o sinal modulado por OOK apresenta-se como uma sequência de janelas da portadora que são ligadas e desligadas de acordo com a lógica do sinal de modulação $m(t)$. Cada intervalo em que a portadora está presente corresponde a um bit "1", enquanto os intervalos em que a portadora é suprimida correspondem a um bit "0".

Na figura 5 é mostrada a forma de onda modulada em ASK (OOK).

Figura 5 – (a) Sequência binária do sinal de mensagem; (b) Sinal modulado ASK.



Fonte: Adaptado de (HAYKIN, 2006).

No domínio da frequência, a análise via Transformada Rápida de Fourier (FFT) revela a estrutura espectral do sinal OOK. O espectro apresenta um pico principal na frequência da portadora f_c , que corresponde à energia concentrada do sinal contínuo de alta frequência. Em torno desse pico, surgem componentes laterais, denominadas *sidebands*, que refletem a variação do sinal de modulação $m(t)$ e contêm a informação transmitida.

A análise espectral permite não apenas confirmar a presença da modulação, mas também avaliar a largura de banda ocupada pelo sinal e identificar as características do conteúdo de áudio ou dados inseridos. Dessa forma, a inspeção no domínio da frequência é uma ferramenta essencial para projetistas e engenheiros verificarem o desempenho do sistema e a fidelidade da transmissão.

3 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO

3.1 Funcionamento do protótipo gerador de arco elétrico sonoro

O funcionamento do protótipo baseia-se na integração de três blocos principais: (i) o circuito oscilador multivibrador astável; (ii) o transformador *Flyback*; e (iii) o sistema de modulação em amplitude por chaveamento digital (AM), controlado por um microcontrolador Arduino.

Inicialmente, o circuito oscilador multivibrador astável gera um sinal pulsado em forma de onda quadrada, com frequência fixa de aproximadamente 15 kHz. Esse sinal atua como portadora de alta frequência e é aplicado ao gate de um transistor MOSFET, que funciona como chave eletrônica de alta velocidade.

Quando um sinal de controle é aplicado a porta de um transistor MOSFET, esse conecta o enrolamento primário do transformador Flyback à fonte de alimentação de 12 V, permitindo o fluxo de corrente. Nesse instante, o transformador acumula energia em seu núcleo de ferrite. Quando a condução é interrompida, essa energia é rapidamente transferida para o secundário do Flyback, gerando impulsos de alta tensão capazes de romper o ar e produzir um arco elétrico.

O sinal modulante é gerado por um microcontrolador Arduino, que é responsável pela geração do sinal sonoro. Por meio da função `tone()`, o Arduino gera sinais digitais com frequência variável (geralmente entre 200 Hz e 2 kHz), correspondentes às notas de uma melodia. Esse sinal é aplicado à base de um transistor NPN, que funciona como estágio de chaveamento intermediário, uma vez que o sinal da portadora gerada pelo multivibrador fluirá no sentido coletor-emissor para o *gate* (porta) do MOSFET.

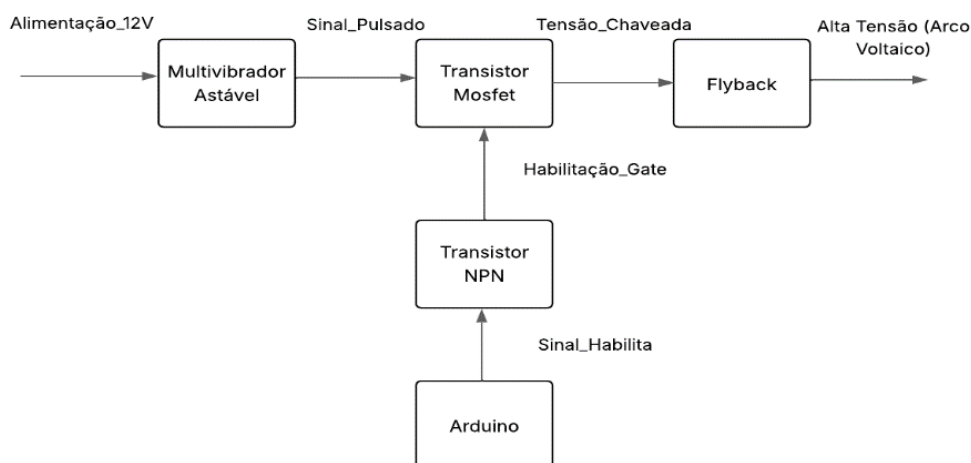
Essa lógica cria uma modulação em amplitude por chaveamento (On-Off Keying, OOK), na qual a portadora de 15 kHz só é aplicada ao MOSFET quando o sinal do Arduino está em nível alto. Assim, a portadora é ligada e desligada conforme o ritmo das notas musicais, transferindo a frequência do som para o arco voltaico. O resultado é a reprodução da melodia através da modulação do plasma, fenômeno conhecido como transdução plasma-acústica.

É importante destacar que, diferentemente da modulação por largura de pulso (PWM), não há variação do *duty cycle*. A informação sonora é transmitida pela frequência

do sinal de modulação, enquanto a portadora mantém seu ciclo fixo. O som não é gerado por variações na potência média entregue, mas pela alternância da presença da portadora, caracterizando o sistema como um modulador AM digital do tipo OOK, característica da modulação por chaveamento de amplitude - ASK.

