

Desenvolvimento de um Sintetizador Musical com Comunicação Sem Fio Controlado por Movimento

1st Carla Gómez Molist

Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)
Farroupilha, RS, Brasil
carlagmolist@gmail.com

2nd Gustavo Künzel

Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)
Farroupilha, RS, Brasil
gustavo.kunzel@farroupila.ifrs.edu.br

Resumo—Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de sintetizador musical controlado por movimentos, com comunicação sem fio. O sistema foi implementado com base no microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima, explorando sua saída DAC integrada para geração de sinais sonoros em diferentes formas de onda. Os gestos foram captados por uma luva sensorizada, adaptada para transmitir dados via rádio utilizando o protocolo ModBus. Foi desenvolvido um firmware que interpreta os dados de movimento e os traduz em notas musicais, controlando a frequência e o timbre do som gerado. Além disso, foi implementada uma interface interativa com menu em display LCD e botões físicos. O protótipo validou a proposta de um sistema modular, capaz de integrar diferentes dispositivos de entrada e expandir o controle musical baseado em movimento.

Palavras-chave—Sintetizador musical, Modbus, comunicação sem fio, DAC

I. INTRODUÇÃO

A música contemporânea foi profundamente moldada pela síntese de áudio, uma inovação que capacitou os músicos a explorarem uma vasta gama de sonoridades eletrônicas, desde simples tons até arranjos sonoros complexos [1]. Ao longo do tempo, os sintetizadores evoluíram para se tornarem ferramentas essenciais na produção musical, desempenhando um papel vital na criação de novos gêneros musicais, na ampliação das fronteiras sonoras e na expressão artística [2].

A história dos sintetizadores remonta ao início do século XX, quando Laurens Hammond, inspirado por várias invenções, desenvolveu os primeiros órgãos eletromecânicos compactos [1]. Esses instrumentos, como o Telharmonium de Thaddeus Cahill, representaram os primeiros passos na síntese de áudio, utilizando técnicas eletromecânicas para gerar sons musicais. Com o tempo, os sintetizadores evoluíram, passando de sistemas eletrônicos analógicos para digitais, oferecendo uma variedade cada vez maior de sons e possibilidades de manipulação sonora [1]. Os sintetizadores rapidamente se tornaram uma parte essencial da música contemporânea, sendo amplamente adotados por músicos de diversos gêneros, desde o jazz e o rock até a música eletrônica e experimental. Sua capacidade de criar sons únicos e inovadores permitiu que os artistas explorassem novas fronteiras musicais, desafiando as convenções e criando obras que transcendem os limites do convencional.

Recentemente, o avanço dos sensores MEMS (Microelectromechanical Systems), como giroscópios e acelerômetros, tem revolucionado a forma como os músicos se relacionam com instrumentos musicais. Esses sensores, além de serem compactos e de baixo consumo energético, possibilitam a captura de movimentos e gestos, abrindo novas possibilidades de controle musical em tempo real [3]. O uso de acelerômetros, por exemplo, permite a identificação de gestos com base em valores de aceleração tridimensional, o que pode ser integrado em sistemas de instrumentos musicais para reconhecimento e controle a partir do movimento das mãos ou do corpo.

Por outro lado, microcontroladores modernos, como o Renesas RA4M1, disponível na placa Arduino Uno R4, estão equipados com saídas DAC (Digital-to-Analog Converter), que convertem sinais digitais em analógicos diretamente, sem necessidade de circuitos auxiliares, facilitando o desenvolvimento de sintetizadores. Esses microcontroladores são particularmente atraentes para protótipos de sintetizadores, pois oferecem alta capacidade de processamento, mantendo a simplicidade de implementação [4]. A combinação desses microcontroladores com sensores MEMS cria uma plataforma útil para a síntese musical baseada em gestos.

Neste contexto, o presente TCC propõe-se a desenvolver um protótipo de sintetizador musical. O objetivo geral é desenvolver um dispositivo de síntese de áudio, utilizando microcontroladores com tecnologia DAC para gerar sons e uma interface de comunicação via rádio que permita a comunicação entre dispositivos. Foi utilizada uma luva sensorizada real [18], capaz de transmitir dados de movimento via rádio. O sistema desenvolvido interpreta esses dados e gera notas musicais correspondentes por meio de sinais analógicos produzidos pela saída DAC do microcontrolador. Além disso, foi implementada uma interface interativa com display LCD e botões físicos, permitindo ajustes de parâmetros sonoros e visualização dos dados recebidos.

Como objetivos específicos, este trabalho visou:

- Apresentar os principais conceitos de síntese musical;
- Projetar o circuito eletrônico do protótipo;
- Implementar o firmware com controle de conexão, timbre e volume;
- Validar o funcionamento do sistema com uma luva sensorizada.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na seção II, são apresentados os fundamentos teóricos que embasam o projeto; na seção III, descreve-se a proposta do sistema, seus elementos e o funcionamento geral; na seção IV, detalha-se o processo de implementação e testes realizados; por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Princípios fundamentais da síntese de áudio.

A síntese de áudio é uma parte fundamental da música eletrônica, utilizando recursos eletrônicos para criar sons e produzir uma ampla gama de tons e padrões de som. Esse processo de síntese, se conecta às abordagens estudadas pela Acústica, que examina os fenômenos sonoros, e pela Música, que os considera como forma de arte.

Som é o termo usado para descrever as flutuações na pressão do ambiente. O som é um tipo de energia que se propaga através de qualquer substância e é detectado pelo sistema auditivo. Para que isto aconteça, é necessária uma onda mecânica longitudinal, cujas frequências estão dentro do intervalo audível humano, entre 20 Hz e 20 kHz [5]. Desta forma, pode-se dizer que a onda sonora, como um fenômeno físico, possui quatro características essenciais: amplitude, timbre, intensidade e duração. A amplitude está relacionada à frequência da onda sonora, determinando a percepção do som como agudo ou grave. Na notação musical, notas mais altas representam frequências maiores [6]. O timbre tem a ver com a disposição das harmônicas em uma onda sonora. O timbre permite distinguir entre sons emitidos por diferentes instrumentos, mesmo que tenham a mesma frequência fundamental [5]. A intensidade sonora é quantificada em Watts por metro quadrado (W/m^2), esta serve como medida da magnitude da onda sonora, o que é chamado comumente de volume.

A dinâmica musical usa símbolos para indicar variações na intensidade, como pp, p, mp, mf, f e ff, indicam, em italiano, sons, respectivamente, *pianíssimo* (muito fraco), *piano* (fraco), *mezzo piano* (moderadamente fraco), *mezzo forte* (moderadamente intenso), *forte* (intenso) e *fortíssimo* (muito intenso) [5]. Finalmente, a duração refere-se ao período de tempo durante o qual o som persiste [6]. A duração das notas é representada por figuras musicais que indicam padrões de duração do som e do silêncio. As relações entre diferentes figuras são baseadas em proporções fixas [5].

B. Sintetizadores

Um sintetizador eletrônico é um dispositivo composto por várias partes essenciais que trabalham em conjunto para criar e controlar sons. Essas partes incluem osciladores, controladores, sequenciadores e o protocolo MIDI (Interface Digital de Instrumentos Musicais). Os osciladores são responsáveis por gerar sinais de áudio com diferentes formas de onda, como senoidal, triangular, dente de serra e quadrada. Esses sinais servem como base para a criação dos sons.

Por outro lado, os controladores são dispositivos que permitem que o músico interaja com o sintetizador, seja através de um teclado, fitas, placas sensíveis ao toque ou outros

meios. Eles captam os movimentos e gestos do músico para controlar parâmetros como tom, volume e timbre. Além dos controladores, encontram-se os sequenciadores, que são módulos que permitem gravar e reproduzir sequências de notas, criando padrões musicais repetitivos. Eles podem ser programados para controlar a ordem e a duração das notas, proporcionando uma variedade de possibilidades musicais. Por fim, o MIDI é um protocolo de comunicação que permite a interconexão entre diferentes instrumentos musicais eletrônicos. Ele transmite informações como notas, dinâmica e controle de parâmetros entre dispositivos compatíveis com MIDI, facilitando a integração e o controle de vários equipamentos musicais [7].

Além disso, os sintetizadores utilizam diferentes tipos de síntese de áudio para criar sons. Alguns dos tipos mais comuns incluem:

- Síntese Subtrativa: é um método que começa com uma onda rica em harmônicos, como uma onda dente de serra ou quadrada. Esta onda passa por filtros que removem (ou subtraem) frequências específicas, moldando o som final. É amplamente utilizada em sintetizadores analógicos clássicos (anos 60-70). Eles soavam dessa maneira porque os harmônicos de dente de serra, pulso ou ondas quadradas eram atenuados com um filtro passa-baixa ressonante controlado por tensão [8].
- Síntese Aditiva: Consiste na criação de sons ou formas de onda complexas ao combinar ondas senoidais simples. Cada senoide representa uma harmônica do som final, permitindo uma construção complexa de timbres. É possível recriar essas formas de onda usando múltiplos osciladores, amplificadores controlados por voltagem (VCAs), e um mixer [9].
- Síntese FM (modulação de frequência): é um método de criação de sons complexos ao modular a frequência de uma onda (portadora) com outra onda (moduladora), resultando em uma terceira onda mais complexa [10].

