

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEEL

LUIS FERNANDO MOMM ANTUNES

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO COM REALIMENTAÇÃO
POR VISÃO COMPUTACIONAL

JOINVILLE

2026

LUIS FERNANDO MOMM ANTUNES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO COM REALIMENTAÇÃO
POR VISÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mariana Santos Matos Cavalca

Coorientador: Prof^o. Dr^o. Tiago Jackson May Dezuó

JOINVILLE

2026

Antunes, Luis Fernando Momm

Projeto e construção de um sistema de levitação acústica: desenvolvimento de um protótipo didático com realimentação por visão computacional / Luis Fernando Momm Antunes. -- 2026.

115 p.

Orientadora: Mariana Santos Matos Cavalca

Coorientador: Tiago Jackson May Dezuo

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2026.

1. Levitação Acústica. 2. Manipulação sem Contato. 3. Arranjos de Fase Ultrassônicos. 4. Controle em Malha Fechada. 5. Visão Estereoscópica. I. Cavalca, Mariana Santos Matos. II. Dezuo, Tiago Jackson May. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

LUIS FERNANDO MOMM ANTUNES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO COM REALIMENTAÇÃO
POR VISÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mariana Santos Matos Cavalc

Coorientador: Prof^o. Dr^o. Tiago Jackson May Dezu

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr^o. Tiago Jackson May Dezu
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof^o. Dr^o. Fabrício Novelleto
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof^o. Dr^o. Alexandro Garro Brito
Universidade Federal de Santa Catarina

Joinville, 03 de julho de 2026.

A todos que, de alguma forma, tornaram
este desafio possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora e ao meu coorientador por aceitarem conduzir o meu trabalho de pesquisa.

A todos os meus professores do curso de da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc pela excelência da qualidade técnica de cada um.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções
que não davam certo.” (EDISON, [19--])

RESUMO

A manipulação da matéria sem contato físico por meio da levitação acústica tem demonstrado potencial em uma ampla gama de domínios científicos e industriais. Avanços recentes progrediram de sistemas de ondas estacionárias para arranjos de fase sofisticados, holografia acústica e arquiteturas híbridas, possibilitando controle tridimensional, manipulação de múltiplas partículas e armadilhas acústicas customizáveis. Esses desenvolvimentos sustentam aplicações que variam desde a manipulação biomédica de células e a entrega direcionada de fármacos até a montagem industrial, manufatura aditiva e exibições volumétricas interativas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento, a modelagem matemática e a implementação de uma plataforma de levitação acústica projetada como um laboratório para o estudo de sistemas de controle. A arquitetura física consiste em um arranjo de transdutores ultrassônicos operando de forma síncrona a 40 kHz, gerenciados por um FPGA responsável por sintetizar o campo acústico sob restrições de quantização. Para fechar a malha de controle cinemático, o sistema integra um *pipeline* de visão estereoscópica assíncrona empregando Filtragem de Kalman bidimensional para a extração de características geométricas, seguida por triangulação via Decomposição em Valores Singulares (SVD) e atenuação IIR (Média Móvel Exponencial) para mitigar o ruído espacial tridimensional. A síntese holográfica da armadilha acústica rotativa (*Twin Trap*) é executada por meio de um algoritmo de aproximação iterativa (GS-PAT), inicializado com uma semente analítica para garantir estabilidade computacional. Telemetria e monitoramento em plano de fase confirmam a eficácia do controlador PID tridimensional em dissipar ativamente a energia cinética da partícula. O sistema desenvolvido valida a plataforma tanto para a suspensão precisa de partículas quanto como uma ferramenta para pesquisas futuras em estratégias de controle e na mitigação de atrasos de transporte em atuadores de estado sólido.

Palavras-chave: Levitação Acústica, Manipulação sem Contato, Arranjos de Fase Ultrassônicos, Controle em Malha Fechada, Visão Estereoscópica.

ABSTRACT

The manipulation of matter without physical contact through acoustic levitation has demonstrated potential across a wide range of scientific and industrial domains. Recent advances have progressed from standing-wave systems to sophisticated phased arrays, acoustic holography, and hybrid architectures, enabling three-dimensional control, multi-particle manipulation, and customizable acoustic traps. These developments support applications ranging from the biomedical manipulation of cells and targeted drug delivery to industrial assembly, additive manufacturing, and interactive volumetric displays. This work presents the development, mathematical modeling, and implementation of an acoustic levitation platform designed as a laboratory for the study of control systems. The physical architecture consists of an array of ultrasonic transducers operating synchronously at 40 kHz, managed by an FPGA responsible for synthesizing the acoustic field under quantization constraints. To close the kinematic control loop, the system integrates an asynchronous stereoscopic vision pipeline employing two-dimensional Kalman Filtering for geometric feature extraction, followed by triangulation via Singular Value Decomposition (SVD) and IIR attenuation (Exponential Moving Average) to mitigate three-dimensional spatial noise. The holographic synthesis of the rotating acoustic trap (Twin Trap) is executed through an iterative approximation algorithm (GS-PAT), initialized with an analytical seed to ensure computational stability. Telemetry and phase-plane monitoring confirm the effectiveness of the three-dimensional PID controller in actively dissipating the particle's kinetic energy. The developed system validates the platform for precise particle suspension and also as a tool for future research into control strategies and the mitigation of transport delays in solid-state actuators.

Keywords: Acoustic Levitation, Contactless Manipulation, Ultrasonic Phased Arrays, Closed-Loop Control, Stereoscopic Vision.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de aplicações	29
Figura 2 – Sinal UART	33
Figura 3 – Interferência construtiva dos transdutores	48
Figura 4 – Armadilha de pinça.....	52
Figura 5 - Diagrama de componentes de hardware	54
Figura 6 - Configurações de hardware: duplo (esquerda) e simples (direita)	59
Figura 7 - Configurações de hardware com realimentação óptica	60
Figura 8 – Diagrama funcional do firmware.....	61
Figura 9 – Diagrama dos <i>clocks</i> dos registradores de deslocamento	62
Figura 10 – Euler no círculo trigonométrico.....	70
Figura 11 – Sinal de entrada e saída do transdutor	75
Figura 12 – Interface de conexão.....	79
Figura 13 – Aba de calibração.....	80
Figura 14 – Definição de quais transdutores estão operacionais ou defeituosos.....	81
Figura 15 – Calibração do ângulo das lentes das webcams	81
Figura 16 – Definição da região de interesse	82
Figura 17 – Calibração da sensibilidade a luz.	83
Figura 18 – Calibração de distâncias	83
Figura 19 – Validação do volume interno do levitador.....	84
Figura 20 – Aba de operação	85
Figura 21 – Interface de conexão.....	86
Figura 22 – Coluna de comandos	88
Figura 23 – Aba de simulação.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i> — sinal de confirmação de recepção bem-sucedida de um pacote de dados.
AGT	<i>Adaptive Gaussian Thresholding</i> — técnica de segmentação de imagem baseada em vizinhanças locais.
ALTPLL	<i>Altera Phase-Locked Loop</i> — IP Core da Intel/Altera para manipulação de sinais de clock.
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> — padrão de codificação de caracteres de 7 ou 8 bits.
BRAM	<i>Block RAM</i> — bloco de memória de acesso aleatório embutido na estrutura do FPGA.
CCA	<i>Connected Components Analysis</i> — algoritmo para identificar regiões de pixels adjacentes.
CI	Circuito Integrado — componente eletrônico que integra múltiplos elementos em um substrato.
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> — tecnologia de fabricação de sensores de imagem.
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> — perturbação gerada por campos eletromagnéticos.
ERR	<i>Error</i> — sinal de retorno negativo em protocolos seriais, indicando pacote inválido.
ESP32	Microcontrolador com Wi-Fi e Bluetooth integrados.
FGF	<i>Fast Guided Filter</i> — filtro para remoção de interferências de iluminação complexa.
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i> — circuito integrado de lógica reconfigurável.
FPS	<i>Frames Per Second</i> — taxa de atualização em sistemas de vídeo.
FRT	<i>Firm Real-Time</i> — sistemas onde resultados atrasados são descartados sem falha catastrófica.

FSM	<i>Finite State Machine</i> — modelo computacional de estados e transições (Máquina de Estados).
GND	<i>Ground</i> — referência de tensão nula (terra).
GS-PAT	<i>Gerchberg-Saxton for Phased Arrays of Transducers</i> — algoritmo para síntese de hologramas acústicos.
GUI	<i>Graphical User Interface</i> — interface visual de interação homem-máquina.
HAT	<i>Holographic Acoustic Tweezers</i> — pinças acústicas para manipulação de partículas.
HOT	<i>Holographic Optical Tweezers</i> — pinças ópticas para manipulação via gradientes de campo.
HRT	<i>Hard Real-Time</i> — sistemas onde o não cumprimento de prazos é uma falha crítica.
IDLE	Estado de repouso de um módulo ou máquina de estados.
IoT	<i>Internet of Things</i> — paradigma de dispositivos conectados em rede.
IP Core	<i>Intellectual Property Core</i> — bloco funcional pré-projetado para FPGAs.
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i> — classe de filtros digitais (ex: Média Móvel Exponencial).
LSB	<i>Least Significant Bit</i> — bit de menor peso em uma representação binária.
LUT	<i>Look-Up Table</i> — tabela de consulta para mapeamento de entradas em saídas pré-calculadas.
MATD	<i>Multimodal Acoustic Trap Display</i> — sistema de exibição volumétrica via levitação acústica.
MEQ	<i>Module Evaluation Questionnaire</i> — instrumento de avaliação de satisfação estudantil.
MOSFET	Transistor de efeito de campo utilizado em drivers de potência.
MOT	<i>Multi-Object Tracking</i> — rastreamento de múltiplos objetos em vídeo.

MPC	<i>Model Predictive Control</i> — estratégia de controle baseada em otimização futura.
MSO-P1040H07T	Modelo do transdutor ultrassônico piezoelétrico de 40 kHz.
NASA	Agência espacial norte-americana.
OAM	<i>Orbital Angular Momentum</i> — momento angular de ondas helicoidais.
OC-SORT	<i>Observation-Centric SORT</i> — algoritmo avançado de rastreamento de objetos.
PAT / UPA	<i>Phased Array of Transducers</i> — matriz de transdutores com controle de fase.
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> — placa de circuito impresso.
PDI	Processamento Digital de Imagens.
PID	Proporcional-Integral-Derivativo — topologia clássica de controle realimentado.
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i> — circuito para sincronização de fase e frequência.
PMUT	<i>Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer</i> — transdutor fabricado por microfabricação.
PnP / SolvePnP	<i>Perspective-n-Point</i> — estimação de pose de câmera 3D para 2D.
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> — modulação por largura de pulso para controle de potência.
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i> — algoritmo robusto para estimação de modelos com outliers.
ROI	<i>Region of Interest</i> — sub-região delimitada de uma imagem para processamento.
RSI	<i>Rayleigh-Sommerfeld Integral</i> — formulação matemática para propagação de ondas.
RTL	<i>Register-Transfer Level</i> — nível de abstração para descrição de hardware digital.
RX	<i>Receive</i> — linha de recepção de dados serial.

SAAL	<i>Single Axis Acoustic Levitator</i> — levitador acústico de eixo único (NASA).
SMD	<i>Surface-Mount Device</i> — componente para montagem em superfície de PCB.
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> — protocolo de comunicação serial síncrono.
SRT	<i>Soft Real-Time</i> — sistemas onde atrasos ocasionais são tolerados.
STS-61A	Missão do Ônibus Espacial (1985) que utilizou levitação acústica.
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i> — técnica de fatoração de matrizes.
TC4427A	Circuito integrado driver de MOSFET de alta velocidade.
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i> — família lógica de circuitos digitais.
TX	<i>Transmit</i> — linha de transmissão de dados serial.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> — protocolo serial assíncrono.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> — interface serial de alta largura de banda.
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language — Linguagem de descrição de hardware para FPGAs.
WCET	<i>Worst-Case Execution Time</i> — tempo máximo de execução de uma tarefa.
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> — padrão de comunicação sem fio IEEE 802.11.
XOR	<i>Exclusive OR</i> — operação lógica usada para cálculo de checksum.
YOLO	<i>You Only Look Once</i> — família de redes neurais para detecção de objetos.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Matriz intrínseca da câmera (3×3)
B	Matriz para resolução analítica ($B = A^{-T} A^{-1}$)
c_0	Velocidade de propagação do som no meio
$D(\theta)$	Função de diretividade (modelo de pistão circular)
$e(t)$	Erro de posição (alvo - estimado)
$\in$	Pertence
f	Frequência de operação (40 kHz)
F_a	Força de radiação acústica resultante
F	Matriz de transição de estado (Filtro de Kalman)
H_0	Matriz de Homografia (3×3)
H	Matriz de observação (Kalman)
I	Matriz identidade
$I(t)$	Estado da integral do controlador
$J_1(x)$	Função de Bessel de primeira ordem
K	Ganho de Kalman
k_0	Número de onda acústico ($k_0 = \frac{\omega}{c_0}$)
k_1, k_2, k_3	Coefficientes de distorção radial (Brown-Conrady)
K_d	Ganho derivativo do PID
K_i	Ganho integral do PID
K_p	Ganho proporcional do PID
mod	Resto da divisão
N	Ciclos de clock por bit UART
p_{2D}	Ponto bidimensional no plano da imagem $(u, v, 1)^T$
P	Matriz de covariância do erro de estimação
P_{3D}	Ponto tridimensional no espaço $(X, Y, Z, 1)^T$
$p(r)$	Pressão acústica complexa no ponto r
p_1, p_2	Coefficientes de distorção tangencial
π	Pi
Q	Matriz de covariância do ruído de processo
r	Distância radial ao centro óptico ($r^2 = x^2 + y^2$)

R	Matriz de covariância do ruído de medição
R_{ot}	Matriz de rotação (3×3)
r_{trans}	Raio do transdutor piezoelétrico
s	Fator de escala arbitrário na projeção
t	Vetor de translação (3×1)
t_{param}	Variável escalar adimensional de tempo normalizado
U	Potencial de radiação acústica de Gor'kov
$u(r')$	Velocidade de vibração da superfície do transdutor
$u_c(t)$	Sinal de saída do controlador PID (esforço)
u_0, v_0	Coordenadas do ponto principal (centro óptico)
u_{PID}	Vetor de correção espacial
$u_{circulo}, v_{circulo}$	Parametrização da circunferência
V_1, V_2	Vértices de trajetória quadrada
w_k, v_k	Ruído de processo e de medição (Gaussiano)
$x_{comando}$	Posição na trajetória
x_{end}	Posição final da esfera
x_{real}	Posição real da esfera
x_{start}	Posição inicial da esfera
x_{target}	Posição alvo da esfera
x_k	Vetor de estado no instante k (posição/velocidade)
z_k	Vetor de medição (centroide do detector)
α	Distância focal horizontal da câmera
β	Distância focal vertical da câmera
Δt	Intervalo de amostragem entre quadros
γ	Coeficiente de obliquidade (<i>skew</i>) da câmera
θ	Ângulo em relação ao eixo central do transdutor
λ	Comprimento de onda acústico (c_0/f)
$\lambda/2$	Metade do comprimento de onda (espaçamento de nós)
ρ_0	Densidade do meio fluido (ar)
ω	Frequência angular da onda ($2\pi f$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	LEVITAÇÃO ACÚSTICA	24
2.2	PROCESSAMENTO EM TEMPO REAL	29
2.3	COMUNICAÇÃO SERIAL	31
2.4	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM	33
2.4.1	Fundamentos de Formação de Imagem e Calibração	33
2.4.2	Extração de Atributos	37
2.4.3	Visão Estereoscópica e Reconstrução 3D	40
2.4.4	Rastreamento em imagem	42
2.5	ENSINO DE CONTROLE	45
2.6	HOLOGRAFIA E ALGORITMO GS-PAT	48
3	PLANTA	54
3.1	ARQUITETURA DO HARDWARE	54
3.2	ARQUITETURA DO FIRMWARE	60
3.3	SOFTWARE DE APLICAÇÃO	68
4	RESULTADOS	79
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	99
	GLOSSÁRIO	113

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de suspender e manipular matéria sem contato físico direto representa um dos desafios da física e da engenharia modernas. Dentre as abordagens disponíveis como pinças ópticas, levitação magnética e levitação eletrostática, a levitação acústica destaca-se por operar em meios fluidos como o ar ou a água, sem depender das propriedades ópticas ou magnéticas do objeto e por ser capaz de manipular amostras que vão desde partículas micrométricas até objetos da escala de centímetro (FUSHIMI; OCHIAI, 2023), (ANDRADE et al., 2018).

Do ponto de vista histórico, os primeiros indícios de que campos acústicos podiam exercer forças sobre a matéria remontam ao experimento de August Kundt, em 1866. Embora seu objetivo fosse mensurar a velocidade do som, o aparato revelou que partículas em suspensão num tubo acústico se organizam espontaneamente em nós de pressão de ondas estacionárias. A formalização matemática dessas forças viria décadas depois, com os trabalhos de Lord Rayleigh (1902), Louis Vessot King (1934) e, de forma mais geral, L. P. Gor'kov (1961), cuja expressão do potencial de radiação acústica permanece como referência na área. A partir de 2014, a convergência entre o barateamento de transdutores piezoelétricos, o aumento do poder computacional e os avanços em algoritmos de holografia acústica permitiu o surgimento das chamadas Matrizes de Transdutores Ultrassônicos (UPAs) e dos sistemas de Hologramas Acústicos, que tornaram possível a manipulação tridimensional e dinâmica de objetos no ar (FUSHIMI; OCHIAI, 2023), (MORRIS et al., 2019), (MARZO et al., 2015).

No contexto atual, tais sistemas encontram aplicações em áreas tão distintas quanto a biologia celular, a manufatura sem contato, a farmacologia, as exposições volumétricas e a robótica (VASILEIOU et al., 2016), (HIRAYAMA et al., 2019). Contudo, a transição de um levitador estático, capaz de manter um objeto numa posição fixa, para um sistema de manipulação dinâmica e robusta exige o fechamento de uma malha de controle, o que impõe desafios simultâneos em hardware de alta frequência, firmware determinístico, processamento de imagem em tempo real e teoria de controle. A integração dessas áreas num sistema coerente e funcional é, portanto, uma questão de pesquisa relevante tanto do

ponto de vista científico quanto formativo (FURUMOTO et al., 2019), (LIPARI, 2015).

Além disso, o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) permanece como a topologia de controle mais difundida na indústria. Apesar de sua presença obrigatória na maioria dos currículos de engenharia, estudos indicam que estudantes frequentemente carecem de compreensão intuitiva de seus parâmetros, em especial da relação entre os ganhos proporcional, integral e derivativo e o comportamento dinâmico do sistema. Um levitador acústico controlado por PID constitui, nesse sentido, uma planta didática visualmente impactante e suficientemente complexa para evidenciar os fenômenos que o PID precisa endereçar, como erro estacionário, sobressinal, tempo de acomodação e sensibilidade a ruído (FURUMOTO et al., 2019), (JIA et al., 2025).

O sistema desenvolvido neste trabalho consiste em um levitador acústico, fundamentado no design proposto por Morales et al. (MORALES et al., 2021), composto por duas matrizes opostas de 256 transdutores ultrassônicos cada, operando na frequência de 40 kHz, totalizando 512 emissores independentemente controláveis. A geometria de placa dupla permite gerar campos acústicos volumétricos por superposição de ondas, possibilitando a criação de armadilhas do tipo *Twin Trap*, que são regiões de nó de pressão cercadas por paredes de alta intensidade acústica, reconhecidas como a topologia mais estável para a manipulação de esferas macroscópicas. Dada a natureza multidisciplinar do sistema, ele pode ser explorado como plataforma de ensino em disciplinas de controle, sinais e sistemas, processamento de imagem e sistemas embarcados, constituindo um laboratório didático de alto impacto visual e pedagógico (MARZO et al., 2015), (MARZO; DRINKWATER, 2019).

A percepção da posição tridimensional da partícula levitada é realizada por um sistema de visão computacional composto por duas câmeras posicionadas ortogonalmente. Cada câmera monitora dois dos três eixos cartesianos, e a redundância no eixo vertical garante a fusão confiável das coordenadas. O *pipeline* de processamento de imagem opera sobre Regiões de Interesse (ROI) pré-definidas, aplicando conversão para escala de cinza, limiarização adaptativa e operações morfológicas de erosão e dilatação. A posição da esfera é extraída via detecção de *blobs* e cálculo de centroide de

massa, que oferece precisão superior à simples detecção de contorno (FURUMOTO et al., 2019), (WANG et al., 2024a), (ZHANG et al., 2022).

Para garantir robustez frente a oclusões temporárias e ruído de medição inerente ao sensor CMOS, cada câmera conta com um Filtro de Kalman independente que opera como estimador de estado recursivo, alternando entre etapas de predição cinemática e correção por medição (FURUMOTO et al., 2019), (JIA et al., 2025). A transformação das coordenadas de pixel para o sistema métrico é realizada por meio de calibração intrínseca, que determina a matriz da câmera e os coeficientes de distorção das lentes, e de calibração extrínseca, que posiciona as câmeras no referencial geométrico das matrizes de transdutores. A validação do processo é feita por sobreposição de um cubo virtual ao vídeo capturado, cujos vértices devem coincidir com os cantos físicos das placas (ZHANG et al., 2022), (LU et al., 2016).

A estabilidade da levitação é mantida por um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) tridimensional que atua sobre o erro de posição entre a coordenada alvo e a coordenada estimada pelo sistema de visão com Filtro de Kalman. O termo proporcional K_p gera uma força restauradora imediata, analogamente a uma mola virtual. O termo integral K_i , com implementação de Anti-Windup, corrige erros estacionários causados, por exemplo, pelo peso da esfera ou por desalinhamentos físicos entre as placas. O termo derivativo K_d atua como amortecedor dinâmico, antecipando a trajetória do erro e evitando que se ultrapasse a posição alvo (FURUMOTO et al., 2019).

O sistema inclui uma zona morta configurável de aproximadamente 0,5 mm, que suprime a resposta do controlador a flutuações de medição inferiores à resolução efetiva do campo acústico após a discretização de fase e amplitude (MARZO et al., 2015), (FURUMOTO et al., 2019). Para trajetórias complexas como as circulares, quadradas ou em lemniscata, uma máquina de estados finitos interpola suavemente entre o ponto atual e o início da trajetória, impedindo acelerações abruptas que superariam a força de captura da armadilha acústica. O ajuste interativo dos ganhos K_p , K_i e K_d diretamente na interface gráfica, com realimentação visual em tempo real por gráficos de rastreamento, erro de posição, esforço de controle e diagrama de plano de fase, constitui o núcleo da

funcionalidade didática do sistema (MORALES et al., 2021), (WANG et al., 2024a).

O desenvolvimento deste trabalho insere-se numa trajetória que compreende tanto os fundamentos teóricos consolidados quanto os avanços tecnológicos mais recentes da área. Desde os experimentos pioneiros de Kundt (1866) e a teoria de King (1934), passando pela formalização de Gor'kov (1961) e pelos primeiros sistemas de levitação de eixo único para processamento espacial na missão STS-61A (1987), até a emergência dos *phased arrays* modernos com o projeto TinyLev (2017) e as telas volumétricas baseadas em *voxels* físicos (2019), a levitação acústica evoluiu de um fenômeno físico curioso para uma tecnologia de manipulação de matéria com aplicações científicas e industriais (MARZO et al., 2017), (HIRAYAMA et al., 2019).

Embora o fenômeno físico da levitação acústica esteja bem compreendido teoricamente e diversas demonstrações de manipulação 3D tenham sido publicadas nos últimos anos, a integração de todos os subsistemas necessários como a geração de sinais de alta frequência, comunicação serial determinística, processamento de imagem em tempo real e controle em malha fechada num sistema funcional, documentado e reproduzível constitui um problema de engenharia não trivial (FURUMOTO et al., 2019), (SAKAR et al., 2025). Cada subsistema impõe requisitos de temporização e largura de banda que em conjunto criam gargalos e interdependências que precisam ser cuidadosamente endereçados (LIPARI, 2015).

Este trabalho tem como objetivo geral projetar, implementar e validar um sistema completo de levitação acústica com controle em malha fechada, capaz de estabilizar e movimentar uma partícula esférica em trajetórias tridimensionais pré-definidas ou não, integrando hardware FPGA, firmware VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*), processamento digital de imagem e controle PID numa plataforma com interface gráfica interativa de uso didático (MARZO et al., 2017).

1.1 OBJETIVOS

Para atingir o objetivo geral de desenvolvimento de um protótipo didático com realimentação por visão computacional, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Projetar e implementar em um FPGA um gerador de sinais PWM com controle independente de fase e amplitude para cada um dos 512 transdutores ultrassônicos da matriz;
- Implementar em VHDL um módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) com sobreamostragem dezesseis vezes, duplo *buffering* de memória e protocolo de verificação de integridade por *checksum* XOR, capaz de operar a 115.200 baud com erro acumulado nulo;
- Implementar em Python um *solver* acústico baseado na Integral de Rayleigh–Sommerfeld e no algoritmo GS-PAT, capaz de calcular em tempo real os vetores de fase e amplitude necessários para gerar uma armadilha *Twin Trap* em coordenadas arbitrárias;
- Desenvolver um sistema de visão computacional com calibração intrínseca e extrínseca, rastreamento por detecção de *blobs* e estimação de estado por Filtro de Kalman para duas câmeras ortogonais;
- Implementar um controlador PID tridimensional com zona morta, Anti-Windup e limitador de aceleração para estabilização e execução de trajetórias programáveis;
- Construir uma interface gráfica unificada que integre as funcionalidades de calibração, operação, controle e simulação do campo acústico, com visualização em tempo real dos sinais de rastreamento, erro e esforço de controle.

No âmbito deste trabalho foram realizadas as contribuições a seguir. Desenvolveu-se um hardware de levitação acústica com duas placas opostas de 256 transdutores operando a 40 kHz, capaz de gerar ondas ultrassônicas estáveis sem sobreaquecimento dos componentes. O firmware, implementado em VHDL sobre FPGA, provê geração de sinais com fase quantizada em 16

níveis (resolução de $22,5^\circ$) e amplitude em 9 níveis de *duty cycle*, sincronização global de todos os 512 canais e atualização de estado por duplo *buffering* de memória. A comunicação entre o computador e o hardware é realizada via UART a 115.200 baud com detecção de erros por XOR e protocolo de confirmação ACK/ERR.

No domínio de software, implementou-se em Python uma plataforma multicamadas que integra o *solver* acústico baseado em holografia GS-PAT, o sistema de visão computacional com Filtro de Kalman, o controlador PID com Anti-Windup e a codificação de pacotes binários para transmissão serial. A interface gráfica oferece quatro abas funcionais: Conexão, Operação e Controle, Simulador 2D e Calibração, com visualização em tempo real de posição rastreada, erro tridimensional, esforço PID e diagrama de plano de fase.

O sistema implementado demonstrou ser capaz de suspender e estabilizar uma esfera em posição fixa com o controlador PID ativo, mantendo o erro de posição dentro da zona morta de 0,5 mm em condições estáticas. O hardware se mostrou estável termicamente e capaz de reproduzir continuamente campos acústicos arbitrários. O firmware opera de forma determinística, garantindo a coerência de fase de todos os 512 transdutores a cada atualização de estado. O sistema de visão computacional, após calibração, fornece coordenadas métricas confiáveis validadas pela sobreposição do cubo virtual ao vídeo das câmeras. A interface gráfica integrada permite ajuste interativo dos ganhos PID com realimentação visual imediata, bem como a execução de trajetórias circulares e quadradas nos planos XY, XZ e YZ com raio e velocidade configuráveis. A plataforma de simulação 2D permite ainda a inspeção do campo acústico gerado para qualquer posição de armadilha, fornecendo informação complementar ao operador sobre a qualidade do campo produzido.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente documento está organizado como a seguir.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os fundamentos teóricos e o estado da arte nas áreas de levitação acústica, sistemas de tempo real, comunicação serial, processamento digital de imagem, Filtro de Kalman,

algoritmos de holografia acústica e ensino de controle PID, que fornecem o embasamento conceitual necessário para compreensão das escolhas de projeto adotadas.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do hardware, detalhando a arquitetura da matriz de transdutores, o circuito de potência e o projeto do firmware VHDL, incluindo os módulos de geração de sinais PWM com controle de fase, o receptor e transmissor UART com sobreamostragem e o gerenciador de memória com duplo *buffering*. Ele também apresenta o desenvolvimento do software de aplicação, descrevendo a arquitetura multicamadas do sistema Python, o *solver* acústico, o sistema de visão computacional com calibração e a implementação do controlador PID tridimensional e o protocolo de comunicação serial com o hardware.