A seguir, apresenta-se o Diagrama de Blocos do protótipo (figura 6), que ilustra de forma simplificada o funcionamento do sistema.

Figura 6 – Diagrama de blocos do funcionamento do gerador de alta tensão com modulação ASK.



Fonte: Autoria própria.

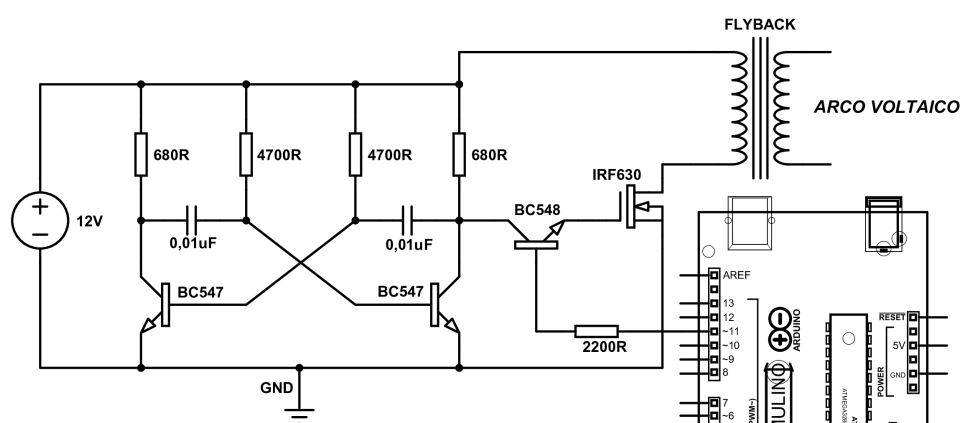
Na figura 6 é possível observar o fluxo de operação e os principais sinais envolvidos em cada etapa do circuito, desde a geração da portadora pelo multivibrador astável até a modulação do arco elétrico pelo microcontrolador Arduino. O funcionamento do protótipo envolve diversos sinais essenciais, representados no diagrama de blocos, que controlam a geração de alta tensão e a modulação sonora do arco elétrico. Os principais sinais são descritos a seguir:

- Alimentação_12V:** Tensão contínua de 12 V fornecida a todo o circuito.
- Sinal_Pulsado (Portadora 15 kHz):** Onda quadrada gerada pelo multivibrador astável, aplicada ao gate do MOSFET quando habilitada.
- Sinal_Habilita (Sinal de Modulação - Arduino):** Sinal digital de frequência variável (200 Hz – 2 kHz) gerado pelo Arduino para controlar a aplicação da portadora.
- Habilitação_Gate:** Saída do transistor NPN que combina os sinais da portadora e do modulante, acionando o gate do MOSFET.
- Tensão_Chaveada:** Pulso de alta frequência presente no dreno do MOSFET, aplicado ao enrolamento primário do transformador Flyback.

- f) **Alta_Tensão:** Tensão elevada gerada no secundário do Flyback, responsável pela criação do arco voltaico que emite o som.

A figura 7 apresenta o esquema eletrônico completo do protótipo, detalhando a disposição dos componentes e as conexões responsáveis pela operação do circuito.

Figura 7 – Esquemático do circuito eletrônico do protótipo.



Fonte: Autoria própria.

O circuito elétrico da figura 7 mostra o multivibrador astável que produz o sinal de 15 kHz, montado utilizando dois transistores NPN BC547, dois capacitores de 10 nF, e quatro resistores sendo dois resistores de 4,7 k Ω (resistores de base) e dois resistores de 680 Ω (resistores de coletor). O transistor NPN BC548 e o resistor de 2,2 k Ω formam o circuito intermediário de chaveamento, controlado pelo sinal digital de uma das portas do arduíno. O transistor MOSFET IRF630 atua como chave de potência, fechando a malha dreno-fonte que conecta a fonte de 12V ao primário do transformador *flyback* TAT1405. Para complementar esta descrição, o funcionamento prático do protótipo pode ser conferido em um vídeo demonstrativo disponível no Apêndice B ([CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO](#)).

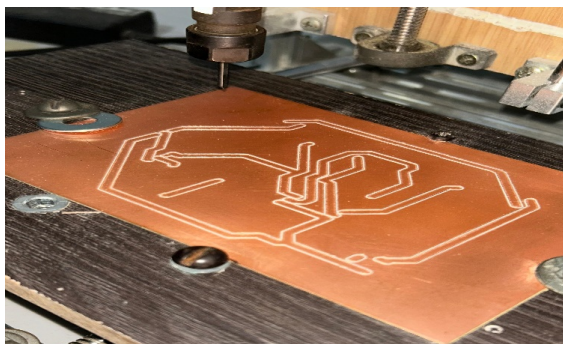
3.2 Construção do protótipo gerador de arco elétrico sonoro

A fabricação do protótipo envolveu diversas etapas, desde o desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso (PCI) até a montagem final dos componentes e da estrutura física do sistema. Cada etapa foi cuidadosamente planejada para garantir um funcionamento eficiente e seguro, considerando especialmente as altas tensões presentes no projeto.

A figura 8 mostra o layout da placa foi desenvolvido no software *EASYEDA*, que permite a criação simultânea do esquema elétrico e do layout físico da placa.

