

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

Oliver Poma Mendoza Guarachi

**Modernização de Impressora 3D e Avaliação de Indicadores de Qualidade de
Impressão**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

Oliver Poma Mendoza Guarachi

Modernização de Impressora 3D e Avaliação de Indicadores de Qualidade de Impressão

Trabalho de Conclusão de Curso ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica.

Orientador:

Prof. AURELIO DA COSTA SABINO
NETTO

Coorientador:

VITOR FARIAS DE BORBA

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Guarachi, Oliver

Modernização de Impressora 3D e Avaliação de Indicadores de Qualidade de Impressão / Oliver Guarachi; orientação de AURELIO SABINO; coorientação de VITOR FARIAS.

- Florianópolis, SC, 2026.

144 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Manufatura aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Retrofit. 4. Cinemática H- Bot. 5. Klipper. I. SABINO, AURELIO . II. FARIAS, VITOR . III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Modernização de Impressora 3D e Avaliação de Indicadores de Qualidade de Impressão.

MODERNIZAÇÃO DE IMPRESSORA 3D E AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE QUALIDADE DE IMPRESSÃO

OLIVER POMA MENDOZA GUARACHI

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica em julho de 2026 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

FLORIANÓPOLIS, 09 de julho, 2026.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

AURELIO DA COSTA SABINO NETTO

Data: 07/08/2026 08:37:49-0300

CPF: ***.274.739-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

AURELIO DA COSTA SABINO NETTO,
Dr. Eng.



Documento assinado digitalmente

VITOR FARIAS DE BORBA

Data: 07/08/2026 09:18:26-0300

CPF: ***.611.919-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

VITOR FARIAS DE BORBA, Msc.



Documento assinado digitalmente

LEONARDO SANTANA

Data: 07/08/2026 09:45:38-0300

CPF: ***.808.849-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

LEONARDO SANTANA, Dr.



Documento assinado digitalmente

GUILHERME RANZOLIN PIAZZETTA

Data: 07/08/2026 09:21:32-0300

CPF: ***.696.069-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

GUILHERME RANZOLIN PIAZZETTA,
Msc.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, especialmente durante os períodos de maior dedicação ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aurelio da Costa Sabino Netto, pela orientação, disponibilidade e apoio ao longo do projeto. Agradeço especialmente por ter sido sempre prestativo, auxiliando na disponibilização de equipamentos de medição, infraestrutura e recursos necessários para a realização do *retrofit* da impressora 3D.

Ao meu coorientador, Msc. Vitor Farias de Borba, pelo acompanhamento técnico durante o desenvolvimento do trabalho, pelas sugestões apresentadas e pelas contribuições práticas para a solução dos problemas encontrados ao longo do TCC.

Ao Prof. Dr. Francisco Rafael Moreira da Mota, do Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica do IFSC Câmpus Florianópolis, por disponibilizar o laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento, espaço no qual pude realizar grande parte das atividades práticas deste trabalho. Agradeço pela confiança e pela possibilidade de utilizar o laboratório durante muitas tardes e noites dedicadas ao desenvolvimento do projeto.

Ao meu amigo Douglas Daltoé, pelo auxílio na parte mecânica do *retrofit*, especialmente na realização das furações necessárias para a instalação do conector RJ45 e da placa de alumínio utilizada como base de fixação dos componentes eletrônicos.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, pela formação acadêmica proporcionada e pela estrutura disponibilizada ao longo do curso de Engenharia Mecatrônica. Agradeço também aos professores, técnicos e colegas que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação e para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, participaram desta etapa e contribuíram para a conclusão deste projeto.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um processo de *retrofit* aplicado à impressora 3D Cliever CL2 Pro Plus, equipamento de cinemática H-Bot disponível no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis. A intervenção substituiu a arquitetura proprietária original por uma plataforma aberta baseada no *firmware* Klipper, placa controladora BIGTREETECH Octopus Pro v1.1, Raspberry Pi 3 Model B, *drivers* TMC2209, alimentação em 24 V e sensor de nivelamento automático CR Touch. A metodologia foi estruturada em três etapas: caracterização quantitativa do estado original da máquina (*baseline*); implementação física e lógica do *retrofit*; validação experimental pós-intervenção por meio de ensaios térmicos, cubos de calibração, modelo #3DBenchy e protocolo Autodesk-Kickstarter. Os resultados evidenciaram ganhos expressivos: o tempo médio de aquecimento da mesa foi reduzido de 16 min 55 s para 8 min 30 s (redução de 50%), e o bico extrusor de 3 min 41 s para 1 min 56 s (redução de 47%). Nos ensaios de impressão, o tempo real do #3DBenchy reduziu em 42% e o do modelo Autodesk-Kickstarter em 52%. Do ponto de vista dimensional, o erro médio no eixo Y dos cubos de calibração foi reduzido de +1,60% para +0,45%, representando redução de 72% no desvio sistemático associado ao acoplamento cinemático H-Bot. A integração do CR Touch estabilizou a primeira camada com malha de compensação de amplitude 0,127 mm, e a modificação no sistema de resfriamento favoreceu o desempenho em pontes horizontais. Apesar dos ganhos obtidos, permaneceram limitações associadas ao controle de fluxo, *ringing*, *overhangs* e *Z-banding*, indicando a necessidade de calibrações dinâmicas e intervenções mecânicas futuras. Conclui-se que o *retrofit* foi tecnicamente viável, recuperou a funcionalidade do equipamento e o transformou em uma plataforma aberta, documentada e replicável para ensino, pesquisa e desenvolvimento em Engenharia Mecatrônica.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Impressão 3D; *Retrofit*. Klipper; Cinemática H-Bot; BIGTREETECH Octopus Pro.