C. Módulos de rádio

Os módulos de rádio são dispositivos que permitem a comunicação sem fio entre diferentes equipamentos, utilizando ondas de rádio como meio de transmissão. Eles são amplamente utilizados em aplicações de Internet das Coisas (IoT), sistemas de controle remoto, e em projetos de automação devido à sua capacidade de transmitir dados a longas distâncias com baixo consumo de energia [11]. Os módulos de rádio operam por meio de transmissões de ondas eletromagnéticas, que codificam os dados digitais em sinais de rádio. Esses sinais são então transmitidos através do ar e capturados por outro módulo receptor, que decodifica o sinal e extrai os dados [12]. Para este tipo de comunicação, é necessário codificar e decodificar a informação a ser transmitida. Para isto utiliza-se um processo de modulação e demodulação: A modulação é o processo de converter os dados em um sinal de rádio. Existem diferentes técnicas de modulação (como AM, FM, FSK, PSK) que são utilizadas dependendo do módulo. A demodulação é o processo inverso, onde o receptor converte

o sinal de rádio de volta em dados digitais [11]. Os dois tipos mais comuns de modulação são a Modulação por Amplitude (AM) e a Modulação por Frequência (FM). Na modulação por amplitude, uma onda portadora com frequência fixa tem sua amplitude variada de acordo com o sinal de mensagem. Em contraste, na modulação por frequência, a frequência da onda portadora é alterada de acordo com o sinal de mensagem, enquanto a amplitude da onda portadora permanece constante. Os sinais FM são menos suscetíveis a ruídos e interferências externas, pois esses ruídos tendem a afetar a amplitude da onda portadora, enquanto a modulação de frequência é menos afetada por tais variações [12].

D. Protocolo Modbus

O Modbus é um protocolo de padrão aberto, amplamente adotado em ambientes industriais e comerciais devido à sua simplicidade, eficiência e flexibilidade na comunicação entre dispositivos diversos, como sensores, controladores e atuadores.

O Modbus opera em um modelo mestre-escravo [15], permitindo que um dispositivo mestre inicie consultas a dispositivos escravos, que respondam aos dados solicitados ou executem ações específicas. Este modelo possibilita a leitura e escrita de dados de forma sequencial e organizada, utilizando registros numéricos que são facilmente interpretados pelos dispositivos envolvidos.

O Modbus apresenta diferentes modos de transmissão, sendo os principais o Modbus RTU (Remote Terminal Unit) e o Modbus TCP/IP [15].

- O formato RTU é amplamente utilizado. Geralmente, é usada uma interface serial padrão RS-232 ou RS-485. A estrutura de uma mensagem RTU é composta por um código de dispositivo, uma função a ser executada, dados específicos e um código de verificação de erro (CRC) para garantir a integridade da comunicação.
- No caso do Modbus TCP/IP, a comunicação é realizada por meio de redes Ethernet, utilizando o modelo TCP/IP para a transmissão de pacotes de dados. A mensagem é composta por um identificador de transação, um identificador de protocolo, o comprimento da mensagem, um identificador de unidade para o dispositivo, o código da função a ser executada e dados específicos. O Modbus TCP/IP não utiliza CRC, pois a verificação de integridade é realizada pelo próprio protocolo TCP/IP, que já inclui checagem de erro.

Uma característica central do protocolo Modbus é sua organização em funções numeradas, que definem operações específicas. As funções incluem leitura de registros, escrita de valores, leitura de entradas digitais e analógicas, entre outras. Na Tabela I são apresentados alguns exemplos das funções mais utilizadas. As mensagens Modbus seguem um formato padronizado, o que facilita sua interpretação e implementação.

E. Conversores Digital-Analógicos (DACs)

Conversores Digital-Analógicos (DACs) são dispositivos que convertem sinais digitais em sinais analógicos. Os si-

Tabela I
PRINCIPAIS FUNÇÕES DO MODBUS

Código da Função	Nome da Função	Descrição
01	Read Coils	Leitura do estado de saídas digitais
02	Read Discrete Inputs	Leitura do estado de entradas digitais
03	Read Holding Registers	Leitura de registros de memória
04	Read Input Registers	Leitura de registros de entrada analógica
05	Write Single Coil	Escrita no estado de uma única saída digital
06	Write Single Register	Escrita de um valor em um registro de memória
15	Write Multiple Coils	Escrita no estado de múltiplas saídas digitais
16	Write Multiple Registers	Escrita de valores em múltiplos registros de memória

nais analógicos são características da maioria dos fenômenos físicos. Estes conversores são usados geralmente para transformar dados de linguagem de máquina de volta para variáveis do mundo físico para controle, exibição de informações ou processamento analógico adicional. O processo de conversão digital-analógica geralmente envolve várias etapas fundamentais. Primeiramente, o DAC recebe um sinal digital, que é composto por valores binários representando a amplitude desejada do sinal analógico em pontos discretos no tempo. A saída do DAC, que resulta da conversão digital para analógica, pode ser na forma de uma tensão ou uma corrente. Existem diferentes arquiteturas para realizar essa conversão:

- DAC de String (Kelvin Divider): Esta arquitetura é comumente utilizada para conversão em tensão. O DAC de string é composto por uma série de resistores conectados em cadeia e interruptores que se ativam para selecionar a posição apropriada na cadeia de resistores. Quando um valor digital é aplicado, o DAC de string gera uma tensão proporcional a esse valor digital na saída. A precisão e a linearidade da tensão gerada dependem da precisão dos resistores e da correta comutação dos interruptores [13]. Esta arquitetura pode ser visualizada na Figura 1.
- DAC de Termômetro: Utilizado principalmente para conversão em corrente. A arquitetura de termômetro emprega várias fontes de corrente comutáveis. Cada fonte de corrente é ativada ou desativada conforme o valor digital, e as correntes são somadas para produzir uma saída de corrente total. Esta corrente pode então ser convertida em uma tensão ajustada com base no valor digital. Os DACs de termômetro são conhecidos por sua alta precisão e linearidade, pois a comutação das correntes resulta em uma saída que é proporcional ao valor digital aplicado, sem transientes indesejados ou ruídos significativos [13], esta arquitetura pode ser visualizada na Figura 2.

Após a conversão digital para analógica, o sinal analógico

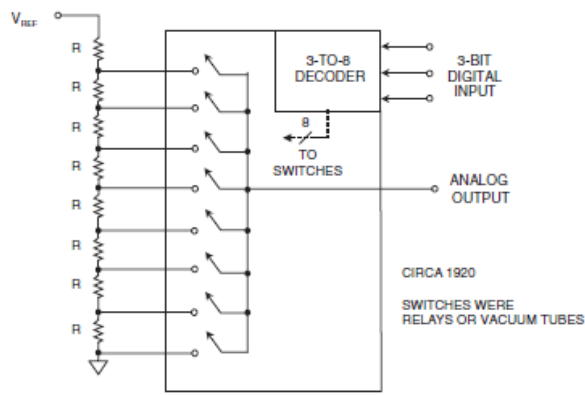


Figura 1. Conversor de tensão modelo resistores. Adaptado de: "The Data Conversion Handbook" [13]

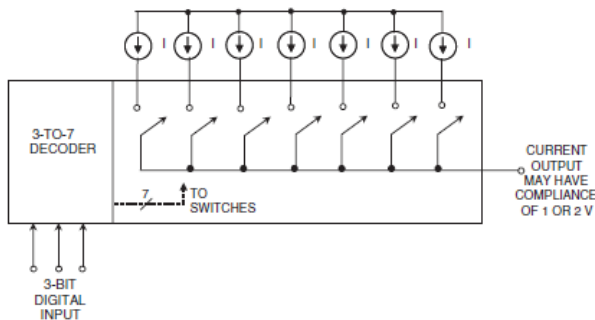


Figura 2. Conversor de corrente modelo fonte de corrente. Adaptado de: "The Data Conversion Handbook" [13]

geralmente necessita ser suavizado usando um filtro passa-baixa, para reduzir a forma de onda de escada resultante e criar uma saída analógica contínua [13].

F. Exemplo de sintetizador



Figura 3. Sintetizador MiniMoog. Adaptado de: www.teclacenter.com.br [19]

O MiniMoog, lançado em 1970 por Robert Moog, é um dos sintetizadores analógicos mais icônicos. Ele está representado na Figura 3. Este sintetizador utiliza um processo chamado síntese subtrativa para criar sons complexos [14]. Os principais componentes do MiniMoog são osciladores controlados por tensão (VCOs), um filtro e um amplificador. Também

é composto por um oscilador de modulação (LFO), que não é o componente principal, mas adiciona funcionalidades. Suas funcionalidades podem ser visualizadas na Figura 4. O MiniMoog possui três VCOs que geram formas de onda básicas como serra, triangular e quadrada. Esses osciladores fornecem o material sonoro inicial que será moldado e ajustado ao longo do processo, com cada forma de onda podendo ser mixada e ajustada individualmente, assim como configurada em diferentes frequências ou harmônicos. Em seguida, o som é processado por um filtro de baixa frequência de 24 dB por oitava, que atenua ou enfatiza certas frequências e é responsável por criar o som característico do MiniMoog. Esse filtro possui controles de frequência de corte e ressonância, permitindo moldar o som de maneiras distintas e adicionando flexibilidade ao timbre gerado.

Na etapa seguinte, o amplificador ajusta a amplitude (volume) do som, podendo também ser modulado para criar variações dinâmicas que controlam o volume geral da saída do sintetizador. Por fim, o oscilador de modulação de Baixa Frequência (LFO) entra em ação, sendo utilizado para aplicações como vibrato, enquanto as rodas de pitch-bend e modulação fornecem mais expressividade durante a performance [14].

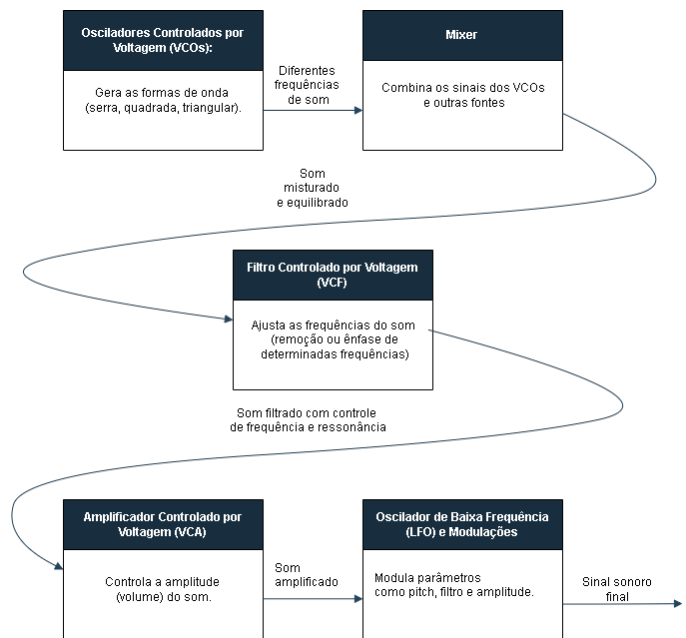


Figura 4. Diagrama do sintetizador. Elaborado pela autora, com base em "Esquema MiniMoog" [14].

G. Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos vêm explorando a utilização de sensores de movimento combinados com plataformas de prototipagem para aplicações musicais. Numa monografia de conclusão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná [20], os autores desenvolveram um sistema de controle musical utilizando sensores conectados a um Arduino, capaz de traduzir movimentos em comandos sonoros em tempo real. A proposta é similar

à deste trabalho, principalmente no uso de sensores como interface de controle, mas difere na ausência de comunicação sem fio e no uso de saídas PWM para geração de som.

Outro exemplo é apresentado do Instituto Federal do Rio Grande do Sul [18], onde uma luva sensorizada equipada com acelerômetro e giroscópio foi implementada para detectar gestos e enviar dados via rádio. Embora o foco do trabalho tenha sido a construção da luva, o presente projeto aproveita essa interface física e propõe um sistema completo de sintetizador musical.

Esses estudos reforçam a viabilidade técnica e a relevância de pesquisas que unem sensores, microcontroladores e música, e mostram que o presente trabalho se insere em um campo de investigação promissor, ao propor uma solução completa, flexível e compatível com diferentes interfaces físicas.

III. PROPOSTA

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de sintetizador musical com comunicação sem fio, capaz de receber e interpretar sinais enviados via rádio e transformá-los em sons correspondentes. O sistema apresenta uma arquitetura modular e flexível, que permite a integração com diferentes dispositivos de entrada, como uma luva sensorizada baseada em sensores MEMS.

É utilizada uma luva sensorizada real, desenvolvida previamente no Trabalho de Conclusão de Curso de Leonardo Bet [18], a qual já se encontra funcional. Essa decisão permite validar o funcionamento do sistema com dados reais de movimento, aproximando os testes do cenário de uso final. A luva conta com um sensor MPU6050 (acelerômetro e giroscópio) e envia os dados de movimento via rádio, utilizando o módulo nRF24L01.

O sistema é composto por um microcontrolador com saída DAC integrada, um módulo de comunicação sem fio nRF24L01, um circuito de amplificação com LM386, uma interface de usuário com display LCD e botões, e uma placa de circuito impresso projetada para integrar todos os componentes de forma organizada. O sintetizador atua como mestre na comunicação Modbus RTU via rádio, requisitando dados de movimento da luva sensorizada, que responde como escrava. Os dados recebidos são processados pelo firmware do microcontrolador, que converte os movimentos em notas musicais reproduzidas pela saída DAC. A estrutura básica do projeto pode ser visualizada na Fig. 5.

1) *Desenvolvimento do Sintetizador:* O desenvolvimento do circuito do sintetizador está baseado na plataforma Arduino UNO R4 Mínima, escolhido por possuir um conversor DAC. A arquitetura do sintetizador é modular, permitindo ajustes futuros e expansões conforme novas interfaces de controle sejam desenvolvidas. Para permitir esta modularidade, é projetado um *Shield* dedicado para a plataforma utilizada, que comporta todos os componentes eletrônicos necessários para o funcionamento do sintetizador, incluindo os circuitos de interface de usuário e os conectores para entrada e saída de sinais. Para amplificação do sinal de áudio gerado, é utilizado um circuito de amplificação baseado no CI LM386. Para

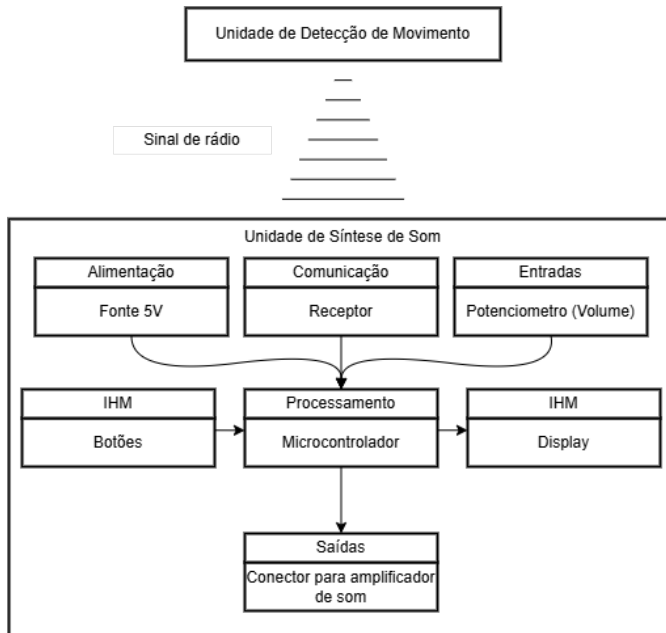


Figura 5. Diagrama do projeto. Elaborado pela autora.

permitir configurações como volume e controle de parâmetros sonoros (como timbre e intensidade), o shield projetado apresenta conectores para botões, que possibilitam a interação do usuário com a plataforma, configurando os efeitos sonoros em tempo real. Quanto à fonte de alimentação, o circuito inclui um sistema de conexão com uma fonte externa, garantindo a operação estável do sistema mesmo com o consumo adicional dos periféricos conectados. A interface de usuário é composta por um display LCD 16x2 com comunicação I2C e três botões que permitem navegar por um menu de opções.

2) *Implementação do Sistema de Comunicação Sem Fio:* O sistema de comunicação é implementado utilizando o módulo de rádio nRF24L01. Este módulo pode ser visualizado na figura 6. O microcontrolador é programado para receber e interpretar esses sinais, transformando-os em comandos que o sintetizador conseguirá processar imediatamente.

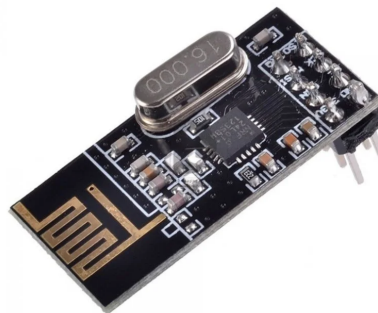


Figura 6. Módulo de comunicação de radiofrequência nRF24L01. Adaptado de: www.baudaeletronica.com.br.

O protocolo escolhido para a comunicação é o Modbus,

que permite seu uso com o módulo de Rádio. O Modbus é um protocolo amplamente documentado e suportado por uma vasta gama de microcontroladores e plataformas. Isso facilita a implementação, reduz o tempo de desenvolvimento e simplifica a depuração, pois há muitas bibliotecas prontas que podem ser usadas para gerenciar a comunicação, leitura e transmissão de dados.

No contexto do projeto, o sintetizador atua como o mestre na comunicação Modbus, enquanto a luva sensorizada funciona como o escravo. Isso significa que o sintetizador envia requisições para a luva, que, por sua vez, responde com os dados de movimento capturados. Essa configuração permite uma organização clara da comunicação e garante que o sintetizador possa controlar e interpretar os sinais de forma eficaz.

Tabela II
ESTRUTURA DO QUADRO MODBUS

Campo	Tamanho (bytes)	Descrição
Requisição		
Endereço	1	Identifica o escravo
Código de Função	1	Código que identifica a leitura dos dados dos sensores.
Endereço Inicial	2	Identifica o registrador inicial.
Quantidade de Registradores	2	Quantidade de registradores a serem lidos.
Soma de verificação (CRC16)	2	Verificação de integridade para garantir a confiabilidade dos dados.
Resposta		
Endereço	1	Identifica o escravo.
Código de Função	1	Código que identifica a leitura dos dados dos sensores.
Número de bytes	1	Quantidade de bytes enviados.
Aceleração X	2	Valor de aceleração no eixo X (16 bits, complemento de dois).
Aceleração Y	2	Valor de aceleração no eixo Y (16 bits, complemento de dois).
Aceleração Z	2	Valor de aceleração no eixo Z (16 bits, complemento de dois).
Rotação X	2	Valor de rotação no eixo X (16 bits, complemento de dois).
Rotação Y	2	Valor de rotação no eixo Y (16 bits, complemento de dois).
Rotação Z	2	Valor de rotação no eixo Z (16 bits, complemento de dois).
Soma de verificação (CRC16)	2	Verificação de integridade para garantir a confiabilidade dos dados.

O quadro Modbus transmite os valores dos sensores de variação de movimento e rotação (acelerômetros e giroscópios) capturados pela unidade de detecção de movimento. Cada quadro de dados é estruturado conforme a especificação do Modbus RTU e adaptado para comunicação sem fio. A estrutura do quadro está apresentada na Tabela II.

O endereço do escravo varia de 1 a 4, e é utilizada exclusivamente a função 4. A função 4 do protocolo Modbus, denominada "Read Input Registers" (leitura de registradores de

entrada), é empregada para acessar registradores que armazenam valores coletados por sensores. Essa função é indicada para leituras contínuas e atualizadas em tempo real, como é o caso das informações provenientes dos sensores de aceleração e rotação. O registrador inicial adotado é o 0, que armazena o valor de aceleração no eixo X (16 bits). Os valores dos eixos Y e Z são armazenados nos registradores subsequentes, seguidos pelas rotações nos eixos X, Y e Z, conforme captadas pelo giroscópio.

3) *Integração com a Luva Sensorizada:* A luva do projeto original pode ser visualizada na figura 7. A integração com a luva sensorizada real será descrita na seção de implementação IV.