A confecção da PCI foi realizada por meio do processo de fresagem CNC, uma alternativa prática e econômica, amplamente utilizada na fabricação de protótipos. Após

Figura 9 – Placa fresada e finalizada, pronta para montagem dos componentes.



Fonte: Autoria própria.

Com a PCI finalizada, foi realizada a soldagem dos componentes eletrônicos, respeitando as orientações de polaridade, especialmente nos semicondutores, como os transistores. A placa abriga o circuito do multivibrador astável, o transistor BC548, o MOSFET IRF630, além dos bornes de conexão, que facilitam a ligação externa com o Arduino e o transformador Flyback.

Além da placa, foi confeccionada uma estrutura física composta por uma base de madeira e uma caixa de proteção. A caixa abriga a PCI e seus componentes eletrônicos, atuando como barreira física para evitar o contato acidental com partes energizadas. Na prática, ela protege principalmente contra a alta corrente no lado primário do transformador. Tanto o transformador Flyback quanto o microcontrolador Arduino ficam posicionados externamente, fixados na base de madeira juntamente com a própria caixa de proteção, garantindo a organização dos componentes e facilitando a realização de testes e manutenções.

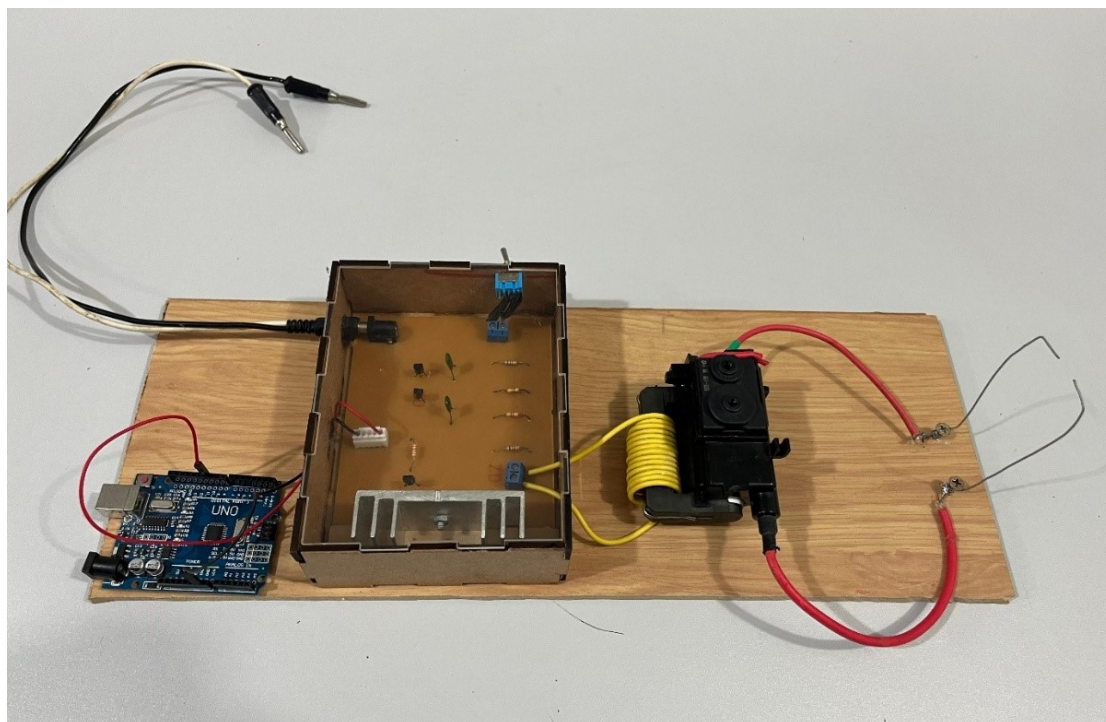
O protótipo de gerador de alta tensão com modulação AM por chaveamento digital foi construído e testado, apresentando funcionamento conforme previsto no projeto. A integração do circuito multivibrador astável, do transformador Flyback e do sistema de modulação controlado pelo Arduino demonstrou eficiência na geração de arcos elétricos visíveis e audíveis, reproduzindo sons correspondentes às notas programadas.

A Figura 10 apresenta o protótipo finalizado, destacando a disposição da PCI, a estrutura de proteção, o transformador Flyback e o microcontrolador Arduino.

O quadro 3 apresenta os principais elementos que compõem o protótipo, juntamente com suas respectivas funções.

Essa organização garante a segurança dos operadores, evitando o contato com pontos de alta tensão e correntes elevadas, além de proporcionar estabilidade, facilitar testes e ajustes durante o desenvolvimento e permitir melhor visualização do funcionamento do protótipo. A disposição ordenada dos componentes também favorece manutenção, substituição de peças e futuras modificações ou melhorias no circuito.

Figura 10 – Protótipo final do gerador de alta tensão com modulação AM por chaveamento digital, mostrando a PCI, o transformador Flyback, o microcontrolador Arduino e a estrutura de proteção.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 3 – Elementos que compõem o protótipo e suas respectivas funções

Elemento	Função
Caixa Protetora	Abriga a PCI com o multivibrador astável, MOSFET, transistor e bornes
Base de Madeira	Suporte e fixação dos componentes
Transformador Flyback	Geração de alta tensão
Microcontrolador Arduino	Modulação ASK/OOK

Fonte: Autoria própria.