O Capítulo 4 relata os resultados experimentais obtidos, apresentando o desempenho do sistema de levitação, a análise do comportamento do controlador PID frente a diferentes configurações de ganho e a avaliação da interface gráfica como ferramenta didática.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, discutindo os objetivos alcançados, as limitações identificadas e as perspectivas para trabalhos futuros, incluindo a integração de transdutores adicionais, a implementação de algoritmos de controle mais avançados e a expansão das funcionalidades didáticas da plataforma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LEVITAÇÃO ACÚSTICA

A levitação acústica é uma técnica de manipulação de matéria sem contato realizada em fluidos, geralmente ar ou água, ela contrapõe a gravidade por meio da pressão da radiação acústica, muitas vezes com uso de ondas em frequências ultrassônicas (FUSHIMI; OCHIAI, 2023). Inicialmente era baseada na suspensão de objetos em nós de ondas estacionárias em sistemas compostos por um transdutor e um refletor que juntos criavam campos acústicos estáveis. Porém, essa abordagem limita a dimensão do objeto levitado a uma fração do comprimento de onda e o fixa em uma posição no espaço (ANDRADE et al., 2018), (KISHORE et al., 2025). Nas últimas décadas os estudos nessa área tiveram um grande avanço, parte disso se deve à redução do custo dos transdutores, que permitiu aumentar o número de estudos e o uso de matriz faseada de transdutores (*phased arrays*) (LI et al., 2025).

August Kundt, em 1866, realizou um experimento mostrando que campos acústicos podem organizar a matéria macroscopicamente. Feito com o intuito de medir a velocidade do som, o Tubo de Kundt era um tubo de vidro horizontal contendo pó de cortiça ou esporos de lycopódio, com uma das extremidades fechada e uma fonte sonora na outra. Pôde-se perceber que, em uma dada frequência na qual o comprimento do tubo correspondesse a um múltiplo de meio comprimento de onda, eram geradas ondas estacionárias e o pó se organizava formando as “figuras de Kundt” (DAVIS, 1997). Com esse experimento pôde-se observar que as partículas se acomodam nos pontos de pressão mínima, nós, ou máxima, antinós, dependendo da densidade e do volume da partícula. Embora Kundt não tenha alcançado a levitação (no sentido de suspender verticalmente superando a gravidade), seu trabalho estabeleceu o princípio físico de que as ondas acústicas estacionárias exercem forças não nulas sobre pequenas partículas (ANDRADE et al., 2018).

O trabalho *On the pressure of vibrations* publicado em 1902 por Lord Rayleigh introduziu a análise teórica dos cálculos da pressão exercida por ondas sonoras (FUSHIMI; OCHIAI, 2023). Um grande avanço ocorreu em 1934,

quando Louis Vessot King publicou sua teoria sobre a pressão de radiação exercida por uma onda sonora em uma pequena esfera (KING, 1934). O trabalho de King foi o primeiro a calcular rigorosamente a força constante que um campo sonoro poderia exercer sobre um objeto, fornecendo a justificativa matemática para as observações de aprisionamento do século anterior. Isso foi precedido por cálculos anteriores de Bjerknes em 1906, que se concentrou nas forças que atuam sobre bolhas em um fluido e foi um precursor para a compreensão de partículas compressíveis (ANDERSSON et al., 2018).

A partir da teoria de King, em 1936 Söllner e Bondy confinaram partículas em campos acústicos de forma estável com um dispositivo composto por um transdutor e um refletor, estabelecendo a configuração básica do levitador de eixo único que permaneceu por décadas como modelo padrão (ANDRADE et al., 2018). Durante esse período, o conceito de levitação como meio de “processamento sem recipiente” foi idealizado pela primeira vez (BAER et al., 2014). Em 1961 L.P. Gor'kov formulou uma expressão geral, com média temporal, para a força de radiação acústica que atua sobre uma esfera pequena em um fluido não viscoso (GORKOV, 1961). Sua sintetização resumiu e generalizou o trabalho de Yosioka e Kawasima de 1955, que haviam estudado a força sobre uma esfera compressível, e o trabalho anterior de King. Ao expressar a força como um potencial, Gor'kov possibilitou identificar facilmente as localizações de aprisionamento estáveis (os mínimos do potencial) em campos acústicos complexos. Seu modelo se mantém como modelo padrão até a atualidade (LI et al., 2025).

Gor'kov introduziu o conceito de “potencial de radiação acústica” denotado por U , onde a força de radiação F_a é o gradiente negativo desse potencial (1):

$$F_a = -\nabla U \quad (1)$$

Em 1974, Elleman et al. estudaram o potencial de usar campos acústicos para cultivar cristais, medir a tensão superficial e fundir materiais sem a contaminação introduzida por um recipiente (ELLEMAN et al., 1974), (WANG, 1979). Wang apresentou *Acoustic Levitation and Manipulation for Space Applications*, em 1979, com foco nos desafios de engenharia de sistemas orbitais

(WANG, 1979) e a NASA desenvolveu um levitador acústico de eixo único nomeado de SAAL (*Single Axis Acoustic Levitator*) que foi utilizado na missão do Ônibus Espacial STS-61A (Spacelab D1) em 1987. Durante o voo, três amostras foram processadas com sucesso em temperaturas entre 600 °C e 1550 °C (REY et al., 1987), (MARZO, 2020). Esses experimentos demonstraram que campos acústicos podiam posicionar gotículas fundidas de forma estável, mesmo sob as condições termodinâmicas variáveis de um ciclo de aquecimento e resfriamento. O comportamento de levitação medido foi comparado com previsões teóricas, validando o uso do potencial de Gor'kov e seus derivados para engenharia espacial (REY et al., 1987).

Algumas décadas depois, a partir da década de 2010 ocorreu a transição dos levitadores clássicos de eixo único, baseados em transdutores de Langevin e refletores, para Matrizes de Transdutores Ultrassônicos (UPAs). Os primeiros sistemas capazes de manipulação 3D real usando múltiplos transdutores digitais apareceram com os trabalhos de Foresti et al. (2013), que demonstrou o transporte sem contato, e Ochiai et al. (2014), com o sistema “Pixie Dust”, que estabeleceu a manipulação de objetos em pleno ar usando *phased arrays* (FUSHIMI; OCHIAI, 2023), (MORRIS et al., 2019). O conceito de Hologramas Acústicos foi formalizado por Asier Marzo et al. em 2015, quando eles demonstraram que é possível projetar frentes de onda complexas com forma de “pinças”, “garrafas” ou “vórtices” acústicos para capturar e mover objetos de forma independente (MARZO et al., 2015). O projeto TinyLev, de Marzo et al., publicado em 2017, democratizou a tecnologia ao criar um levitador de baixo custo usando pequenos transdutores ultrassônicos, permitindo que laboratórios ao redor do mundo construíssem sistemas de múltiplos emissores (MARZO et al., 2017). Em 2019 o uso das técnicas holográficas permitiu a criação de telas volumétricas, onde se levita partículas movendo-as rapidamente a fim de formar imagens 3D no ar (MARZO et al., 2019a), (HIRAYAMA et al., 2019).

Há estudos em áreas diversas que utilizam essa técnica como ferramenta de manipulação sem contato. Alguns exemplos são os estudos em aplicações biológicas e médicas em que Vasileiou demonstrou a transfecção de DNA em células de mamíferos levitadas no ar (VASILEIOU et al., 2016). Posteriormente,

Yang conseguiu manipular bactérias geneticamente modificadas dentro de um organismo vivo (camundongo), usando vesículas de gás como “alças acústicas” (YANG et al., 2023). Os fundamentos de pinças acústicas e holografia propostos por Marzo em 2015 foram corroborados em 2019 com a introdução do controle individual de múltiplas partículas em 3D usando *arrays* de fase e a consolidou o conceito de *Holographic Acoustic Tweezers* (HAT) (MARZO; DRINKWATER, 2019). Esses estudos foram ainda mais disseminados com o oferecimento de uma plataforma de hardware aberto e análise da resolução necessária para criar padrões de amplitude precisos, complementando o TinyLev (MORALES et al., 2021). Há também estudos focados em transformar partículas levitadas em pixels físicos (Voxels) como o de Hirayama et al. em 2019 que introduziu o MATD (*Multimodal Acoustic Trap Display*), um sistema capaz de entregar conteúdo visual, tátil e auditivo simultaneamente usando uma única partícula em alta velocidade (HIRAYAMA et al., 2019). A evolução algorítmica de Hirayama et al. em 2022 permitiu que a levitação funcionasse mesmo com obstáculos físicos espalhando o som, atingindo 10.000 atualizações por segundo e resolvendo o problema de “interferência de superfícies”, o que é relevante para aplicações em realidade mista, uma tecnologia que une o mundo físico e o digital (HIRAYAMA et al., 2022). Outras abordagens curiosas também foram estudadas. Zang descreveu a transformação de uma gota em bolha via ressonância acústica, útil para criar materiais do tipo *core-shell* (ZANG et al., 2018). Polychronopoulos e Memoli usaram um metamaterial reflexivo otimizado para criar armadilhas acústicas fixas e complexas em vez de *arrays* eletrônicos, propondo uma alternativa de baixo custo à holografia dinâmica de Marzo (POLYCHRONOPOULOS; MEMOLI, 2020). O trabalho de Lu et al. (2021) usando controle de abertura subcomprimento de onda representa um passo na miniaturização e precisão das armadilhas acústicas (LU et al., 2021).

Alguns estudos foram realizados na área de controle com realimentação, visto que a transição da levitação acústica de “estática” para “dinâmica e robusta” depende do fechamento do *loop* de controle. A visão computacional é um método de sensoriamento comum para localizar a partícula em 3D, permitindo corrigir desvios causados por correntes de ar ou instabilidades térmicas. Em 2019, Furumoto et al. estudaram a manipulação de grandes objetos. Eles utilizaram

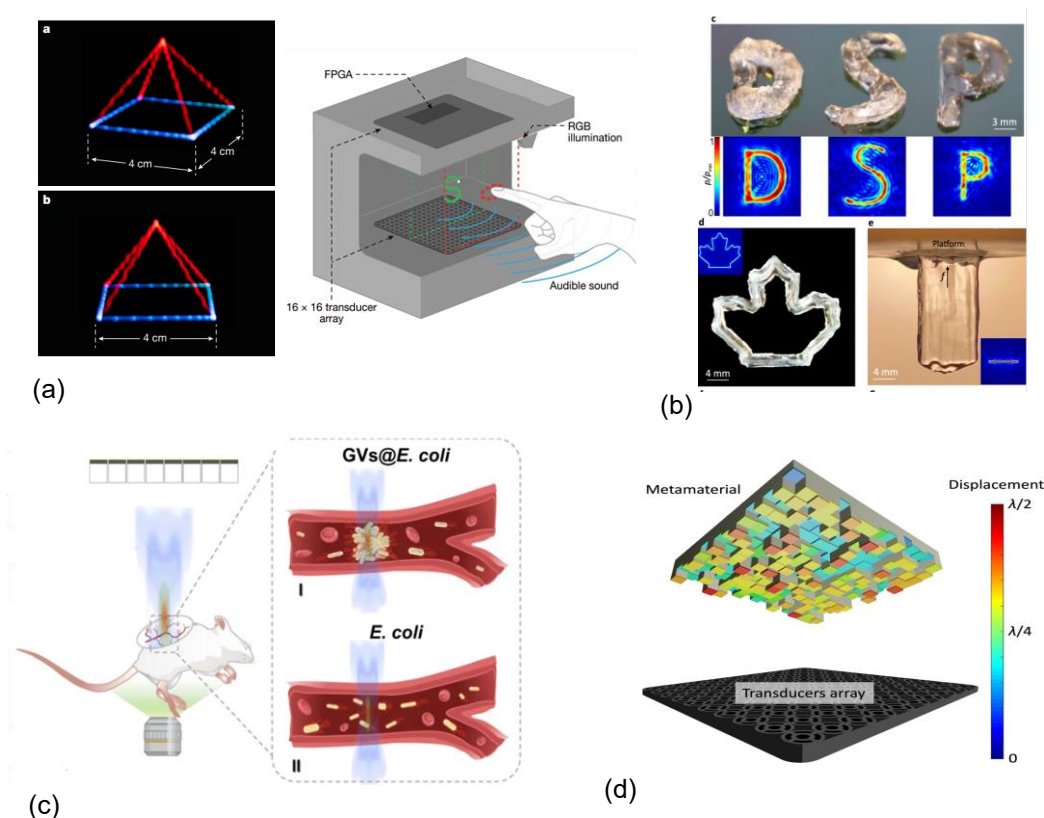
uma câmera para rastrear a posição de um balão de 200 mm e implementaram um controlador PID dinâmico. Eles derivaram um modelo da força de radiação acústica e da dinâmica do sistema para estabilizar o objeto em trajetórias 3D (FURUMOTO et al., 2019). Múltiplas micropartículas foram localizadas simultaneamente com visão estéreo por Wang et al. Seu sistema usa uma estratégia de multiplexação espaço-temporal para criar armadilhas independentes e movê-las em malha fechada (WANG et al., 2024a). Matouš propôs uma plataforma de manipulação acustoforética que utiliza um bloco de visão computacional para medir a posição e alimentar um controlador em tempo real pensada para experimentos de precisão (MATOUŠ, 2018). Bachynskyi et al., estudaram a estabilização de partículas (BACHYNSKYI et al., 2018) e Jia et al., usaram um Observador de Distúrbios para suprimir oscilações em armadilhas acústicas, integrando feedback visual para aumentar a robustez contra interferências externas (JIA et al., 2025). Além de visão computacional, outras formas de realimentação foram estudadas. Davis et al. utilizou um ciclo de realimentação de autoressonância para rastrear a frequência de ressonância de um sistema de levitação em campo próximo (motores acústicos) em tempo real, mantendo a levitação estável mesmo quando as propriedades do ar ou da carga mudam (DAVIS et al., 2018). Wang et al. também menciona o uso de hidrofones para localizar o campo acústico e ajustar sua modulação dinamicamente, junto do uso da visão estéreo para o rastreamento das partículas (WANG et al., 2024a).

O estado da arte atual é caracterizado pela integração de transdutores de matrizes de fase (PATs), transdutores ultrassônicos micromecânicos piezoelétricos (PMUTs) e metamateriais. Matrizes de PMUTs endereçáveis digitalmente permitem a micromanipulação acústico-fluídica reconfigurável e escalável para tecnologias de laboratório em chip (SAKAR et al., 2025). Patentes importantes na área incluem sistemas baseados em matrizes ultrassônicas com controle baseado em FPGA para levitação específica (ZHILI, 2022), sistemas que utilizam células unitárias para manipular campos de onda por meio de atrasos temporais (MEMOLI, 2020), métodos para ejeção de gotas baseados em configurações de emissor-refletor acústico (FORESTI, 2017) e sistemas para

o foco espacial e padronização de diversos materiais utilizando fontes de ondas multifrequenciais (Doyle, 2019).

A figura 1 mostra algumas aplicações. A holografia acústica com feedback tátil é tratada em (a), (b) aplica a manipulação acústica para gerar impressões 3D, (c) mostra a manipulação de bactérias in-vivo e (d) mostra possibilidades de superfície refletora com metamateriais.

Figura 1 – Exemplo de aplicações



Fonte: Adaptado de (a) Hirayama, 2019 (b) Derayatifar, 2024 (c) Yang, 2023 (d) Polychronopoulos, 2020.

2.2 PROCESSAMENTO EM TEMPO REAL

Sistemas em tempo real são definidos por sua capacidade de fornecer resultados logicamente corretos dentro de restrições temporais específicas, diferentemente de sistemas “rápidos” que priorizam a taxa de transferência média, os sistemas em tempo real priorizam o determinismo e a previsibilidade. A área evoluiu de controladores simples de tempo real rígido para sistemas

sofisticados em rede e sistemas de tempo real flexível que lidam com cargas de trabalho dinâmicas e conectividade remota. Compreender as nuances desses sistemas é fundamental para variadas aplicações, entre elas veículos autônomos, teleoperação, automação industrial entre outras (LIPARI, 2015).

Classificar um sistema de tempo real é essencial para selecionar os algoritmos de escalonamento e o hardware apropriados. A literatura identifica vários critérios-chave para determinar a classificação de um sistema. Em sistemas em Tempo Real Rígido (*Hard Real-Time* - HRT) os prazos são rígidos e o atraso, mesmo que mínimo, é considerado uma falha do sistema e pode ter consequências catastróficas (LIPARI, 2015), (FURIO et al., 2018). Em sistemas de Tempo Real Flexível (*Soft Real-Time* - SRT) os prazos são importantes, mas atrasos ocasionais são tolerados e a consequência de um atraso é uma degradação na qualidade do resultado ou na experiência do usuário (LIPARI, 2015). Uma subclasse de SRT é chamada de Tempo Real Firme (*Firm Real-Time* - FRT), onde um resultado só é útil se entregue antes do prazo e se for entregue com atraso será descartado, mas o sistema não falha a menos que muitos prazos sejam perdidos (RODRÍGUEZ, 2011), (SAITO, 2010).

Quanto aos requisitos de previsibilidade os sistemas HRT requerem conhecimento preciso do Tempo de Execução no Pior Caso (*Worst-Case Execution Time* - WCET) para garantir que todos os prazos sejam cumpridos em todas as condições possíveis (LIPARI, 2015). Em relação ao desempenho probabilístico ou médio, os sistemas SRT frequentemente dependem de tempos de execução médios e modelos probabilísticos de carga de trabalho para garantir que os requisitos de tempo sejam atendidos na maioria das vezes (LIPARI, 2015). Os sistemas também são classificados por seu nível de criticidade, sistemas críticos para a segurança como controle de voo ou dispositivos médicos são quase sempre HRT, enquanto sistemas críticos para a missão ou não críticos como *streaming* de vídeo e reservas de passagens aéreas são tipicamente SRT ou de melhor esforço (FURIO et al., 2018), (SANKARAYOGI, 2005).

Os sistemas SRT possuem degradação gradual, ou seja, são projetados para lidar com sobrecargas sacrificando a qualidade do desempenho em vez da integridade do sistema (LIPARI, 2015). Ao contrário dos sistemas de tempo real

rígido que frequentemente desperdiçam recursos provisionando para cenários de pior caso, os sistemas SRT utilizam mecanismos como reserva de recursos para fornecer garantias estatísticas enquanto maximizam a utilização (LIPARI, 2015). Sendo que muitos sistemas SRT incorporam *loops* de feedback para se adaptarem às mudanças nas cargas do sistema ou nas condições ambientais, garantindo que as tarefas mais críticas recebam recursos suficientes (KALOGERAKE et al., 2008), (SAITO, 2010).

2.3 COMUNICAÇÃO SERIAL

A comunicação serial é o processo de envio de dados um bit de cada vez, sequencialmente, por meio de um canal de comunicação ou barramento. O Transmissor/Receptor Assíncrono Universal (UART) é um protocolo de comunicação de hardware fundamental que facilita essa troca serial de maneira configurável (GONG et al., 2023) e desde sua concepção, atribuída a pioneiros como Gordon Bell, o UART evoluiu para uma interface muito presente na comunicação de microcontroladores, sensores e periféricos de computador (ZHANG, 2023), (HUANG et al., 2024).

Ao contrário dos protocolos síncronos que dependem de um sinal de clock compartilhado entre o transmissor e o receptor, o UART opera de forma assíncrona, uma característica que simplifica a interface física, muitas vezes exigindo apenas dois fios de comunicação (transmissor - TX e receptor - RX) e um terra comum. A ausência de um clock compartilhado, no entanto, exige uma estrutura de enquadramento rígida para garantir que o receptor possa amostrar com precisão os bits de dados recebidos (MOHAN et al., 2025).

Sua implementação física envolve a tradução de bits lógicos em sinais elétricos adequados para transmissão por fios, geralmente é interna ao chip com níveis TTL, 0V e 3,3V/5V. O padrão RS-232, por exemplo, utiliza oscilações de tensão mais altas (+12V para lógica 0 e -12V para lógica 1) para melhorar a imunidade a ruído em distâncias maiores. O sincronismo é o aspecto mais crítico da comunicação UART e a velocidade de transmissão é medida em baud, que representa o número de unidades de sinalização (bits) por segundo.

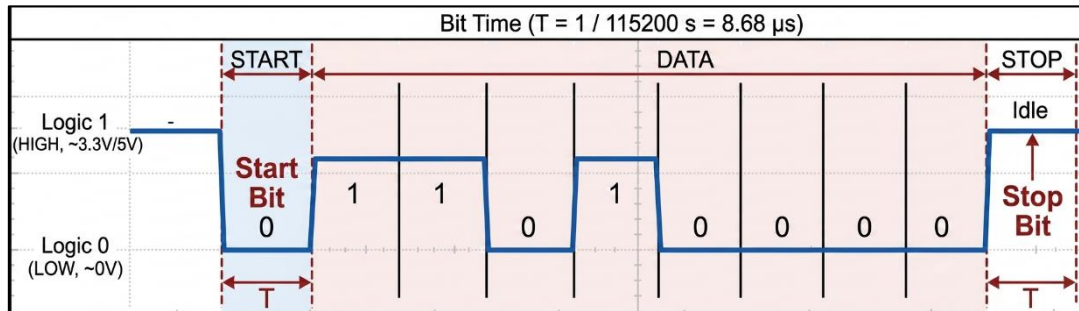
Projetos UART modernos baseados em FPGA podem suportar taxas de baud configuráveis e manter a estabilidade mesmo em frequências superiores a 200 MHz (SINGH et al., 2025), (GOVIL et al., 2022). Para garantir a recuperação precisa dos dados, os receptores normalmente sobreamostram o sinal de entrada, comumente se utiliza um *clock* de sobreamostragem com frequência 16 vezes superior à do sinal. O receptor aguarda a transição de nível alto para baixo do bit de início e, em seguida, conta alguns pulsos a fim de atingir o meio do bit de início. Os bits subsequentes são amostrados a uma taxa fixa de pulsos para garantir que o receptor faça a amostragem no centro de cada período de bit, onde o sinal é mais estável (GONG et al., 2023).

O quadro de dados UART é uma sequência de bits que encapsula a informação propriamente dita, sendo que um quadro padrão consiste em 10 ou 11 bits (VÁSQUEZ, 2023). A transmissão começa com um bit de início, que é sempre um nível lógico baixo, essa transição do estado ocioso (nível lógico alto) alerta o receptor para se preparar para os dados recebidos (JEEVAN et al., 2022). A informação é enviada normalmente em 5 ou 8 bits, sendo 8 bits o padrão mais comum. Essa configuração permite a transmissão de um único caractere ASCII ou um byte de dados binários e em algumas aplicações especializadas, os quadros podem ser estendidos para incluir bits adicionais para sinalização específica ou larguras de dados expandidas (MOHAN et al., 2025).

A paridade é uma forma básica de detecção de erros usada para identificar inversões de bits durante a transmissão. Na paridade par o bit de paridade é configurado de forma que o número total de bits lógicos “um” nos dados mais o bit de paridade seja par (JEEVAN et al., 2022). Na paridade ímpar o bit de paridade é configurado de forma que o número total de bits lógicos “um” seja ímpar (JEEVAN et al., 2022). Embora a paridade seja eficaz na detecção de erros de um único bit, ela falha se dois bits forem corrompidos simultaneamente (VÁSQUEZ, 2023), para superar essa limitação, alguns pesquisadores propõem adicionar bits de checksum ou implementar códigos de correção de erros mais complexos dentro do quadro UART (VÁSQUEZ, 2023), (SUMMERVILLE, 2009). Após os bits de dados e paridade, um ou mais bits de parada são transmitidos como um nível lógico alto para garantir que a linha retorne ao estado ocioso, fornecendo um intervalo mínimo entre os quadros (VÁSQUEZ, 2023).

A figura 2 mostra um sinal elétrico para enviar o byte 00001011 sem bit de paridade, o primeiro bit de dado enviado é o bit menos significativo, ele é antecedido por um start bit em nível baixo e o byte finaliza com um stop bit em nível alto.

Figura 2 – Sinal UART



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

2.4.1 Fundamentos de Formação de Imagem e Calibração

Na área de Processamento Digital de Imagens (PDI) a calibração de câmeras é uma etapa essencial de pré-processamento para qualquer tarefa que exija medição espacial, como reconstrução 3D, robótica e rastreamento de alta precisão. O objetivo fundamental da calibração é determinar as características intrínsecas e a posição espacial (extrínsecas) de um sistema de câmera (ZHANG et al., 2022), (LU et al., 2016). Uma calibração precisa é necessária para que o mapeamento entre o mundo, o qual é tridimensional, e a imagem, que é bidimensional, permaneça qualitativo, pois distorções da lente e desalinhamentos geométricos introduzem erros significativos (DING et al., 2024), (RANGANATHAN et al., 2012).

O modelo de câmera estenopeica é uma estrutura matemática amplamente utilizada para descrever como uma câmera captura uma cena, ele se baseia em aproximar a projeção de pontos 3D em um plano de imagem 2D através de um ponto singular, o centro óptico (BÓDIS-SZOMORÚ et al., 2008), (BHATTI, 2011). A projeção de um ponto em três dimensões $P_{3D} = [X, Y, Z, 1]^T$ para uma coordenada de pixel $p_{2D} = [u, v, 1]^T$ é tipicamente expressa como

uma transformação linear em coordenadas homogêneas como nas equações (2) e (3) (SHAN et al., 2016), (BÓDIS-SZOMORÚ et al., 2008), (RANGANATHAN et al., 2012):

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A [R_{ot}|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Em que:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nessa transformação s é um fator de escala arbitrário multiplicando uma coordenada de pixel. A matriz intrínseca A define os parâmetros internos da câmera: α e β são as distâncias focais em unidades de pixel, γ é o coeficiente de inclinação (*skew coefficient*) e (u_0, v_0) define as coordenadas do ponto principal, que é a interseção do eixo óptico com o plano da imagem (BÓDIS-SZOMORÚ et al., 2008), (LI et al., 2023). A matriz extrínseca, $[R_{ot}|t]$, é uma matriz aumentada 3×4 , formada pela união de R_{ot} (Matriz de Rotação 3×3) com t (Vetor de Translação 3×1). Ela representa a transformação de corpo rígido do sistema de coordenadas do mundo para o sistema de coordenadas da câmera. (SHAN et al., 2016), (RANGANATHAN et al., 2012).

A multiplicação é possível porque as dimensões internas das matrizes se cancelam sucessivamente: a matriz A (3×3) ao multiplicar a matriz extrínseca (3×4) gera uma matriz de projeção total de 3×4 ; esta, por sua vez, ao multiplicar o vetor de coordenadas homogêneas do mundo (4×1), resulta em um vetor final de 3×1 . Esse vetor resultante contém os valores $[su, sv, s]^T$, onde a terceira componente s atua como um fator de escala (profundidade) que, ao ser usado para dividir as duas primeiras, revela as coordenadas reais de pixel (u, v) no plano da imagem.

Lentes reais se desviam do modelo ideal de orifício estenopeico devido a aberrações ópticas, principalmente distorções radiais e tangenciais que devem

ser modeladas matematicamente e corrigidas para manter a integridade geométrica. A distorção radial surge do formato da lente e faz com que a ampliação da imagem varie com a distância do centro óptico, um exemplo é a distorção em barril, na qual as linhas próximas às bordas curvam-se para fora; outro é a distorção em almofada, na qual as linhas próximas às bordas curvam-se para dentro. A distorção tangencial ocorre quando os elementos da lente não estão perfeitamente alinhados com o sensor de imagem e isso leva a uma leve inclinação da imagem (ZHANG et al., 2022), (RANGANATHAN et al., 2012).