Figura 7. Luva sensorizada. Adaptado de: "Desenvolvimento de uma luva para captura de gestos com comunicação sem fio." [18]

4) *Desenvolvimento do programa do Sintetizador:* O microcontrolador é programado para processar os sinais de movimento e rotação recebidos da luva sensorizada, aplicando algoritmos que interpretam esses valores e os convertem em comandos sonoros. Um algoritmo interno converte os dados recebidos em sinais elétricos correspondentes às notas musicais, que são então gerados pela saída DAC.

O software é desenvolvido com flexibilidade para permitir ao usuário configurar parâmetros como o timbre e o volume das notas geradas, proporcionando uma experiência sonora variada. Um menu de navegação organiza as funcionalidades disponíveis:

- **Conectar Dispositivo:** Permite que o usuário escolha entre 4 dispositivos de entrada diferentes, dependendo do endereço configurado no dispositivo escravo.
- **Exibir Dados de Movimento:** Exibe a nota musical correspondente ao movimento.
- **Ajustes de Parâmetros Sonoros:** Permite que o usuário ajuste configurações como:
Timbre : Seleção de formas de onda (senoidal, quadrada, triangular, serra e ruído branco).
Volume : Ajuste da intensidade da nota musical gerada.
- **Sair:** Entra em modo Stand-by, desativando todas as funcionalidades, exceto a leitura da tecla ON-OFF.

Para transformar os movimentos capturados em notas musicais, é definida uma relação entre os dados dos sensores e a nota

correspondente. Um exemplo de mapeamento é apresentado na Tabela III.

Tabela III
RELAÇÃO MOVIMENTO - NOTA EMITIDA

Movimento	Nota Correspondente	Interpretação de Dados Recebidos
Para a Frente	Nota Dó	Aceleração positiva no eixo Y.
Para Trás	Nota Ré	Aceleração negativa no eixo Y.
Para a Direita	Nota Mi	Aceleração positiva no eixo X.
Para a Esquerda	Nota Fá	Aceleração negativa no eixo X.
Rotação Horária	Nota Sol	Rotação positiva no eixo Z.
Rotação Anti-Horária	Nota Lá	Rotação negativa no eixo Z.
Para cima	Nota Sí	Aceleração positiva no eixo Z.
Para Baixo	STOP	Aceleração negativa no eixo Z.

As frequências das notas a serem geradas no sintetizador seguem o padrão internacional da escala temperada [17], que define valores precisos para cada nota. As frequências utilizadas são mostradas na Tabela IV.

Tabela IV
RELAÇÃO MOVIMENTO - NOTA EMITIDA

Nota	Frequência (Hz)
Dó (C2)	65.41
Ré (D2)	73.42
Mi (E2)	82.41
Fá (F2)	87.31
Sol (G2)	98.00
Lá (A2)	110.00
Sí (B2)	123.47

A estrutura do programa compreende as seguintes etapas:

- **Inicialização:** Na inicialização, são configurados os pinos de entrada e saída, parâmetros de comunicação (como baudrate) e inicialização do display. Além disso, os registradores do Modbus são configurados conforme necessário para a comunicação.
- **Leitura Contínua de Dados:** No loop principal, o microcontrolador lê continuamente os dados de movimento requisitados do dispositivo de captura de movimento. A leitura constante permite que o programa monitore em tempo real as variações de aceleração e rotação, determinando qual nota deve ser tocada.
- **Processamento de Dados:** Durante a leitura contínua, o programa executa as seguintes etapas: A leitura dos dados de aceleração e rotação. E depois executa o mapeamento que transforma os dados de movimento para nota. O movimento é mapeado para uma nota musical com base nos limites definidos para cada eixo, garantindo que o movimento correspondente toque a nota desejada.
- **Geração de Sinal de Áudio:** O firmware usa a saída DAC para gerar a nota musical correspondente ao movimento detectado. Cada nota é associada a uma frequência

específica e a geração do sinal é controlada por uma interrupção temporizada para manter a prioridade de funcionamento na geração correta dos sons.

- **Atualização do Display:** Durante a execução do firmware, o display é atualizado para exibir os valores dos sensores e a nota tocada, permitindo que o usuário monitore o funcionamento do sistema.
- **Interação com o Usuário:** A navegação no menu é feita por meio de botões, permitindo ajustes nos parâmetros sonoros, seleção de dispositivos de entrada e acesso a informações de movimento.

Nas Figuras 8 e 9 encontra-se um fluxograma do funcionamento do programa.

A geração do sinal de áudio é feita por um oscilador digital, controlado por interrupções do timer do microcontrolador. O sinal correspondente a cada nota é enviado à saída DAC, garantindo fidelidade e precisão.

O funcionamento detalhado da geração do sinal — que envolve o uso de um vetor com os valores discretizados da forma de onda e o controle por um acumulador de fase — é apresentado na subseção IV-D2.

Essa estrutura permite que o sintetizador gere sinais com frequência ajustável, boa estabilidade e baixa carga de processamento. Além disso, facilita a troca entre diferentes formas de onda (senoidal, triangular, etc.), conforme configurado pelo usuário no menu do sistema.

5) *Testes e Validação:* A última etapa do projeto envolve a validação prática do protótipo com a luva sensorizada real. Os testes foram realizados com foco em três aspectos principais:

- **Estabilidade da comunicação:** Verificou-se se os quadros Modbus foram recebidos de forma contínua e sem perdas, garantindo a confiabilidade da comunicação sem fio.
- **As formas de onda geradas pelo DAC foram observadas em um osciloscópio e comparadas com os formatos teóricos esperados (senoidal, triangular, quadrada, serra e ruído branco), confirmando que a reprodução das notas musicais estava conforme o esperado.**
- **Correlação gesto-nota:** Durante os testes com a luva, foi possível validar que diferentes gestos realizados com a mão correspondiam de forma consistente a diferentes notas musicais.

IV. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Com base na proposta apresentada e o diagrama da figura 10, a implementação do sistema seguiu a arquitetura modular descrita, detalhada a seguir.

A. Seleção de Componentes

Foram feitas pesquisas para definir os componentes mais adequados para o projeto, priorizando fatores como compatibilidade, facilidade de programação e suporte ao protocolo Modbus. Dois componentes principais foram selecionados:

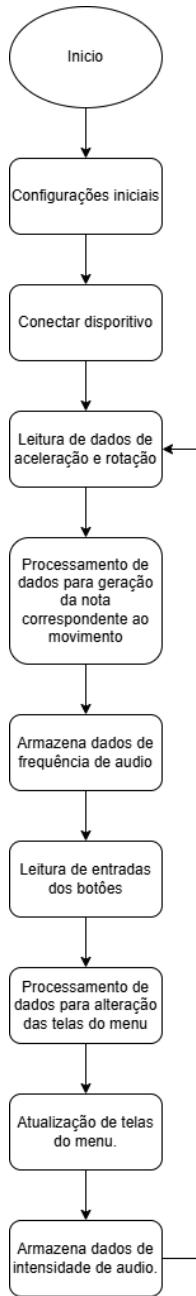


Figura 8. Fluxograma principal do programa do sintetizador. Elaborado pela autora.

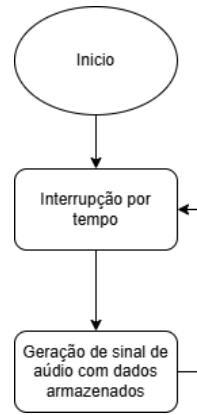


Figura 9. Fluxograma da interrupção do programa do sintetizador. Elaborado pela autora.

- **Arduino R4 Mínima:** Este modelo foi escolhido, sobretudo, pelo módulo DAC integrado, permitindo a geração de sinais analógicos diretamente. Essa característica é particularmente útil para o projeto de áudio, pois elimina a necessidade de um DAC externo, simplificando o design e permitindo melhor controle de saída sonora. O Arduino UNO R4 Mínima também se destaca por utilizar o microcontrolador Renesas RA4M1, que tem um alto poder de processamento. Esse microcontrolador possui um processador de 32 bit e uma unidade de cálculo de ponto flutuante, que permite operações rápidas e complexas, o que é uma vantagem em projetos que demandam um processamento contínuo de dados. Além disso, o Arduino UNO R4 Mínima opera a 48 MHz, em comparação com modelos anteriores como o UNO R3 que operam em 16,0 MHz. Essa frequência permite tempos de resposta mais rápidos e menor latência na execução de tarefas, o que viabiliza o processamento em tempo real de sinais para controle de áudio [4].
- **nRF24L01-Shield:** A plataforma Arduino oferece compatibilidade com diversos shields, incluindo o shield de rádio nRF24L01, selecionado para o projeto. Esta compatibilidade permite a fácil integração de módulos adicionais, como o rádio, essencial para a comunicação sem fio entre o sintetizador e outros dispositivos [4]. O módulo de rádio nRF24L01-Shield foi selecionado para este projeto devido à sua alta eficiência em comunicações sem fio de baixa potência e baixa latência. Esse módulo é adequado para aplicações que requerem troca rápida de dados em tempo real, como é o caso do sintetizador musical, que depende de respostas imediatas aos comandos enviados pelo dispositivo de controle. Além disso, o nRF24L01-Shield é o mesmo dispositivo utilizado no projeto desenvolvido em [18], o que facilitará a integração futura entre os dois projetos. Essa compatibilidade simplifica a comunicação entre o sintetizador e a luva, garantindo um funcionamento eficiente e coordenado. O nRF24L01 opera na faixa de 2,4 GHz e possui taxas de transferência de até 2 Mbps, o que assegura um fluxo

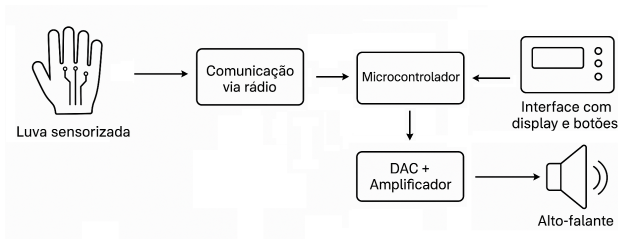


Figura 10. Diagrama em blocos representando o funcionamento geral do sistema. Elaborado pela autora.

de dados consistente e rápido, minimizando atrasos. Por fim, a escolha do nRF24L01 também se deve à sua compatibilidade com o Arduino UNO R4 Mínima através do shield, facilitando a integração física e a programação do módulo com o microcontrolador. Isso simplifica o desenvolvimento e garante uma comunicação estável com o mínimo de componentes adicionais. [16]

B. Montagem do Hardware

A arquitetura do sistema foi desenvolvida inicialmente em uma placa padrão (protoboard e posteriormente uma placa universal), com o objetivo de facilitar os testes, correções e ajustes durante o processo de prototipagem. Essa abordagem permitiu validar o funcionamento de cada módulo eletrônico de forma prática e iterativa, antes da consolidação do circuito completo. Durante essa etapa, foram enfrentados desafios especialmente relacionados ao áudio — como ruído na saída amplificada — e à comunicação sem fio, o que reforçou a importância de concluir um protótipo funcional e estável antes de qualquer tentativa de integração definitiva em hardware dedicado.