ABSTRACT

This work presents the development and validation of a retrofit process applied to the Cliever CL2 Pro Plus 3D printer, an H-Bot kinematic equipment available at the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC), Florianópolis Campus. The intervention replaced the original proprietary architecture with an open platform based on the Klipper firmware, BIGTREETECH Octopus Pro v1.1 controller board, Raspberry Pi 3 Model B, TMC2209 stepper drivers, 24 V power supply, and CR Touch automatic bed leveling sensor. The methodology was structured in three stages: quantitative characterization of the machine's original state (baseline), physical and logical implementation of the retrofit, and experimental post-intervention validation through thermal tests, calibration cubes, the #3DBenchy model, and the Autodesk-Kickstarter protocol. Results demonstrated significant gains: average bed heating time was reduced from 16 min 55 s to 8 min 30 s (50% reduction), and the extruder nozzle from 3 min 41 s to 1 min 56 s (47% reduction). In printing tests, the #3DBenchy real execution time decreased by 42% and the Autodesk-Kickstarter model by 52%. From a dimensional standpoint, the mean error in the Y-axis of calibration cubes was reduced from +1.60% to +0.45%, representing a 72% reduction in the systematic deviation associated with H-Bot kinematic coupling. CR Touch integration stabilized first-layer adhesion with a compensation mesh of 0.127 mm amplitude, and the modified cooling system improved bridging performance. Despite these gains, limitations persisted in flow control, ringing, overhangs, and Z-banding, indicating the need for future dynamic calibrations and mechanical interventions. It is concluded that the retrofit was technically feasible, restored the equipment's functionality, and transformed it into an open, documented, and replicable platform for teaching, research, and development in Mechatronics Engineering.

Keywords: Additive manufacturing; 3D printing; Retrofit; Klipper; H-Bot kinematics; BIGTREETECH Octopus Pro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de impressão 3D (Esquemático)	17
Figura 2 – Etapas do fluxo de trabalho na impressão 3D	18
Figura 3 – Modelo Esquemático Tecnologia Cartesiana	19
Figura 4 – Modelo Esquemático Tecnologia Delta	20
Figura 5 – Esquema de acionamento e correias da topologia CoreXY	21
Figura 6 – Representação vetorial das forças e momento de torque na cinemática H-Bot	22
Figura 7 – Sistemas de Extrusão: Bowden e Direct Drive	26
Figura 8 – Modelo de teste para avaliação geométrica: #3DBenchy	29
Figura 9 – Modelo de teste para precisão dimensional (Cubo de Calibração)	29
Figura 10 – Modelo de teste quantitativo Autodesk-Kickstarter para calibração de performance	30
Figura 11 – Interface de usuário e ferramentas de manutenção originais	34
Figura 12 – Limitações de parametrização no processo de fatiamento	35
Figura 13 – Telas de preferências do sistema proprietário	35
Figura 14 – Diagrama de pinagem da placa BIGTREETECH Octopus Pro v1.1	38
Figura 15 – Microcomputador Raspberry Pi 3 Model B utilizado na arquitetura distribuída	39
Figura 16 – Fonte chaveada 24 V/20 A e módulo conversor CC-CC abaixador para 5 V	39
Figura 17 – Modelo #3DBenchy: vistas laterais (Baseline)	48
Figura 18 – Modelo #3DBenchy: vistas frontal, traseira e perspectiva (Baseline)	49
Figura 19 – Controle de fluxo nas três amostras (Baseline)	52
Figura 20 – Recursos negativos nas três amostras (Baseline)	53
Figura 21 – Capacidade de ponte nas amostras analisadas (Baseline)	54
Figura 22 – Ressonância XY (<i>Ringing</i>) nas três amostras (Baseline)	55
Figura 23 – Comparação do compartimento eletrônico antes (a) e após (b) o <i>retrofit</i>	56
Figura 24 – Estado original dos conectores (a) e compartimento antes da desmontagem (b)	57
Figura 25 – Sistema retrofitado instalado: nova eletrônica, chapa de alumínio e organização de cabos	58
Figura 26 – Curvas de resposta da calibração PID do <i>hotend</i> registradas no Mainsail	60
Figura 27 – Impressora Cliever CL2 Pro Plus após a conclusão do <i>retrofit</i>	62
Figura 28 – Cubos de calibração XYZ: iterações de ajuste dos parâmetros iniciais pós-retrofit	63