O modelo de Brown-Conrady é uma estrutura abrangente para corrigir essas distorções no plano da imagem normalizada. Para um ponto não distorcido (x, y) , o ponto distorcido (x_d, y_d) é calculado da seguinte forma (4) (RANGANATHAN et al., 2012):

$$\begin{aligned} x_d &= x + x_{rad} + x_{tan} \\ y_d &= y + y_{rad} + y_{tan} \end{aligned} \quad (4)$$

Os componentes de distorção radial (x_{rad}, y_{rad}) , equação (5), são regidos pelos coeficientes $k_1, k_2, k_3, \dots$, ou seja, o comportamento e a intensidade do efeito são determinados por esses valores. Eles são frequentemente referidos como $D_1, D_2, \dots$ em implementações de software específicas, como o OpenCV, e a estimativa precisa de k_1 e k_2 é suficiente para a maioria das lentes padrão e de grande angular moderada, não necessitando determinar os valores a partir de k_3 .

$$\begin{aligned} x_{rad} &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ y_{rad} &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ r^2 &= x^2 + y^2 \end{aligned} \quad (5)$$

As componentes de distorção tangencial (x_{tan}, y_{tan}) , equação (6), são regidas pelos coeficientes $p_1, p_2, \dots$:

$$\begin{aligned} x_{tan} &= [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy](1 + p_3r^2 + p_4r^4 + \dots) \\ y_{tan} &= [2p_1xy + p_2(r^2 + 2y^2)](1 + p_3r^2 + p_4r^4 + \dots) \end{aligned} \quad (6)$$

O método de Zhengyou Zhang, de 2000, é uma técnica de calibração baseada em planos amplamente adotada. Ele preenche a lacuna entre os métodos de alvo 3D computacionalmente intensivos e os métodos de autocalibração, frequentemente instáveis (LU et al., 2016), (LI et al., 2023). Zhang usa um alvo plano em forma de tabuleiro de xadrez e define o sistema de coordenadas do mundo de forma que o tabuleiro de xadrez esteja no plano $Z = 0$, simplificando a equação de projeção (7) (SHAN et al., 2016), (BHATTI, 2011):

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A[r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A[r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Isso define uma homografia $H_0 = A[r_1|r_2|t]$ entre o padrão plano e sua imagem, onde H_0 é uma matriz 3×3 estimada a partir da correspondência entre os pontos de canto conhecidos no tabuleiro de xadrez e suas posições detectadas na imagem (SHAN et al., 2016), (LI et al., 2023), (BHATTI, 2011). Como r_1 e r_2 são colunas ortonormais de uma matriz de rotação, elas satisfazem as seguintes restrições (8):

$$\begin{aligned} r_1^T r_2 &= 0 \\ |r_1| &= |r_2| = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Essas restrições na homografia $H_0 = [h_1|h_2|h_3]$ se traduzem em equações (9) envolvendo a matriz intrínseca A :

$$\begin{aligned} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 &= 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 &= h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{aligned} \quad (9)$$

Ao coletar pelo menos duas vistas do padrão planar, essas restrições permitem a solução analítica da matriz $B = A^{-T} A^{-1}$, da qual os parâmetros intrínsecos em A podem ser extraídos via decomposição de Cholesky (BÓDIS-SZOMORÚ et al., 2008), (BHATTI, 2011). Os parâmetros extrínsecos R e t para cada vista são então derivados usando os valores conhecidos de A e H_0 . O fluxo

de trabalho prático envolve capturar múltiplas imagens, pelo menos de 3 a 10, de um tabuleiro de xadrez plano em diferentes orientações, detectar os cantos do tabuleiro de xadrez com alta precisão usando refinamento subpixel, calcular homografias e resolver os parâmetros intrínsecos e extrínsecos iniciais e então usar uma estimativa de máxima verossimilhança (tipicamente o algoritmo de Levenberg-Marquardt) para refinar todos os parâmetros simultaneamente, incluindo os coeficientes de distorção, minimizando o erro de reprojeção (CHEN et al., 2019), (YU et al., 2017), (ZHANG et al., 2024).

Estruturas modernas, como por exemplo a de Zhang et al. de 2022, utilizam abordagens baseadas em aprendizado para codificação robusta de coordenadas de cantos de tabuleiro de xadrez e algoritmos de decodificação de coordenadas com rejeição de outliers (ZHANG et al., 2022), (ZHANG et al., 2022). Esses métodos alcançam precisão subpixel e melhoram significativamente o desempenho em condições desafiadoras. A etapa de refinamento apresentou melhorias por meio da integração de restrições adicionais, Zhang et al., em 2024, propuseram métodos de otimização baseados em restrições multicondicionais, que produzem conjuntos de parâmetros mais estáveis e precisos do que o método tradicional de Zhang (ZHANG et al., 2024). Além disso, o RANSAC (*Random Sample Consensus*) agora é frequentemente usado para excluir correspondências de características discrepantes durante a fase inicial de estimação (ZHANG et al., 2022), (ZHANG et al., 2022).

2.4.2 Extração de Atributos

O Processamento Digital de Imagem é um campo interdisciplinar que fornece as ferramentas necessárias para a interpretação automatizada de dados visuais e dentro deste domínio a segmentação de objetos é um passo crítico para a extração de informações significativas a partir de imagens complexas. Fazem parte dessas técnicas a conversão de imagens em formatos binários através da limiarização, o isolamento físico de objetos via análise de conectividade e a descrição matemática desses objetos utilizando momentos de imagem (VREJOIU, 2020).

A limiarização é um método de segmentação que consiste na conversão de uma imagem em tons de cinza para uma imagem binária, ele facilita etapas subsequentes de morfologia e análise de forma. O processo básico envolve a comparação da intensidade de cada pixel com um valor de limiar predefinido; se a intensidade for superior ao limiar, o pixel é atribuído ao primeiro plano, com valor 1, caso contrário, ao fundo, com valor 0 (SAHA et al., 2000), (SAHA et al., 2001). (HWANG et al., 2011).

A principal fraqueza da limiarização global é sua sensibilidade a mudanças de iluminação, pois variações de brilho e contraste alteram a distribuição dos níveis de cinza, o que pode levar à perda de detalhes do objeto ou à fusão de ruído ao primeiro plano (HWANG et al., 2011), (BEJ et al., 2023). Para mitigar esses efeitos, a literatura propõe diversas estratégias, entre elas estão a transformação para o espaço YCrCb e o uso de limiares nos canais de crominância (Cr/Cb), que são eficazes para segmentar objetos como pele humana em condições de luz variável (HWANG et al., 2011).

Métodos como a Limiarização Adaptativa Gaussiana (AGT) superam a detecção de bordas tradicional (ex: algoritmo de Canny) ao considerar vizinhanças locais de pixels, sendo superiores tanto em imagens nítidas quanto em imagens borradas ou escuras (HAROON, 2023). O uso de filtros de guia rápidos (FGF) combinados com funções gama de dois parâmetros permite remover interferências de iluminação complexa em ambientes industriais (ZHANG et al., 2022b). Métodos dinâmicos que utilizam a intensidade do fundo como referência e ajuste por curvas polinomiais garantem a estabilidade da segmentação em sistemas de visão de máquina sujeitos a envelhecimento de LEDs ou mudanças de voltagem (BEJ et al., 2023).

Uma vez binarizada, a imagem deve ser analisada para isolar regiões de pixels adjacentes que formam um objeto, conhecidas como *blobs*. Algoritmos de detecção de contornos extraem as fronteiras que separam o objeto do fundo utilizando técnicas como a análise de contraste por bloco e a filtragem morfológica, as quais são aplicadas para limpar o mapa binário e selecionar regiões aceitáveis com base em critérios geométricos (HWANG et al., 2011), (VREJOIU, 2020), (DAS et al., 2015). A Rotulação de Componentes Conectados (CCA) é um algoritmo para identificar e etiquetar cada *blob* distinto

em uma imagem binária e permite que propriedades individuais, como área e perímetro, sejam calculadas para cada objeto segmentado. Um exemplo de aplicação é no reconhecimento de placas de veículos ou caracteres, em que é utilizado para separar letras e números individuais que, de outra forma, poderiam ser interpretados como um único bloco de pixels (VREJOIU, 2020), (JAMTSHO et al., 2019).

A Teoria dos Momentos de Imagem e os Momentos de Hu servem para descrição de formas, reconhecimento de padrões e análise de objetos em imagens digitais. Eles transformam a imagem de um objeto em um conjunto de números que caracterizam sua forma, permitindo identificar o objeto independentemente de sua posição, tamanho ou orientação. A teoria dos momentos fornece uma descrição estatística da distribuição de intensidade dos pixels, sendo os momentos brutos, denotados por m_{pq} , calculados a partir da soma dos produtos das coordenadas dos pixels elevadas às potências p e q (DHANYA et al., 2024). O centróide representa a posição média ponderada dos pixels do objeto e seu cálculo corresponde a determinação do centro de gravidade de um objeto binarizado $(\bar{x}, \bar{y})$, que é derivado diretamente desses momentos. O centróide é utilizado para determinar a posição do objeto no espaço da imagem e serve como base para normalizar outros momentos contra translação (DHANYA et al., 2024), (HAN et al., 2011), (AGUIAR et al., 2022).

Os Momentos de Hu consistem em um conjunto de sete descritores derivados de momentos centrais normalizados, eles possuem invariância geométrica dado que os valores permanecem constantes mesmo que o objeto sofra translação, rotação ou alteração de escala (HWANG et al., 2011), (DHANYA et al., 2024), (KUMAR et al., 2021). São amplamente utilizados no reconhecimento de gestos manuais (HWANG et al., 2011), reconhecimento de placas de veículos (JAMTSHO et al., 2019) e no rastreamento de objetos em linhas de produção robótica (NGUYEN et al., 2024), além de que pesquisas recentes exploram momentos complexos e o *Principal Moment Analysis* para definir a orientação única de formas arbitrárias, superando limitações de abordagens que falham em formas não alongadas (AGUIAR et al., 2022).

2.4.3 Visão Estereoscópica e Reconstrução 3D

Um sistema de rastreamento de posição em tempo real para alimentar algoritmos de controle deve permitir que a manipulação seja precisa, nesse sentido, a visão estereoscópica surge como a solução para obter coordenadas 3D de partículas ou objetos levitados (MEIER et al., 2017), (ONO et al., 2023). A geometria epipolar fornece a base teórica para relacionar múltiplas vistas, enquanto a triangulação matemática converte observações 2D em localizações 3D, já o uso de técnicas de álgebra linear, como a Decomposição em Valores Singulares (SVD), garante que o sistema suporte o ruído inerente à captura de imagem e à calibração de câmeras (ROTHER et al., 2001).

A geometria epipolar descreve a relação geométrica intrínseca entre duas câmeras que observam a mesma cena de perspectivas diferentes, nela qualquer ponto no espaço tridimensional juntamente com os centros ópticos das duas câmeras define um plano epipolar cuja intersecção com os planos de imagem das câmeras resulta nas chamadas linhas epipolares (XU et al., 1996). A restrição dessa geometria é que, dado um ponto em uma imagem, sua correspondência na segunda imagem deve obrigatoriamente residir sobre a linha epipolar correspondente (SCHENK et al., 1991), (XU et al., 1996). Esta propriedade é explorada para reduzir a busca de correspondências de um espaço bidimensional para uma busca linear unidimensional (WANG et al., 2024b).

Embora a visão estereoscópica tradicional utilize câmeras dispostas de forma paralela ou convergente com pequena linha de base, as configurações de eixos ortogonais nas quais as câmeras são posicionadas a 90 graus uma da outra oferecem benefícios para o rastreamento (MEIER et al., 2017). Uma montagem ortogonal mitiga falhas de correspondência em que, em sistemas estéreo convencionais, se um objeto ou característica visual estiver alinhado com a linha epipolar a estimativa de profundidade torna-se ambígua ou falha completamente. Ao utilizar uma configuração ortogonal é possível resolver essas regiões de incerteza e aumentar a robustez do sistema, pois o que é ambíguo para um par paralelo de câmeras é geralmente bem definido para o par ortogonal (MEIER et al., 2017).

A triangulação é o processo matemático de determinar a posição tridimensional de pontos a partir de suas projeções em múltiplos planos de imagem, o ponto 3D é encontrado na intersecção dos raios projetivos que partem dos centros das câmeras e passam pelos pontos detectados nas imagens. No entanto, em condições reais, devido a erros de quantização de pixels, ruído no sensor e imprecisões na calibração, esses raios podem não se interceptar em um único ponto no espaço e para resolver essa discrepância, o problema é formulado como a busca pelo ponto 3D que minimiza a distância para todos os raios projetivos envolvidos (BERMUTH et al., 2025).

A Decomposição em Valores Singulares (SVD) é utilizada para resolver o sistema de equações lineares gerado no processo de triangulação (AGUILAR-GONZÁLEZ et al., 2016). Quando temos múltiplas câmeras, um sistema superdeterminado, as equações de projeção podem ser escritas na forma matricial $AP = 0$, onde P representa as coordenadas homogêneas do ponto 3D. A SVD é inerentemente estável frente a matrizes mal condicionadas, o que ocorre frequentemente quando as câmeras têm grandes linhas de base ou quando os pontos estão distantes (ROTHER et al., 2001), (ROTHER et al., 2002), e fornece uma solução que minimiza a norma de erro quadrático médio, sendo robusta contra ruído gaussiano nas observações de pixel. Algoritmos baseados em SVD podem ser aplicados tanto para a reconstrução de pontos quanto para a recuperação simultânea da pose das câmeras, permitindo calibrações dinâmicas ou ajustes em tempo real (ROTHER et al., 2001).

Para que os dados de posição obtidos pelas câmeras sejam úteis eles podem ser transformados do referencial local da câmera para o referencial global do sistema, um processo que envolve a determinação dos parâmetros extrínsecos, ou seja a matriz de rotação R e o vetor de translação t (AGUILAR-GONZÁLEZ et al., 2016). O problema de determinar a pose de uma câmera a partir de correspondências entre pontos 2D na imagem e pontos 3D conhecidos no mundo é conhecido como *Perspective-n-Point* (PnP), originando o termo “*SolvePnP*” frequentemente referido a uma implementação específica em bibliotecas de visão (JUBRAN et al., 2022). Nessa aplicação a SVD pode ser usada para estimar a matriz de rotação que melhor alinha os conjuntos de pontos

entre referenciais distintos (AGUILAR-GONZÁLEZ et al., 2016), (OOMORI et al., 2016).

2.4.4 Rastreamento em imagem

O objetivo do rastreamento de múltiplos objetos (*Multi-Object Tracking - MOT*) é manter a identidade de diversos objetos ao longo do tempo, estimando suas trajetórias a partir de detecções ruidosas em cada quadro do vídeo, sendo o Filtro de Kalman um exemplo de um estimador recursivo útil para sistemas lineares sujeitos a ruído gaussiano (BEWLEY et al., 2016), (RAY et al., 2019). Sua relevância reside em sua capacidade de lidar com a incerteza intrínseca tanto nas medições dos detectores de objetos quanto na própria dinâmica do movimento, pois em cenários reais os objetos podem sofrer oclusões parciais ou totais, onde o detector falha em fornecer uma medição da posição atual. Nestes casos, o rastreador deve confiar em seu modelo interno para prever a localização futura do alvo (RAY et al., 2019).

Para aplicar o Filtro de Kalman ao rastreamento, é necessário definir matematicamente o sistema em termos de um modelo de espaço de estados que descreve como o estado do objeto evolui no tempo e como esse estado se relaciona com as observações capturadas pela imagem. Em sistemas cinemáticos aplicados ao rastreamento 2D em imagens, o vetor de estado x_k no instante k é tipicamente composto por variáveis de posição e velocidade tendo como representação comum o centroide do objeto e suas respectivas velocidades nos eixos cartesianos. Por exemplo, Ray et al. (2019) definem o vetor de estado como (10):

$$x_k = [r_k, c_k, u_{r,k}, v_{c,k}]^T \quad (10)$$

onde (r_k, c_k) representam as coordenadas do centroide (linha e coluna) e $(u_{r,k}, v_{c,k})$ são as velocidades correspondentes (RAY et al., 2019). Outras implementações podem incluir dimensões da *bounding box* (largura, altura e aspect ratio) para capturar mudanças de escala (CAO et al., 2023).

A evolução do estado é modelada como um sistema linear discreto no tempo dado pela equação (11):

$$x_k = Fx_{k-1} + w_{k-1} \quad (11)$$

onde a matriz de transição de estado F define como o estado x_{k-1} se projeta para x_k , assumindo a forma de uma matriz identidade aumentada com o intervalo de amostragem Δt para um modelo de velocidade constante, relacionando a posição futura com a posição atual mais o deslocamento da velocidade. O ruído de processo w_{k-1} é modelado como um ruído branco gaussiano com matriz de covariância que representa incertezas no modelo de movimento, como acelerações súbitas não modeladas (RAY et al., 2019).

As medições, como *bounding boxes* fornecidas por um detector como YOLO ou Faster R-CNN, são ligadas ao estado através da matriz de observação H , equação (12):

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (12)$$

onde z_k é o vetor de medição, v_k é o ruído de medição com covariância R e a matriz H age como um seletor que extrai apenas as componentes de posição do vetor de estado para comparação com a detecção (RAY et al., 2019). O Filtro de Kalman opera em um ciclo contínuo de predição e correção, permitindo que o rastreador refine constantemente sua estimativa à medida que novas informações se tornam disponíveis. A etapa de predição projeta o estado atual e a incerteza para o próximo passo de tempo, sem considerar a medição atual, sendo uma estimativa “a priori” baseada puramente na dinâmica do sistema. A estimativa do estado futuro $\hat{x}_{k|k-1}$ é calculada aplicando a matriz de transição F à estimativa anterior $\hat{x}_{k-1|k-1}$ e a matriz de covariância $P_{k|k-1}$, que representa a incerteza na estimativa, é atualizada considerando a propagação do erro anterior e a adição do ruído de processo Q (RAY et al., 2019), equação (13):

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q \quad (13)$$

Durante falhas de detecção essa etapa fornece a melhor estimativa possível da trajetória do objeto baseada em seu histórico de movimento (BEWLEY et al., 2016) e quando uma nova medição z_k está disponível a etapa de correção ajusta a estimativa a priori para produzir a estimativa a posteriori $\hat{x}_{k|k}$. O peso relativo entre a predição e a medição, dado pelo Ganho de Kalman, equação (14), minimizando a covariância do erro é:

$$K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1} \quad (14)$$

A nova estimativa, equação (15), é a soma da predição com a inovação (resíduo) ponderada pelo ganho:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \quad (15)$$

Na atualização da covariância a incerteza é atualizada, equação (16), refletindo o ganho de informação:

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1} \quad (16)$$

Aqui, I representa a Matriz Identidade, cuja função é permitir a operação de subtração matricial para reduzir a incerteza $P_{k|k-1}$ após a incorporação da nova informação.

Oclusões interrompem o fluxo de medições z_k para o filtro e o rastreador deve lidar com a ausência do termo de correção em que o sistema utiliza apenas as equações de Predição (*Time Update*). O estado é projetado sucessivamente usando F , mantendo o rastreamento ativo sem o ajuste da etapa de correção e permitindo que o filtro preveja a posição do objeto enquanto ele está oculto (GUTTEV; DEBONO, 2021), (JEONG et al., 2014).

Sistemas podem utilizar contadores de quadros sem medição para que, se o objeto não reaparecer dentro de um tempo limite (*timeout*), o rastreo é descartado, pois a incerteza $P_{k|k-1}$ cresce a cada passo de predição sem correção, tornando a estimativa pouco confiável (JEONG et al., 2014). Abordagens como o OC-SORT mitigam o acúmulo de erro durante oclusões

longas através de “trajetórias virtuais”, recuperando o objeto após a oclusão, permitindo que o sistema retroaja e ajuste o estado do filtro para alinhar a predição linear com a posição real de reaparecimento, corrigindo desvios acumulados. Apesar de movimentos não-lineares causarem falhas na predição a priori, o filtro linear permite o processamento em tempo real superior a 700 FPS, sendo adequado para sistemas de baixo custo e alta frequência (CAO et al., 2023).

2.5 ENSINO DE CONTROLE

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) permanece como a topologia de controle mais difundida no cenário industrial devido à sua robustez e simplicidade conceitual, sua dinâmica é fundamentada na ponderação de três ações distintas: a ação proporcional (K_p), que atua no erro presente; a integral (K_i), responsável pela eliminação do erro em regime permanente através do acúmulo histórico; e a derivativa (K_d), que provê uma antecipação da tendência do erro, conferindo amortecimento ao sistema (SOTELO et al., 2022). Sua lei de controle é dada por (17):

$$u_c(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Contudo, o ajuste desses parâmetros impõe um compromisso (*trade-off*) entre estabilidade e desempenho, onde a elevação excessiva de K_i , por exemplo, pode degradar a margem de fase e induzir oscilações indesejadas (*overshoot*). Aumentar a constante proporcional K_p geralmente reduz o tempo de subida e diminui o erro transitório, porém tende a aumentar o *overshoot* e pode deixar erro em regime permanente distinto de zero, quando utilizado isoladamente. O termo integral reduz ou elimina o erro em regime ao acumular erro ao longo do tempo; contudo, K_i elevado costuma aumentar o *overshoot* e prolongar o tempo de acomodação devido à ação acumulada. A ação derivativa K_d antecipa a tendência do erro, geralmente reduzindo o *overshoot* e

melhorando a estabilidade e amortecimento, mas é sensível a ruído de medição e pode amplificar flutuações se mal filtrada (SOTELO et al., 2022).

Métodos de projeto podem incluir análise de lugar das raízes, procedimentos experimentais e algoritmos iterativos usados em ensino prático para ajustar os três ganhos simultaneamente (SOZANSKI, 2023) e implementar anti-windup é recomendado para evitar acumulação excessiva da integral (saturação) quando há não-linearidade inerente aos atuadores físicos, prática comum em controladores embarcados educativos. A validação experimental, feita ao se testar alterações em K_p , K_i e K_d em um laboratório ou kit didático, confirma efeitos observados e ajuda a escolher compromissos entre overshoot, tempo de subida e erro em regime (TRAN et al., 2019).

O controle PID constitui um conhecimento central que engenheiros devem dominar para atuar em diversas áreas da indústria, incluindo processos químicos, mecânicos, eletromecânicos, aeroespaciais e acionamentos elétricos (TRAN et al., 2019). A importância do ensino de controle na graduação em engenharia decorre de sua vasta aplicação como solução eficaz para problemas industriais, Ntogramatzidis et al. (2014) destacam que grande parte dos compensadores usados na indústria são controladores PID, justificando sua posição obrigatória na maioria dos currículos de controle. Kelly e Santibáñez (2001) argumentam que a aplicação de controladores PID é amplamente difundida na automação de processos mecânicos onde o controle de motores é fundamental, tornando essencial que estudantes compreendam tanto os princípios quanto as implementações reais desses controladores.

A educação em controle PID enfrenta desafios significativos relacionados à abstração matemática, pois estudantes frequentemente apresentam dificuldades em conectar controladores à realidade prática. Craig e Roan (2002) observam que o ensino tradicional de controle como disciplina isolada, oferecida tardiamente no currículo, com pouca discussão sobre hardware, implementação ou integração através de projeto, mostra-se ineficaz na preparação para a prática profissional. Raviv et al. (2017) documentam que muitos estudantes, embora obtendo bom desempenho em provas e trabalhos, carecem de compreensão de conceitos básicos fundamentais, como o conceito de estabilidade, e sua pesquisa indica que estudantes contemporâneos buscam

crescentemente métodos visuais e intuitivos de aprendizagem, afastando-se do aprendizado tradicional baseado em livros-texto (RAVIV et al., 2017). Para abordar essa desconexão entre teoria e prática, a literatura tem documentado o desenvolvimento de kits didáticos portáteis e de baixo custo que permitem aos estudantes implementar e testar controladores em sistemas reais (SOTELO et al., 2022), (MOHAMMADIANAFTAH et al., 2024), (SOZANSKI, 2023).

Tran et al. (2019) relatam que laboratórios focados em PID aumentam a capacidade dos alunos de aplicar teoria em sistemas reais e geram feedback estudantil positivo. Mohammadianaftah et al. (2024) enfatizam a importância de experimentos práticos para que estudantes compreendam os princípios e aplicações reais do controle PID e sua pesquisa com kit didático de baixo custo para sistema bola-viga demonstrou eficácia na conexão teoria-prática. Similarmente, Munoz-Vazquez (2025) documenta que o controle PID é fundamental para permitir que alunos compreendam a importância do controle de feedback e obtenham entendimento sobre sua implementação.

A portabilidade e modularidade constituem características valorizadas em kits didáticos modernos. Pickering (2024) avalia a abordagem *lab-in-a-box* (laboratório em caixa), demonstrando através de questionários de avaliação de módulo (MEQ) aumento significativo na satisfação estudantil após sua introdução, oferecendo experiência de engenharia com hardware essencial.

Navarro-Durán et al. (2023) implementaram abordagem de aprendizagem ativa para desenvolver competências disciplinares relacionadas a controle automático usando estações didáticas de baixo custo do tipo “faça você mesmo”. Durante a primeira fase, estudantes guiados por professores projetaram e implementaram quatro protótipos eletromecânicos e em seguida, na segunda fase, os protótipos foram usados em cursos de Engenharia de Controle e Controle Computadorizado para implementar e avaliar controladores. O grupo experimental que utilizou as estações apresentou média final de notas superior ao grupo de controle.

Kim et al. (2020) propõem o uso de Python como alternativa de baixo custo ao MATLAB para implementação de controladores PID, visando universidades de países em desenvolvimento sem licenças de software

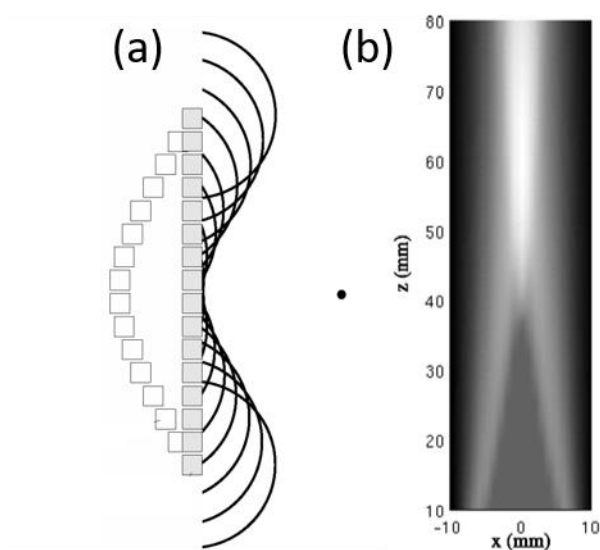
comercial, com uma abordagem que demonstra que limitações orçamentárias de software podem ser contornadas mantendo-se qualidade pedagógica.

2.6 HOLOGRAFIA E ALGORITMO GS-PAT

A manipulação de matéria por campos de pressão experimentou avanços com o desenvolvimento de *Phased Arrays of Transducers* (PATs) e técnicas de holografia computacional (FUSHIMI et al., 2021), (MARZO; DRINKWATER, 2019b). A transição da holografia óptica para a acústica trouxe desafios, mas também oportunidades em termos de força de radiação e escala de objetos manipuláveis, enquanto as pinças ópticas (HOT) operam em escalas micrométricas, as pinças acústicas holográficas (HAT) permitem a manipulação de objetos desde micrômetros até centímetros (MARZO; DRINKWATER, 2019b).

Para conseguir gerar um foco de pressão é necessário sincronizar o momento de emissão de cada transdutor, mantendo cada um deles com a defasagem necessária a fim de criar interferência construtiva em um determinado foco. A figura 3 mostra a criação de um foco de pressão, em (a) diversas frentes de onda são sincronizadas para chegarem em fase na posição do foco. Em (b) uma fileira de transdutores é posicionada na base da imagem e

Figura 3 – Interferência construtiva dos transdutores



Fonte: Adaptado de Franco et al., 2011

a interferência de cada emissão gera uma região de maior pressão (mais brilhante).