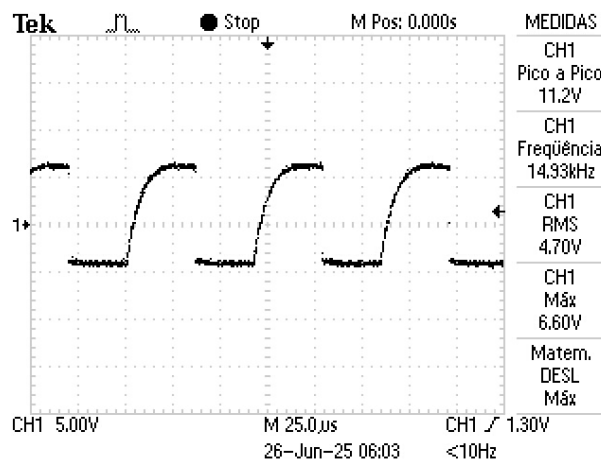
4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais obtidos por meio de medições realizadas com o auxílio de um osciloscópio digital. As formas de onda referentes ao oscilador multivibrador astável e ao sinal digital gerado pelo Arduino foram registradas diretamente no osciloscópio. Já a análise espectral do sinal de modulação, realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), foi processada em ambiente Python a partir dos dados exportados do osciloscópio, de modo a proporcionar maior clareza na visualização do espectro. Os sinais analisados têm como objetivo validar o funcionamento dos blocos do protótipo, confirmar a presença da modulação em amplitude por chaveamento (ASK/OOK). Adicionalmente, a tensão de saída gerada pelo transformador Flyback durante a ocorrência do arco voltaico foi estimada indiretamente, a partir da medição da distância entre os eletrodos com paquímetro digital e da relação de campo elétrico necessário para a ruptura do ar.

4.1 Sinal do Multivibrador Astável

A Figura 11 apresenta o sinal obtido na saída do circuito oscilador multivibrador astável, responsável por gerar a portadora de 15 kHz utilizada para acionar o transistor MOSFET.

Figura 11 – Sinal de saída do multivibrador astável.



Fonte: Autoria própria.

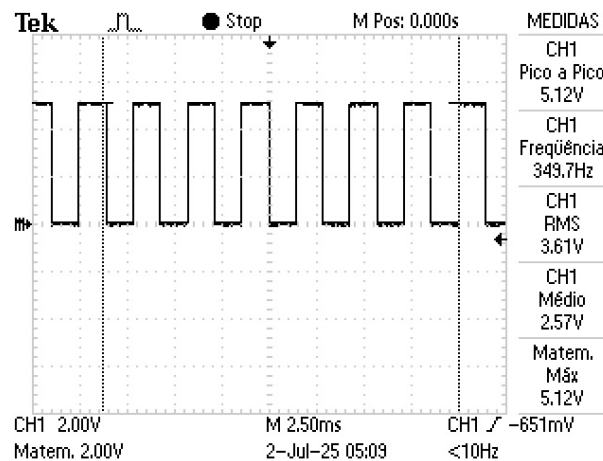
Como pode ser observado, o sinal apresenta uma forma de onda quadrada simétrica

com frequência aproximada de 15 kHz, confirmando o funcionamento correto do oscilador. Esta portadora será posteriormente modulada pelo sinal gerado pelo microcontrolador Arduino.

4.2 Sinal da Modulação ASK

Na Figura 12, é apresentado o sinal digital gerado pelo Arduino no pino de saída utilizado para a modulação do arco voltaico. Trata-se de uma onda quadrada com frequência aproximada de 349,7 Hz, correspondente a uma das notas musicais da melodia programada no código. O sinal apresenta uma amplitude de 5,12 V pico a pico, valor típico de saída digital em nível TTL (0 V a 5 V). A forma de onda é claramente periódica, com ciclo de trabalho (*duty cycle*) próximo de 50%.

Figura 12 – Sinal de modulação gerado pelo Arduino no domínio do tempo.



Fonte: Autoria própria.

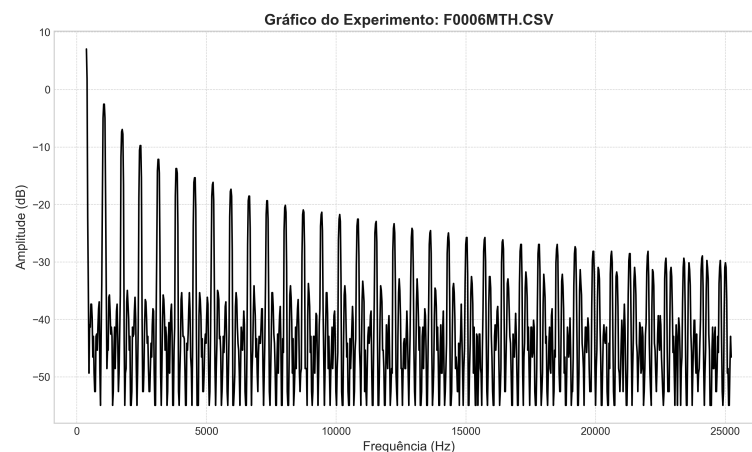
Esse sinal atua como modulante, determinando quando a portadora de 15 kHz, gerada pelo oscilador multivibrador astável, será habilitada ou bloqueada no gate do MOSFET. Dessa forma, o Arduino comanda o acionamento da alta tensão no ritmo da frequência musical, possibilitando a modulação em amplitude por chaveamento (AM digital) do arco voltaico.