Figura 29 – Modelo #3DBenchy na avaliação preliminar, antes dos ajustes de temperatura e resfriamento	64
Figura 30 – Torres de temperatura (a) e $Q_{retract_test}$ /pontes (b)	65
Figura 31 – Modelagem do suporte de resfriamento customizado no Autodesk Fusion 360	66
Figura 32 – Configuração da ventoinha antes (a) e após (b) a instalação do suporte de resfriamento	66
Figura 33 – Modelo #3DBenchy: vistas frontal, traseira, perspectiva e lateral (Pós- <i>retrofit</i>)	70
Figura 34 – Inclinações (<i>overhangs</i>) e recursos negativos nas três amostras (Pós- <i>retrofit</i>)	72
Figura 35 – Controle de fluxo e recursos negativos nas três amostras (Pós- <i>retrofit</i>)	73
Figura 36 – Capacidade de ponte e ressonância XY nas três amostras (Pós- <i>retrofit</i>)	74
Figura 37 – Vista geral e alinhamento de eixo Z nas três amostras (Pós- <i>retrofit</i>)	75
Figura 38 – Comparação dos cubos de calibração: <i>baseline</i> (a) e pós- <i>retrofit</i> (b)	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de Pontuação do Teste Autodesk-Kickstarter	31
Tabela 2 – Ensaios térmicos do sistema original (12 V)	46
Tabela 3 – Comparação entre tempo estimado e real de impressão: Baseline .	47
Tabela 4 – Análise dimensional dos cubos de calibração: Baseline	48
Tabela 5 – Erros dimensionais e métricas consolidadas: protocolo Autodesk (Baseline)	51
Tabela 6 – Scores do protocolo Autodesk-Kickstarter: Baseline	51
Tabela 7 – Ganhos PID obtidos após calibração do <i>hotend</i> e da mesa	59
Tabela 8 – Ensaios térmicos do sistema pós- <i>retrofit</i> (24 V com PID)	67
Tabela 9 – Comparação entre tempo estimado e real de impressão: Pós- <i>retrofit</i>	68
Tabela 10 – Análise dimensional dos cubos de calibração: Pós- <i>retrofit</i>	69
Tabela 11 – Erros dimensionais e métricas consolidadas: protocolo Autodesk (Pós- <i>retrofit</i>)	76
Tabela 12 – Scores do protocolo Autodesk-Kickstarter: Pós- <i>retrofit</i>	76
Tabela 13 – Comparação consolidada entre Baseline e Pós- <i>retrofit</i>	79
Tabela 14 – Medições individuais dos cubos de calibração: Baseline	140
Tabela 15 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 1 (Baseline)	141
Tabela 16 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 2 (Baseline)	141
Tabela 17 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 3 (Baseline)	141
Tabela 18 – Medições individuais dos cubos de calibração: Pós- <i>retrofit</i>	142
Tabela 19 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 1 (Pós- <i>retrofit</i>)	143
Tabela 20 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 2 (Pós- <i>retrofit</i>)	143
Tabela 21 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 3 (Pós- <i>retrofit</i>)	143

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABL	<i>Automatic Bed Leveling</i> — Nivelamento Automático de Mesa
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> — Projeto Assistido por Computador
DFU	<i>Device Firmware Upgrade</i> — modo de gravação de firmware via USB
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> — Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> — Fabricação por Filamento Fundido
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
MA	Manufatura Aditiva
MCU	<i>Microcontroller Unit</i> — Unidade Microcontroladora
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> — Modulação por Largura de Pulso
SSH	<i>Secure Shell</i> — protocolo de acesso remoto seguro
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Definição do Problema	15
1.3	Objetivo Geral	15
1.4	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Manufatura Aditiva e a Tecnologia FFF	17
2.2	Cinemática de Impressoras 3D	18
2.2.1	Topologia H-Bot (Estudo de Caso: Cliever CL2 Pro Plus)	21
2.2.2	A Importância do Retrofit para a Estabilidade Cinética	23
2.3	Sistemas de Controle e Firmware	24
2.3.1	A Revolução da Arquitetura Distribuída: Klipper	24
2.4	Hardware e Componentes Críticos	25
2.4.1	Sistemas de Extrusão: Bowden vs. Direct Drive	26
2.4.2	Nivelamento Automático e Compensação de Superfície	26
2.4.3	Tensão de Operação	27
2.5	Metodologia de Avaliação de Desempenho (Benchmarking)	28
2.5.1	Avaliação Geométrica e Visual	28
2.5.2	Cubo de Calibração (Dimensional e Fluxo)	29
2.5.3	Protocolo de Teste de Geometria Autodesk-Kickstarter	30
2.6	Retrofitting e Modernização Tecnológica	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Visão Geral da Abordagem Metodológica	33
3.2	Levantamento do Estado Inicial (<i>Baseline</i>)	33
3.2.1	Análise da Interface e Limitações do Ecossistema Proprietário	34
3.2.2	Condições Experimentais do Levantamento Inicial	36
3.2.3	Síntese dos Resultados do Benchmark Inicial	36
3.3	Materiais e Componentes Técnicos do <i>Retrofit</i>	37
3.3.1	Placa Controladora: BIGTREE TECH Octopus Pro v1.1	37
3.3.2	Unidade de Processamento de Alto Nível: Raspberry Pi 3 Model B	38
3.3.3	Sistema de Alimentação Elétrica	39
3.3.4	Sensor de Nivelamento Automático: CR Touch	40
3.4	Configuração Lógica e Parametrização do Firmware Klipper	40
3.4.1	Modelagem Cinemática H-Bot e Parametrização Compatível no Klipper	41
3.4.2	Cálculo e Calibração do Fator de Deslocamento Cinemático	41