O desenvolvimento das pinças acústicas holográficas permitiu a manipulação independente de múltiplas partículas, possibilitando a montagem de microestruturas 3D e o estudo de matéria mole (MARZO; DRINKWATER, 2019b). A capacidade de projetar campos de pressão volumétricos complexos permite aplicações como exibições volumétricas baseadas em voxels físicos levitantes, feedback tátil espaço-temporal e manipulação robótica sem contato (HIRAYAMA et al., 2022b), (PLASENCIA et al., 2020), (VALDIVIA, 2011). Central para esse campo é a compreensão da física de difração e a eficiência dos algoritmos de recuperação de fase, que determinam a precisão e a velocidade com que múltiplos pontos de levitação podem ser gerados e controlados em tempo real (FUSHIMI et al., 2021).

A descrição formal da propagação de ondas de pressão em meios fluidos, como o ar, baseia-se na teoria de difração, sendo que a Integral de Rayleigh–Sommerfeld (RSI) fornece o arcabouço matemático necessário para calcular a pressão acústica complexa em qualquer ponto do espaço a partir de uma superfície emissora harmônica. Este modelo é fundamentado no princípio de Huygens-Fresnel, onde cada ponto de uma frente de onda age como uma fonte secundária de ondas esféricas (PLASENCIA et al., 2020).

Matematicamente, a pressão $p(r)$ em um ponto de observação r é expressa pela integral das contribuições de cada elemento da superfície de fonte S (18) (PLASENCIA et al., 2020):

$$p(r) = \frac{i\rho_0 c_0 k_0}{2\pi} \int \int_S u(r') \frac{e^{-ik_0|r-r'|}}{|r-r'|} ds \quad (18)$$

onde i é a unidade imaginária, ρ_0 representa a densidade do meio fluido (ar), c_0 é a velocidade de propagação do som no meio, k_0 é o número de onda definido como $\frac{\omega}{c_0}$, $u(r')$ é a velocidade da partícula na superfície da fonte, assumindo uma vibração harmônica, r é o ponto de observação, r' é o ponto na fonte e $|r - r'|$ é a distância geométrica (propagador de Green) que define a atenuação geométrica e o deslocamento de fase ao longo da distância.

A aplicação da RSI permite a reconstrução volumétrica de campos acústicos a partir de superfícies medidas ou projetadas (HIRAYAMA et al., 2022b) e em sistemas de levitação, essa formulação é usada para prever a distribuição de pressão necessária para criar nós de pressão estáveis. Além disso, o modelo permite simular como o campo se comporta em diferentes meios e frequências, sendo a base para o projeto de metassuperfícies acústicas e hologramas de espessura zero (PLASENCIA et al., 2020), (ORTEGA-SANDOVAL et al., 2024).

Para projetar matrizes de transdutores (PATs), cada transdutor individual pode ser modelado como um pistão circular vibrando em uma parede infinita (HIRAYAMA et al., 2022b), (NAKAHATA et al., 2012), dado que este modelo simplificado é eficaz para descrever a diretividade e o padrão de radiação dos dispositivos (HIRAYAMA et al., 2022b). A diretividade do feixe acústico gerado por um pistão circular é governada por sua geometria de abertura, sendo que a função de diretividade $D(\theta)$, no campo distante, descreve como a amplitude da pressão varia com o ângulo θ em relação ao eixo central (19) (HIRAYAMA et al., 2022b), (MARZO et al., 2018):

$$D(\theta) = \frac{2J_1(kr\sin\theta)}{kr\sin\theta} \quad (19)$$

Nela, r é o raio do transdutor e $J_1(x)$ é a função de Bessel de primeira ordem e primeira espécie. O papel da função $J_1(x)$ é fundamental para a caracterização do feixe, dado que o termo $\frac{2J_1(x)}{x}$ possui um máximo global no eixo central $x = 0$ e diminui lateralmente. O primeiro zero dessa função define o limite do lobo principal do feixe mas a oscilação da função de Bessel cria lóbulos secundários laterais (HIRAYAMA et al., 2022b). Em matrizes de fase, a gestão desses lóbulos é crucial para evitar pontos de pressão indesejados que poderiam desestabilizar a levitação ou criar objetos virtuais ou sensações táteis que não existem fisicamente, mas que o usuário sente em aplicações de tecnologia háptica (PLASENCIA et al., 2020), (MARZO et al., 2018). Como o argumento da função inclui o número de onda k , o feixe estreita-se, tornando-se mais diretivo à medida que a frequência aumenta ou o raio do transdutor cresce (HIRAYAMA

et al., 2022b). Este modelo é integrado aos algoritmos de holografia para compensar a variação de amplitude que ocorre quando o ponto alvo não está perfeitamente alinhado com o eixo de cada transdutor da matriz (HIRAYAMA et al., 2022b), (MARZO et al., 2018).

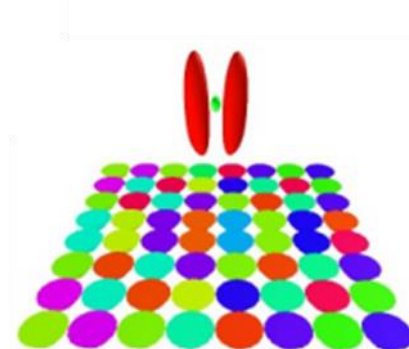
A manipulação estável de objetos em campos acústicos requer a criação de armadilhas (*traps*) que gerem forças restauradoras suficientes em três dimensões e conta com pelo menos três topologias na literatura: *Vortex Traps*, *Bottle Traps* e *Twin Traps* (CHEN et al., 2024). *Vortex Traps* utilizam frentes de onda helicoidais para criar um núcleo de pressão nula, onde o momento angular orbital (OAM) transferido para a partícula pode ser ajustado. No entanto, Marzo et al. (2020) demonstraram que essas armadilhas podem se tornar instáveis para partículas com dimensões comparáveis ao comprimento de onda (λ), fazendo-as orbitar rapidamente até serem ejetadas por forças centrífugas ou instabilidades de *streaming* (COURTNEY et al., 2013), (LIM; JAEGER, 2022).

Bottle Traps são regiões fechadas de baixa pressão cercadas por paredes de alta intensidade acústica, são particularmente eficazes para confinar partículas pequenas em volumes específicos, agindo como um “poço” tridimensional (CHEN et al., 2024). *Twin Traps* são formadas por dois conjuntos de fontes, ou dois hemisférios de uma matriz, que emitem sinais em anti-fase, ou seja, com defasagem de 180° entre si, o que cria um plano de interferência destrutiva (nó de pressão) com um gradiente de pressão muito íngreme em ambos os lados (CHEN et al., 2024).

A *Twin Trap* é reconhecida como a topologia superior para a manipulação de esferas macroscópicas, objetos maiores que $\frac{\lambda}{2}$ ou comparáveis a λ , devido à profundidade do poço de potencial, estabilidade de torque e orientação e resistência à ejeção. A anti-fase gera uma variação de pressão mais abrupta, resultando em poços de potencial de Gor'kov mais profundos que se traduzem em forças restauradoras (força de radiação acústica) muito maiores para contrabalançar o peso e a inércia de objetos macroscópicos (CHEN et al., 2024). Ao contrário dos vórtices, que tendem a girar o objeto, a *Twin Trap* fornece uma fixação estável que pode inclusive ser usada para orientar objetos não esféricos ou agregados de células (ORTEGA-SANDOVAL et al., 2024), (CHEN et al., 2024). Enquanto vórtices podem ejetar partículas grandes devido à transferência

de momento angular, a *Twin Trap* mantém a partícula capturada no plano de anti-fase, sendo mais robusta contra perturbações dinâmicas (LIM; JAEGER, 2022), (CHEN et al., 2024). A figura 4 mostra o formato de pinça da *Twin trap*, que consegue segurar uma esfera, sobre uma matriz de transdutores, cada um com sua fase.

Figura 4 – Armadilha de pinça



Fonte: Adaptado de Marzo, 2015

A geração de hologramas em tempo real para múltiplos pontos de controle exige alta eficiência computacional e nessa área o algoritmo GS-PAT (Gerchberg-Saxton *for Phased Arrays of Transducers*) representa um avanço (PLASENCIA et al., 2020). Ele é uma evolução do método clássico de projeções alternadas que itera entre o plano dos transdutores e o plano dos pontos de controle acústico (PLASENCIA et al., 2020). Em cada iteração, o algoritmo segue esses passos:

- 1 - Propaga a fase atual dos transdutores para os pontos de controle usando o modelo de propagação de pistão.
- 2 - Substitui a amplitude resultante pela amplitude alvo desejada.
- 3 - Retropropaga a fase para a matriz de transdutores.
- 4 - Aplica as restrições físicas da matriz podendo ajustar a amplitude e a fase de cada transdutor.

A principal inovação do GS-PAT é sua implementação massivamente paralela em GPU, permitindo que o sistema recalcule o holograma a taxas de até 17 kHz (PLASENCIA et al., 2020), útil para criar exibições volumétricas onde

as partículas precisam se mover rapidamente para formar imagens persistentes na retina humana (HIRAYAMA et al., 2022b), (PLASENCIA et al., 2020).

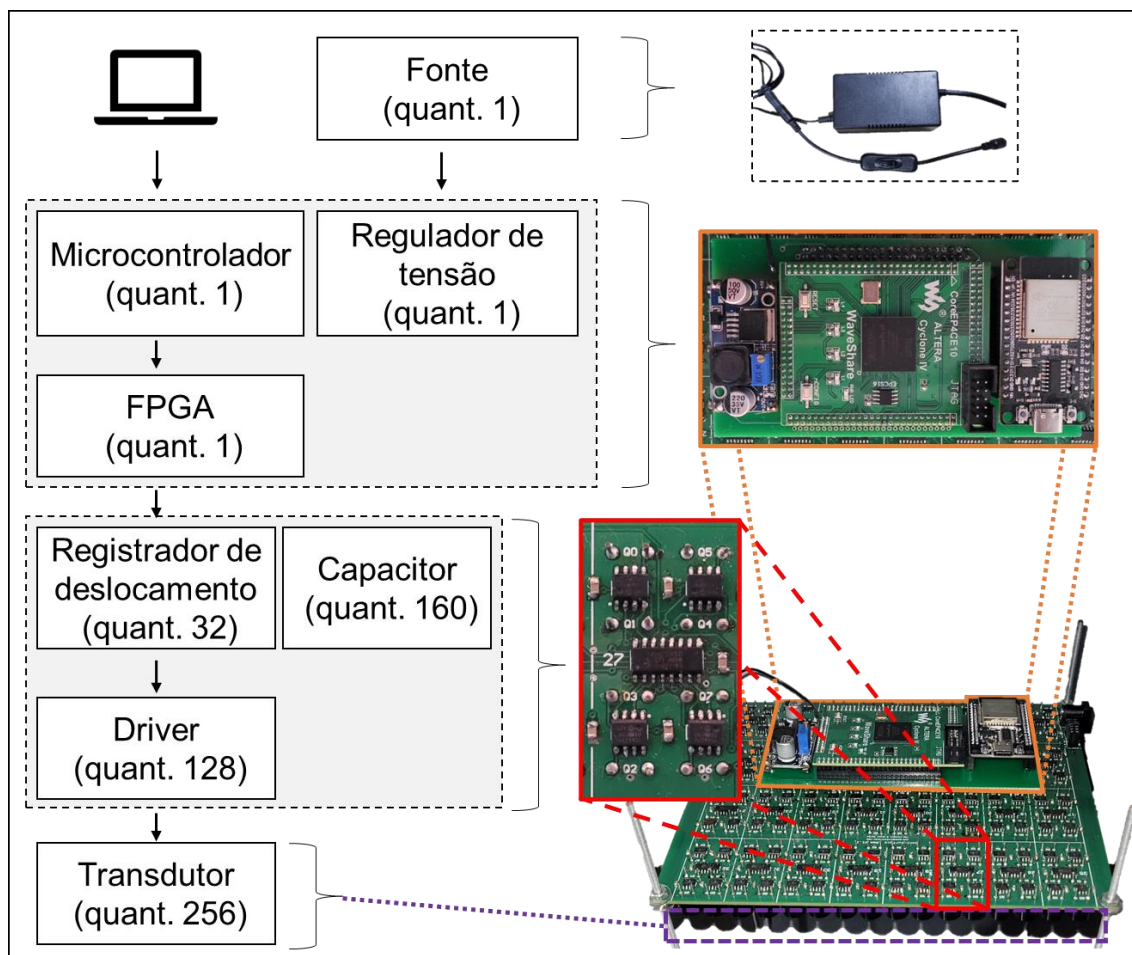
Um problema possível em algoritmos baseados em GS é a estagnação em mínimos locais, onde a fase converge para uma solução que não satisfaz plenamente as amplitudes alvo. Ele pode ser corrigido com o uso de uma técnica de inicialização estratégica como a utilização de uma Semente Geométrica Analítica (FUSHIMI et al., 2021), (MARZO et al., 2018). Ao começar com uma fase baseada na solução analítica de retropropagação, ou seja, a fase necessária para focar em cada ponto individualmente, o algoritmo começa em uma região do espaço de busca próxima à solução ideal reduzindo o número de iterações necessárias para atingir um erro aceitável, o que é crucial para manter a alta taxa de quadros (*framerate*) do sistema GS-PAT (MARZO et al., 2018), (CHEN et al., 2024), (PLASENCIA et al., 2020). Isso também garante que o gradiente de pressão ao redor dos nós de levitação seja maximizado, prevenindo quedas acidentais de partículas durante a manipulação dinâmica (FUSHIMI et al., 2021).

3 PLANTA

3.1 ARQUITETURA DO HARDWARE

Este capítulo detalha a concepção e a construção do protótipo de levitador acústico, fundamentado no design proposto por Morales et al. (2021). A arquitetura aqui apresentada diferencia-se do modelo original ao integrar sistemas de controle, potência e comunicação em uma plataforma unificada, visando maior autonomia, capacidade de processamento e portabilidade. A figura 5 mostra os componentes usados para montar um módulo do hardware.

Figura 5 - Diagrama de componentes de hardware



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ao integrar uma fonte portátil associada a um regulador de tensão *step-down* diretamente no circuito, elimina-se a necessidade de periféricos de

bancada para suprir as diferentes tensões de alimentação do sistema, conferindo portabilidade ao dispositivo. O sistema opera a partir de uma entrada de 18 V e 2 A que alimenta diretamente os drivers de potência. Simultaneamente, um regulador de tensão *step-down*, LM2596, converte essa entrada para uma linha estável de 5 V, responsável por alimentar a lógica digital do microcontrolador, do FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) e dos registradores de deslocamento. A escolha de um regulador *step-down* em vez de um regulador linear justifica-se pela eficiência energética e gestão térmica. Essa configuração elimina a necessidade de fontes externas ajustáveis, facilitando o transporte e adicionando possibilidade de utilização itinerante ao dispositivo.

O microcontrolador ESP32 atua como interface de comunicação entre um sistema de controle externo e o FPGA, que por sua vez, gera e envia sincronizadamente os sinais de cada uma das saídas. A integração entre eles é estabelecida através de um barramento serial UART configurado com uma taxa de transmissão de 115200 bps suficiente para suportar a atualização rápida dos quadros de fase. Além disso, a inclusão do ESP32 introduz conectividade Wi-Fi e Bluetooth ao projeto, permitindo que o levitador atue para além de um experimento isolado, mas como um nó dentro de um ecossistema de Internet das Coisas (IoT) ou controlado remotamente via protocolos de rede, e assim, não apenas replique o princípio da levitação acústica, mas seja uma plataforma integrada para estudos avançados e pesquisa.

O hardware utiliza uma arquitetura modular composta por duas matrizes de 256 transdutores ultrassônicos em que o arranjo geométrico permite configurações de placas paralelas ou o posicionamento sobre superfícies refletoras, visando a síntese de um campo acústico estacionário estável no volume de controle interplacas ou na região entre o arranjo e a superfície refletora. Do ponto de vista de geração dos sinais, o uso de arquiteturas de processamento com FPGA permite o gerenciamento de centenas de canais de saída com determinismo temporal e paralelismo real, características que são requisitos para a geração de armadilhas acústicas complexas e dinâmicas.

O FPGA, modelo Cyclone IV EP4CE10F17C8N, centraliza a sincronização temporal do sistema, ao receber os comandos via UART, o dispositivo sintetiza paralelamente os 256 sinais de onda quadrada de 40 kHz

permitindo aplicar atrasos de fase individuais para cada canal com precisão de nanossegundos. Devido ao elevado número de saídas necessárias, o sinal do FPGA é multiplexado através de uma rede de registradores de deslocamento que acionam os 128 drivers de ponte, os quais elevam a amplitude para 18 V antes de excitarem a malha de transdutores piezoelétricos. Além disso, a capacidade lógica desse modelo de Cyclone IV, com 10.320 elementos lógicos, permite que, em versões futuras do projeto, algoritmos de controle de malha fechada ou modulações mais complexas, como a geração de formas de onda arbitrárias, sejam implementados sem a necessidade de alteração física no hardware.

Para converter os sinais lógicos de baixa potência gerados pelo FPGA em ondas de pressão capazes de sustentar matéria, o hardware utiliza uma cadeia de expansão e amplificação composta por registradores de deslocamento, drivers de potência e transdutores piezoelétricos. Foram implementados 32 circuitos integrados registradores de deslocamento de 8 bits com *latch*, 74HC595, pois a arquitetura de *latch* permite que os dados sejam deslocados internamente sem alterar as saídas atuais, sendo atualizados simultaneamente apenas após o preenchimento de todo o buffer. Isso garante que as frentes de onda de todos os transdutores permaneçam sincronizadas e evita distorções no campo acústico.

A força de radiação acústica é diretamente proporcional à amplitude da pressão sonora emitida e sinais lógicos de 3,3 V ou 5 V são insuficientes para gerar as forças necessárias para a levitação estável de objetos milimétricos. Assim, foram utilizados 128 circuitos integrados TC4427A, que são drivers de MOSFET de alta velocidade e canal duplo, para cada um deles receber dois sinais lógicos e os amplificar para a tensão de barramento de 18 V. Este componente foi selecionado por sua capacidade de fornecer correntes de pico elevadas e por seus tempos de subida e descida reduzidos, típicos de 25 ns, garantindo que a transição do sinal de 40 kHz não sofra deformações térmicas ou temporais significativas.

Outro elemento do hardware é o transdutor ultrassônico de banda estreita MSO-P1040H07T, que opera na frequência central de 40 kHz. Embora o FPGA e os drivers entreguem uma onda quadrada, rica em harmônicos ímpares, a

saída acústica resultante é predominantemente senoidal porque o transdutor piezoelétrico atua como um oscilador mecânico com alto fator de qualidade. A estrutura mecânica do transdutor possui uma frequência de ressonância natural sintonizada em 40 kHz, funcionando como um filtro passa-faixa de banda estreita.

Para mitigar os transientes de comutação causados pela ativação simultânea de centenas de drivers, foram posicionados 160 capacitores de desvio (*bypass*) de $0,1\ \mu F$ em invólucro SMD 0805. Estes capacitores são instalados o mais próximo possível dos pinos de alimentação dos CIs, reduzindo a indutância parasita e prevenindo afundamentos de tensão locais (*sag*) que poderiam comprometer a precisão da fase e, conseqüentemente, a estabilidade das armadilhas acústicas. A comutação simultânea de cargas indutivas e capacitivas em frequências ultrassônicas gera desafios significativos de integridade de sinal e ruído eletromagnético (EMI), para reduzir essa interferência organizou-se as trilhas de alimentação e sinais em uma face da placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board* - PCB) e manteve-se a outra face majoritariamente como um plano de terra (GND) contínuo uma face. O plano de terra cria um caminho para a corrente de retorno fluir e ajuda a conter as linhas de campo elétrico que saem das trilhas de alimentação e sinal, evitando que elas se acoplem em componentes vizinhos ou se propaguem para fora da placa.

A eficácia da levitação acústica depende não apenas da geração eletrônica de sinais, mas da precisão geométrica na disposição dos transdutores e na distância entre as superfícies de propagação. A montagem mecânica do protótipo foi projetada para oferecer rigidez estrutural, sendo a sustentação das placas de transdutores e da eletrônica de controle realizada por meio de quatro barras roscadas de aço, posicionadas nos vértices do arranjo, permitindo ajuste fino da altura entre o emissor e a base ou entre dois emissores. Para que ocorra a formação de uma onda estacionária estável, a distância entre a fonte e o refletor, ou a segunda fonte, deve ser um múltiplo de meio comprimento de onda, $\frac{\lambda}{2}$, ou seja, considerando a velocidade do som no ar aproximadamente 343 m/s e a frequência de operação de 40 kHz, o comprimento de onda é dado por (20):

$$\lambda = \frac{v}{f} \approx 8,57 \text{ mm} \quad (20)$$

Portanto, o ajuste das barras roscadas permite encontrar o ponto de ressonância onde os nós de pressão são máximos, compensando variações atmosféricas de temperatura e umidade que alteram levemente a velocidade do som.

A lista de componentes usados para montar um dos módulos do hardware é dada na tabela 1:

Tabela 1 - Componentes do hardware

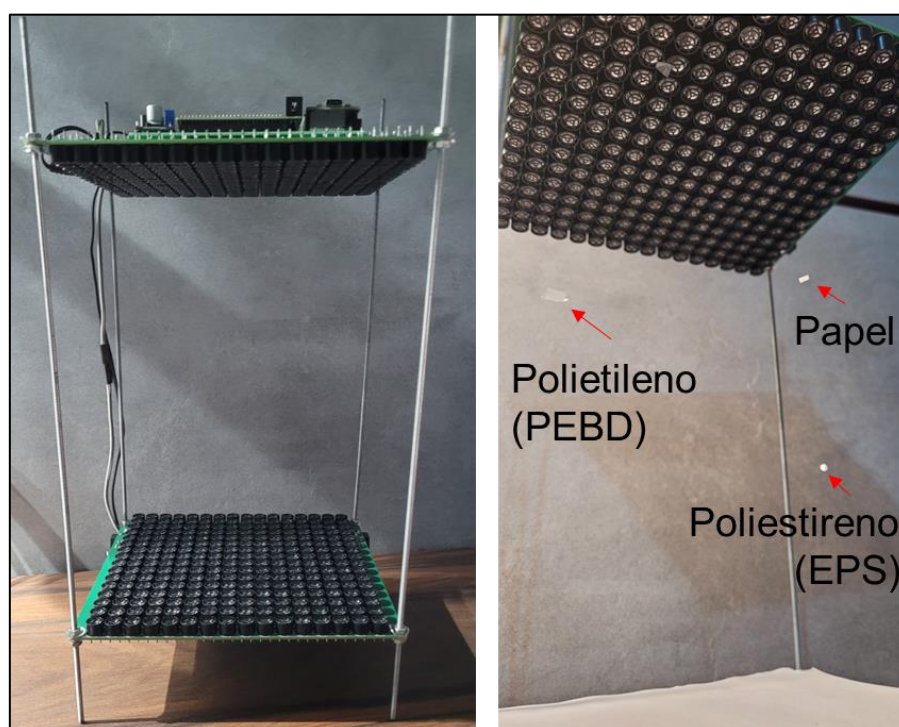
Componente	Modelo	Quantidade
Microcontrolador	Esp32 Doit Devkit	1
FPGA	Cyclone IV EP4CE10F17C8N	1
Modulo regulador de tensão	Step-down LM2596	1
Fonte	18 V / 2 A DC	1
Registrador de deslocamento	74HC595	32
Driver	TC4427A	128
Capacitor	0,1 μF / 50 V SMD 0805	160
Transdutor	MSO-P1040H07T	256

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O hardware foi validado em duas configurações, arranjo simples com refletor plano e arranjo duplo. Na primeira, a placa de transdutores é posicionada paralelamente a uma superfície lisa e acusticamente reflexiva, como acrílico ou vidro, para que a onda emitida interferira construtivamente com a onda refletida, criando nós de pressão estacionários. É uma configuração de baixo custo e alta simplicidade de alinhamento, capaz de sustentar múltiplos objetos simultaneamente, conforme demonstrado nos testes experimentais. Na segunda, duas placas de transdutores são posicionadas face a face e embora isso exija uma sincronização de fase entre as duas matrizes, gerenciada pelo

FPGA, e dobre o custo de transdutores, esta configuração gera forças de radiação acústica significativamente superiores e cria campo acústico mais estável contra perturbações externas, permitindo a manipulação de objetos com maior densidade ou dimensões. Para usar duas placas simultaneamente, na configuração proposta, é necessário conectar a referência de tensão (GND) de ambas, usar o mesmo sinal de *clock*, o mesmo sinal serial RX e o mesmo sinal de referência da onda a 40 KHz em fase 0°. A figura 6 mostra as possibilidades de utilização do hardware (com duas placas em oposição ou uma placa com superfície refletora).

Figura 6 - Configurações de hardware: duplo (esquerda) e simples (direita)

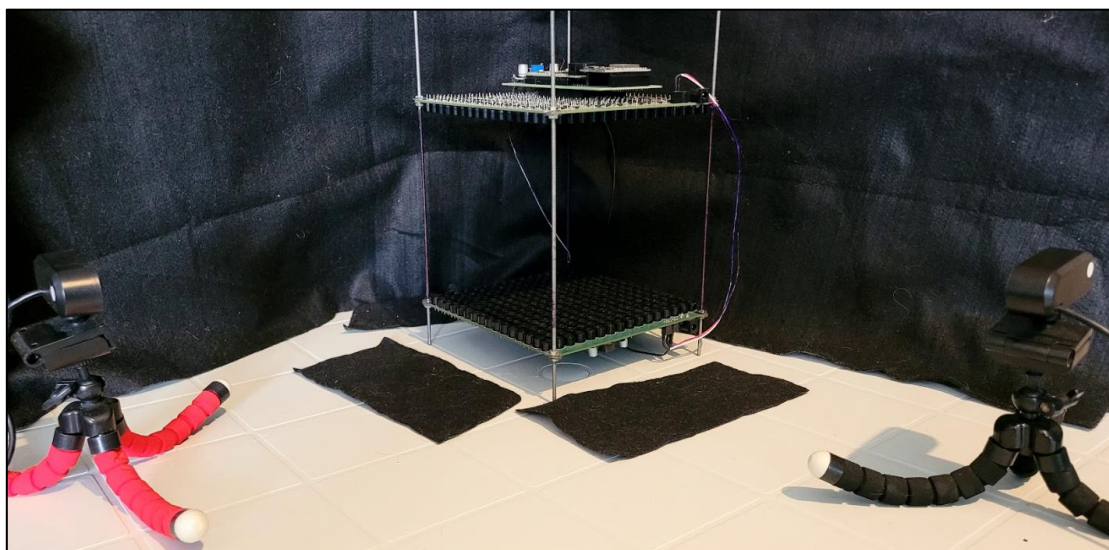


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para viabilizar o estudo de algoritmos de controle de malha fechada e a análise dinâmica das partículas levitadas, o hardware foi equipado com um sistema de monitoramento óptico. Este sistema utiliza duas webcams da marca Ethernità, com 1080p (Full HD) e conexão USB. Elas foram posicionadas de forma perpendicular entre si, voltadas para o volume interno do levitador, um fundo preto foi posicionado com a finalidade de destacar as esferas brancas levitadas.

O objetivo desta implementação é fornecer o sinal de retroalimentação (*feedback*) necessário para o controle de posição, em que as webcams detectam o desvio da partícula em relação ao ponto de equilíbrio permitindo que o controlador compense perturbações externas, como correntes de ar, através do ajuste dinâmico das armadilhas acústicas. Com a infraestrutura física, figura 7, e os mecanismos de retroalimentação, o sistema torna-se apto à implementação dos algoritmos de síntese de fases, permite o rastreamento tridimensional de partículas em tempo real e a realização dos ensaios experimentais de controle dinâmico que serão detalhados nos capítulos subsequentes.