Para analisar a natureza espectral do sinal de modulação aplicado à base do transistor NPN, foi utilizada a função FFT (*Fast Fourier Transform*) a partir dos dados exportados do osciloscópio e processados em ambiente Python. A Figura 13 apresenta o espectro de magnitude completo do sinal digital gerado pelo Arduino, no intervalo de 0 a 25 kHz. Observa-se a presença de um pico fundamental em aproximadamente 443 Hz, com amplitude próxima de 10 dB, correspondente à nota musical executada no instante da medição. Além disso, são visíveis as componentes harmônicas associadas à forma de onda quadrada, confirmando que o Arduino realiza variação de frequência no sinal de modulante

sem alterar o ciclo de trabalho (*duty cycle*). Esse comportamento caracteriza a técnica de modulação em amplitude por chaveamento (ASK/OOK) empregada no protótipo.

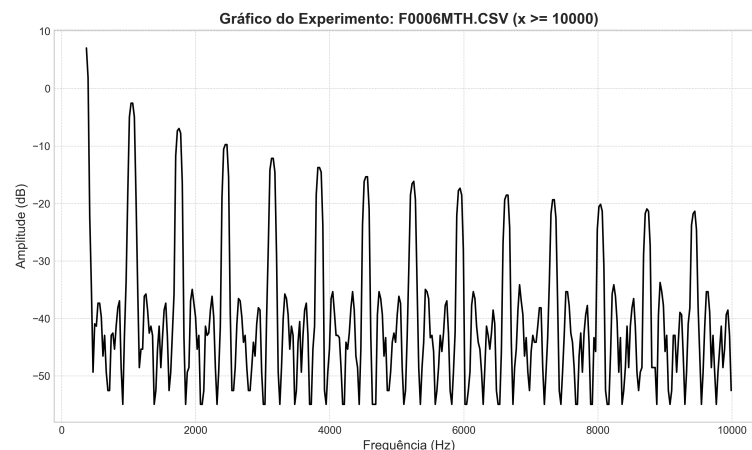
Com o objetivo de destacar a região espectral de maior interesse, a figura 14 apresenta o mesmo espectro restringindo o eixo de frequência ao intervalo de 0 a 10 kHz. Essa representação permite visualizar com maior clareza a componente fundamental e as primeiras harmônicas, que são diretamente relacionadas à frequência da nota musical reproduzida pelo Arduino.

Figura 13 – Espectro de magnitude do sinal de modulação digital gerado pelo Arduino (0–25 kHz).



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Espectro de magnitude do sinal de modulação digital gerado pelo Arduino (0–10 kHz).



Fonte: Autoria própria.

4.3 Estimativa da tensão máxima de saída do flyback

Para estimar a tensão de saída do transformador Flyback, foi realizado um experimento baseado na rigidez dielétrica do ar. Os eletrodos do secundário foram fixados em uma base de madeira, permitindo a visualização clara do arco voltaico. A distância entre os eletrodos foi medida com um paquímetro digital, obtendo-se o valor de 6,8 mm.

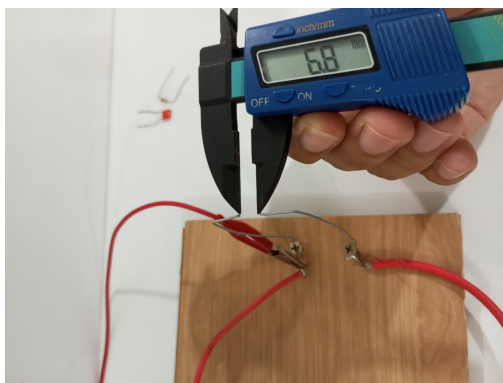
Considerando que, em condições normais de temperatura e pressão, o ar apresenta uma rigidez dielétrica aproximada de 3,3 kV/mm, a tensão de ruptura estimada é:

$$V = d \cdot E_{\text{ar}} = 6,8 \text{ mm} \times 3,3 \text{ kV/mm} \approx 22,44 \text{ kV} \quad (10)$$

Essa estimativa representa a tensão de pico necessária para romper o dielétrico (ar) nessa distância, indicando que o Flyback é capaz de gerar aproximadamente 22,4 kV no secundário. Vale destacar que, após o início do arco, a tensão necessária para sua manutenção tende a ser menor que a tensão de ruptura.

A Figura 15 ilustra a medição realizada com o paquímetro durante o experimento.

Figura 15 – Distância entre eletrodos fixados em base de madeira, medida com paquímetro digital.



Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento, construção e caracterização de um protótipo de gerador de alta tensão com modulação em amplitude por chaveamento digital (AM-OOK). Ao longo do estudo, foi possível integrar de forma eficiente os três blocos principais do sistema: o oscilador multivibrador astável, o transformador Flyback e o módulo baseado em Arduino, responsável por gerar o sinal modulante que determina quando a portadora está presente ou ausente. A análise dos sinais gerados e a realização de experimentos permitiram validar o correto funcionamento de cada bloco, evidenciando a geração de uma portadora de 15 kHz e a modulação em amplitude do arco voltaico conforme o sinal modulante.