3.5	Controle Térmico e Validação dos Sensores	42
3.6	Protocolo de Calibração Pré-Ensaio	42
3.6.1	Calibração de Temperatura de Extrusão	42
3.6.2	Calibração de Retração	43
3.7	Protocolo de Validação Experimental Pós-Retrofit	43
3.7.1	Condições Experimentais Pós-Retrofit	44
3.7.2	Calibrações Avançadas Aplicadas	44
3.7.3	Crterios de Avaliao	45
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
4.1	Resultados do Sistema Original (<i>Baseline</i>)	46
4.1.1	Desempenho térmico do sistema original	46
4.1.2	Tempo de impressão e planejamento de trajetória	47
4.1.3	Análise dimensional dos cubos de calibração	47
4.1.4	Avaliação qualitativa do modelo #3DBenchy	48
4.1.5	Protocolo Autodesk-Kickstarter no sistema original	50
4.1.6	Síntese das limitações do sistema original	56
4.2	Validação Funcional do Sistema Atualizado	56
4.2.1	Reconhecimento da MCU e comunicação com o Klipper	58
4.2.2	Validação dos sensores de fim de curso	59
4.2.3	Validação dos <i>drivers</i> TMC2209 via UART	59
4.2.4	Validação térmica e calibração PID	59
4.2.5	Validação da cinemática e calibração do <i>rotation_distance</i>	60
4.2.6	Instalação e Validação do CR Touch	60
4.3	Calibração do Sistema Pós-Retrofit	62
4.3.1	Identificação dos parâmetros iniciais: cubos de calibração	62
4.3.2	Avaliação preliminar e identificação da necessidade de ajustes	63
4.3.3	Calibração de temperatura e retração	64
4.3.4	Intervenção no sistema de resfriamento	65
4.4	Ensaio de Desempenho Térmico Pós-Retrofit	67
4.5	Ensaio de Impressão Pós-Retrofit	68
4.5.1	Tempo de impressão pós-retrofit	68
4.5.2	Análise dimensional dos cubos pós-retrofit	68
4.5.3	Avaliação qualitativa do #3DBenchy pós-retrofit	69
4.5.4	Protocolo Autodesk-Kickstarter pós-retrofit	71
4.5.5	Limitações observadas durante os ensaios	77
4.6	Comparação entre Sistema Original e Sistema Retrofitado	79
4.6.1	Tabela consolidada de métricas	79
4.6.2	Comparação térmica	79
4.6.3	Comparação dimensional e cinemática	79

4.6.4	Comparação da qualidade das superfícies	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	84
	REFERÊNCIAS	86
	Glossário	89
	APÊNDICES	91
	APÊNDICE A – DIAGRAMA FUNCIONAL ELÉTRICO	92
	APÊNDICE B – MANUAL DE INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO KLIPPER	94
	APÊNDICE C – ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO DO KLIPPER (PRINTER.CFG)	135
	APÊNDICE D – DADOS DE MEDIÇÃO: BASELINE	140
	APÊNDICE E – DADOS DE MEDIÇÃO: PÓS-RETROFIT	142

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva, frequentemente referida como impressão 3D, emergiu nas últimas décadas como uma tecnologia transformadora nos processos de fabricação, permitindo a construção de objetos camada por camada a partir de modelos digitais (Santana, 2015). Dentre as diversas técnicas existentes, a Fabricação por Filamento Fundido (FFF), também conhecida comercialmente como Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), opera pela extrusão controlada de filamentos termoplásticos e alcançou ampla disseminação devido à sua relativa simplicidade e confiabilidade, sendo frequentemente implementada por meio de mecanismos de movimentação paralela, como a topologia H-Bot (Hadisujoto; Wijaya, 2021). No âmbito da Engenharia Mecatrônica, o domínio dessa tecnologia tornou-se uma competência valiosa, viabilizando a prototipagem rápida e o desenvolvimento de sistemas de posicionamento horizontal de alta precisão (Idà; Nanetti; Mottola, 2022; Siepamann *et al.*, 2022).

Paralelamente à evolução do *hardware*, o desenvolvimento de *software* para controle dessas máquinas tem sido intensamente impulsionado por comunidades de código aberto. Essa filosofia colaborativa permitiu o surgimento de *firmwares* avançados, como o Klipper, que se distingue por sua arquitetura de processamento distribuído (Nazarenko; Ostroushko, 2025). Ao delegar cálculos complexos para um microcomputador auxiliar, o Klipper viabiliza a implementação de algoritmos sofisticados de otimização de trajetória e funções de compensação dinâmica complexas demais para microcontroladores convencionais, essenciais para mitigar as limitações dinâmicas de máquinas não-cartesianas (Erwiński; Ustaszewski, 2025). A aplicação desses recursos visa superar os entraves de sistemas tradicionais, permitindo aumentar significativamente a velocidade de impressão enquanto se aprimora a qualidade das superfícies e a precisão dimensional das peças.

Este trabalho se insere nesse contexto de otimização tecnológica, focando na aplicação prática desses avanços em um equipamento específico presente no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis.

1.1 Justificativa

A Manufatura Aditiva é uma ferramenta crucial para a Engenharia Mecatrônica no IFSC, Câmpus Florianópolis, tanto no ensino quanto em projetos. O Câmpus possui uma impressora Cliever CL2 Pro Plus, de cinemática H-Bot, incorporada por doação, porém subutilizada devido à descontinuidade do suporte pelo fabricante. A indisponibilidade do *software* proprietário torna sua manutenção convencional inviável e impede o aproveitamento pleno do *hardware* existente.

Diante das limitações orçamentárias para aquisição de novos equipamen-

tos, a recuperação e otimização de ativos torna-se uma prioridade institucional. Este TCC propõe o *retrofit* da eletrônica e do sistema de controle da Cliever CL2 Pro Plus, substituindo o ecossistema fechado por uma arquitetura baseada em Klipper. Essa abordagem visa superar a obsolescência de *software*, aproveitando a robustez mecânica da H-Bot para transformá-la em uma plataforma com maior capacidade de parametrização e controle de processo.