O circuito final foi então representado em forma de esquemático eletrônico utilizando o software Eagle, apresentado na Figura 11. Essa representação permitiu organizar logicamente os componentes e facilitar eventuais reproduções futuras. Para uma visão mais detalhada, o esquemático completo pode ser consultado no Anexo A. A montagem física do hardware está ilustrada nas Figuras 12 e 13. Na parte frontal observa-se o display LCD 16x2 com comunicação I2C, os três botões de navegação, o amplificador LM386 e o módulo de comunicação sem fio nRF24L01. Na parte traseira, é possível ver as conexões soldadas manualmente e o encaixe do Arduino UNO R4 Mínima, que serve como unidade central de controle. Durante a prototipagem, observou-se que a disposição dos componentes influenciava diretamente na usabilidade. A posição inicial do display na parte inferior e dos botões na parte superior comprometeu a ergonomia e a visualização das informações. Para versões futuras, considera-se mais apropriado posicionar o display na parte superior e os botões logo abaixo, facilitando a interação com o usuário. Também surgiram limitações de espaço e de layout ao tentar acomodar todos os módulos necessários em um shield com as dimensões do Arduino UNO R4 Minima. Essa restrição motivou a decisão de abandonar o projeto original do shield e partir para o desenvolvimento de uma placa de circuito ampliada, capaz de integrar todos os elementos do sistema de forma mais organizada, funcional e definitiva.

1) *Amplificador de Áudio com LM386*: A etapa de maior complexidade na montagem foi o módulo amplificador de áudio, responsável por amplificar o sinal senoidal gerado no DAC. Inicialmente, a forma de onda observada diretamente no DAC era estável e correta. No entanto, ao conectar o módulo LM386, a saída começou a apresentar cortes, distorções e instabilidades.

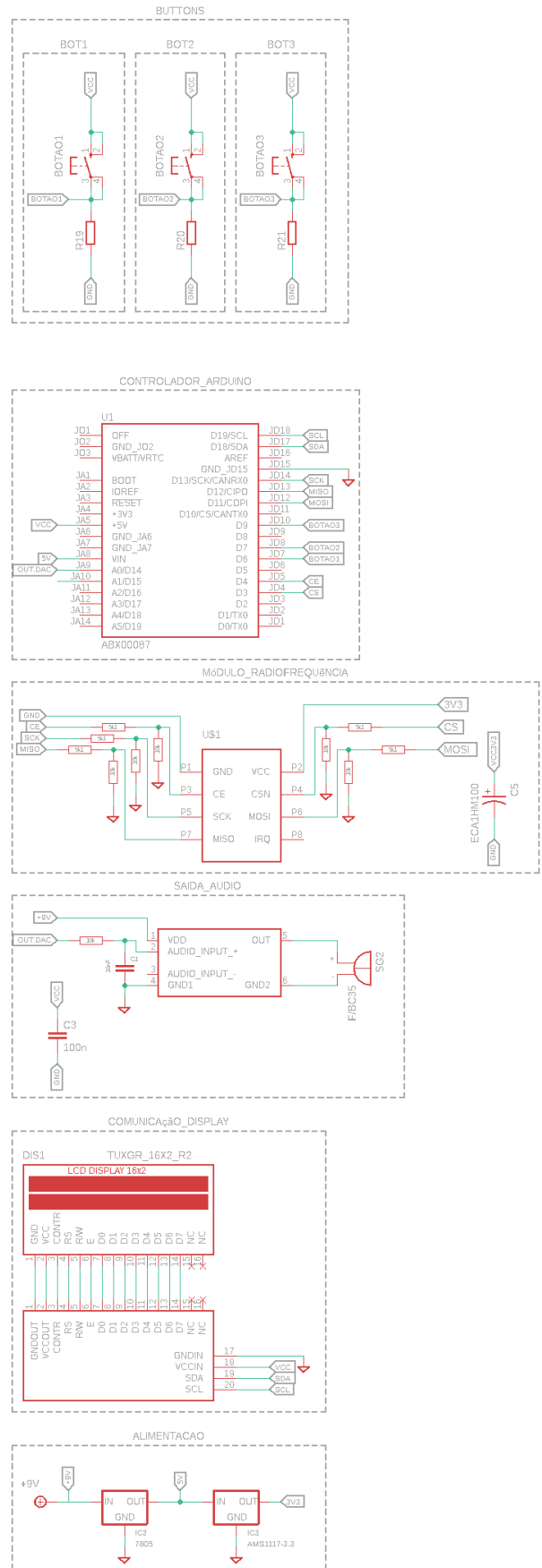


Figura 11. Desenho esquemático.

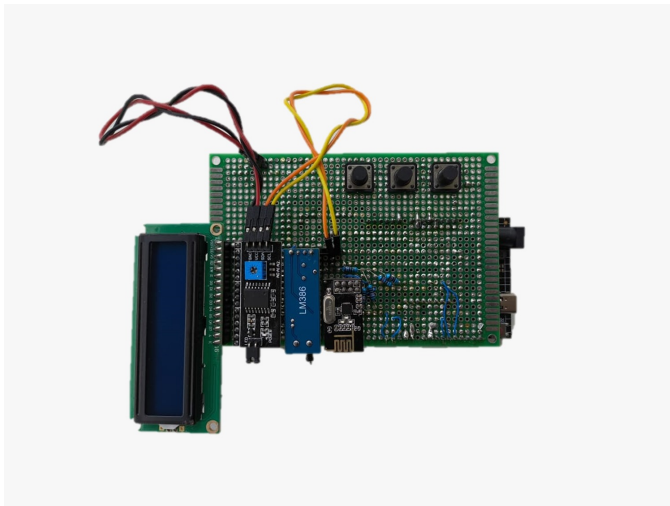


Figura 12. Vista frontal do protótipo montado em placa padrão, com display LCD, amplificador LM386, módulo nRF24L01 e três botões de navegação.

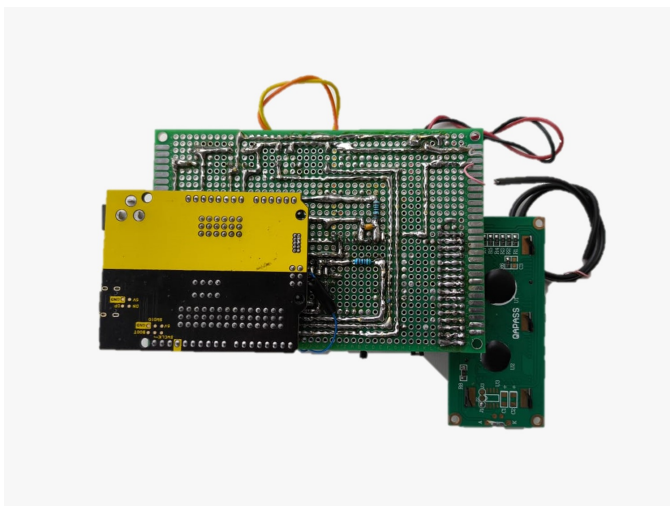


Figura 13. Vista traseira da placa padrão, com soldagens manuais das conexões dos componentes e encaixe do Arduino UNO R4 Mínima.

Esses cortes ocorriam, principalmente, no momento em que o programa executava a interrupção para atualizar o valor da saída DAC. A forma de onda era visivelmente segmentada no osciloscópio, com perdas de continuidade.

Para resolver esse problema, foi inserido um filtro passa-baixa RC entre a saída DAC e a entrada do amplificador. O filtro foi calculado para uma frequência de corte de aproximadamente 15 MHz, utilizando um capacitor de 10 nF e resistor de valor correspondente. Com isso, a forma de onda na entrada do LM386 foi suavizada, eliminando os cortes e ruídos.

Após essa correção, ainda havia um novo problema: a saturação do amplificador. A saída do DAC variava de 0 V a 5 V, o que ultrapassava os limites esperados pela entrada do LM386, resultando em distorção por saturação na saída. A solução foi feita diretamente no firmware: o valor do sinal DAC foi limitado para gerar uma saída entre 0 mV e 150 mV,

o que foi suficiente para excitar o LM386 sem saturá-lo. A partir disso, o amplificador gerava uma saída limpa com amplitude próxima de 9 V, adequada para o alto-falante.

2) *Comunicação sem Fio com nRF24L01*: Para a implementação da comunicação sem fio, foi utilizado o módulo de radiofrequência nRF24L01, que foi alimentado a partir de uma fonte externa conectada à saída de 3,3 V do regulador de tensão, de forma a garantir corrente suficiente para seu funcionamento estável.