As medições experimentais demonstraram que o circuito alcançou os objetivos propostos, incluindo a reprodução de frequências sonoras determinadas pelo Arduino, a modulação precisa da portadora e a geração de tensões elevadas de aproximadamente 22,4 kV no secundário do Flyback. Os resultados obtidos confirmam que o protótipo é funcional e que o desenvolvimento proporcionou a aplicação integrada de diversos conhecimentos e habilidades adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica, incluindo eletrônica, eletromagnetismo e programação.

Como perspectivas para trabalhos futuros, destaca-se a possibilidade de explorar técnicas de modulação mais avançadas, como PWM ou PSK, visando maior eficiência espectral e robustez a ruídos. Outra direção é a implementação de medidas de monitoramento automatizado, permitindo a coleta de dados em tempo real e a caracterização detalhada do arco voltaico. Adicionalmente, aprimoramentos na construção física, como encapsulamento do transformador e isolamento avançado, podem aumentar a segurança operacional e expandir as aplicações do protótipo em diferentes contextos experimentais e de pesquisa. Também se sugere a implementação de um sistema de ventilação integrado ao dissipador de calor, possibilitando maior tempo de operação contínua sem riscos de danos aos componentes por aquecimento excessivo.

Referências

- BILLC. *Idealised single-phase transformer also showing the path of magnetic flux through the core*. 2006. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transformer3d_col3.svg>. Acesso em: 08 mai. 2025. Citado na página 19.
- BRAGA, N. C. *Multivibrador Astável (Cálculo M002)*. 2025. <<https://newtonbraga.com.br/matematica-na-eletronica/433-multivibrador-astavel-calculo-m002.html>>. Acesso em: 08 mai. 2025. Citado na página 17.
- CODÁ, R.; COLABORADORES. Implementação de protótipos em aulas de laboratório de eletrônica digital. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE)*. [s.n.], 2013. Acesso em: 16 ago. 2025. Disponível em: <https://turing.pro.br/anais/COBENGE-2013/pdf/117965_1.pdf>. Citado na página 13.
- FITZGERALD, A. E.; JR., C. K.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. Citado na página 19.
- FLOYD, T. L. *Principles of Electric Circuits*. 10th. ed. New York: Pearson, 2019. Citado na página 18.
- GUIDE, E. R. *Flyback Transformer*. 2025. <<https://www.electronicrepairguide.com/flyback-transformers.html>>. Acesso em: 11 set. 2025. Citado na página 20.
- HAYKIN, S. *Sistemas de Comunicação*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- KEOGH, B.; COHEN, I. *Flyback Transformer Design Considerations for Efficiency and EMI*. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/196/slup338.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- LABORATORIES, L. *Flyback Driver Circuits*. 2025. <<https://www.loneoceans.com/labs/flyback/>>. Acesso em: 11 set. 2025. Citado na página 21.
- MALVINO, A. P.; BATES, D. J. *Princípios de Eletrônica*. 8. ed. São Paulo: AMGH, 2011. Citado na página 16.
- PAULO, I. F. de S. *Estudantes de Engenharia Elétrica apresentam protótipos de soluções inovadoras*. 2023. <<https://vtp.ifsp.edu.br/index.php/noticias/2160-estudantes-de-engenharia-eletrica-apresentam-prototipos-de-solucoes-inovadoras.html>>. Acesso em: 16 ago. 2025. Citado na página 13.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microelectronic Circuits*. 7th. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015. Citado na página 18.

VILAR, R. S.; COLABORADORES. Uso da plataforma arduino para o desenvolvimento de habilidades práticas em disciplinas de engenharia elétrica. *Principia*, v. 22, n. 2, p. 45–57, 2018. Acesso em: 16 ago. 2025. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1745>>. Citado na página 13.

Apêndices

A Código em Python para Plotagem dos Resultados Experimentais

O código apresentado neste apêndice foi utilizado para processar e plotar os resultados experimentais obtidos a partir de arquivos .CSV exportados do osciloscópio digital. A implementação faz uso das bibliotecas Pandas e Matplotlib, responsáveis respectivamente pela manipulação dos dados e pela geração dos gráficos. Inicialmente, o script identifica e extrai dos metadados do arquivo as unidades correspondentes aos eixos horizontal e vertical, garantindo que os rótulos dos gráficos estejam de acordo com as informações originais da medição. Em seguida, os dados são carregados em um DataFrame, sendo aplicados filtros para limitar a faixa do eixo da frequência, de forma a facilitar a análise visual. O gráfico resultante é configurado no estilo ABNT, com grade, rótulos claros e título informativo, e posteriormente salvo em formato de imagem com resolução de 300 dpi. Esse procedimento foi realizado duas vezes: inicialmente considerando todo o intervalo de frequência até 25 kHz, e posteriormente com a restrição para 10 kHz, o que proporcionou uma visualização mais detalhada dos sinais analisados.

```

1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import os
4
5 # --- Grafico para F0006MTH.CSV (com filtro em x <= 1000) ---
6 file_path_2 = 'F0006MTH.CSV'
7 try:
8     # Extrai metadados para os rotulos dos eixos
9     with open(file_path_2, 'r') as f:
10         lines = f.readlines()
11         horizontal_units = 'Eixo X'
12         vertical_units = 'Eixo Y'
13         for line in lines[:15]:
14             if 'Horizontal Units' in line:
15                 horizontal_units = line.split(',')[1].strip()
16             if 'Vertical Units' in line:
17                 vertical_units = line.split(',')[1].strip()
18
19     # Le os dados do CSV
20     df2 = pd.read_csv(file_path_2, header=None, skiprows=15,