Figura 7 - Configurações de hardware com realimentação óptica



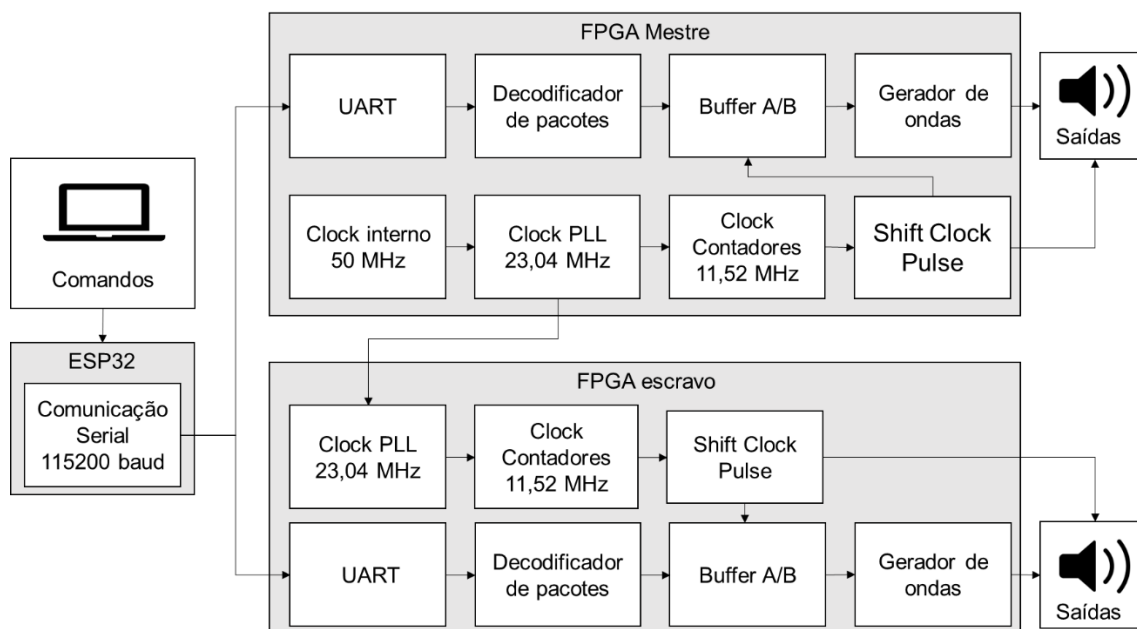
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 ARQUITETURA DO FIRMWARE

O firmware foi desenvolvido em linguagem de descrição de hardware (VHDL) utilizando o software Quartus Prime. A configuração foi projetada visando o determinismo temporal e a integridade dos dados na transição entre o domínio de recepção assíncrona (UART) e o domínio de geração de ondas síncrono. Para elucidar a interconectividade entre esses blocos funcionais e o fluxo de dados predominante no sistema, a figura 8 apresenta o diagrama de

blocos detalhado da arquitetura, evidenciando as dependências lógicas que regem o comportamento global do dispositivo.

Figura 8 – Diagrama funcional do firmware



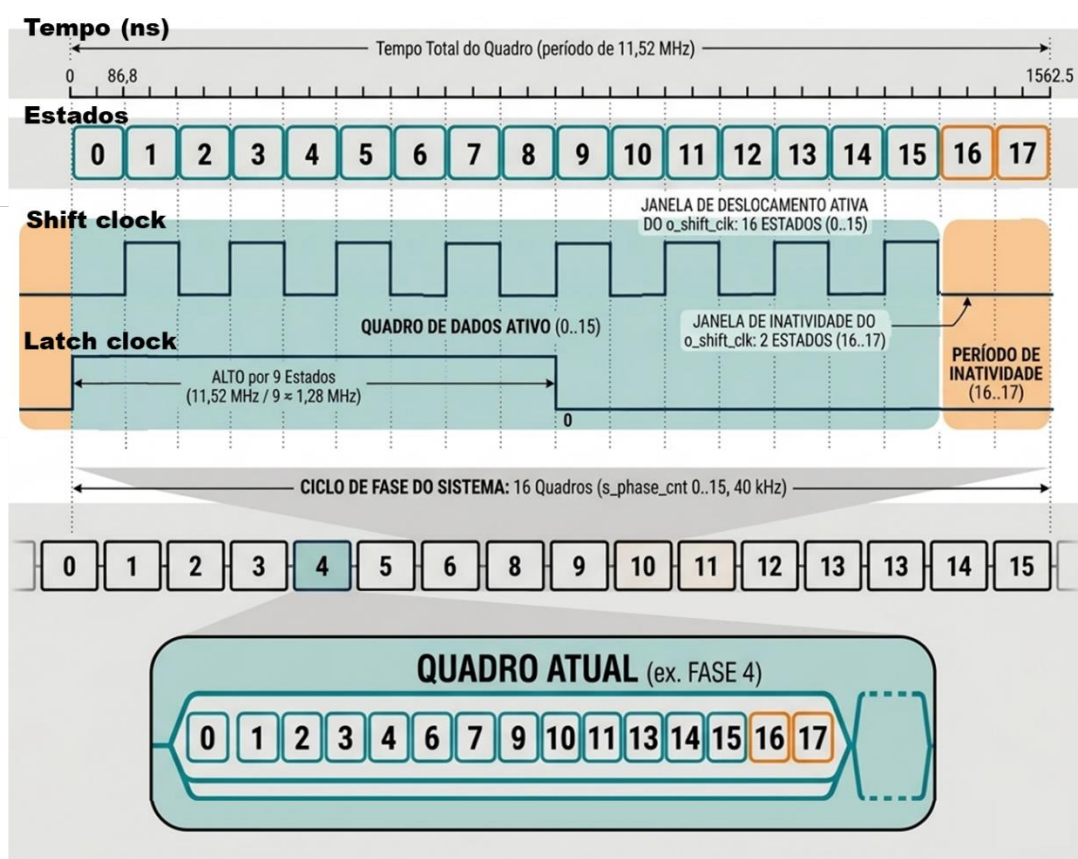
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O *Clock* interno do FPGA (50 MHz) é reduzido com uso do IP Core ALTPLL (Phase-Locked Loop) da Intel gerando uma base de tempo mestre de 23,04 MHz. A arquitetura é fundamentada em uma hierarquia de divisores de frequência e máquinas de estado. O funcionamento do módulo temporização inicia-se com um estágio de pré-escalamento de *clock*, em que, através de um contador binário de um bit, a frequência de entrada é dividida por dois, gerando um sinal de habilitação que pulsa a 11,52 MHz. Esta técnica de *clock enable* é preferível em projetos de lógica programável (FPGA) em detrimento da criação de novos domínios de *clock*, pois mitiga problemas de *skew* e facilita a análise de fechamento de tempo.

A base temporal principal é definida por um contador de dezoito estados (módulo-18), o qual delimita o que se define como “estados” de transmissão. Associado a este, um segundo contador de quatro bits monitora a progressão das fases, permitindo o rastreamento de até dezesseis quadros consecutivos, figura 9. Essa estrutura permite que o sistema identifique a posição do bit individual dentro de um byte e também a posição da palavra dentro de um ciclo

completo de operação de 40 kHz. A geração do sinal de relógio destinado aos registradores de deslocamento externo (*shift clock*) é governada pelo estado do contador de quadro. Durante os primeiros dezesseis ciclos do *clock* habilitado, a saída alterna seu estado lógico seguindo o bit menos significativo do contador e, após este período, o sinal é mantido em nível lógico baixo pelos dois ciclos restantes do quadro. Este comportamento resulta em uma sequência de oito pulsos por quadro, garantindo a transferência completa de um byte de informação de forma síncrona.

Figura 9 – Diagrama dos *clocks* dos registradores de deslocamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Concomitantemente, o módulo sintetiza um sinal de captura (*latch clock*) que, diferentemente do relógio de deslocamento, opera com um ciclo de trabalho (*duty cycle*) de 50%, permanecendo em nível alto durante a primeira metade do quadro (nove ciclos) e em nível baixo na metade subsequente. Essa transição sinaliza aos periféricos o momento de transferência do conteúdo dos registradores de deslocamento para os buffers de saída, isolando o processo de

carga da atualização das saídas físicas. Para a sincronização fina dos dados internos, o módulo gera um pulso de pré-carga (*preload*) que é derivado de uma análise combinatória que identifica o início de cada meio-período par dentro da janela de deslocamento. O pulso possui a duração de apenas um ciclo do *clock* mestre, servindo como um gatilho de alta precisão para preparar os dados antes da borda ativa do relógio de deslocamento. A posição de fase indica em qual dos dezesseis quadros o sistema se encontra, esta saída indica o índice do bit atualmente em processamento, permitindo que a lógica de aplicação selecione o dado correto para a serialização sem a necessidade de contadores externos redundantes, sendo ela a referência de fase de todas as ondas geradas. O registrador de deslocamento recebe em sua entrada o valor alto ou baixo referente ao estado atual da onda do transdutor correspondente, meio comprimento de onda antes da borda de subida do shift *clock* ser enviada para o registrador de deslocamento para que seu dado de entrada seja atualizado. Após atualizar as oito posições do registrador, um sinal de *latch* é enviado para liberar as saídas para serem atualizadas simultaneamente em sua borda de subida.

A entrada de dados no sistema ocorre por meio de uma interface UART, configurada para operar com uma taxa de transmissão estabelecida em 115.200 baud. O fluxo de dados serial é processado por um decodificador de pacotes dedicado, que valida a integridade das informações recebidas e faz remapeamento espacial de endereços. Devido às disposições dos componentes de hardware, os endereços lógicos dos dados recebidos via serial precisam ser mapeados por uma tabela de consulta (*lookup table*) que traduz o endereçamento sequencial de entrada em um mapa físico.

Na comunicação serial, utilizou-se um código em VHDL para implementação do UART. A implementação fundamenta-se em uma arquitetura de nível de transferência entre registradores (RTL), utilizando máquinas de estados finitos (FSM) independentes para os processos de transmissão e recepção. Enquanto o transmissor opera na frequência nominal do *baud*, o receptor utiliza uma técnica de sobreamostragem de dezesseis vezes para permitir a recuperação de *clock* e a sincronização de fase com o fluxo de dados

de entrada, minimizando erros decorrentes de desvios de frequência entre os dispositivos comunicantes.

A comunicação UART é inerentemente assíncrona, o que significa que não existe uma linha de *clock* compartilhada entre o transmissor e o receptor para ditar quando um bit deve ser lido. Para contornar essa ausência, ambos os dispositivos devem concordar previamente com uma taxa de bits fixa (Baud). O hardware utiliza a frequência do sistema 23,04 MHz como referência de alta resolução para subdividir o tempo. A relação entre as frequências foi escolhida dessa forma para satisfazer, com resultado inteiro, a seguinte razão (21):

$$N = \frac{f_{clk}}{Baud} = \frac{23040000}{115200} = 200 \quad (21)$$

onde N representa o número de ciclos de *clock* que compõem a duração de um único bit, ou seja, cada bit transmitido tem a duração exata de 200 ciclos de *clock*, evitando erro acumulado (*baud rate error*) por arredondamento na transmissão.

O caminho de recepção é projetado com múltiplas camadas de proteção contra ruídos e problemas de temporização inerentes a sistemas assíncronos. O sinal de entrada serial passa por um registrador de deslocamento de dois estágios a fim de mitigar os efeitos da metaestabilidade, permitindo que o sinal assíncrono seja corretamente amostrado pelo domínio de *clock* interno. Após a sincronização, aplica-se um filtro digital majoritário baseado em um contador de dois bits, ele atua como um integrador de sinal, onde a transição lógica só é validada após a persistência do nível de tensão por múltiplos ciclos de sobreamostragem, eliminando transientes de ruído de alta frequência. Através de um contador de espaçamento, o sistema localiza o centro ideal de cada bit recebido, pois a amostragem no ponto médio do intervalo de bit maximiza a margem de erro permitida para variações de *clock*, aumentando a confiabilidade da captura de dados.

Então, a máquina de estados monitora a linha em busca do *start bit* (transição para nível lógico baixo) até sua detecção, quando isso ocorre o sistema transita para a fase de coleta, onde oito bits de dados são serialmente

deslocados para um vetor paralelo e, por fim, valida-se o *stop bit* antes de sinalizar a disponibilidade do dado ao sistema superior via um sinal de *strobe*.

O transmissor opera de forma simplificada em relação ao receptor, focando na serialização precisa do barramento de dados de entrada por meio de uma FSM. Ao detectar a solicitação de envio através de um sinal de validação externo, o módulo emite um nível lógico baixo por um período completo de bit, sinalizando o início do pacote. Em seguida um mecanismo de *handshake* é empregado para coordenar o fluxo com o processador ou lógica adjacente e os oito bits de dados são transmitidos sequencialmente, iniciando pelo bit menos significativo (LSB). O sistema utiliza um registrador de deslocamento interno sincronizado com o divisor de *clock* de transmissão e o processo encerra-se com o retorno da linha ao nível lógico alto, garantindo o tempo de guarda necessário para que o receptor remoto identifique o término do quadro e se prepare para a próxima transação.

Para assegurar que a atualização dos parâmetros de controle não interfira na geração dos sinais em tempo real, foi implementada uma arquitetura de memória em regime de duplo buffering, ou técnica de *ping-pong*. A memória é composta por dois bancos independentes (Banco A e Banco B), cada um subdividido em 32 instâncias de memórias de acesso aleatório de pequena escala. Enquanto o sistema de recepção preenche um dos bancos com novos parâmetros de controle provenientes da interface serial o estágio de geração de sinais consome os dados armazenados no banco oposto. O objetivo desta estrutura é permitir a recepção contínua de dados sem que o processamento do pacote anterior interfira na captura do pacote subsequente, otimizando o *throughput* do sistema de comunicação. A unidade gerencia o endereçamento e os sinais de controle para uma memória de acesso aleatório em bloco (BRAM) alternando automaticamente entre dois bancos de memória. Através de um sinal de seleção de buffer, o sistema garante que, enquanto um pacote está sendo escrito em um dos bancos, o banco oposto permanece estático e disponível para leitura por módulos geração dos sinais de saída.

A transição entre os bancos é controlada por um mecanismo de sinalização de “confirmação” (*commit*). A troca efetiva do banco de leitura pelo de escrita ocorre apenas após a validação completa de um pacote de dados e

de forma sincronizada com a borda de subida do sinal de travamento (*latch*) dos registradores de deslocamento. Esse procedimento evita riscos de metaestabilidade e garante que todos os 32 canais de saída sejam atualizados simultaneamente, mantendo a coerência de fase do sistema.

No estado inicial de repouso (*Idle*), o módulo monitora o fluxo de entrada em busca de delimitadores específicos. O comando de teste “Ping”, quando identificado, dispara uma resposta imediata de “Pong” para verificação de conectividade e informa ao módulo de temporização que deve se sincronizar na próxima referência de *clock*, já o delimitador de início de quadro, identificado por um prefixo de sincronização, sinaliza o início de uma transferência de dados. Após a detecção do início de um quadro, a FSM transita para a captura do comprimento do pacote (*Payload Length*), este valor define dinamicamente o número de ciclos de escrita em memória que ocorrerão a seguir. Cada byte validado é encaminhado diretamente ao barramento de escrita da BRAM, utilizando um contador interno para o incremento de endereços. Simultaneamente, o módulo realiza o cálculo acumulado de uma redundância cíclica baseada na operação lógica *XOR* entre todos os bytes da carga útil, utilizado para confirmar a integridade dos dados, quando o *checksum* recebido é comparado com o valor calculado localmente. Qualquer discrepância resulta na invalidação do pacote e na sinalização de um erro de transmissão.

A conclusão de um pacote ocorre apenas após a recepção do delimitador de fim de quadro. Uma vez validado o pacote completo com a delimitação correta e o *checksum* coincidente, o módulo emite um pulso de sincronismo indicando que um novo conjunto de dados está pronto para processamento. Então alterna o seletor de escrita, preparando o buffer oposto para a próxima recepção e inicia um procedimento de *handshake* para transmitir um código de reconhecimento (ACK) ou erro (ERR) de volta ao transmissor, garantindo o fechamento do ciclo de comunicação.

Após o decodificador informar qual buffer está reservado para escrita e qual buffer é destinado para leitura os geradores de onda leem o byte em suas respectivas posições do buffer e geram as ondas com as características de fase e amplitude definidas por ele. A arquitetura proposta utiliza um gerador de sinais digitais baseado em modulação por largura de pulso (PWM) com controle de

fase, otimizado para síntese em lógica programável (FPGA). O módulo em questão é responsável por traduzir vetores de controle em uma saída binária temporalmente modulada, operando em um domínio de *clock* de 23,04 MHz.

A operação do módulo de geração de sinais de onda se inicia pela recepção de um sinal de controle síncrono que atua como um gatilho de atualização para os registradores internos. Cada unidade é alimentada individualmente por um byte de controle extraído do banco de memória ativo e o endereçamento de leitura dessas memórias é orquestrado por um módulo de sincronização, que gera sinais de *preload*, *shift* e *latch* compatíveis com a expansão de saídas via registradores de deslocamento (74HC595).

A interface de entrada recebe um byte de configuração que é segmentado de forma que os 3 bits mais significativos definem o comportamento do ciclo de trabalho do sinal de saída. Este parâmetro é determinado através de uma tabela de busca (LUT – *Look Up Table*) predefinida, que mapeia o índice binário para valores inteiros que representam a duração ativa do pulso dentro de um ciclo de fase. Um bit de controle dedicado atua como um mestre de interrupção (*disable*), permitindo a supressão do sinal de saída (*mute*) independentemente do estado dos contadores internos. Os 4 bits menos significativos especificam um *offset* de fase local para garantir a sincronização ou o desalinhamento proposital das fases entre múltiplos canais, permitindo a síntese de campos de onda complexos e o controle fino de temporização.

A lógica interna realiza o cálculo da fase total somando o índice global recebido ao deslocamento de fase local extraído do byte de controle. Esta operação é truncada pela largura de banda do vetor, comportando-se como uma operação de módulo 2^n . A geração do bit de saída é governada por uma função de comparação de magnitude e o estado lógico da saída é definido pela relação entre a fase total calculada e o valor de *duty cycle* recuperado da LUT. Se a fase total atual for inferior ao limiar definido pela amplitude selecionada, a saída transita para (ou permanece em) nível lógico alto. Caso contrário, ou caso o bit de desabilitação esteja ativo, a saída é forçada ao nível lógico baixo. A lógica descrita é implementada de forma síncrona, sendo avaliada exclusivamente na borda de subida do sinal de relógio. A utilização de variáveis internas para o

processamento intermediário garante que o cálculo da fase e a decisão de saída ocorram dentro de um único ciclo de *clock* após o sinal de *preload*.

O sistema opera sob uma base de tempo derivada de um laço de captura de fase (PLL), operando em 23,04 MHz. A partir deste *clock* mestre, o gerenciador sintetiza um barramento de dados de 32 bits, cujos estados são deslocados serialmente para os periféricos externos, uma onda de referência com frequência de 40 kHz e ciclo de trabalho de 50%, utilizada para o alinhamento de fase de transdutores ou componentes externos e sinais de depuração via LEDs, que indicam visualmente o estado da recepção de pacotes, erros de protocolo e a atividade do sistema.

3.3 SOFTWARE DE APLICAÇÃO

A plataforma foi implementada em um código utilizando Python, ela possui diversas funções como visão computacional, cálculo da atuação de controle de cada transdutor e do formato do campo acústico, calibrações, simulação e codificação para comunicação serial. O software é organizado em uma arquitetura multicamadas que separa a interface de alto nível do processamento matemático e da comunicação de baixo nível.

Um *Solver Acústico* calcula a fase e a amplitude necessárias para cada transdutor. O algoritmo utiliza a propagadores de Rayleigh-Sommerfeld para criar uma Twin Trap, uma geometria de pressão onde um nó central é cercado por regiões de alta pressão, garantindo estabilidade lateral e axial à partícula.

A retroalimentação da posição da partícula é realizada por um sistema de visão computacional em que duas câmeras ortogonais capturam o deslocamento da esfera nos planos XZ e YZ e o software processa os quadros para detectar o centroide da esfera. Para garantir a robustez em tempo real aplica-se um Filtro de Kalman que modela a cinemática da esfera para prever sua posição futura e filtrar ruídos de medição, permitindo que o sistema mantenha o controle mesmo em falhas temporárias de detecção.

A estabilidade da levitação é mantida por um controlador PID. O erro entre a posição alvo e a posição real (estimada pelo filtro de Kalman) é processado para gerar um vetor de correção, este vetor desloca a armadilha acústica para

exercer uma força restauradora sobre a esfera. O sistema permite a execução de trajetórias complexas através de uma máquina de estados, onde a posição da armadilha evolui no tempo de acordo com funções geométricas parametrizadas.

O sinal desejado é discretizado mapeando a fase em 16 níveis discretos (passos de $22,5^\circ$) e a amplitude é convertida em 9 níveis de *duty cycle* por modulação de largura de pulso. A informação do ângulo da fase da onda e sua amplitude são codificados em um byte para cada transdutor. Os dados são então empacotados em um *payload* binário de 512 bytes, protegidos por um *checksum* XOR, e transmitidos via protocolo serial para o hardware de potência.

A precisão do sistema é dependente de um processo de calibração que inclui o alinhamento das câmeras com o centro geométrico da matriz de transdutores e a correção de distorções de lente. A integração entre a calibração óptica e o modelo físico permite que a posição calculada no simulador corresponda milimetricamente à posição física da esfera no levitador.

A base fundamental deste sistema de levitação reside na manipulação controlada da pressão de radiação acústica. Para que uma partícula sólida seja mantida em suspensão no ar, o sistema deve gerar um campo de pressão ultrassônico capaz de neutralizar a força da gravidade e fornecer forças restauradoras em todas as direções (X, Y e Z). O sistema opera com uma frequência fixa de 40 kHz, o que resulta em um comprimento de onda de aproximadamente 8,5 mm no ar se considerada a velocidade do som como sendo 343 m/s. A modelagem matemática trata cada um dos 512 transdutores como fontes pontuais de ondas esféricas que interferem entre si, seguindo o Princípio de Huygens-Fresnel.

O campo acústico em qualquer ponto do espaço é calculado como a soma complexa das contribuições individuais de cada transdutor em que cada contribuição é definida por um propagador acústico, que leva em conta três fatores. São eles, a distância euclidiana, pois a queda de amplitude inversamente proporcional à distância entre o transdutor e o ponto alvo, o atraso de fase, dado pelo deslocamento de fase resultante do tempo de viagem da onda e a função de diretividade, já que como os transdutores possuem um diâmetro físico (10 mm), eles não emitem som de forma perfeitamente esférica. O modelo utiliza

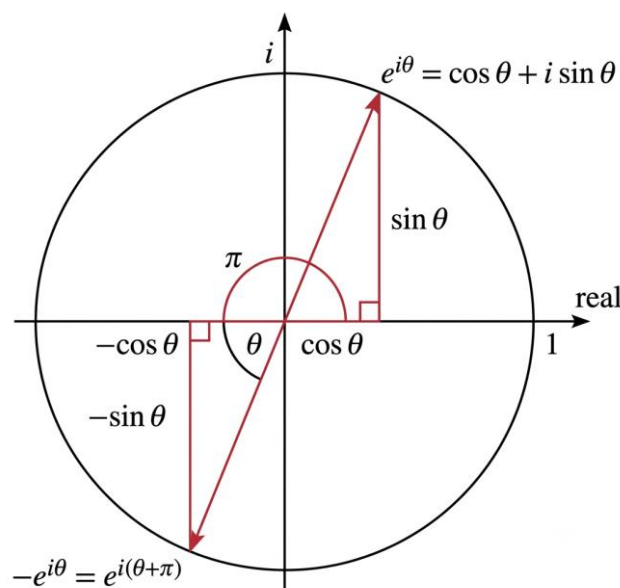
uma função de Bessel de primeira ordem para descrever como a intensidade sonora decai à medida que o ângulo em relação ao eixo central do transdutor aumenta.

Diferente de um simples ponto focal onde todas as ondas convergem em fase, o sistema utiliza a geometria de Twin Trap. Esta configuração é mais robusta para a manipulação de esferas, pois cria uma região de pressão mínima (nó) cercada por duas “paredes” de alta pressão. Para gerar a armadilha, o motor de física calcula dois focos secundários separados 4 mm entre si. A lógica consiste em emitir esses dois focos com uma diferença de fase de 180 graus (π radianos) entre eles, pois essa oposição de fase cria uma zona de interferência destrutiva no centro exato entre os focos, onde a partícula será capturada. A Twin Trap é eficaz porque permite girar a orientação desses muros de pressão, oferecendo controle sobre a estabilidade lateral da partícula.

A diferença entre a fase dos focos é atingida com a equação (22), em que subtrair duas exponenciais complexas equivale a adicionar uma defasagem de 180° (ou π radianos) entre os dois focos, como mostra a figura 10.

$$\text{Campo geométrico} = e^{-i2\pi\frac{d_1}{\lambda}} - e^{-i2\pi\frac{d_2}{\lambda}} \quad (22)$$

Figura 10 – Euler no círculo trigonométrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A geração das fases para os 512 transdutores ocorre em duas etapas principais. Primeiro, o sistema calcula a solução analítica ideal para posicionar os dois focos da armadilha na coordenada desejada. Isso estabelece a base do campo de fases. Depois, o sistema combina as ondas necessárias para os transdutores da placa, caso seja utilizada apenas uma, ou das placas superior e inferior quando se utiliza um arranjo de placas opostas. A coordenação entre as duas placas é necessária para que os nós de pressão não se desloquem devido a erros de sincronia.

Um diferencial da modelagem presente nos códigos é a adaptação dinâmica da armadilha. O motor de física monitora o vetor de velocidade da partícula e quando o sistema detecta que a esfera está se movendo ou deve ser movida em uma direção específica, ele recalcula a orientação espacial da “Twin Trap”. A armadilha é rotacionada de modo que o eixo de maior estabilidade, dado pelo vão entre os dois picos de pressão, esteja sempre alinhado ou compensando o movimento. Isso evita que a esfera saia da armadilha devido à inércia ou a fluxos de ar laterais, permitindo movimentos mais rápidos e fluidos do que em sistemas de levitação estática convencionais.

Por fim, toda a modelagem é mapeada para um sistema de coordenadas tridimensional real, definido pela geometria das placas. O software considera o desalinhamento físico entre as placas superior e inferior e a distância exata entre elas. Considerar esses parâmetros influencia para que o nó de pressão calculado matematicamente coincida com a posição física real onde a esfera deve levitar.

Para que o controle em malha fechada seja efetivo, o sistema necessita de uma percepção precisa e de baixa latência da posição da partícula no espaço tridimensional. A arquitetura de visão computacional atua como o principal sensor de retroalimentação do levitador, transformando fótons capturados por sensores CMOS em coordenadas métricas confiáveis.

O sistema utiliza duas câmeras montadas de forma ortogonal para resolver a ambiguidade de profundidade inerente a uma única imagem 2D, uma monitora o deslocamento lateral no eixo X e a altura no eixo Z, a outra monitora o deslocamento lateral no eixo Y e a mesma altura no eixo Z. Essa configuração simplifica a reconstrução 3D, pois cada câmera fornece diretamente duas das

três coordenadas necessárias, permitindo uma fusão de dados baseada na redundância do eixo vertical Z.

O *pipeline* de processamento de imagem é projetado para maximizar a velocidade, operando em Regiões de Interesse (ROI) pré-definidas. O fluxo de tratamento de cada quadro passa por converter para tons de cinza a fim de reduzir a complexidade de dados, focando apenas na intensidade luminosa. Seguida pela definição de um limiar, em que se aplica um filtro binário no qual pixels acima de um valor crítico tornam-se brancos (objeto) e o restante preto (fundo), este valor é ajustável para compensar variações na iluminação do ambiente. Por fim, operações de erosão e dilatação são aplicadas para eliminar ruídos, e pequenos pontos de brilho, e suavizar o contorno da esfera, garantindo que o objeto detectado seja consistente.

Com a imagem binária limpa, o software executa um algoritmo de detecção de *blobs* que identifica grupos de pixels conectados e calcula as propriedades geométricas desse agrupamento. A característica mais importante extraída é o centroide de massa da esfera, pois em vez de apenas encontrar o centro geométrico do contorno, o sistema calcula a média ponderada da posição dos pixels, o que confere maior precisão à medição, permitindo detectar movimentos menores.