A relevância do projeto é dupla: academicamente, proporciona experiência prática avançada em integração de *hardware/software* e controle de movimento; institucionalmente, promove autonomia tecnológica e desenvolve um método replicável para a modernização de impressoras similares no IFSC, maximizando o impacto do trabalho para a instituição.

1.2 Definição do Problema

O *hardware* da impressora Cliever CL2 Pro Plus baseia-se na cinemática H-Bot, uma configuração que utiliza uma única correia contínua para o movimento nos eixos X e Y. Embora robusta, essa topologia apresenta desafios dinâmicos intrínsecos: estudos experimentais demonstram que a dinâmica real de deposição pode apresentar desvios de velocidade entre 20% e 50% em relação ao programado, devido às características inerciais e ao efeito de torque no pórtico transversal (*racking*) (Oleksyshen *et al.*, 2020). Tais limitações resultam em falta de repetibilidade e comportamento heterogêneo do cabeçote extrusor, problemas documentados na avaliação de equipamentos de código aberto (Santana, 2015).

A transição de um sistema fechado para uma plataforma aberta exige um *retrofit* completo de *hardware* e *software* (Siepamann *et al.*, 2022). Embora os benefícios teóricos do Klipper sobre *firmwares* monolíticos sejam discutidos na literatura, há uma lacuna de dados quantitativos sobre essa migração em equipamentos proprietários como o modelo em estudo. Trabalhos anteriores focaram em monitoramento remoto sem análise aprofundada do impacto cinemático na performance (Siepamann *et al.*, 2022). Diante deste cenário, o problema de pesquisa é:

Qual é o impacto do retrofit eletrônico e da substituição do firmware proprietário por uma arquitetura baseada em Klipper no desempenho de uma impressora 3D H-Bot, considerando precisão dimensional, velocidade de fabricação e estabilidade dinâmica?

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver e validar um processo de *retrofit* para a impressora 3D Cliever CL2 Pro Plus, substituindo seu sistema de controle proprietário por uma arquitetura

distribuída baseada em Klipper, com migração da alimentação elétrica para 24 V e integração de sensor de nivelamento automático. O objetivo é analisar e quantificar o impacto dessas intervenções na estabilidade, na precisão dimensional e na qualidade de impressão, estabelecendo um método replicável para a modernização de equipamentos similares.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Analisar teoricamente os fundamentos da manufatura aditiva por Fabricação por Filamento Fundido (FFF), com ênfase na cinemática H-Bot e nos efeitos associados à dinâmica de movimento do sistema.
- b) Caracterizar experimentalmente o desempenho do equipamento em sua configuração original (*baseline*), mensurando tempos de ciclo, desvios dimensionais e qualidade das superfícies por meio de ensaios padronizados com protocolo Autodesk-Kickstarter e modelo #3DBenchy.
- c) Projetar e implementar a nova arquitetura de controle distribuído, integrando uma placa controladora de 32 bits (BIGTREETECH Octopus Pro v1.1) a um microcomputador (Raspberry Pi 3 Model B), com migração do barramento elétrico de 12 V para 24 V, visando a separação entre planejamento de trajetória e controle de baixo nível.
- d) Configurar o *firmware* Klipper, incluindo a integração de sensor de nivelamento automático (CR Touch), calibração PID dos subsistemas térmicos e avaliação de recursos de compensação de extrusão (*Pressure Advance*) e dinâmica (*Input Shaping*), quando aplicáveis às condições experimentais disponíveis.
- e) Avaliar o impacto das modificações propostas por meio de ensaios comparativos pré e pós-intervenção, utilizando métricas de tempo de impressão, precisão dimensional e qualidade de superfície.
- f) Identificar e analisar os principais fatores limitantes do sistema original e residuais do sistema retrofitado, correlacionando defeitos observados nas amostras (como *ringing*, *stringing*, *Z-banding* e degradação em *overhangs*) com aspectos de controle, dinâmica estrutural e limitações mecânicas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

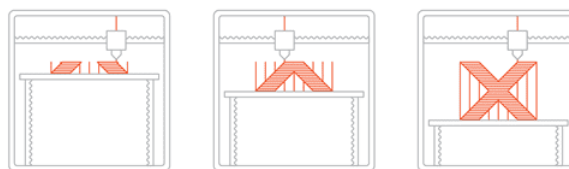
Para compreender os desafios e as soluções propostas neste trabalho de *retrofit*, é necessário primeiramente situar a tecnologia de impressão 3D no contexto atual da manufatura e detalhar os princípios que regem seu funcionamento, desde a mecânica básica até os algoritmos de controle avançados.

2.1 Manufatura Aditiva e a Tecnologia FFF

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, é definida como um processo de fabricação digital que produz objetos físicos através da adição sucessiva de material, construindo-os camada por camada (Couto, 2023). Segundo Maximiano (2015), essa tecnologia utiliza dados de um modelo tridimensional para gerar o objeto diretamente, diferenciando-se dos métodos convencionais por eliminar a necessidade de um planejamento complexo de processo para a remoção de material. A expansão dessa tecnologia foi impulsionada pela expiração de patentes industriais e pelo surgimento de comunidades de código aberto, permitindo a democratização do acesso a ferramentas de prototipagem rápida e produção personalizada (Santana, 2015).