```

```
    usecols=[3, 4])
21 df2.columns = ['x', 'y']
22
23 # >>> ALTERACAO AQUI: Filtra o DataFrame para incluir apenas
    x <= 10000 <<<
24 df2 = df2[df2['x'] <= 10000]
25
26 # Configuracoes do plot (Estilo ABNT)
27 plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
28 plt.figure(figsize=(10, 6))
29
30 # Plota os dados ja filtrados
31 plt.plot(df2['x'], df2['y'], color='black')
32
33 # Titulo e rotulos
34 file_name_2 = os.path.basename(file_path_2)
35 plt.title(f'Grafico do Experimento: {file_name_2} (x >=
    10000)', fontsize=14, fontweight='bold')
36 x_label_2 = f'Tempo ({horizontal_units})' if horizontal_units
    == 's' else f'Frequencia ({horizontal_units})'
37 y_label_2 = f'Tensao ({vertical_units})' if vertical_units ==
    'V' else f'Amplitude ({vertical_units})'
38 plt.xlabel(x_label_2, fontsize=12)
39 plt.ylabel(y_label_2, fontsize=12)
40
41 # Grade e salvamento
42 plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
43 plt.tight_layout()
44 output_filename_2 = f'grafico_{os.path.splitext(file_name_2)
    [0]}_filtrado_ate_x1000.png'
45 plt.savefig(output_filename_2, dpi=300, bbox_inches='tight')
46 print(f'Grafico salvo como: {output_filename_2}')
47
48 except Exception as e:
49     print(f"Nao foi possivel processar o arquivo {file_path_2}.
    Erro: {e}")
50
51 \end{apendicesenv}
```

B Vídeo Demonstrativo do Protótipo

Com o objetivo de complementar a compreensão do funcionamento do protótipo, foi produzido um vídeo demonstrativo.

O vídeo está disponível para acesso público no seguinte endereço eletrônico:

https://drive.google.com/file/d/1YUJ0T_EhnSz_zWMfMcsJmV-fSiiCxhi7/view?usp=drivesdk

Recomenda-se assistir ao vídeo para observar o funcionamento prático do protótipo desenvolvido no Trabalho de Conclusão de Curso "Desenvolvimento de um Protótipo de Gerador de Alta Tensão com Modulação AM Digital via Arduino".

Anexos

A Código-fonte Arduino para Geração de Notas Musicais

O código apresentado neste anexo foi utilizado para gerar a melodia "Happy Birthday" no protótipo do gerador de alta tensão. A implementação se baseia na função `tone()` do Arduino, que permite a emissão de sinais sonoros em frequências específicas através de um buzzer piezoelétrico conectado ao pino 11.

Inicialmente, são definidas constantes que representam as notas musicais em Hertz (`NOTE_C4`, `NOTE_D4`, ...), cobrindo desde as notas mais graves até as mais agudas, bem como o valor `REST` para representar pausas. O array `melody[]` armazena a sequência de notas e suas durações correspondentes, utilizando números positivos para notas regulares e negativos para notas pontuadas (dotted notes).

No bloco `setup()`, o código percorre cada nota da melodia, calculando sua duração em milissegundos com base no tempo definido pela variável `tempo`. A função `tone()` é chamada para reproduzir a nota durante 90% de sua duração, garantindo uma pequena pausa de 10% entre as notas para maior clareza sonora. A função `noTone()` interrompe o som antes da execução da próxima nota. O loop principal (`loop()`) permanece vazio, uma vez que a melodia é executada apenas uma vez durante a inicialização.

```

1  /*
2   Happy Birthday
3   Connect a piezo buzzer or speaker to pin 11 or select a new pin
4   .
5   More songs available at https://github.com/robsoncouto/arduino-songs
6
7   Robson Couto, 2019
8  */
9  #define NOTE_B0  31
10 #define NOTE_C1  33
11 #define NOTE_CS1 35
12 #define NOTE_D1  37
13 #define NOTE_DS1 39
14 #define NOTE_E1  41
15 #define NOTE_F1  44
16 #define NOTE_FS1 46