Devido à natureza ruidosa da captura de vídeo, com vibrações, oclusões temporárias ou variações de brilho, o sistema implementa um Filtro de Kalman independente para cada câmera que atua como um estimador de estado recursivo que opera em predição e correção. Baseado na posição e velocidade anteriores, o filtro prevê onde a esfera deveria estar no quadro atual, seguindo as leis da cinemática. Quando o *blob* é detectado, o filtro compara a posição medida com a prevista e o “Ganho de Kalman” decide quanto peso dar à nova medição versus a previsão anterior. Essa técnica ajuda na estabilidade do controle, pois permite que o sistema preveja a posição da esfera por alguns quadros caso ela desapareça momentaneamente da visão, por exemplo, ao passar atrás de um suporte, evitando que o controlador PID gere comandos equivocados por falta de dados.

As coordenadas extraídas em pixels não possuem significado físico direto para o motor de acústica, portanto, o sistema utiliza uma matriz de calibração

intrínseca que corrige distorções radiais e tangenciais provocadas pelas lentes das câmeras. Através de uma transformação linear (homografia) e o conhecimento da geometria das placas, o software mapeia as coordenadas do plano da imagem para o sistema métrico internacional, definido em metros. Esse mapeamento leva em conta o *offset* físico das câmeras em relação ao centro das matrizes de transdutores para que a referência da visão coincida exatamente com o centro geométrico do campo acústico.

A estabilidade de uma partícula em um levitador acústico sofre com perturbações externas, como correntes de ar ou não-linearidades do campo sonoro. Para mitigar essa instabilidade, o sistema implementa uma arquitetura de controle que processa os dados de visão e ajusta a posição da armadilha acústica com algoritmo PID, que atua sobre o erro de posição da esfera. O erro é definido como o vetor tridimensional resultante da diferença entre a posição alvo e a posição real fornecida pelo sistema de visão. O termo proporcional K_p gera uma força restauradora imediata, em que caso a esfera se desloca para uma direção, o controlador move a armadilha acústica para a direção oposta, criando uma “mola virtual” que puxa a partícula de volta ao centro e o termo integral K_i corrige erros residuais de regime estacionário, como o deslocamento provocado pelo peso da própria esfera ou por desalinhamentos físicos entre as placas.

O sistema utiliza uma técnica de *Anti-Windup*, limitando o acúmulo da integral para evitar que o sistema se torne instável após grandes deslocamentos. O termo derivativo K_d atua como um amortecedor dinâmico que observa a taxa de variação do erro (velocidade) e antecipa a frenagem da armadilha para evitar que a esfera ultrapasse o alvo, suavizando o movimento.

Sensores de visão computacional possuem um ruído intrínseco de medição (jitter) e para evitar que o hardware tente corrigir essas variações insignificantes causando vibrações desnecessárias nos transdutores, o controlador implementa uma zona morta. Se o erro de posição for inferior a um limiar crítico, definido em aproximadamente 0,5 mm devido à definição do campo acústico gerado após ser discretizado, o controlador ignora a flutuação, mantendo a estabilidade mecânica do sistema.

A execução de movimentos complexos não é feita de forma abrupta, mas sim através de uma máquina de estados finitos que garante transições suaves entre o repouso e o movimento. No estado inativo (idle), a armadilha permanece em uma posição fixa de segurança. No estado seguinte, quando uma nova trajetória é iniciada, o sistema não salta diretamente para o início da forma, ele calcula uma interpolação linear entre a posição atual da esfera e o ponto inicial da trajetória, movendo a armadilha, e consequentemente a esfera, em uma velocidade controlada. No estado de rastreamento, uma vez no ponto inicial, o sistema inicia a evolução temporal do parâmetro da forma pré-definida (círculo, linha ou lemniscata), movendo o setpoint ao longo do caminho geométrico enquanto o PID mantém a esfera capturada.

Diferente de sistemas de controle puramente digitais, a levitação acústica lida com a inércia física da partícula, e por isso o motor de controle implementa um limitador de aceleração e velocidade escalar. Mesmo quando o usuário solicita um movimento manual brusco via interface, o software processa esse comando através de um filtro de suavização para que a armadilha acústica nunca acelere além da capacidade de captura da pressão de radiação, o que causaria a queda da esfera. O controlador possui ainda uma camada de limitação da região em que é permitida a movimentação da armadilha para evitar que a ela saia da zona de interferência construtiva dos transdutores.

Para que as soluções matemáticas geradas pelo motor de física se traduzam em pressão acústica real, o sistema deve transmitir dados para o hardware com eficiência e confiabilidade. Este processo é governado pelas restrições físicas dos transdutores e da lógica da FPGA. A fase contínua, que varia de 0 a 2π , é mapeada em 16 níveis discretos gerando resolução de $22,5^\circ$ por passo, pois isso permite que o hardware gerencie o tempo de disparo de cada transdutor com contadores digitais simples de 4 bits. A amplitude é convertida em 9 níveis de *duty cycle*, variando de 0% a 50% do período de um comprimento de onda sonora a 40 KHz.

Cada transdutor do *array* de 512 unidades é representado por exatamente um byte de informação e o sistema utiliza uma técnica de empacotamento de bits para otimizar a largura de banda da transmissão serial. Os bits 0 a 3 (menos significativos) armazenam o índice da fase quantizada (0 a 15). O bit 4 atua como

um “mute” de hardware, o qual se ativado, o transdutor é desligado independentemente dos outros valores. Os bits 5 a 7 (mais significativos) armazenam o índice de amplitude. Essa estrutura permite que uma única instrução de 8 bits contenha toda a configuração necessária para o comportamento de um transdutor em um determinado ciclo de onda. A tabela 2 mostra exemplos de bytes com comando de fase e amplitude dos transdutores.

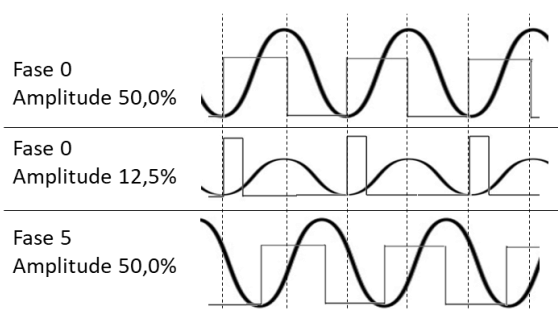
Tabela 2 – Exemplo de bytes decodificados

Decimal	Binário	Amplitude / Ciclo de trabalho	On/OFF	Fase
0	000 0 0000	000 = 6,25 %	0 = ON	0000 = 0
34	001 0 0010	001 = 12,50 %	0 = ON	0010 = 2
67	010 0 0100	010 = 18,75 %	0 = ON	0100 = 4
104	011 0 1000	011 = 25,00 %	0 = ON	1000 = 8
138	100 0 1010	100 = 31,25 %	0 = ON	1010 = 10
172	101 0 1100	101 = 37,50 %	0 = ON	1100 = 12
222	110 1 1110	110 = 43,75 %	1 = OFF	1110 = 14
239	111 0 1111	111 = 50,00 %	0 = ON	1111 = 15

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A figura 11 mostra o impacto de modificar a fase, mudar da fase 0 para fase 5 gera um atraso, já mudar o ciclo de trabalho do PWM altera a amplitude da onda sonora. O sinal enviado ao transdutor é uma onda quadrada e a saída do transdutor é uma senoide.

Figura 11 – Sinal de entrada e saída do transdutor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A transmissão não é feita de forma isolada, mas através de quadros de dados estruturados para garantir a integridade da recepção. Cada pacote enviado pelo computador possui cabeçalho com um byte de sincronia, que sinaliza para o hardware o início de um novo estado de campo. Possui uma sequência contígua de 512 bytes, onde os primeiros 256 correspondem aos transdutores da placa superior e os 256 seguintes à placa inferior. Em seguida é enviado um byte calculado através da operação lógica XOR (Ou-Exclusivo) de todos os bytes do *payload*. O hardware recalcula este valor e o compara com o recebido e se houver divergência, devido a ruído na linha serial, o pacote é descartado. Um byte de rodapé indica o encerramento do frame.

O sistema implementa um protocolo de confirmação para garantir o sincronismo entre o processamento de software e a atuação de hardware em que após o envio de cada frame, o software aguarda um sinal de retorno indicando reconhecimento de sucesso, quando o hardware recebeu, validou o checksum e aplicou as novas fases, ou indicando erro de comunicação. A tabela 3 mostra os bytes usados como referência para recebimento de pacotes de dados.

Tabela 3 – Bytes de referência

Comando	Hexadecimal	Binário
Cabeçalho	FE	11111110
Rodapé	FD	11111101
Ping	55	01010101
ACK	FA	11111010
Erro	FB	11111011
Dados	8 bits codificando fase e amplitude	

Dada a alta carga de dados (515 bytes por atualização), o sistema de comunicação opera em uma linha de execução (*thread*) separada da interface gráfica para evitar que travamentos visuais interfiram na levitação física.

A eficácia de um sistema de levitação acústica depende da coesão entre o mundo digital, onde a física é calculada, e o mundo físico, onde a partícula

reside. Por isso são necessários procedimentos de calibração intrínseca e extrínseca que garantem a precisão espacial do sistema. Lentes de câmeras convencionais introduzem distorções inerentes, como o efeito “barril” ou “almofada”, que deformam a percepção espacial, especialmente nas bordas do quadro, porém resolve-se este problema através de um processo de calibração de câmera baseada em padrões. Na detecção de tabuleiro o sistema utiliza padrões de xadrez conhecidos para identificar pontos de controle, e com a extração de parâmetros através de algoritmos de otimização, o software calcula a matriz intrínseca, distância focal e centro óptico, e os coeficientes de distorção. Estes dados permitem que o sistema corrija matematicamente cada quadro capturado, garantindo que uma linha reta no mundo real seja vista como uma linha reta pelo algoritmo de rastreamento.

O sistema de coordenadas é estabelecido tendo como base a geometria física das matrizes de transdutores em que a origem (0,0,0) é definida no centro da face da placa superior, o eixo Z é negativo em direção à placa inferior, com uma distância ajustada para a ressonância. Os eixos X e Y são alinhados com as linhas e colunas da grade de transdutores. Esta geometria permite que o *software* saiba a posição exata de cada um dos 512 emissores, permitindo o cálculo preciso das interferências de fase.

A calibração extrínseca determina a posição e orientação das câmeras em relação ao centro do levitador. Em vez de exigir um posicionamento manual perfeito das câmeras, o software utiliza um mapeamento de projeção em que são definidos pontos matemáticos virtuais nos cantos do volume de levitação e o sistema projeta esses pontos 3D no plano 2D da câmera. Através da interface de calibração, o operador ajusta os *offsets* até que os pontos projetados coincidam exatamente com os marcos físicos vistos na imagem, com os cantos das placas. Isso cria uma função de transformação que converte qualquer coordenada de pixel detectada pelo sistema de visão em uma coordenada métrica dentro da região do campo acústico. Para validar a calibração o software desenha, sobreposto ao vídeo das câmeras, um cubo virtual amarelo que representa os limites físicos do sistema. Se as linhas amarelas do cubo coincidirem com a região da imagem das placas de transdutores no vídeo, a calibração é considerada válida, mas um desalinhamento visual indica que o

sistema de visão fornecerá dados errados ao controlador PID, exigindo uma nova calibração.

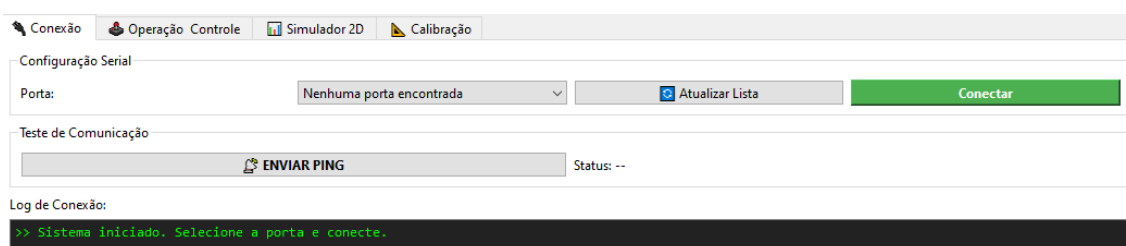
A precisão também envolve lidar com imperfeições nos componentes. O sistema inclui uma camada de mapeamento de transdutores defeituosos na qual, através de um diagnóstico manual ou automático, transdutores que não respondem corretamente são marcados em um arquivo de configuração. O motor de física utiliza essa máscara para ignorar esses emissores no cálculo do campo, ajustando a fase dos transdutores vizinhos para compensar a perda de pressão. Isso garante que a armadilha acústica permaneça simétrica e estável, mesmo que o hardware possua pequenas falhas físicas.

4 RESULTADOS

Este trabalho resultou no desenvolvimento do hardware de um levitador acústico, na elaboração de um firmware em VHDL e na criação de uma interface de usuário em Python. O hardware desenvolvido é capaz de gerar ondas ultrassônicas estáveis sem sobrecarregar os componentes eletroeletrônicos ou causar sobreaquecimento. Por sua vez, o firmware reproduz estavelmente um campo acústico arbitrário, gerando ondas com fases e amplitudes independentes para cada transdutor. A interface de usuário viabiliza a execução de calibrações, a simulação do campo acústico e o controle do sistema, tanto de forma manual quanto por meio de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Ao iniciar o programa, o usuário visualiza uma janela composta por quatro abas: Conexão, Operação e Controle, Simulador 2D e Calibração. Na aba Conexão, Figura 12, viabiliza-se a atualização da lista de portas seriais do computador para estabelecer a comunicação USB com o levitador acústico. Essa aba permite conectar, desconectar e enviar comandos de *ping*, os quais testam a integridade da comunicação e, simultaneamente, sincronizam as placas de transdutores superior e inferior. Abaixo dessas opções, são exibidos os registros (*logs*) históricos da conexão.

Figura 12 – Interface de conexão

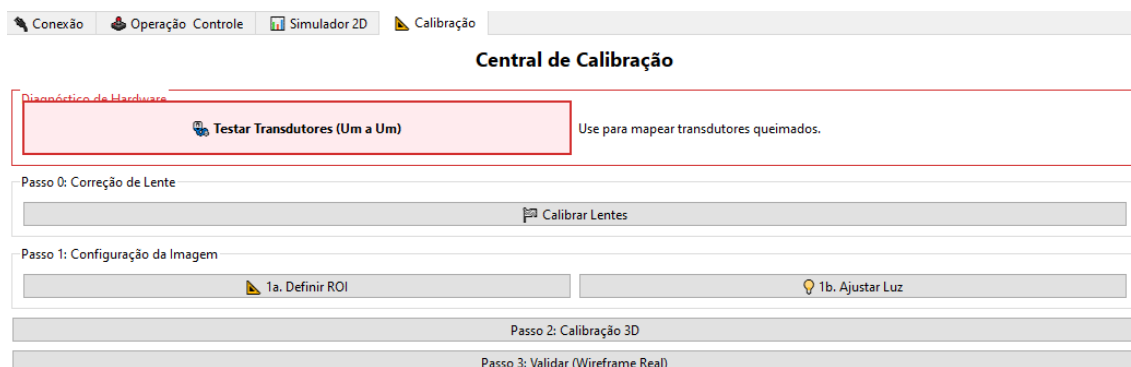


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após o primeiro estabelecimento de conexão, torna-se indispensável calibrar o sistema para assegurar o seu correto funcionamento. A aba Calibração, Figura 13, reúne as instruções necessárias para esse procedimento. Nela, o usuário pode testar os transdutores individualmente; para tanto, deve-se conectar um dos pinos de um transdutor avulso à ponteira de um osciloscópio, e o outro à referência da ponteira, e posicioná-lo sobre o transdutor sob teste na

placa. Caso este esteja operacional, uma onda senoidal de 40 kHz será exibida no visor do osciloscópio.

Figura 13 – Aba de calibração



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Se a onda senoidal for detectada, o usuário deve pressionar a tecla "C"; caso contrário, deve pressionar "X". Em seguida, o próximo transdutor será acionado automaticamente, conforme ilustrado na Figura 14. Esse procedimento deve ser repetido linha por linha até a validação de todos os transdutores. Esse mapeamento permite que, na eventualidade de falha de algum componente, o software recalcule o campo acústico ideal, compensando a ausência do transdutor defeituoso por meio da intensificação da potência daqueles que o circundam.

Cumprido destacar que a calibração dos transdutores deve ser realizada apenas uma vez por hardware. Essa configuração será salva de forma definitiva e servirá para corrigir o comportamento do hardware que contenha transdutores defeituosos, eliminando a necessidade de refazer o procedimento a cada nova inicialização do sistema, visto que o software recuperará esses dados de calibração automaticamente.

Outro procedimento de ajuste que demanda execução única — desde que não haja modificação na posição das câmeras — é a compensação dos ângulos das lentes. Trata-se de um processo fundamental em visão computacional, cujo objetivo é determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos do sistema óptico. Com isso, corrigem-se as distorções introduzidas pelas lentes e estabelece-se uma relação matemática precisa entre o espaço tridimensional real e o plano de imagem bidimensional do sensor.

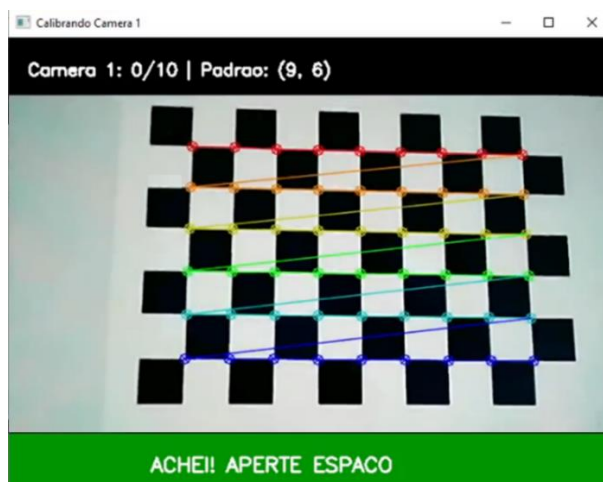
Figura 14 – Definição de quais transdutores estão operacionais ou defeituosos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após o acionamento do botão correspondente à calibração de lentes, o sistema exibirá o fluxo de vídeo da câmera, que buscará identificar um padrão de "tabuleiro de xadrez" composto por 9 colunas e 6 linhas, Figura 15. Utilizando um tabuleiro plano — que pode ser exibido na tela de um *smartphone*, por exemplo —, o operador deve pressionar a barra de espaço para capturar ao menos 12 imagens em diferentes posições, ângulos e distâncias, cobrindo toda a área do campo de visão da câmera. Não há um limite máximo para o número de capturas; de fato, uma amostragem maior tende a aprimorar a precisão dos resultados. Ao final do processo, deve-se pressionar a tecla *Enter* para prosseguir para a próxima câmera ou encerrar a etapa.

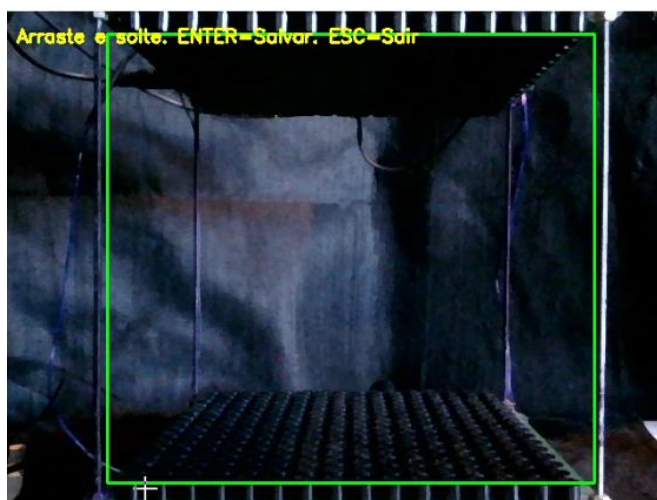
Figura 15 – Calibração do ângulo das lentes das webcams



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com os parâmetros ópticos devidamente estabelecidos, torna-se possível calibrar a Região de Interesse (ROI, do inglês *Region of Interest*). A delimitação dessa área define o espaço exato da imagem onde a esfera será rastreada. Esse recurso é fundamental para excluir pontos reflexivos ou brilhantes estranhos ao ensaio, tais como a estrutura de suporte das placas, Figura 16. Ao circunscrever a busca exclusivamente ao interior útil do levitador, otimiza-se o rastreamento da esfera e reduz-se o custo computacional, visto que um número menor de pixels precisa ser monitorado. Para realizar essa seleção, basta clicar com o mouse e arrastar sobre a área desejada.

Figura 16 – Definição da região de interesse

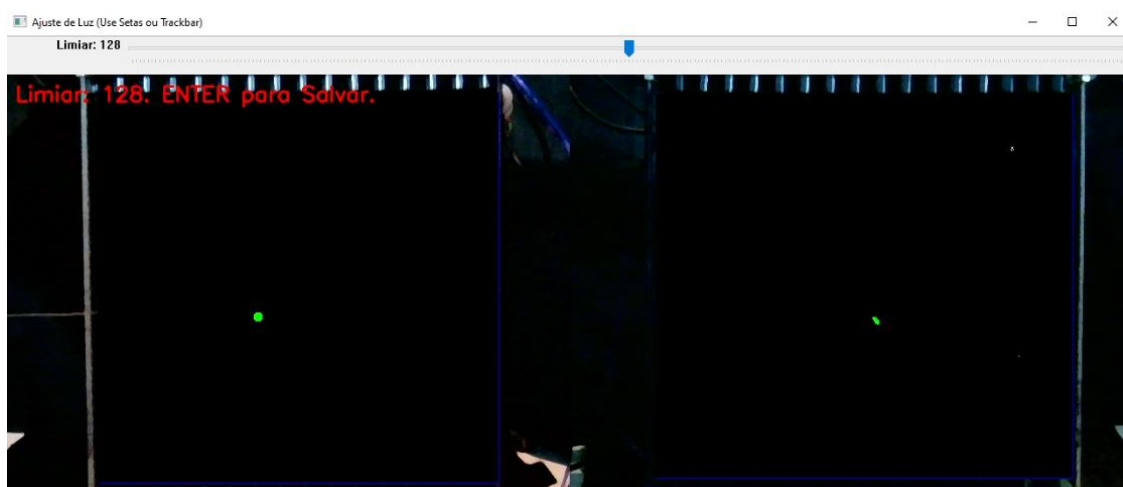


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Adicionalmente, faz-se necessária a calibração do limiar de luminosidade (Figura 17). Ao elevar o valor desse parâmetro, isolam-se apenas as regiões de maior intensidade luminosa na imagem, as quais correspondem à esfera, desconsiderando todo o fundo escuro e ruídos visuais. O ajuste deve ser incrementado gradualmente até que somente o objeto levitado seja segmentado e destacado digitalmente na cor verde.

Posteriormente, deve-se calibrar a relação de escala entre as dimensões em pixels e as distâncias reais no espaço físico. Como o software possui a informação geométrica prévia da distância entre os cantos das placas de transdutores, o mapeamento é realizado posicionando-se a esfera consecutivamente em cada um dos oito vértices do volume interno do levitador,

Figura 17 – Calibração da sensibilidade a luz.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

permitindo que o sistema identifique com precisão a localização tridimensional de qualquer ponto, independentemente da profundidade. A interface gráfica instrui o operador sobre onde posicionar a esfera: se sobre a placa inferior (*Chão*) ou fixada à placa superior (*Teto*), especificando o canto correspondente — "frente" ou "trás" para a Câmera 1, e "direita" ou "esquerda" para a Câmera 2. A Figura 18 ilustra o procedimento de associação entre as coordenadas de pixels na imagem e os pontos físicos reais do volume interno.

Figura 18 – Calibração de distâncias

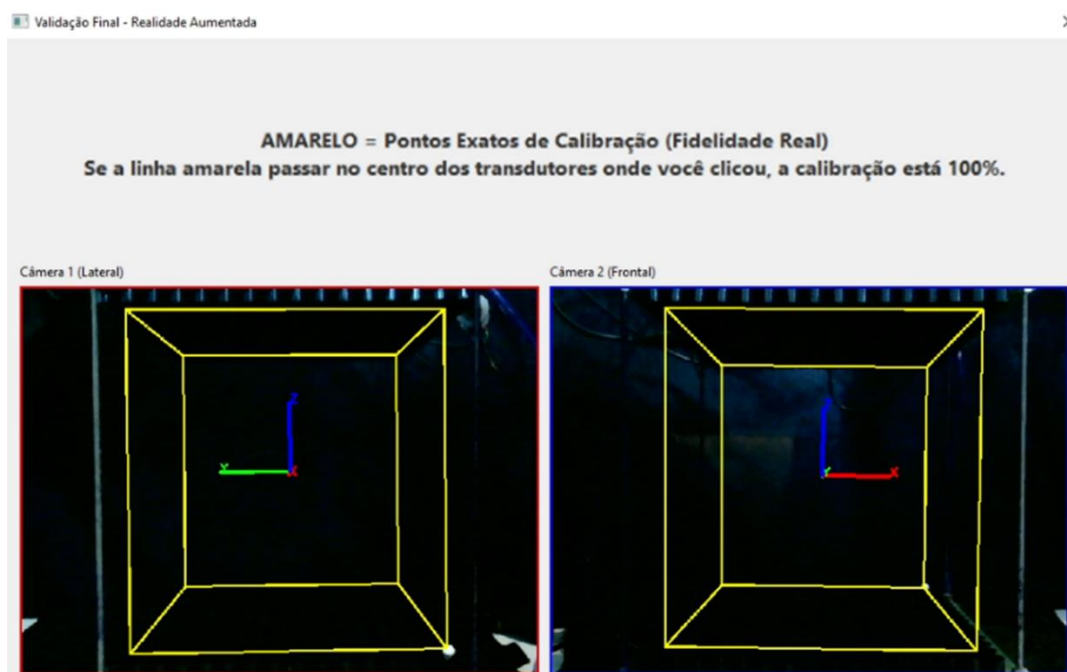


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Concluída essa etapa, o usuário pode acionar o botão "Validar" para projetar um cubo em realidade virtual (Figura 19). Os vértices desse cubo virtual devem coincidir perfeitamente com os cantos físicos do levitador, atestando que as métricas espaciais foram interpretadas corretamente pelo algoritmo. Para fins de projeto, os vértices físicos foram definidos como o centro geométrico entre os quatro transdutores localizados nos cantos das placas, facilitando a fixação manual da esfera e assegurando o perfeito alinhamento. A projeção também exibe os eixos de coordenadas adotados pelo sistema: o eixo X em vermelho, o eixo Y em verde e o eixo Z em azul.