Além disso, foram implementados divisores resistivos nos pinos de controle SPI (SCK, MOSI, CSN e CE), uma vez que o microcontrolador opera em 5 V, enquanto os níveis lógicos suportados pelo módulo não devem exceder 3,3 V. Os divisores foram dimensionados com resistores de 5,1 k Ω e 10 k Ω , limitando a tensão dos sinais a níveis seguros e compatíveis com o nRF24L01.

Essas adequações permitiram a integração confiável do módulo de rádio ao sistema, mantendo a comunicação estável mesmo durante longos períodos de operação.

3) *Interface de Usuário e Fontes de Alimentação*: O sistema inclui ainda um display LCD 16x2 com comunicação I2C, e três botões físicos para navegação no menu, ligados aos pinos digitais do Arduino. A alimentação geral do sistema é feita com uma fonte de 9 V, que é regulada para 5 V através de um regulador 7805, e para 3,3 V através de um AMS1117. Essa estrutura garante fontes independentes e estáveis para os diferentes subsistemas.

C. Comunicação Modbus via Rádio

Para a comunicação entre o sintetizador musical e o dispositivo de entrada, foi utilizado o módulo de rádio nRF24L01, operando em conjunto com o protocolo Modbus RTU adaptado para comunicação sem fio. Neste projeto, o sintetizador atua como mestre, enviando requisições Modbus, e a luva sensorizada atua como escrava, respondendo com os dados de movimento capturados.

1) *Integração com a luva sensorizada*: Foi possível integrar ao projeto uma luva sensorizada real, desenvolvida por Leonardo Bet [18], também no contexto de um Trabalho de Conclusão de Curso. Essa luva, equipada com sensores de aceleração e giroscópio, fornece dados reais de movimento em tempo real, tornando a aplicação prática mais completa e realista. Originalmente, a luva enviava quadros com estrutura própria, contendo número da leitura, valores dos eixos (aceleração e rotação) e a tensão lida de um sensor analógico. Para possibilitar a integração com o sintetizador, o firmware da luva foi ajustado para transmitir esses mesmos dados, mas agora encapsulados conforme o formato do protocolo Modbus, com adição do identificador do escravo, código de função, quantidade de dados e CRC, mantendo a compatibilidade com o protocolo utilizado pelo sintetizador. A luva sensorizada [18] foi gentilmente cedida para este projeto. Ela já estava funcional e equipada com sensores de movimento (acelerômetro e giroscópio MPU6050), um microcontrolador ATmega328P (compatível com Arduino Pro Mini), módulo de rádio nRF24L01 e alimentação por pilhas. A Figura 14

apresenta a placa principal da luva utilizada, onde é possível observar os componentes integrados.

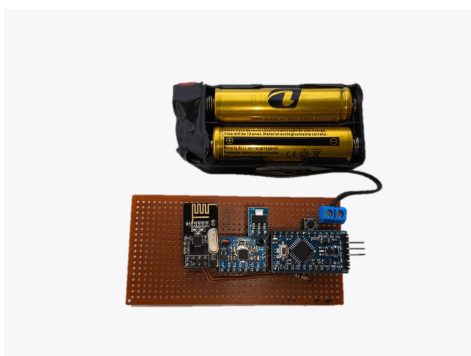


Figura 14. Placa da luva sensorizada utilizada no projeto, com microcontrolador, MPU6050 e módulo nRF24L01.

2) *Ajustes e sincronização:* Durante os testes iniciais, a comunicação apresentava instabilidades, falhas na recepção e travamentos esporádicos. Após análise, identificou-se que o problema estava nos delays presentes no firmware do sintetizador, que bloqueavam o processamento e comprometiam a troca de dados. A remoção desses delays e a reorganização do fluxo principal de execução resolveram o problema, tornando a comunicação via rádio fluida e estável. O sintetizador passou então a enviar requisições constantes à luva, e receber corretamente os quadros contendo aceleração e rotação nos três eixos, além da leitura de tensão — agora organizados conforme os padrões do protocolo Modbus.

A comunicação entre o sintetizador e a luva foi observada diretamente nos monitores seriais de ambos os dispositivos. A Figura 15 mostra o lado do mestre (sintetizador), com a requisição enviada via rádio, a resposta recebida e a interpretação dos dados dos sensores em forma de aceleração e rotação. Já a Figura 16 mostra a resposta gerada no lado da luva sensorizada, evidenciando a estrutura do quadro Modbus construído e os dados codificados. Essas capturas confirmam o funcionamento da comunicação Modbus via rádio de forma fluida e estável.

```
10:32:14.864 -> Requisicao: 1 4 0 0 8 F1 CC
10:32:14.864 -> Tamanho da requisicao: 8
10:32:14.864 -> Requisição enviada
10:32:14.864 -> CRC recebido:4521
10:32:14.899 -> CRC calculado:4521
10:32:14.899 -> Mensagem recebida: 1 4 10 0 1D 7 D8 1 C0 35 44 FE AE FF 16 0 2C 1 D 21 45
10:32:14.899 -> Resposta válida recebida do módulo RF
10:32:14.899 -> Leitura nº: 1025
10:32:14.899 -> Acelerômetro: ax = 16, ay = 1821, az = 472
10:32:14.899 -> Giroscópio: gx = 13760, gy = -444, gz = -82
```

Figura 15. Monitor serial do sintetizador (mestre) exibindo requisições Modbus e os dados de movimento recebidos da luva.

```
10:37:57.342 -> Resposta Modbus válida: 1 4 0 0 8 F1 CC
10:37:57.441 -> Enviando dados para o CLIENTE...
10:37:57.507 -> Resposta Modbus enviada: 1 4 10 1 1C 7 C4 1 CC 35 B4 FE B2 FF 20 0 3E 1 E C0 1C
10:37:58.577 -> 285,2112,568,13624,-330,-249,47
```

Figura 16. Monitor serial da luva sensorizada (escrava) exibindo o processamento da requisição Modbus recebida e a resposta com os dados dos sensores.

3) *Tradução dos dados em notas musicais:* Com os dados recebidos da luva, o sistema realiza uma análise em tempo real para determinar qual movimento foi mais pronunciado. Para isso, é feito o cálculo do delta entre a leitura atual e a anterior de cada uma das seis grandezas (aceleração e rotação em X, Y e Z). O eixo que apresentar a maior variação absoluta é considerado o mais expressivo, e sua direção determina a nota musical que será tocada. Esse método permite interpretar movimentos bruscos com precisão, mantendo a coerência entre gestos físicos e respostas sonoras. Assim, por exemplo, um movimento rápido para frente (aceleração positiva no eixo Y) gera a nota Dó, enquanto uma rotação no sentido horário (rotação positiva no eixo Z) aciona a nota Sol.

D. Geração do Sinal de Áudio (DAC)

A geração do sinal sonoro no sintetizador é realizada por meio do conversor digital-analógico (DAC) integrado ao pino A0 do Arduino UNO R4 Mínima. Com base nos dados recebidos via protocolo Modbus, o sistema determina qual nota musical deve ser reproduzida e gera a forma de onda correspondente, que é enviada ao DAC.

1) *Conversão de nota em frequência:* A partir da análise dos dados de movimento recebidos da luva, o firmware identifica o eixo com maior intensidade de aceleração ou rotação. Para isso, são considerados os valores absolutos das medições nos três eixos de aceleração e nos três eixos do giroscópio, com pesos maiores atribuídos ao giroscópio, especialmente ao eixo de rotação vertical (gz). Com base na direção desse movimento predominante, é determinada uma nota musical. Cada nota é então associada à sua frequência correspondente, por exemplo:

Dó → 261 Hz
Ré → 293 Hz
Mi → 329 Hz

Esses valores seguem a escala temperada padrão, amplamente utilizada em instrumentos musicais modernos. Para este projeto, foi adotada uma única oitava, que abrange as notas de Dó a Si. Essa decisão teve como base três principais fatores:

- Simplicidade na implementação inicial: trabalhar com uma oitava reduz a complexidade no mapeamento entre gestos e sons, permitindo concentrar o desenvolvimento no funcionamento da síntese e da comunicação.
- Limitações práticas do controle por movimento: a luva utilizada permite distinguir um número limitado de gestos com precisão, o que torna mais eficiente e confiável associar cada gesto a uma nota dentro de uma única oitava.
- Objetivo didático e de prototipagem: como o foco do projeto é demonstrar a viabilidade técnica da geração sonora controlada por movimento, uma oitava é suficiente para validar todos os conceitos envolvidos, sem comprometer a funcionalidade principal.

2) *Geração do sinal com acumulador de fase:* A geração do sinal é controlada por um oscilador, que utiliza uma variável acumuladora de fase para controlar a progressão da onda. O acumulador de fase é uma variável que cresce a cada

interrupção do timer, e seu valor define um valor de índice a ser acessado em um vetor. O valor do acumulador de fase é utilizado para acessar um vetor de dados da onda, que contém os valores discretos da forma de onda (senoidal, triangular, etc.). A cada ciclo, o acumulador de fase é atualizado, o que faz o oscilador avançar no vetor de dados, gerando o próximo valor da onda que será enviada ao DAC.

A frequência da nota é controlada pela velocidade com que o acumulador de fase é incrementado. Isso é feito através de uma variável que ajusta a passagem do acumulador, ou seja, quanto maior o valor dessa variável, mais rápido o acumulador de fase avança, o que resulta em uma maior frequência da nota. Assim, ao controlar essa variável, é possível gerar notas musicais de diferentes frequências.

Quando o valor do acumulador de fase atinge um índice que ultrapassa o tamanho do vetor, ele volta ao início do vetor, reiniciando o ciclo da onda, o que permite que a onda seja gerada de forma contínua.

O valor calculado é ajustado para garantir que se encaixe na faixa de 12 bit do DAC (0 a 4095). Esse processo se repete continuamente, gerando uma sequência de notas conforme as interrupções do timer. Dessa forma, o sinal gerado é uma representação das frequências das notas musicais, e o oscilador permite a variação entre as diferentes ondas para gerar o áudio correspondente.