```

```
16 #define NOTE_G1 49
17 #define NOTE_GS1 52
18 #define NOTE_A1 55
19 #define NOTE_AS1 58
20 #define NOTE_B1 62
21 #define NOTE_C2 65
22 #define NOTE_CS2 69
23 #define NOTE_D2 73
24 #define NOTE_DS2 78
25 #define NOTE_E2 82
26 #define NOTE_F2 87
27 #define NOTE_FS2 93
28 #define NOTE_G2 98
29 #define NOTE_GS2 104
30 #define NOTE_A2 110
31 #define NOTE_AS2 117
32 #define NOTE_B2 123
33 #define NOTE_C3 131
34 #define NOTE_CS3 139
35 #define NOTE_D3 147
36 #define NOTE_DS3 156
37 #define NOTE_E3 165
38 #define NOTE_F3 175
39 #define NOTE_FS3 185
40 #define NOTE_G3 196
41 #define NOTE_GS3 208
42 #define NOTE_A3 220
43 #define NOTE_AS3 233
44 #define NOTE_B3 247
45 #define NOTE_C4 262
46 #define NOTE_CS4 277
47 #define NOTE_D4 294
48 #define NOTE_DS4 311
49 #define NOTE_E4 330
50 #define NOTE_F4 349
51 #define NOTE_FS4 370
52 #define NOTE_G4 392
53 #define NOTE_GS4 415
54 #define NOTE_A4 440
55 #define NOTE_AS4 466
56 #define NOTE_B4 494
57 #define NOTE_C5 523
```

```
58 #define NOTE_CS5 554
59 #define NOTE_D5 587
60 #define NOTE_DS5 622
61 #define NOTE_E5 659
62 #define NOTE_F5 698
63 #define NOTE_FS5 740
64 #define NOTE_G5 784
65 #define NOTE_GS5 831
66 #define NOTE_A5 880
67 #define NOTE_AS5 932
68 #define NOTE_B5 988
69 #define NOTE_C6 1047
70 #define NOTE_CS6 1109
71 #define NOTE_D6 1175
72 #define NOTE_DS6 1245
73 #define NOTE_E6 1319
74 #define NOTE_F6 1397
75 #define NOTE_FS6 1480
76 #define NOTE_G6 1568
77 #define NOTE_GS6 1661
78 #define NOTE_A6 1760
79 #define NOTE_AS6 1865
80 #define NOTE_B6 1976
81 #define NOTE_C7 2093
82 #define NOTE_CS7 2217
83 #define NOTE_D7 2349
84 #define NOTE_DS7 2489
85 #define NOTE_E7 2637
86 #define NOTE_F7 2794
87 #define NOTE_FS7 2960
88 #define NOTE_G7 3136
89 #define NOTE_GS7 3322
90 #define NOTE_A7 3520
91 #define NOTE_AS7 3729
92 #define NOTE_B7 3951
93 #define NOTE_C8 4186
94 #define NOTE_CS8 4435
95 #define NOTE_D8 4699
96 #define NOTE_DS8 4978
97 #define REST 0
98
99
```

```
100 // change this to make the song slower or faster
101 int tempo = 140;
102
103 // change this to whichever pin you want to use
104 int buzzer = 11;
105
106 // notes of the melody followed by the duration.
107 // a 4 means a quarter note, 8 an eighteenth , 16 sixteenth, so
    on
108 // !!negative numbers are used to represent dotted notes,
109 // so -4 means a dotted quarter note, that is, a quarter plus
110 //an eighteenth!!
111 int melody[] = {
112
113     // Happy Birthday
114     // Score available at https://musescore.com/user/8221/scores/26906
115
116     NOTE_C4,4, NOTE_C4,8,
117     NOTE_D4,-4, NOTE_C4,-4, NOTE_F4,-4,
118     NOTE_E4,-2, NOTE_C4,4, NOTE_C4,8,
119     NOTE_D4,-4, NOTE_C4,-4, NOTE_G4,-4,
120     NOTE_F4,-2, NOTE_C4,4, NOTE_C4,8,
121
122     NOTE_C5,-4, NOTE_A4,-4, NOTE_F4,-4,
123     NOTE_E4,-4, NOTE_D4,-4, NOTE_AS4,4, NOTE_AS4,8,
124     NOTE_A4,-4, NOTE_F4,-4, NOTE_G4,-4,
125     NOTE_F4,-2,
126
127 };
128
129 // sizeof gives the number of bytes, each int value is composed
130 // of two bytes (16 bits)
131 // there are two values per note (pitch and duration), so for
    each
132 // note there are four bytes
133 int notes = sizeof(melody) / sizeof(melody[0]) / 2;
134
135 // this calculates the duration of a whole note in ms
136 int wholenote = (60000 * 4) / tempo;
137
138 int divider = 0, noteDuration = 0;
```

```
139
140 void setup() {
141     // iterate over the notes of the melody.
142     // Remember, the array is twice the number of notes
143     //(notes + durations)
144     for (int thisNote = 0;thisNote < notes*2;thisNote = thisNote+2)
145         {
146         // calculates the duration of each note
147         divider = melody[thisNote + 1];
148         if (divider > 0) {
149             // regular note, just proceed
150             noteDuration = (wholenote) / divider;
151         } else if (divider < 0) {
152             // dotted notes are represented with negative durations!!
153             noteDuration = (wholenote) / abs(divider);
154             noteDuration *= 1.5;
155             // increases the duration in half for dotted notes
156         }
157
158         // we only play the note for 90% of the duration,
159         \\leaving 10% as a pause
160         tone(buzzer, melody[thisNote], noteDuration * 0.9);
161
162         // Wait for the specief duration before playing the next note
163         .
164         delay(noteDuration);
165
166         // stop the waveform generation before the next note.
167         noTone(buzzer);
168     }
169
170 void loop() {
171     // no need to repeat the melody.
172 }
```