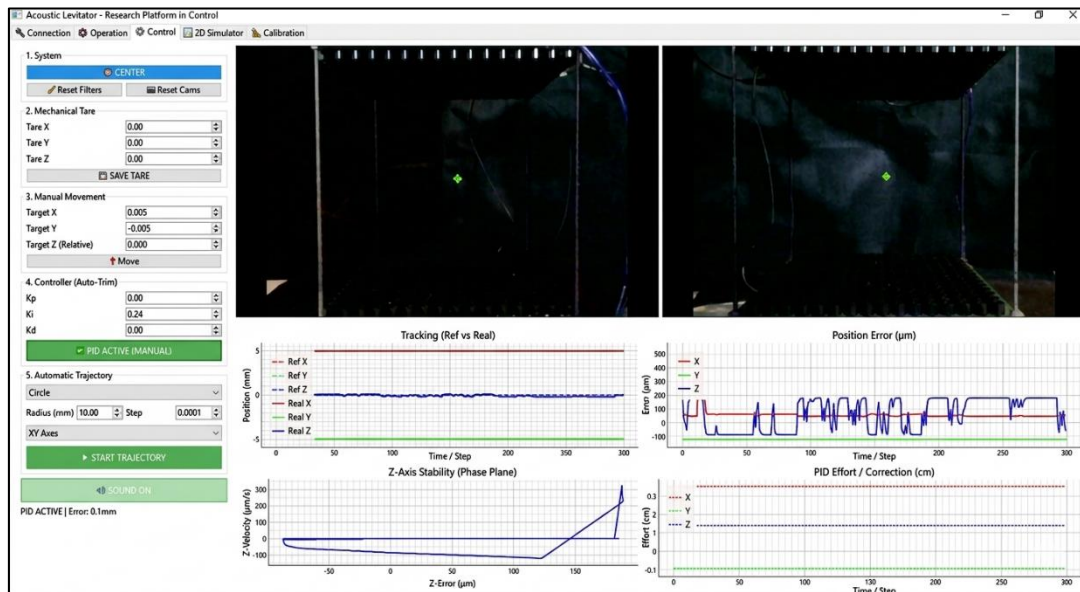
Todas as calibrações permanecem salvas na interface, mesmo após o desligamento do software. No entanto, cumpre ressaltar que as demais calibrações (como a compensação das lentes, a definição da região de interesse, o limiar de luminosidade e a calibração de distâncias reais) devem ser obrigatoriamente refeitas sempre que houver qualquer alteração na posição das câmeras, bem como se o equipamento for movido de lugar ou se a iluminação do ambiente sofrer variações significativas. Uma vez finalizados todos os ajustes, o sistema estará pronto para ser operado.

Figura 19 – Validação do volume interno do levitador



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 20 – Aba de operação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

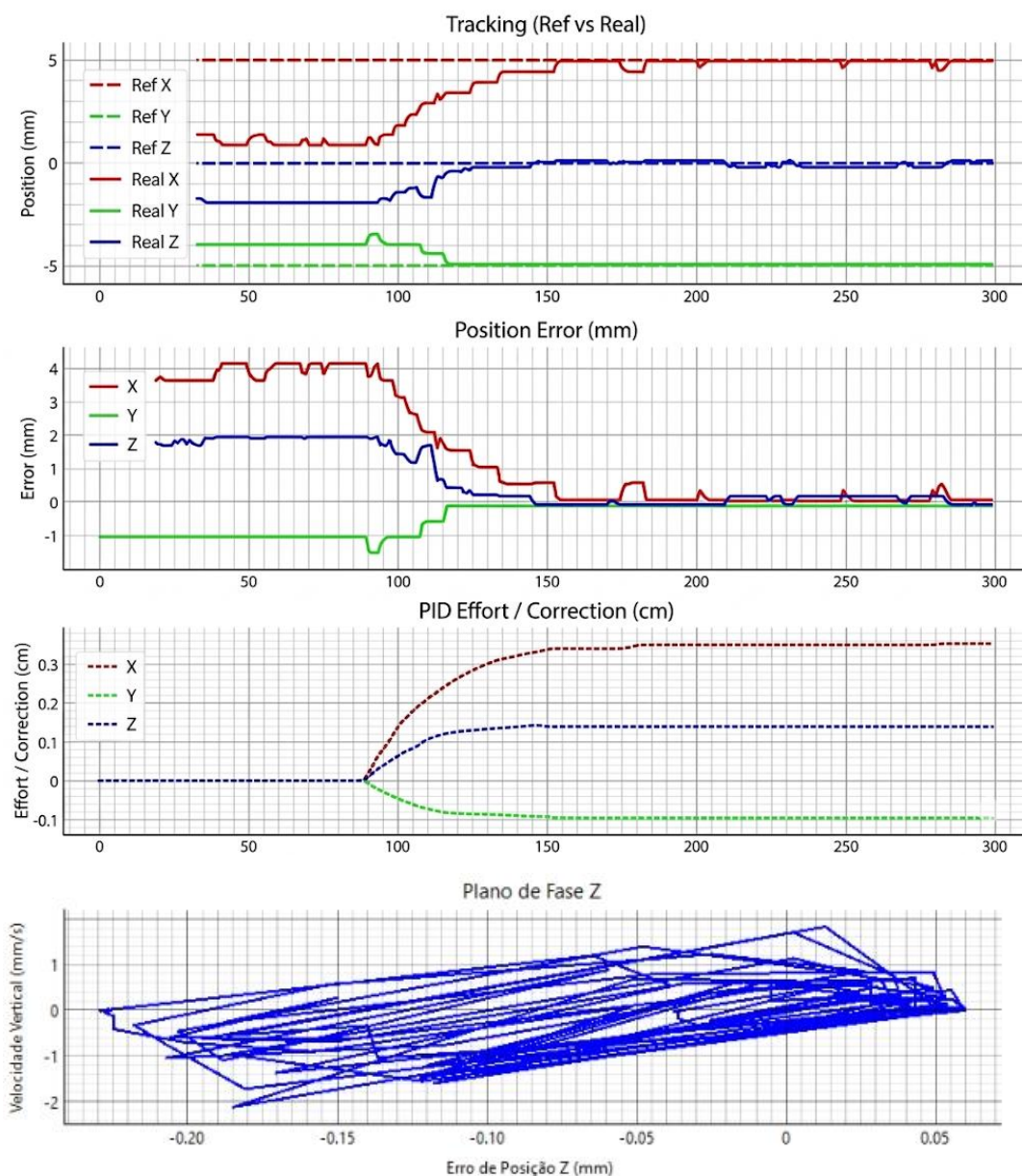
A aba Operação é constituída pelo fluxo de vídeo simultâneo das duas câmeras (Figura 20), por quatro gráficos de monitoramento em tempo real e por uma coluna lateral de comandos. Nas imagens de vídeo, torna-se possível visualizar a posição em tempo real da esfera (identificada por um marcador verde) e a posição de referência desejada (sinalizada por uma cruz amarela). Ao ativar o controlador PID configurado com parâmetros adequados, ambas as marcações devem se tornar concêntricas; quanto maior for o distanciamento entre elas, maior será o erro de posicionamento do sistema.

Imediatamente abaixo das imagens das câmeras, encontram-se dispostos quatro gráficos de desempenho. A Figura 21 ilustra o comportamento dinâmico do sistema ao utilizar uma ação de controle puramente integral, com parâmetros definidos em $K_p = 0$, $K_i = 0,2$ e $K_d = 0$.

O gráfico de rastreamento (*Tracking*) exhibe, em milímetros e para cada um dos três eixos coordenados, a trajetória de referência (representada por linhas tracejadas) em confronto com a posição real medida (representada por linhas contínuas). O gráfico de erro de posição (*Position Error*) quantifica, também em milímetros, o desvio instantâneo entre as posições desejada e real para cada eixo. Por sua vez, o gráfico de esforço do PID (*PID Effort*) evidencia a

magnitude da ação corretiva aplicada pelo controlador em cada direção para mitigar o erro de posicionamento do objeto.

Figura 21 – Interface de conexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O quarto gráfico retrata o plano de fase no eixo Z, permitindo diagnosticar a estabilidade do sistema sem a necessidade de integração analítica explícita. Com base no Teorema de Lyapunov, as regiões de atração podem ser avaliadas geometricamente: uma trajetória em espiral convergente caracteriza um comportamento subamortecido (com presença de sobressinal ou *overshoot*); um

percurso direto rumo ao ponto de repouso indica um regime criticamente amortecido ou sobreamortecido; e uma órbita fechada denota uma oscilação sustentada típica de um sistema marginalmente estável. Por outro lado, trajetórias divergentes evidenciam instabilidade dinâmica. A análise do plano de fase restringiu-se ao eixo Z por ser este o de maior criticidade operacional, dada a atuação contínua da força de gravidade.

À esquerda da tela, exibe-se a coluna de comandos estruturada em cinco seções principais (Figura 22). A Seção 1 contém o botão "Centralizar", que conduz a esfera de qualquer coordenada de volta ao centro geométrico do levitador, além de botões destinados à reinicialização dos filtros de Kalman (responsáveis pelo rastreamento da esfera) e ao restabelecimento da conexão com as webcams, acionados conforme a necessidade do operador. A Seção 2 apresenta as funções de "Tara Mecânica", que operam de modo análogo à tara de uma balança, permitindo introduzir um deslocamento constante arbitrário em qualquer um dos eixos. Esses comandos são úteis para o ajuste manual da posição do objeto (independente do controle automático) ou para a inserção proposital de perturbações com o intuito de avaliar a capacidade de rejeição do controlador PID. A Seção 3 faculta a estipulação manual da coordenada de destino da esfera: o usuário define os valores desejados para cada eixo e, ao acionar o comando de movimentação, o perfil do campo acústico é recalculado para deslocar o objeto até o ponto pretendido. Por fim, a Seção 4 possibilita a inserção dos parâmetros de ganho K_p , K_i e K_d para validar diferentes configurações do controlador PID, acompanhada por um indicador visual colorido (verde para controlador ativo e vermelho para desligado). A Seção 5 gerencia a execução de trajetórias automatizadas (circulares ou quadradas), permitindo ao usuário selecionar o plano geométrico de translação (XY , XZ ou YZ), estipular o raio da trajetória e regular a velocidade de avanço entre as posições discretas. Na extremidade inferior da coluna, encontra-se o botão de desligamento geral, que interrompe a alimentação de todos os transdutores, desativando o levitador por completo.

Figura 22 – Coluna de comandos

1. Sistema

CENTRALIZAR

Reset Filtros Reset Cams

2. Tara Mecânica

Tara X: 0,00

Tara Y: 0,00

Tara Z: 0,00

SALVAR TARA

3. Movimento Manual

Alvo X: 0,000

Alvo Y: 0,000

Alvo Z (Relativo): 0,000

Mover

4. Controlador (Auto-Trim)

Kp: 0,15

Ki: 0,10

Kd: 0,00

CONTROLADOR DESLIGADO

5. Trajetória Automática

Círculo

R(mm): 10,00 Step: 0,0001

XY

▶ INICIAR TRAJETÓRIA

SOM DESLIGADO

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O loop principal de controle opera de maneira assíncrona, gerenciado por um temporizador de alta precisão (QTimer), programado com uma frequência nominal de amostragem de 20 Hz, o que corresponde a um período de tempo discreto (Δt) de aproximadamente 50 ms. A cada ciclo temporal, o sistema executa sequencialmente as seguintes etapas de processamento:

- Sensoriamento: O subsistema de visão computacional atualiza as coordenadas globais, mensurando a posição tridimensional real do objeto levitado;

- Comparação e Cálculo do Erro: O algoritmo confronta a coordenada real obtida com o alvo cinemático instantâneo, gerando um vetor de erro espacial;
- Computação da Ação Corretiva: O vetor de erro alimenta um algoritmo PID vetorizado, que calcula o deslocamento compensatório requerido;
- Saturação e Transmissão: O sinal de comando gerado é submetido a restrições de saturação física baseadas nos limites operacionais do hardware e, subsequentemente, é transmitido aos atuadores eletrônicos por meio de uma região de memória compartilhada e protegida por exclusão mútua (*thread-lock*).

A geração dos perfis geométricos baseia-se na parametrização de curvas bidimensionais, às quais são transladadas e projetadas no espaço euclidiano tridimensional por meio de operadores lineares. A evolução ao longo da trajetória é governada por uma variável escalar adimensional de tempo normalizado, definida como $t_{param} \in [0, 1]$. O mapeamento do espaço paramétrico para o espaço de estados altera-se conforme a topologia selecionada na interface de controle, conforme detalhado a seguir. Para a geração do perfil circular, utiliza-se uma parametrização trigonométrica ortogonal. Dado um raio R definido em metros, as coordenadas no plano local são expressas por (23):

$$\begin{aligned} u_{circulo}(t) &= R \cdot \cos(2\pi \cdot t_{param}) \\ v_{circulo}(t) &= R \cdot \sin(2\pi \cdot t_{param}) \end{aligned} \quad (23)$$

Esse método assegura que, sob uma taxa de variação constante de t_{param} , a velocidade tangencial e a aceleração centrípeta teóricas do alvo permaneçam uniformes ao longo de todo o perímetro da trajetória.

Já a geração do perfil quadrado requer uma abordagem de interpolação linear por partes, em que o domínio contínuo t_{param} é mapeado em quatro segmentos discretos através da amplificação do espaço de estados por um fator equivalente ao número de vértices da geometria. A posição local instantânea é calculada pela combinação linear convexa entre o vértice inicial e o vértice subsequente do segmento ativo, equação (24).

$$V(t) = V_1 + (V_2 - V_1) \cdot (t_{param} \cdot 4 \pmod{1}) \quad (24)$$

O gerenciamento temporal e operacional da trajetória é supervisionado por uma Máquina de Estados Finita (FSM). No estado de inércia (Idle), o loop de controle permanece em modo de espera. No instante do gatilho ($t = 0$), o algoritmo armazena a posição real da esfera $x_{start} = x_{real}(0)$ e define como vetor de destino o ponto inicial da forma geométrica $x_{end} = x_{target}(0)_{geometria}$. O alvo dinâmico instantâneo passa a ser uma interpolação linear contínua, equação (25):

$$x_{target}(t) = x_{start} + (x_{end} - x_{start}) \cdot t_{param} \quad (25)$$

Durante esta fase, t_{param} avança a uma taxa fixa de 0,05 a cada ciclo de estabilização até atingir a unidade [1,0], conduzindo o objeto de forma controlada até a borda do perfil geométrico. Uma vez concluída a aproximação, a FSM redefine $t_{param} = 0,0$ e altera seu estado para o rastreamento ativo. A partir deste momento, o avanço da variável paramétrica deixa de ser estritamente temporal e passa a depender do desempenho dinâmico do erro do sistema, indexado pelo incremento fracionário Δt_{param} (parâmetro "step" na figura 22).

A estabilização do objeto e a rejeição de perturbações externas são executadas por um algoritmo de controle Proporcional-Integral-Derivativo digitalizado, implementado de forma vetorial independente para cada um dos três eixos ortogonais. O vetor de erro espacial instantâneo $e(t) \in \mathbb{R}^3$ é definido como a diferença algébrica entre a posição de referência e a posição real fornecida pelo sensor, equação (26):

$$e(t) = x_{target}(t) - x_{real}(t) \quad (26)$$

A resposta matemática do controlador gera um vetor de correção espacial $u_{PID}(t)$, cuja equação em diferenças discretas é expressa por (27):

$$u_{PID}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot I(t) + K_d \cdot \frac{e(t) - e(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (27)$$

Para contornar o fenômeno de saturação do termo integral (*integral windup*), que ocorre quando um erro persistente acumula excesso de energia no integrador durante transientes longos, o algoritmo impõe uma janela de saturação ao estado da integral $I(t)$, equação (28):

$$I(t) = \text{clip}(I(t - \Delta t) + e(t) \cdot \Delta t; -0,01; 0,01) \quad (28)$$

Esta restrição impede que a memória acumulada do termo integral desvie o comando do sistema além do limite de 1 cm, acelerando o tempo de recuperação do controlador após distúrbios de grande magnitude. A arquitetura deste sistema emprega o princípio do seguidor de referência em que a saída do bloco PID é diretamente somada ao vetor da trajetória geométrica pura, equação (29):

$$x_{comando}(t) = x_{target}(t) + u_{PID}(t) \quad (29)$$

Caso o objeto físico apresente um atraso de fase em relação ao alvo dinâmico, devido ao arrasto aerodinâmico ou à inércia do corpo, o vetor de erro se expande e o controlador gera uma correção orientada no mesmo sentido do erro, o que, na prática, projeta o comando físico enviado ao hardware para uma posição além do perímetro geométrico nominal. Esse deslocamento artificial aumenta o gradiente de força restauradora, forçando o objeto a acelerar em direção à trajetória ideal.

O avanço da trajetória ao longo do perfil geométrico é governado por um critério dinâmico baseado em limiares de tolerância espacial. Em vez de forçar o avanço da geometria em função do tempo de relógio, o algoritmo condiciona o incremento de t_{param} à estabilização do erro dentro de uma zona de convergência admissível. O erro escalar de rastreamento é computado por meio da norma euclidiana L2 do vetor de erro, equação (30):

$$||e(t)||_2 = \sqrt{e_x^2(t) + e_y^2(t) + e_z^2(t)} \quad (30)$$

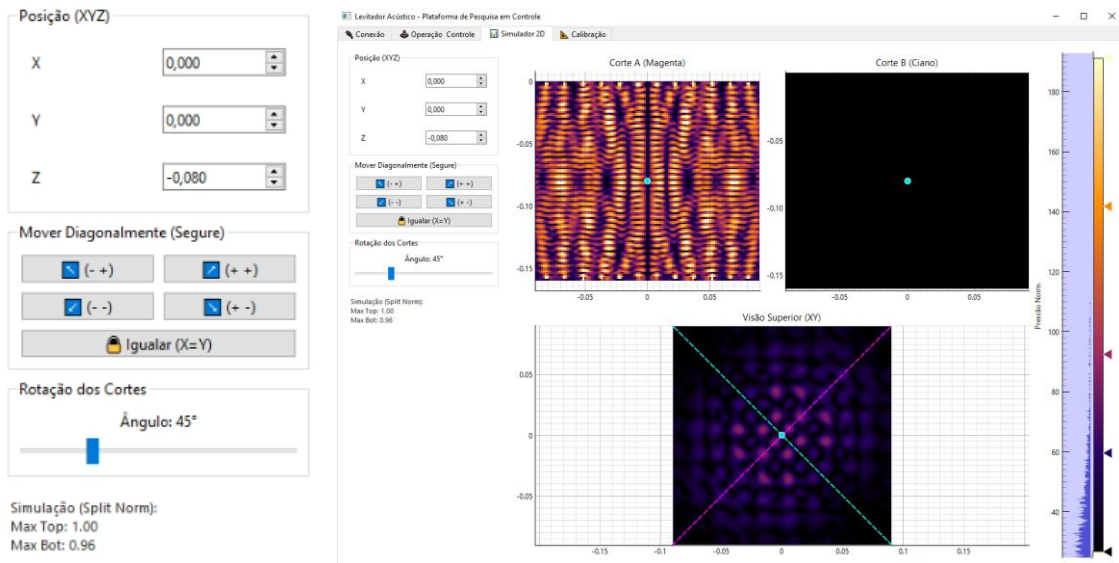
Define-se um limiar de tolerância admissível ε cujo fluxo de decisão lógica opera conforme as seguintes restrições. Se $||e(t)||_2 < \varepsilon$, o contador de quadros estáveis é incrementado. Caso este contador atinja o valor crítico predefinido de 2 quadros consecutivos, o sistema valida a estabilidade local e o parâmetro geométrico é então atualizado, equação (31):

$$t_{param} = (t_{param} + \Delta t_{param}) \pmod{1} \quad (31)$$

Se $||e(t)||_2 \geq \varepsilon$, o contador de estabilidade é instantaneamente zerado e t_{param} é congelado. Como consequência de o alvo geométrico tornar-se estático no espaço tridimensional, o erro de regime persiste, forçando o termo integral a acumular magnitude a cada ciclo. Esse aumento contínuo da ação de controle eleva a força restauradora exercida sobre o objeto até que ele retorne para o interior da zona de tolerância. Uma vez restabelecida a estabilidade por dois ciclos consecutivos, o avanço da trajetória é automaticamente retomado.

A aba de simulação, figura 23, permite visualizar o campo acústico gerado para uma determinada posição. Uma vista superior mostra duas linhas de corte (uma cor magenta e outra ciano). É possível rotacionar as linhas para visualizar o campo no plano de corte em que cada uma delas se encontra. O campo mostrado difere do campo teórico pois é uma reconstrução feita a partir dos valores das saídas enviadas aos transdutores a fim de se aproximar do campo acústico realmente gerado. Na lateral esquerda é possível comandar a posição da esfera simulada, definindo uma posição ou segurando botões para movê-la e também é possível controlar a rotação dos planos de corte.

Figura 23 – Aba de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como propósito o projeto, a implementação e a validação de um sistema completo de levitação acústica com controle em malha fechada, integrando geração de sinais em hardware programável, comunicação serial determinística, processamento digital de imagem e teoria de controle em uma plataforma funcional, documentada e com interface gráfica interativa. Os resultados obtidos permitem afirmar que os objetivos estabelecidos foram atendidos em sua totalidade, conforme se discute a seguir.

A construção do levitador acústico com duas matrizes opostas de 256 transdutores ultrassônicos, operando a 40 kHz, demonstrou que a arquitetura modular proposta é viável do ponto de vista elétrico e térmico. O emprego de drivers TC4427A para a amplificação de sinais lógicos para o nível de 18 V, combinado com capacitores de desvio distribuídos próximos aos pinos de alimentação e ao plano de terra contínuo na face inferior da PCB, mostrou-se eficaz na mitigação de transientes de comutação e no controle de integridade de sinal, permitindo a operação prolongada do sistema sem sobreaquecimento dos componentes.

O firmware desenvolvido em VHDL sobre o FPGA Cyclone IV EP4CE10F17C8N consolidou-se como o núcleo de sincronismo temporal do sistema. A geração de uma base de tempo de 23,04 MHz, a partir do PLL interno, escolhida de modo a satisfazer com resultado inteiro a relação de divisão para a taxa de 115.200 baud eliminou erros acumulados de temporização na comunicação serial. A técnica de *clock enable*, adotada em detrimento da criação de novos domínios de *clock*, minimizou problemas de *skew* e simplificou a análise de fechamento de tempo. O mecanismo de banco de memória duplo (arquitetura “ping-pong”) garantiu que a recepção contínua de novos parâmetros de controle não interferisse na geração dos sinais acústicos em andamento, assegurando a coerência simultânea de fase de todos os 512 canais a cada atualização de estado. A implementação do protocolo de verificação de integridade por *checksum* XOR, com retorno de código ACK/ERR, estabeleceu um ciclo de comunicação confiável entre o software de aplicação e o hardware, descartando pacotes corrompidos antes que perturbassem o campo acústico.

A quantização de fase em 16 níveis (resolução de $22,5^\circ$ por passo) e a discretização de amplitude em 9 níveis de *duty cycle*, codificadas em um único byte por transdutor, representaram uma solução adequada entre a resolução do campo acústico gerado e a largura de banda disponível na interface serial. O sistema de diagnóstico transdutor a transdutor, com mapeamento de defeituosos e compensação adaptativa pelos emissores vizinhos, acrescentou robustez ao hardware frente a falhas físicas inevitáveis em matrizes de grande escala.

A arquitetura de visão computacional com duas câmeras posicionadas ortogonalmente demonstrou ser uma solução eficaz para a reconstrução tridimensional da posição da partícula sem a necessidade de câmeras estéreo calibradas em par, cujo custo e complexidade de configuração seriam significativamente maiores. O *pipeline* de processamento, que passa por conversão para escala de cinza, limiarização adaptável, morfologia e detecção de *blobs* por centroide de massa, revelou-se robusto em condições de iluminação controlada, fornecendo coordenadas de posição com resolução compatível com a zona morta de 0,5 mm adotada pelo controlador.

A calibração intrínseca baseada em tabuleiro de xadrez corrigiu satisfatoriamente as distorções radiais das lentes das câmeras, enquanto a calibração extrínseca por mapeamento de projeção, validada pelo cubo virtual sobreposto ao vídeo, estabeleceu uma correspondência métrica consistente entre o espaço da imagem e o referencial geométrico das placas de transdutores. A persistência das calibrações em arquivo de configuração, dispensando sua repetição a cada inicialização do sistema, contribuiu para a usabilidade da plataforma em ambiente de laboratório.

O controlador PID tridimensional implementado demonstrou ser capaz de estabilizar a partícula em torno de um ponto de equilíbrio fixo com erro residual contido dentro da zona morta configurada. A máquina de estados finitos responsável pela execução de trajetórias programáveis com interpolação linear entre a posição corrente e o ponto inicial da trajetória, seguida de parametrização geométrica temporal se mostrou útil para evitar acelerações abruptas que superariam a força de captura da armadilha acústica. O limitador de aceleração e velocidade escalar, associado à região de operação restrita ao volume de interferência construtiva dos transdutores, conferiram ao sistema uma camada

adicional de proteção contra a perda de captura da partícula durante manobras dinâmicas. O modelo de controle e geração de trajetórias apresentado demonstrou ser matematicamente robusto e computacionalmente eficiente para o escopo desta pesquisa. A combinação de uma Máquina de Estados Finita para a suavização de transientes iniciais com o mecanismo de avanço condicionado ao erro euclidiano confere ao sistema capacidade de rejeição de perturbações, garantindo que o rastreamento ocorra de forma segura e adaptada à resposta dinâmica real do objeto manipulado.

O diagrama de plano de fase no eixo z , exibido em tempo real na interface gráfica, demonstrou ser um instrumento diagnóstico de alto valor pedagógico: a identificação visual de espirais convergentes (subamortecimento), trajetórias diretas ao equilíbrio (amortecimento crítico) e órbitas fechadas (oscilação sustentada) permite ao operador compreender intuitivamente o efeito de cada ganho PID sobre o comportamento dinâmico do sistema, estabelecendo uma ponte direta entre a teoria de Lyapunov e a fenomenologia observável da levitação.

A arquitetura multicamadas do software em Python com separação clara entre o *solver* acústico, o subsistema de visão computacional, o controlador PID e o módulo de comunicação serial, cada qual em camadas funcionais distintas, demonstrou ser uma escolha adequada para um sistema com exigências heterogêneas de temporização e processamento. A execução da comunicação serial em *thread* dedicada isolou a carga de transmissão de 515 bytes por atualização da interface gráfica, garantindo que eventuais atrasos de renderização não comprometessem a estabilidade da levitação física.

O *solver* acústico baseado na Integral de Rayleigh–Sommerfeld e no algoritmo GS-PAT com inicialização por semente geométrica analítica provou ser computacionalmente viável para operação em tempo real, produzindo os vetores de fase e amplitude necessários para a armadilha *Twin Trap* em coordenadas arbitrárias dentro do volume de trabalho. A aba de simulação 2D, que reconstrói o campo acústico a partir das saídas efetivamente enviadas aos transdutores, em vez do campo teórico ideal, ofereceu ao operador uma visão realista do campo gerado, revelando assimetrias decorrentes de transdutores defeituosos ou de discretizações de fase.

Não obstante os resultados satisfatórios, algumas limitações do sistema merecem registro. A discretização de fase em apenas 16 níveis impõe uma resolução mínima de $22,5^\circ$ por transdutor, o que introduz erros de quantização no campo acústico gerado, especialmente para armadilhas posicionadas próximas às bordas do volume de trabalho, onde os ângulos de propagação são menos favoráveis. A comunicação via UART a 115.200 baud, embora determinística, impõe uma taxa máxima de atualização do campo acústico da ordem de grandeza de dezenas de quadros por segundo, o que limita a velocidade máxima de deslocamento da partícula e a execução de trajetórias de alta dinâmica. O sistema de visão computacional depende de condições controladas de iluminação e de contraste entre a esfera e o fundo.

Com base nas limitações identificadas e nas potencialidades demonstradas pela plataforma, propõem-se as direções de trabalhos futuros listadas a seguir.

1) A substituição da comunicação UART por interfaces de maior largura de banda como USB 2.0 de alta velocidade ou SPI poderia elevar substancialmente a taxa de atualização do campo acústico, viabilizando trajetórias mais dinâmicas e a manipulação simultânea de múltiplas partículas com rastreamento individual.

2) O estudo de algoritmos de controle, como controladores Proporcional-Integrais-Derivativos (PID) com ganho agendado (*gain scheduling*) ou controladores PID adaptativos que estimem em tempo real os parâmetros da força de radiação em função da posição, poderia ampliar a faixa de operação estável do sistema e a robustez frente a perturbações externas de maior magnitude.

3) A integração de técnicas de aprendizado de máquina para o ajuste automático dos ganhos PID substituindo o processo iterativo manual atualmente necessário representaria um avanço na usabilidade da plataforma, especialmente no contexto didático, onde diferentes objetos de massas e geometrias distintas exigiriam reconfiguração dos parâmetros de controle.

4) A expansão do sistema de visão para câmeras de maior taxa de quadros reduziria a latência do sinal de retroalimentação, diminuindo o atraso de

malha e potencialmente permitindo a operação com ganhos derivativos mais elevados sem instabilidade.