Esse método garante:

- Estabilidade do sinal,
- Frequência ajustável com precisão,
- Facilidade para mudar a forma de onda (senoidal, triangular etc.),
- Baixo uso de CPU, já que a saída é gerada via interrupção.

3) *Resultados no osciloscópio:* Os sinais gerados foram observados no osciloscópio em dois pontos:

Diretamente no pino A0 (DAC): a forma de onda senoidal se mostrou estável e limpa após a aplicação do filtro passa-baixa RC.

Na saída do amplificador LM386: após resolver os problemas de saturação e ajuste de amplitude, a forma de onda se manteve senoidal, com ganho suficiente para excitar um alto-falante com tensão de pico a pico de até 9 V.

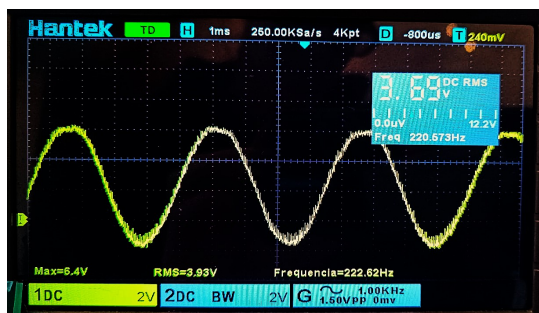


Figura 17. Forma de onda senoidal na saída do amplificador LM386.

A Figura 17 exhibe a forma de onda senoidal gerada pelo sintetizador musical na saída do circuito amplificador LM386.

A forma de onda apresenta boa estabilidade e baixa distorção, evidenciando a eficácia da filtragem passa-baixa implementada entre o DAC e o amplificador.

A troca de notas musicais em resposta a novos movimentos foi confirmada por meio de medições no osciloscópio. A cada gesto detectado, o sistema atualiza a frequência do sinal gerado, o que pode ser observado visualmente nas formas de onda exibidas. A Figura 18 mostra a nota Lá sendo tocada com uma frequência de 442 Hz, enquanto a Figura 19 exhibe a nota Ré com uma frequência de 297 Hz. Essas figuras ilustram claramente a variação de frequência ao alternar entre diferentes gestos, mantendo a qualidade do sinal.

Graças ao uso do filtro passa-baixa e à geração do sinal por meio de um acumulador de fase, a forma de onda senoidal se mantém estável e suave, mesmo durante as transições entre notas.

E. Interface e Navegação no Menu

A interface permite ao usuário navegar por um menu simples, selecionar opções e visualizar dados em tempo real, tornando o funcionamento do sintetizador mais intuitivo.

A lógica de navegação foi implementada no firmware do Arduino, utilizando estados de menu organizados em camadas, onde o usuário pode se mover entre telas e submenus pressionando os botões “ACIMA”, “ABAIXO” e “OK”. O botão “OK” também permite retornar ao menu anterior ao ser pressionado por um tempo mais longo.

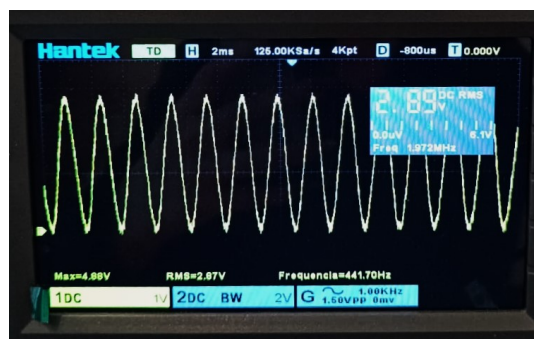


Figura 18. Forma de onda senoidal correspondente à nota Lá, com frequência aproximada de 441,70 Hz.

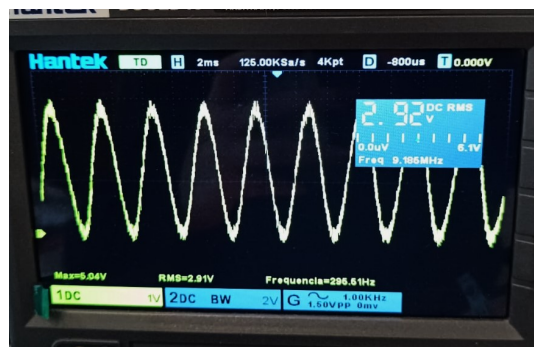


Figura 19. Forma de onda senoidal correspondente à nota Ré, com frequência aproximada de 296,51 Hz.

A Figura 20 apresenta a tela inicial do menu, onde é possível visualizar as primeiras opções: *Conectar disp.* e *Exibir dados.* A navegação por este menu foi programada com base em estados internos no firmware, o que garante uma resposta eficiente e organizada às interações do usuário.



Figura 20. Tela inicial do menu exibida no display LCD, com opções de navegação destacando “Conectar disp.” e “Exibir dados”.

O menu principal do sistema contém as seguintes opções:

- **Conectar Dispositivo:** permite selecionar qual dispositivo será utilizado como entrada. A interface foi preparada para até quatro opções, identificadas por endereços Modbus diferentes. Para este protótipo, foi utilizada a luva sensorizada e foi testada alterando o endereço Modbus.
- **Exibir Dados de Movimento:** exibe, em tempo real, a nota musical atualmente gerada.
- **Configurações:** permite ao usuário alterar o timbre da nota gerada, selecionando entre diferentes formas de onda (senoidal, triangular ou quadrada), bem como ajustar o volume, que é controlado diretamente via firmware por meio da amplitude do sinal enviado ao DAC. O volume do sinal gerado é ajustado diretamente via firmware, por meio da variação da amplitude do valor enviado ao DAC. O nível de volume pode ser selecionado no menu do sistema, onde é exibido visualmente por uma barra gráfica. Essa barra é composta por blocos preenchidos, proporcionando uma representação intuitiva da intensidade atual. A Figura 21 mostra a tela de ajuste de volume com o nível 8 selecionado.



Figura 21. Tela de ajuste de volume, com barra gráfica correspondente ao nível 8.

- **Sair:** coloca o sistema em modo standby, desativando temporariamente a geração de som e a comunicação, mantendo apenas a escuta da tecla ON/OFF.

Tabela V
ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO MENU DO SINTETIZADOR

Menu Principal	Submenu	Opções
1. Conectar Disp.	1.1. Dispositivo 1 1.2. Dispositivo 2 1.3. Dispositivo 3 1.4. Dispositivo 4 1.5. Desconec. Disp.	
2. Exibir Dados		
3. Configurações	3.1. Timbre 3.2. Volume	3.1.1. Onda quadrada 3.1.2. Onda triangular 3.1.3. Onda senoidal 3.1.4. Onda serra 3.1.5. Ruído branco
4. Sair		

V. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo funcional de sintetizador musical controlado por movimento, com comunicação sem fio baseada no protocolo Modbus e geração sonora por meio de conversor digital-analógico. A proposta foi parcialmente concretizada, demonstrando a viabilidade técnica da abordagem e integrando diferentes áreas do conhecimento, como eletrônica, sistemas embarcados, comunicação de dados e síntese de áudio.

Durante o desenvolvimento, foi possível implementar e validar:

- A comunicação entre dispositivos utilizando módulos nRF24L01 e protocolo Modbus;
- A recepção e interpretação de dados de movimento de uma luva sensorizada real;
- A conversão dos gestos detectados em notas musicais, por meio de análise de variação nas grandezas medidas;
- A geração de sinais de áudio em diferentes formas de onda, com saída analógica limpa e amplificada;
- Uma interface de usuário com menu navegável, exibido em display LCD e operado por botões.

Diversos desafios práticos surgiram ao longo da implementação, como problemas com ruído e saturação no sinal de áudio, instabilidade na comunicação sem fio e limitações na montagem física dos componentes. Tais dificuldades foram superadas com ajustes no firmware, correções de hardware e revisão no projeto da placa, proporcionando grande aprendizado e aprimoramento técnico.

Como trabalho futuro, destaca-se a possibilidade de:

- A finalização da placa de circuito impresso (PCB), com layout mais compacto e robusto para uso prolongado;
- O aprimoramento do algoritmo de interpretação de gestos, com mapeamento mais preciso e responsivo dos dados da luva para notas musicais;
- Ampliar o número de oitavas disponíveis;
- Melhorar a interface física com um layout definitivo de placa;
- Incorporar novos modos de controle e expressividade sonora;

De modo geral, o projeto atingiu os principais objetivos propostos, constituindo uma base sólida para futuras evoluções e aplicações reais de sintetizadores controlados por gestos.