Dentre as diversas categorias de MA, a Fabricação por Filamento Fundido (FFF, do inglês *Fused Filament Fabrication*), também comercialmente referenciada como FDM (*Fused Deposition Modeling*), é a mais difundida (Couto, 2023). O processo consiste na extrusão de um filamento termoplástico através de um bico aquecido, que se move em coordenadas *X* e *Y* depositando o material fundido sobre uma plataforma, enquanto o eixo *Z* se desloca para permitir a formação das camadas subsequentes (Azevedo, 2013). O princípio de funcionamento desta tecnologia pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Processo de impressão 3D (Esquemático)

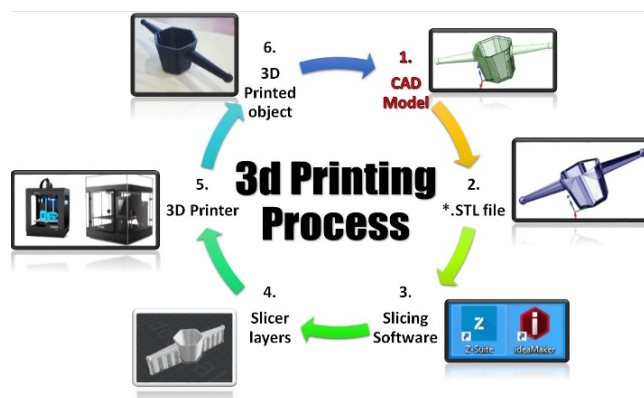


Fonte: 3D Lab (2018).

O fluxo de trabalho na tecnologia FFF inicia-se com a modelagem da peça em sua maioria *software* CAD, seguida pela exportação para o formato de malha trian-

gular STL (*Standard Tessellation Language*). Este arquivo é então processado por um *software* de fatiamento (*slicer*), que converte a geometria em instruções de máquina (G-code). As etapas completas deste fluxo, da concepção digital até a peça física, estão detalhadas na Figura 2.

Figura 2 – Etapas do fluxo de trabalho na impressão 3D



Fonte: Recreate 3D (2025).

A complexidade do processo FFF reside na interdependência de variáveis de diferentes naturezas. Couto (2023) propõe um modelo de três domínios para classificar esses parâmetros:

- **Parâmetros Digitais:** Envolvem o fatiamento, altura de camada e algoritmos de trajetória (como os gerados pelo Klipper);
- **Parâmetros Físicos:** Relacionados à arquitetura da máquina, rigidez estrutural e sistema de movimentação;
- **Parâmetros de Material:** Envolvem a reologia do polímero, viscosidade e comportamento térmico.

O sucesso do *retrofit* proposto neste trabalho depende da harmonização desses três domínios, onde o *firmware* atua como o elo de controle entre o modelo digital e a execução física. Contudo, para que essas modificações resultem em ganhos reais de velocidade e precisão, é fundamental compreender primeiro como a arquitetura mecânica da impressora influencia a dinâmica de movimento.

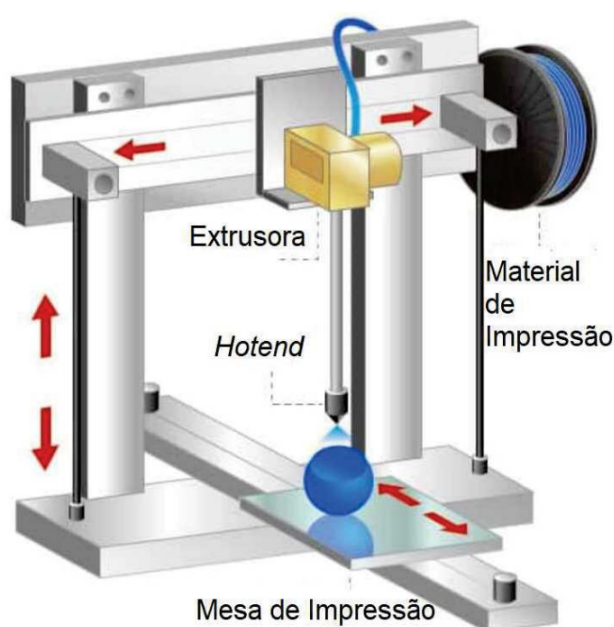
2.2 Cinemática de Impressoras 3D

A cinemática de uma impressora 3D define a mecânica de movimento dos seus componentes (mesa e cabeçote de impressão) para depositar o material nas coordenadas corretas. No mercado de FFF, existem três arquiteturas predominantes:

Cartesiana, Delta e CoreXY, cada uma com características distintas de volume de construção e inércia (Top 3D Shop, 2019).

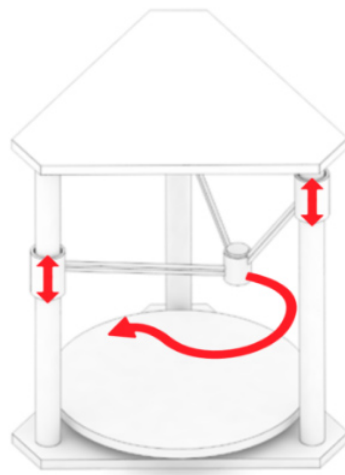
O sistema Cartesiano tradicional (frequentemente chamado de “*bed slinger*”) movimenta a mesa de impressão no eixo Y e o cabeçote nos eixos X e Z. Embora seja um design simples e de baixo custo, a movimentação da mesa adiciona uma massa significativa ao sistema, gerando inércia que limita as velocidades de impressão e aceleração, podendo causar artefatos visuais como *ghosting* em altas velocidades (Nazarenko; Ostroushko, 2025). A Figura 3 exemplifica a arquitetura cartesiana padrão.