5) Do ponto de vista didático, o desenvolvimento de módulos de ensino estruturados, incluindo roteiros de laboratório, exercícios de sintonia de PID e questões de análise de resposta transitória baseados na plataforma consolidaria sua inserção curricular em disciplinas de controle, sistemas embarcados e processamento de sinais, ampliando o impacto pedagógico do trabalho além do ambiente em que foi concebido.

Este trabalho demonstrou que é possível integrar, numa plataforma única e funcional, os fundamentos de acústica física, eletrônica digital, firmware determinístico em FPGA, processamento digital de imagem e controle automático em malha fechada, resultando num sistema de levitação acústica com controle PID tridimensional e interface gráfica interativa. A concepção modular adotada tanto no hardware, com a separação entre circuitos de potência, lógica digital e sensoriamento óptico, quanto no software, com a estratificação entre solver acústico, visão computacional, controlador e comunicação permitiu que cada subsistema fosse desenvolvido, testado e validado de forma independente antes de sua integração no sistema completo, reduzindo a complexidade do depuramento e facilitando futuras expansões.

A levitação acústica, fenômeno que desde Kundt fascina pela aparente suspensão das leis cotidianas da física, revelou-se um problema de engenharia multidisciplinar cujas soluções requerem o domínio simultâneo de áreas que, no currículo tradicional de engenharia, frequentemente permanecem isoladas umas das outras. Nesse sentido, a plataforma desenvolvida cumpre uma função de materializar a integração entre teoria e prática, entre fórmulas matemáticas e fenômenos físicos observáveis.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR et al. Revisiting complex moments for 2D shape representation and image normalization. **arXiv**, 2022. DOI: 10.48550/arxiv.1010.4203.
- AGUILAR-GONZÁLEZ, A. et al. Towards a smart camera for monocular SLAM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARDWARE/SOFTWARE CODESIGN AND SYSTEM SYNTHESIS, 2016. [...]. New York: ACM, 2016. DOI: 10.1145/2967413.2967441.
- ANDERSSON, H. et al. A method for simultaneous creation of an acoustic trap and a quiet zone. In: IEEE SENSOR ARRAY AND MULTICHANNEL SIGNAL PROCESSING WORKSHOP, 2018. [...]. [S.l.: s.n.], 2018. DOI: 10.1109/SAM.2018.8448949.
- ANDRADE, M. A. B. et al. Review of progress in acoustic levitation. **Brazilian Journal of Physics**, v. 48, p. 190–213, 2018. DOI: 10.1007/S13538-017-0552-6.
- BACHYNSKYI, M.; PANEVA, V.; MÜLLER, J. LeviCursor: dexterous interaction with a levitating object. In: ACM SYMPOSIUM ON SPATIAL USER INTERACTION, 2018. [...]. New York: ACM, 2018. p. 253–262. DOI: 10.1145/3279778.3279802.
- BAER, S. et al. Influence of varying thermodynamic magnitudes on the acoustic levitation of particles in a single axis ultrasonic levitator. **International Journal of Chemical Engineering and Applications**, v. 5, n. 5, p. 383–387, 2014. DOI: 10.7763/IJCEA.2014.V5.383.
- BEJ et al. A novel methodology for dynamic thresholding technique under varying illumination conditions. In: CODEC, 2023. [...]. [S.l.: s.n.], 2023. DOI: 10.1109/codec60112.2023.10466142.

BERMUTH, T. et al. RapidPoseTriangulation: multi-view multi-person whole-body human pose triangulation in a millisecond. **arXiv**, 2025.

DOI: 10.48550/arxiv.2503.21692.

BEWLEY, A. et al. Simple online and realtime tracking. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING (ICIP), 2016. [...]. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3464–3468. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533003.

BHATTI, U. A. **Advances in Theory and Applications of Stereo Vision**. [S.l.]: InTech, 2011. DOI: 10.5772/551.

BÓDIS-SZOMORÚ et al. Calibration and sensitivity analysis of a stereo vision-based driver assistance system. 2008. DOI: 10.5772/5886.

CAO, et al. Observation-centric SORT: rethinking SORT for robust multi-object tracking. In: IEEE/CVF CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR), 2023. [...]. [S.l.: s.n.], 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2203.14360.

CHEN et al. Accurate intrinsic and extrinsic calibration of RGB-D cameras with GP-based depth correction. **IEEE Sensors Journal**, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2889805.

CHEN, Z. et al. Real acoustic fields: an audio-visual room acoustics dataset and benchmark. **arXiv**, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2403.18821.

COURTNEY, C. R. P. et al. Dexterous manipulation of microparticles using Bessel-function acoustic pressure fields. **Applied Physics Letters**, v. 102, 2013. DOI: 10.1063/1.4798584.

CRAIG, K.; ROAN, N. Teaching control system design through mechatronics: academic and industrial perspectives. **Mechatronics**, v. 12, n. 2, p. 371–381, 2002. DOI: 10.1016/S0957-4158(01)00076-9.

DAS et al. A pixel based segmentation scheme for fingerprint images. **Proceedings** [...]. New Delhi: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-81-322-2247-7_45.

DAVIS, E. J. A history of single aerosol particle levitation. **Aerosol Science and Technology**, v. 26, n. 3, p. 212–254, 1997.
DOI: 10.1080/02786829708965426.

DAVIS, et al. Automatic resonance-tracking feedback loop for near-field acoustic levitation. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2018.
DOI: 10.1016/j.sna.2018.03.021.

DHANYA et al. Design and implementation of 2D object similarity detection using Hu's moments. In: ASIANCON, 2024. [...]. [S.l.: s.n.], 2024.
DOI: 10.1109/asiancon62057.2024.10838048.

DING et al. High precision camera calibration method based on full camera model. In: CCDC, 2024. [...]. [S.l.: s.n.], 2024.
DOI: 10.1109/ccdc62350.2024.10588332.

DOYLE, T. E. **System and method for harmonic modulation of standing wavefields for spatial focusing, manipulation, and patterning**. Utah: Utah Valley University. Patente US10343187B2. Concessão: 2019.

ELLEMAN, D. D. et al. Acoustical levitation for space processing. 1974.
Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740027149>. Acesso em: 2025.

FORESTI, D. **Acoustophoretic printing apparatus and method**. Cambridge: President and Fellows of Harvard College. Patente US20170001439A1.
Concessão: 2017.

FRANCO *et al.* Acoustic Beam Modeling of Ultrasonic Transducers and Arrays Using the Impulse Response and the Discrete Representation Methods. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**,

v. 33, n. 4, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782011000400004>. Acesso em: 2 jun. 2026.

FURIO, M. et al. A workload generator for evaluating SMT real-time systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND SIMULATION (HPCS), 2018. [...]. [S.l.: s.n.], 2018. p. 32–39. DOI: 10.1109/HPCS.2018.00067.

FURUMOTO, T. et al. Three-dimensional manipulation of a spherical object using ultrasound plane waves. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2019. DOI: 10.1109/LRA.2018.2880330.

FUSHIMI, T. et al. Acoustic hologram optimisation using automatic differentiation. **Scientific Reports**, v. 11, 2021. DOI: 10.1038/S41598-021-91880-2.

FUSHIMI, T.; OCHIAI, Y. Acoustic levitation and acoustic holograms. In: **Acoustic Levitation**. [S.l.]: Wiley-VCH, 2023. cap. 8, p. 217–242. DOI: 10.1002/9783527841325.ch8.

GONG, J. et al. UART communication protocol frame format explanation and application. **Applied and Computational Engineering**, 2023. DOI: 10.54254/2755-2721/14/20230757.

GORKOV, L. P. Sobre as forças que atuam em uma pequena partícula em um campo acústico em um fluido ideal. **Relatórios da Academia de Ciências da URSS**, v. 140, 1961. Disponível em: <https://www.mathnet.ru/rus/dan25473>.

GOVIL, S. et al. Design and implementation of UART using FPGA board. **International Journal for Science, Technology and Engineering**, 2022. DOI: 10.22214/ijraset.2022.41478.

GUTEV, A.; DEBONO, C. J. Improved object tracking throughout occlusions. In: IEEE EUROCON, 2021. [...]. [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535624.

HAN et al. A method of thresholding segmentation and spot center coordinates calculation for light spot-image. **Journal**, v. 18, 2011.

DOI: 10.3969/j.issn.1007-1423-b.2011.18.004.

HAROON. Adaptive Gaussian and double thresholding for contour detection and character recognition of two-dimensional area using computer vision. **Engineering Proceedings**, 2023. DOI: 10.3390/engproc2023032023.

HIRAYAMA, R. et al. A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping. **Nature**, v. 575, n. 7782, p. 320–323, 2019. DOI: 10.1038/s41586-019-1739-5.

HIRAYAMA, R. et al. High-speed acoustic holography with arbitrary scattering objects. **Science Advances**, v. 8, n. 24, p. eabn7614, 2022.

DOI: 10.1126/sciadv.abn7614.

HIRAYAMA, R. et al. High-speed acoustic holography with arbitrary scattering objects. **Science Advances**, v. 8, 2022. DOI: 10.1126/sciadv.abn7614.

HUANG, Y. et al. Analysis and research on UART communication protocol. In: ACCTCS, 2024. [...]. [S.l.: s.n.], 2024. DOI: 10.1109/acctcs61748.2024.00140.

HWANG et al. The command control by hand gesture with Hu and contour sequence moments and probability neural network. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2011. [...]. [S.l.: s.n.], 2011. DOI: 10.1109/ICSMC.2011.6083975.

JAMTSO et al. Bhutanese license plate recognition using Hu's moments and centroid difference. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY (INCIT), 2019. [...]. [S.l.: s.n.], 2019.

DOI: 10.1109/INCIT.2019.8912128.

JEEVAN, P. et al. Simulation and synthesis of UART through FPGA Zedboard for IoT applications. In: ACCAI, 2022. [...]. [S.l.: s.n.], 2022.

DOI: 10.1109/ACCAI53970.2022.9752556.

JEONG, J.; YOON, T.-S.; PARK, J.-B. Kalman filter based multiple objects detection-tracking algorithm robust to occlusion. In: SICE ANNUAL CONFERENCE, 2014. [...]. [S.l.: s.n.], 2014. p. 941–946. DOI: 10.1109/SICE.2014.6935235.

JIA, Y. et al. Oscillation suppression of acoustic trapping: a disturbance observer-based approach. **IEEE**, 2025. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11247089/>.

JUBRAN_et al. Newton-pnp: real-time visual navigation for autonomous toy-drones. **arXiv**, 2022. DOI: 10.48550/arxiv.2203.02686.

KALOGERAKI, V. et al. Resource management using multiple feedback loops in soft real-time distributed object systems. **Journal of Systems and Software**, v. 81, n. 3, p. 387–402, 2008. DOI: 10.1016/j.jss.2007.08.035.

KELLY, R.; SANTIBÁÑEZ, V. Learning PID structures in an introductory course of automatic control. **IEEE Transactions on Education**, v. 44, n. 4, p. 373–376, 2001. DOI: 10.1109/13.965786.

KIM, S. et al. A study on teaching method of control engineering by using Python based PID. **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology**, v. 7, n. 9, p. 1–5, 2020. DOI: 10.17148/iarjset.2020.7901.

KING, L. V. On the acoustic radiation pressure on spheres. **Proceedings of the Royal Society of London A**, 1934. DOI: 10.1098/rspa.1934.0215.

KISHORE, P. et al. A comprehensive review on acoustic levitation techniques and applications. Zenodo, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.15062484.

KUMAR et al. Fragment of binary object contour points on the basis of energy level for shape classification. In: SPIN, 2021. [...]. [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.1109/SPIN52536.2021.9566080.

LECKEY, S. et al. Investigation of ultrasonic wave scattering effects using computational methods. 2011. DOI: 10.21220/S2-E5VV-6092.

LI et al. Decision method of optimal needle insertion angle for dorsal hand intravenous robot. **Sensors**, v. 23, n. 2, p. 848, 2023. DOI: 10.3390/s23020848.

LI, J. et al. Coalescence of multiple pairs of levitated droplets using dual-side phased arrays. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 113, 2025. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2025.107327.

LIM, M. X.; JAEGER, H. M. Acoustically levitated lock and key grains. **arXiv**, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2208.06055.

LIPARI, G. Real-time scheduling: from hard to soft real-time systems. **arXiv: Operating Systems**, 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1512.01978.

LU et al. Camera calibration implementation based on Zhang Zhengyou plane method. **Proceedings [...]**. Berlin: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-48386-2_4.

LU, X. et al. Dynamic acoustic levitator based on subwavelength aperture control. **Advanced Science**, v. 8, n. 14, 2021. DOI: 10.1002/advs.202100888.

MARZO, A. et al. Acoustic virtual vortices with tunable orbital angular momentum for trapping of Mie particles. **Physical Review Letters**, v. 120, p. 044301, 2018. DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.120.044301.

MARZO, A. et al. Acoustophoretic volumetric displays using a fast-moving levitated particle. **Applied Physics Letters**, v. 115, p. 064101, ago. 2019. DOI: 10.1063/1.5113467.

MARZO, A. et al. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. **Nature Communications**, v. 6, p. 8661, 2015. DOI: 10.1038/ncomms9661.

MARZO, A. et al. TinyLev: a multi-emitter single-axis acoustic levitator. **Review of Scientific Instruments**, 2017. DOI: 10.1063/1.4989995.

MARZO, A. Standing waves for acoustic levitation. **Acoustic Levitation**. Singapore: Springer, 2020. cap. 2. DOI: 10.1007/978-981-32-9065-5_2.

MARZO, A.; DRINKWATER, B. W. Holographic acoustic tweezers. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 1, p. 84–89, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1813047115.

MARZO, A.; DRINKWATER, B. W. Holographic acoustic tweezers. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 3, p. 840–845, 2019. DOI: 10.1073/PNAS.1813047115.

MATOUŠ, J. **Manipulation with objects on a surface of a liquid using an array of ultrasonic transducers**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Czech Technical University, Prague, 2018. Disponível em: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/b/bc/Bp_2018_matous_josef.pdf.

MEIER, M. et al. Real-time stereo matching failure prediction and resolution using orthogonal stereo setups. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2017. [...]. [S.l.: s.n.], 2017. p. 315–322. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989662.

MEMOLI, G. **Acoustic metamaterial systems**. Sussex: The University of Sussex. Patente WO2020208380A1 de 2020.

MOHAMMADIANAFTAH, M. et al. Exploring PID control in ball-beam systems: a hands-on educational approach. In: ASEE ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION, 2024. [...]. [S.l.: s.n.], 2024. DOI: 10.18260/1-2-1139-49372.

MOHAN, S. et al. Digital system design of FPGA-based UART protocol using Verilog HDL. **International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering**, 2025. DOI: 10.22399/ijcesen.3306.

MORALES, R. et al. Generating airborne ultrasonic amplitude patterns using an open hardware phased array. **Applied Sciences**, v. 11, n. 7, p. 2981, 2021. DOI: 10.3390/app11072981.

MORRIS, R. H. et al. Beyond the Langevin horn: transducer arrays for the acoustic levitation of liquid drops. **Physics of Fluids**, v. 31, n. 10, p. 101301, out. 2019. DOI: 10.1063/1.5117335.

MUNOZ-VAZQUEZ, A. J. Intuition and importance of feedback control through laboratory experiences. **arXiv**, 2025. DOI: 10.48550/arxiv.2501.15742.

NAKAHATA, F. et al. 3-D modelings of an ultrasonic phased array transducer and its radiation properties in solid. **Ultrasonic Waves**. [S.l.]: InTech, 2012. DOI: 10.5772/29954.

NAVARRO-DURÁN, R. et al. Active learning to develop disciplinary competencies related to automatic control in engineering curricula using low cost do-it-yourself didactic stations. **Frontiers in Education**, v. 7, 2023. DOI: 10.3389/educ.2022.1022888.

NGUYEN et al. Grasping moving objects with incomplete information in a low-cost robot production line using contour matching based on the Hu moments. **Results in Engineering**, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102414.

NTOGRAMATZIDIS, L.; CANTONI, M.; YANG, R. A novel instructional approach to the design of standard controllers: using inversion formulae. **IEEE Transactions on Education**, v. 57, n. 4, p. 229–237, 2014. DOI: 10.1109/TE.2013.2266326.

ONO, S. et al. Trapping of airborne objects by using camera tracking in acoustic levitation. **Robôs Mecatrônicos**, 2023. DOI: 10.1299/jsmermd.2023.2a2-h25.

OOMORI, T. et al. Point cloud matching using singular value decomposition. **Artificial Life and Robotics**, v. 21, 2016.

DOI: 10.1007/S10015-016-0265-X.

ORTEGA-SANDOVAL, D. et al. Ultrasonic manipulation of particles and cell aggregates with simultaneous acoustic visualization. **Applied Physics Letters**, v. 124, 2024. DOI: 10.1063/5.0203018.

DOI: 10.1063/5.0203018.

PICKERING, W. **Control-Lab-in-a-Box: bridging the gap between control theory and engineering practice**. 2024.

DOI: 10.31273/9781911675167/1621.

PLASENCIA, D. M. et al. GS-PAT: high-speed multi-point sound-fields for phased arrays of transducers. **ACM Transactions on Graphics**, 2020.

DOI: 10.1145/3386569.3392492.

POLYCHRONOPOULOS, S.; MEMOLI, G. Acoustic levitation with optimized reflective metamaterials. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 4254, 2020.

DOI: 10.1038/s41598-020-60978-4.

RANGANATHAN et al. Gaussian process for lens distortion modeling. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), 2012. [...]. [S.l.: s.n.], 2012.

DOI: 10.1109/IROS.2012.6385481.

RAVIV, D.; BARTON, J.; SADEGHNEJAD, A. A visual approach to introducing concepts in control systems. In: LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE FOR ENGINEERING, EDUCATION, AND TECHNOLOGY, 2017. [...]. [S.l.: s.n.], 2017. DOI: 10.18687/LACCEI2017.1.1.402.

RAY et al. Object detection by spatio-temporal analysis and tracking of the detected objects in a video with variable background. **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v. 58, p. 101–114, 2019.

DOI: 10.1016/j.jvcir.2018.12.002.

REY, C. A. et al. Acoustic levitation at high temperatures in the microgravity of space. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 82, n. S1, p. S37–S37, 1987. DOI: 10.1121/1.2024549.

RODRÍGUEZ, G. **Uma proposta de modificações no sistema operacional Linux para processamento digital de sinais em tempo real**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. DOI: 10.11606/T.3.2011.TDE-09082011-154626.

ROTHER, B. et al. Linear multi view reconstruction and camera recovery. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2001. [...]. [S.l.: s.n.], 2001. DOI: 10.1109/ICCV.2001.937497.

ROTHER, B. et al. Linear multi view reconstruction and camera recovery using a reference plane. **International Journal of Computer Vision**, v. 49, 2002. DOI: 10.1023/A:1020189404787.

SAHA, et al. New optimum thresholding method using region homogeneity and class uncertainty. In: SPIE PROCEEDINGS, 2000. [...]. [S.l.: s.n.], 2000. DOI: 10.1117/12.387665.

SAHA, et al. Optimum image thresholding via class uncertainty and region homogeneity. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2001. DOI: 10.1109/34.935844.

SAITO, J. H. **Provisão integrada de QoS relativa e absoluta em serviços computacionais interativos com requisitos de responsividade de tempo real**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. DOI: 10.11606/D.55.2010.TDE-19052010-163816.

SAKAR, M. S. et al. Three-dimensional on-chip micromanipulation using bulk acoustic waves. 2025. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6647277/v1.

- SANKARAYOGI, S. **Software tools for real-time simulation and control**. 2005. Dissertação (Mestrado) – West Virginia University, Morgantown, 2005. DOI: 10.33915/ETD.1682.
- SCHENK, T. et al. Recovering epipolar geometry in 3-D vision systems. **SPIE Proceedings**, 1991. DOI: 10.1117/12.46295.
- SHAN, et al. A bridge deflection monitoring system based on CCD. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016. DOI: 10.1155/2016/4857373.
- SINGH, R. et al. Design and implementation of universal asynchronous receiver/transmitter (UART): a review. In: IC2E3, 2025. [...]. [S.l.: s.n.], 2025. DOI: 10.1109/ic2e365635.2025.11167834.
- SOTELO, D. et al. Lab-Tec@Home: a cost-effective kit for online control engineering education. **Electronics**, v. 11, n. 6, p. 907, mar. 2022. DOI: 10.3390/electronics11060907.
- SOZANSKI, K. P. Low cost PID controller for student digital control laboratory based on Arduino or STM32 modules. **Electronics**, v. 12, n. 15, p. 3235, jul. 2023. DOI: 10.3390/electronics12153235.
- SUMMERVILLE, D. H. Serial communication. **Embedded Systems Interfacing for Engineers using the Freescale HCS08 Microcontroller II: Digital and Analog Hardware Interfacing**. Cham: Springer, 2009. (Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems). DOI: 10.1007/978-3-031-79803-0_3.
- TRAN, L. Q. et al. Development and outcomes of teaching PID control in classroom with hands on learning experience. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2019. [...]. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1041–1047. DOI: 10.1109/ICIT.2019.8755227.
- VALDIVIA, M. Numerical methods for near-field acoustic holography over arbitrarily shaped surfaces. **Numerical Methods for Acoustic Holography**. [S.l.]: InTech, 2011. DOI: 10.5772/17828.

VASILEIOU, T. et al. Toward contactless biology: acoustophoretic DNA transfection. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 20023, 2016.

DOI: 10.1038/srep20023.

VÁSQUEZ, J. A new approach to improve reliability in UART using checksum algorithm. In: ICACIE, 2023. [...]. Singapore: Springer, 2023.

DOI: 10.1007/978-981-19-8563-8_23.

VREJOIU, M. License plate segmentation in images based on per-block contrast analysis and CCA. **Studies in Informatics and Control**, v. 29, n. 2, 2020. DOI: 10.24846/V29I2Y202005.

WANG, M. et al. Vision-based closed-loop control with spatiotemporal multiplexing strategy for noncontact trapping of multiple micro-particles. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, 2024.

DOI: 10.1109/TASE.2024.3407144.

WANG, T. G. Acoustic levitation and manipulation for space applications. In: IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1979. [...]. [S.l.: s.n.], 1979.

DOI: 10.1109/ULTSYM.1979.197246.

WANG, Y. et al. 3D noncontact micro-particle manipulation with acoustic robot end-effector under microscope. **IEEE Robotics & Automation Letters**, v. 9, 2024. DOI: 10.1109/lra.2024.3436330.

XU, G. et al. **Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition**.

Dordrecht: Springer, 1996. DOI: 10.1007/978-94-015-8668-9.

YANG, Y. et al. In-vivo programmable acoustic manipulation of genetically engineered bacteria. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 3297, 2023.

DOI: 10.1038/s41467-023-38814-w.

YU et al. Research of improved Zhang's calibration method. In: CHINESE AUTOMATION CONGRESS, 2017. [...]. [S.l.: s.n.], 2017.

DOI: 10.1109/CAC.2017.8242990.

ZANG, D. et al. Inducing drop to bubble transformation via resonance in ultrasound. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 3546, 2018.

DOI: 10.1038/s41467-018-05949-0.

ZHANG et al. Learning-based framework for camera calibration with distortion correction and high precision feature detection. **arXiv**, 2022.

DOI: 10.48550/arxiv.2202.00158.

ZHANG et al. Optimisation of camera calibration parameters based on multiconditional constraints. In: SPIC, 2024. [...]. [S.l.: s.n.], 2024.

DOI: 10.1109/spic62469.2024.10691621.

ZHANG et al. Research on guide line identification and lateral motion control of AGV in complex environments. **Machines**, v. 10, n. 2, p. 121, 2022.

DOI: 10.3390/machines10020121.

ZHANG, X. A systematic analysis of the UART transceiver theory and application. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, v. 61, 2023. DOI: 10.54097/hset.v61i.10290.

ZHILI, L. **Acoustic levitation system based on ultrasonic array and control method thereof**. Harbin: Harbin Institute of Technology (Shenzhen). Patente CN109669485B. Concessão: 2022.

GLOSSÁRIO

Acústica Física: Ramo da física que estuda geração e propagação de ondas mecânicas e sua interação com a matéria.

Anti-Windup: Técnica para limitar o acúmulo da ação integral em controladores PID quando o atuador satura.

Armadilha Acústica (*Acoustic Trap*): Região do campo acústico onde forças de radiação confinam uma partícula em equilíbrio estável (ex: Vortex, Bottle, Twin Trap).

Barramento Serial: Canal de comunicação que transmite dados bit a bit em sequência.

Baud Rate: Taxa de transmissão serial em bits por segundo. No sistema, usa-se 115.200 baud.

Blob: Região de pixels com propriedades similares em uma imagem, usada para detectar a esfera levitada.

Calibração Extrínseca: Determinação da posição e orientação da câmera (matriz R e vetor t) no espaço.

Calibração Intrínseca: Determinação de parâmetros internos da câmera (focais e distorções) via método de Zhang.

Campo Acústico: Distribuição espacial de pressão, velocidade e intensidade de uma onda sonora em um meio.

Centroide de Massa: Posição média ponderada dos pixels de um objeto, usada para rastreamento preciso.

Checksum XOR: Valor de redundância para detecção de erros em pacotes de dados via operação Ou-Exclusivo.

Clock Enable: Técnica de projeto em FPGA para habilitar processamento seletivo sem criar novos domínios de *clock*.

Decomposição de Cholesky: Fatoração de matrizes simétricas positivas, usada na calibração de câmeras.

Diretividade: Variação da amplitude da pressão emitida por uma fonte conforme a direção (ângulo).

Distorção de Barril/Almofada: Tipos de distorção radial de lente que curvam linhas retas para fora ou para dentro.

Duplo Buffering (Ping-Pong): Uso de dois bancos de memória alternados para evitar interrupções no processamento de sinais.

Duty Cycle: Razão entre o tempo ativo e o período total de um sinal PWM.

Erro de Reprojeção: Distância entre a posição detectada de um ponto e sua previsão pelo modelo calibrado.

Figura de Kundt: Padrão de partículas em nós de pressão acústica, primeira evidência de interação som-matéria.

Filtro de Kalman: Estimador recursivo que une predição de modelo e medição de sensores para rastreamento ótimo.

Firmware: Software de baixo nível embarcado; no caso, implementado em VHDL para o FPGA.

Força de Radiação Acústica: Força não linear resultante do gradiente de pressão que permite a levitação.

Geometria Epipolar: Relação geométrica entre duas câmeras que reduz a busca de pontos de 2D para 1D.

Holografia Acústica: Projeção de frentes de onda complexas para criar campos de pressão volumétricos.

Homografia: Matriz 3×3 que mapeia pontos entre dois planos projetivos (ex: tabuleiro e imagem).

Integral de Rayleigh-Sommerfeld (RSI): Base matemática para calcular a pressão acústica em qualquer ponto do espaço.

Interpolação Linear: Técnica para gerar pontos intermediários entre dois valores conhecidos.



JOINVILLE
CENTRO DE CIÊNCIAS
TECNOLÓGICAS

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA
REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

ATESTADO DE VERSÃO FINAL

Eu, Mariana Santos Matos Cavalca, professora do curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica, declaro que esta é a versão final aprovada pela comissão julgadora da dissertação intitulada: **“Projeto e construção de um sistema de levitação acústica: desenvolvimento de um protótipo didático com realimentação por visão computacional”** de autoria do acadêmico Luis Fernando Momm Antunes.

Joinville, 14 de julho de 2026.

Assinatura digital da orientadora:

Mariana Santos Matos Cavalca



JOINVILLE
CENTRO DE CIÊNCIAS
TECNOLÓGICAS

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA
REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

ATESTADO DE VERSÃO FINAL

Eu, Tiago Jackson May Dezuo, professor do curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica, declaro que esta é a versão final aprovada pela comissão julgadora da dissertação intitulada: **“Projeto e construção de um sistema de levitação acústica: desenvolvimento de um protótipo didático com realimentação por visão computacional”** de autoria do acadêmico Luis Fernando Momm Antunes.

Joinville, 14 de julho de 2026.

Assinatura digital do coorientador:

Tiago Jackson May Dezuo