REFERÊNCIAS

- [1] Apple Inc. (2013). Logic Pro X Instruments. Cupertino, CA: K Apple Inc.
- [2] Hammond, L. (1935). Development of electromechanical organs. *Journal of Musical Technology*, 5(2), 45-62.
- [3] Kannadhasan, S.; SURESH, R.; SHANMUGANATHAM, M. Hand gesture recognition using MEMS sensors. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, v. 6, n. 1, p. 206-211, 2017.
- [4] ARDUINO. Arduino documentation. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 16 set. 2024.
- [5] Dantas, J.D.; CRUZ S. S. Um olhar físico sobre a teoria musical. *Revista Brasileira de Ensino de Física, Cuité (PB)*, v. 41, n. 1, p. 3, jun. 2019.
- [6] Grillo, M. E Perez, Luiz. (2020). *Física e Música*.
- [7] Holmes, T. B. *Electronic and Experimental Music: Pioneers in Technology and Composition*. 2. ed. New York: Routledge 2002, p.147-148.
- [8] McAllister, M. (2021, August 9). Understanding Additive and Subtractive Synthesis - Produce Like A Pro. *Produce Like a Pro*. Disponível em: <https://producelikeapro.com/blog/understanding-additive-and-subtractive-synthesis/> Acesso em: 05 set. 2024.
- [9] An Introduction To Additive Synthesis. (n.d.). *Sound on Sound*. Disponível em: <https://www.soundonsound.com/techniques/introduction-additive-synthesis> Acesso em: 05 set. 2024.
- [10] Instruments, N. (2024, April 23). What is FM synthesis? — Native Instruments Blog. *Native Instruments Blog*. Disponível em: <https://blog.native-instruments.com/what-is-fm-synthesis/> Acesso em: 05 set. 2024.
- [11] Haykin, S. (2001). *Communication Systems (4th ed.)*. John Wiley And Sons.
- [12] Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall.
- [13] Kester, Walt. *The Data Conversion Handbook*. Capítulo 3: Técnicas de Conversão Digital para Analógico. Amsterdã: Elsevier, 2005. p. 147-153.
- [14] TECHSCHEMS. Esquema Mínimoog. Disponível em: <https://techschems.com/minimoog-schematic>. Acesso em: 17 Ago. 2024.
- [15] ORGANIZAÇÃO MODBUS. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. Massachusetts: Modbus Organization, 2006. Disponível em: <https://modbus.org/specs.php>. Acesso em: 22 out. 2024.
- [16] NORDIC SEMICONDUCTOR ASA. nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver - Product Specification v1.0. Otto Nielsens vei 12, Trondheim, Noruega: Nordic Semiconductor ASA, setembro de 2008. Disponível em: <http://www.nordicsemi.no>.
- [17] SCHLESINGER, Peter. Frequencies for equal-tempered scale. Disponível em: <https://pages.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- [18] BET, Leonardo; KÜNZEL, Gustavo. Desenvolvimento de uma luva para captura de gestos com comunicação sem fio. 2024. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, Farroupilha, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifrs.edu.br/bitstream/handle/123456789/2078/1234567892078.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- [19] TECLA CENTER. Mínimoog: A sonoridade revolucionária que marcou gerações. 2022. Disponível em: <https://www.teclacenter.com.br/blog/minimoog-sonoridade-revolucionaria/>. Acesso em: 8 jul. 2025.
- [20] TEIXEIRA, Lorena Smiguel. Um estudo sobre sensores na plataforma Arduíno para aplicações em música eletrônica. 2019. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26025/1/sensoresarduinomusicaeletronica.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2025.

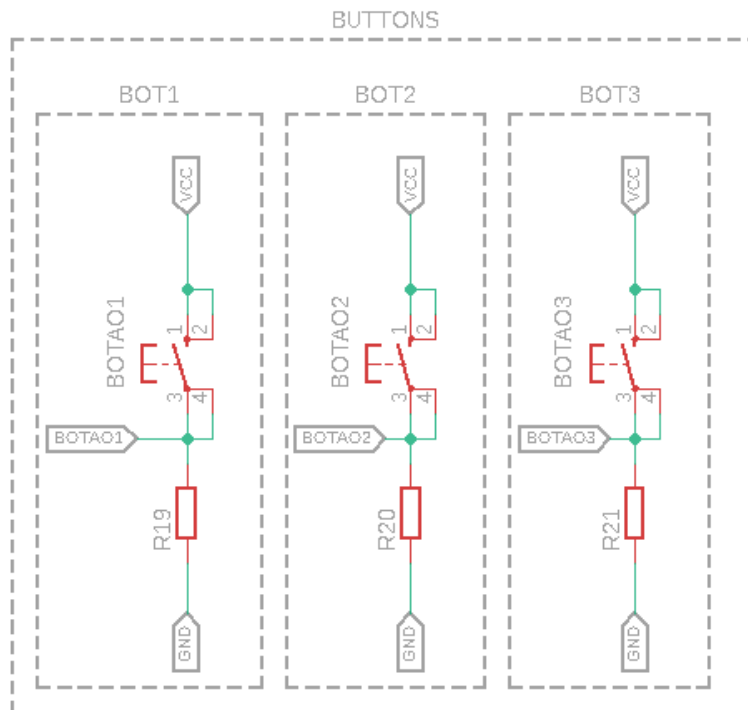


Figura 24. Esquema elétrico dos botões.

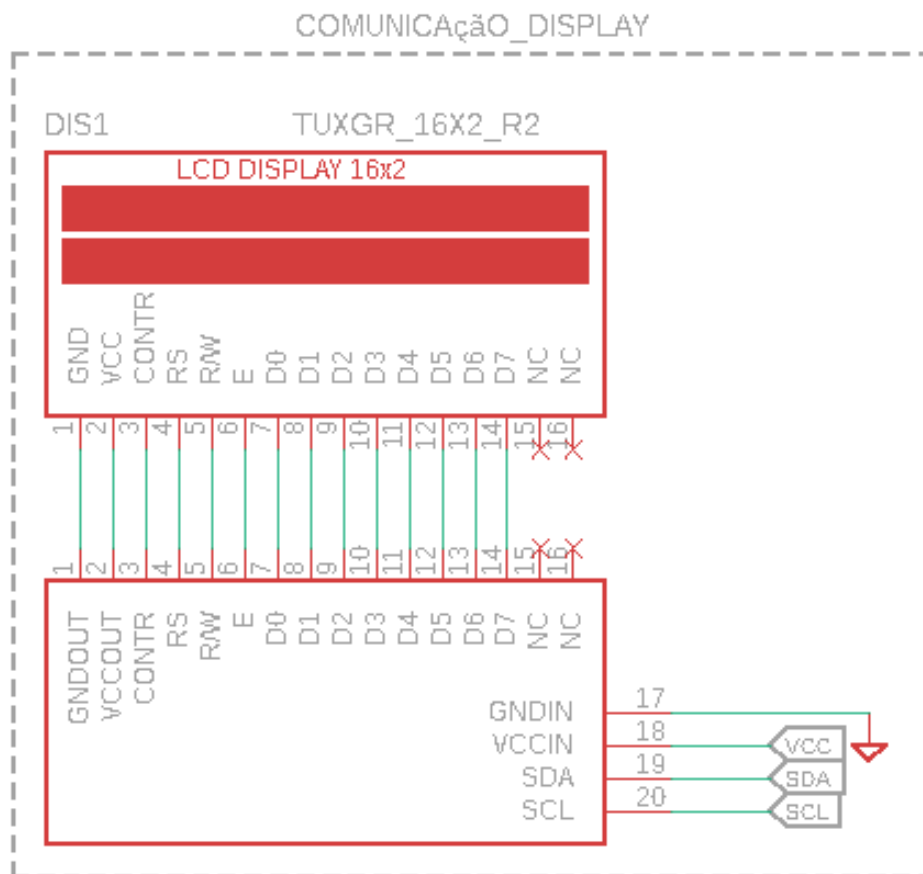


Figura 25. Esquema elétrico do display com módulo I2C.

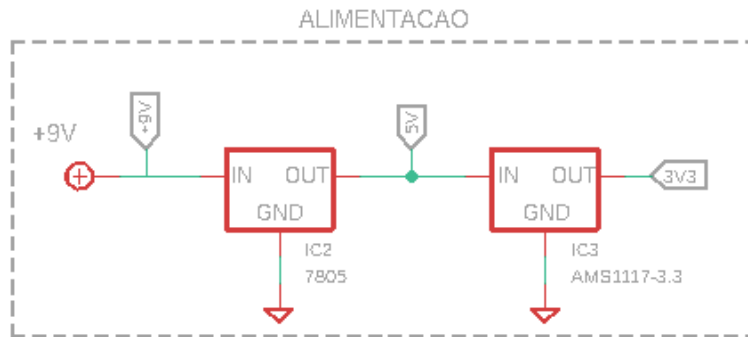


Figura 26. Esquema elétrico da alimentação.

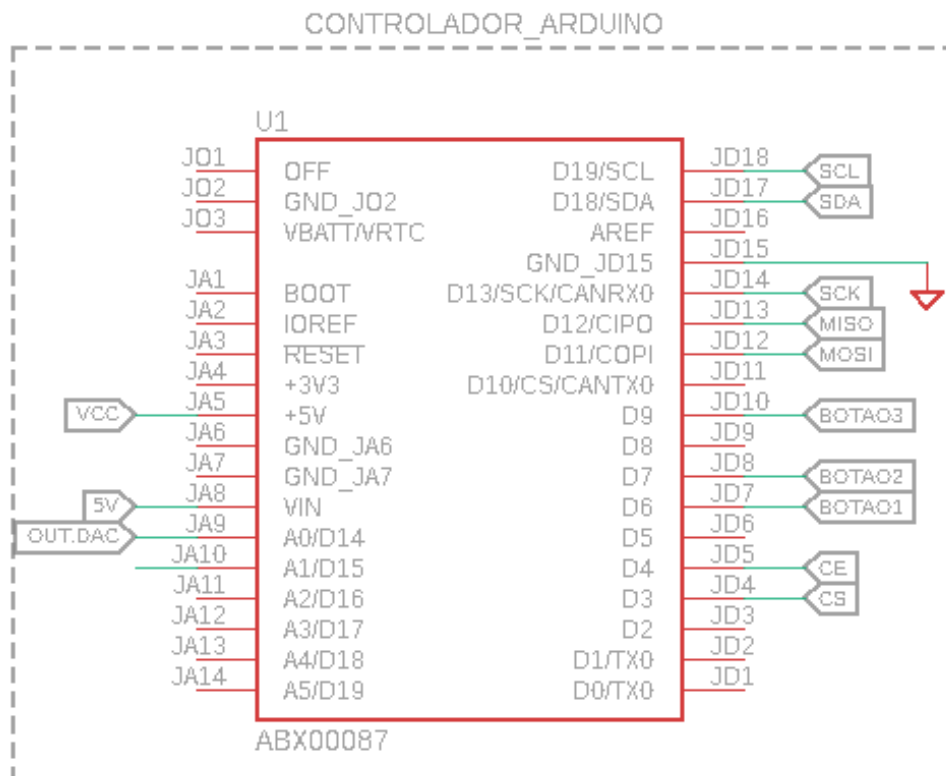


Figura 27. Esquema elétrico do controlador.