Figura 3 – Modelo Esquemático Tecnologia Cartesiana



Fonte: Antonelli (2019).

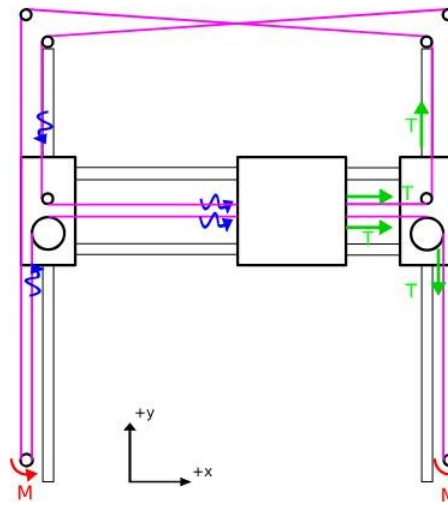
As impressoras Delta, por sua vez, operam com base em uma cinemática paralela, inspirada em robôs industriais. Diferente das cartesianas, elas possuem uma mesa de impressão circular e estática. Conforme ilustrado na Figura 4, o movimento do cabeçote é controlado por três braços articulados que se deslocam verticalmente em três torres dispostas em triângulo (Muñoz Cadenas, 2023). Essa configuração mantém os motores fixos na estrutura, reduzindo drasticamente a inércia do conjunto móvel e permitindo altas velocidades e acelerações. No entanto, o volume de impressão cilíndrico tende a ser menos eficiente para peças retangulares e a calibração geométrica é consideravelmente mais complexa (Muñoz Cadenas, 2023; Top 3D Shop, 2019).

Figura 4 – Modelo Esquemático Tecnologia Delta

Fonte: Les Imprimantes 3D .fr (2025).

A cinemática CoreXY apresenta-se como uma evolução que combina a estabilidade do sistema cartesiano com a redução de massa das impressoras Delta. No CoreXY, os motores dos eixos X e Y são fixados na estrutura da impressora e permanecem estacionários. O movimento é transmitido por meio de um sistema de duas correias independentes que trabalham em planos diferentes ou cruzados, conforme ilustrado na Figura 5 (Holanda, 2023).

De acordo com a documentação técnica de Klipper Project (2025a), a principal vantagem mecânica desta configuração é a simetria de forças. Como as duas correias puxam o carro simultaneamente em sentidos opostos ou complementares, as forças laterais resultantes anulam os binários de torção no pórtico, resultando em movimento puramente translacional e permitindo acelerações superiores sem comprometer a precisão dimensional (Top 3D Shop, 2019; Holanda, 2023). Contudo, a montagem em planos cruzados das duas correias introduz maior complexidade de ajuste e pode gerar desgaste diferencial se a tensão não for mantida uniformemente, representando um fator de atenção em aplicações de precisão (Holanda, 2023).

Figura 5 – Esquema de acionamento e correias da topologia CoreXY

Fonte: Top 3D Shop (2019).

2.2.1 Topologia H-Bot (Estudo de Caso: Cliever CL2 Pro Plus)

A topologia H-Bot é frequentemente confundida com a CoreXY devido à similaridade na disposição estacionária dos motores e no uso de uma correia contínua para acionar ambos os eixos. No entanto, o sistema H-Bot simplifica a montagem ao utilizar uma única correia em um único plano horizontal (formando a letra “H”). Esta característica define a mecânica da impressora Cliever CL2 Pro Plus, objeto deste estudo.

Matematicamente, a cinemática H-Bot é um sistema acoplado. Conforme definido por O'Connor (O'Connor, 2026), o *firmware* deve processar a rotação dos motores A e B para converter os passos em coordenadas cartesianas através das equações:

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B) \quad (1)$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B) \quad (2)$$

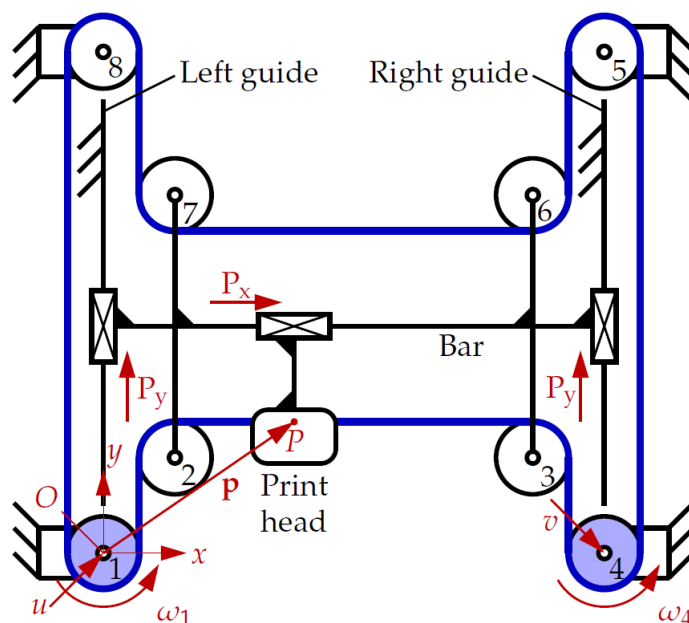
Essas equações evidenciam que o movimento nos eixos X e Y não é independente, mas sim resultado da combinação linear dos deslocamentos dos motores, caracterizando um sistema com acoplamento cinemático. Essa dependência mútua torna o sistema mais sensível a erros estruturais e dinâmicos, especialmente em topologias como a H-Bot, onde imperfeições mecânicas podem ser amplificadas durante a

execução de trajetórias. Nesse contexto, torna-se necessária uma arquitetura de controle capaz de processar essas transformações em tempo real com elevada precisão, evitando a introdução de erros de trajetória.

Embora as relações cinemáticas da H-Bot sejam matematicamente equivalentes às da topologia CoreXY (O'Connor, 2026), as diferenças estruturais na disposição das correias resultam em comportamentos dinâmicos distintos. Conforme ilustrado na Figura 6, a configuração H-Bot utiliza uma correia única disposta em um plano simples, o que, diferentemente da simetria de forças do sistema CoreXY, induz esforços não balanceados no sistema.

Nesta topologia, conforme ilustrado na Figura 6, a aplicação das forças de tração gera um binário de torque (momento fletor) indesejado no pórtico transversal sempre que ocorrem acelerações bruscas no eixo Y (Idà; Nanetti; Mottola, 2022). Este fenômeno, tecnicamente caracterizado como *racking*, compromete a ortogonalidade do conjunto e resulta em torções momentâneas e vibrações residuais que prejudicam a precisão geométrica em altas velocidades (Hadisujoto; Wijaya, 2021). Diante dessa vulnerabilidade estrutural, o sucesso do *retrofit* torna-se dependente de uma estrutura com elevada rigidez mecânica aliada ao uso de algoritmos de compensação ativa, justificando a implementação do *firmware* Klipper para mitigar os desvios cinemáticos inerentes à arquitetura original da Cliever.

Figura 6 – Representação vetorial das forças e momento de torque na cinemática H-Bot



Fonte: Adaptado de Idà, Nanetti e Mottola (2022) e Hadisujoto e Wijaya (2021).

De forma geral, observa-se que topologias cartesianas apresentam limita-

ções associadas à elevada massa móvel, enquanto arquiteturas como CoreXY e Delta reduzem a inércia e permitem maiores acelerações. No entanto, a topologia H-Bot, apesar de sua simplicidade construtiva, apresenta desvantagens estruturais relacionadas ao fenômeno de *racking*, o que justifica a necessidade de estratégias avançadas de controle no contexto deste trabalho.

2.2.2 A Importância do Retrofit para a Estabilidade Cinética

A análise dessas topologias constitui o elemento central que justifica o *retrofit* proposto. Embora a Cliever CL2 Pro Plus apresente uma estrutura com rigidez adequada para operação convencional, a adoção da cinemática H-Bot implica na presença de esforços acoplados entre os eixos, resultando na geração de momentos parasitas sobre o pórtico.

Do ponto de vista da dinâmica estrutural, tais excitações podem induzir vibrações nos modos naturais do sistema, especialmente sob condições de aceleração elevada, manifestando-se na forma de defeitos como *ringing* e degradação da qualidade das superfícies.

Como estratégia de mitigação, o sistema original opera com limitações conservadoras de velocidade e aceleração impostas pelo *firmware* do fabricante, reduzindo a excitação desses modos dinâmicos. No entanto, essa abordagem resulta na subutilização do potencial do *hardware*, restringindo o desempenho global do equipamento.

Com isso, o *retrofit* proposto, baseado na adoção de uma arquitetura de controle distribuído, visa atuar diretamente na origem do problema, permitindo a elevação do desempenho sem comprometimento da qualidade de impressão. Técnicas como o *Input Shaping* possibilitariam a compensação ativa das frequências de ressonância do pórtico; embora não implementada no escopo deste trabalho por limitação de tempo, sua aplicação futura constitui a continuidade natural do projeto, conforme discutido na Seção 4.5.5.

Dessa forma, a migração para a arquitetura de processamento distribuído do Klipper não é apenas uma troca de interface, mas uma solução de engenharia para mitigar uma limitação física do sistema. Ao utilizar a capacidade de processamento de um Raspberry Pi para executar algoritmos de controle avançados e *Jerk limited feedrate* (Erwiński; Ustaszewski, 2025), torna-se possível antecipar as frequências de ressonância do pórtico e reduzir a excitação de determinadas frequências, contribuindo para a mitigação de marcas de vibração superficial.

Em suma, o *retrofit* permite que a Cliever opere próxima ao limite físico de sua mecânica H-Bot, transformando o que era um gargalo de *software* em um sistema capaz de realizar movimentos complexos com determinismo temporal (Oleksyshen et

al., 2020).

2.3 Sistemas de Controle e Firmware

Para que uma impressora 3D funcione, é necessário um sistema que traduza o modelo digital em movimentos físicos precisos. Esse papel é desempenhado pelo *firmware*, um *software* embarcado diretamente na placa eletrônica da impressora.

Embora tecnicamente definido como um sistema de controle de baixo nível, em guias voltados à operação prática de equipamentos (Portela, 2023), o *firmware* é frequentemente comparado a um “intérprete” ou ao cérebro da máquina. Essa analogia ilustra sua função central: ele recebe as instruções de código G (*G-code*) geradas pelo fatiador e as converte em pulsos elétricos para coordenar, em tempo real, a rotação dos motores e o controle térmico.

2.3.1 A Revolução da Arquitetura Distribuída: Klipper

Para superar as limitações físicas e de processamento dos microcontroladores tradicionais, o *firmware* Klipper introduziu uma mudança de paradigma por meio de uma arquitetura de processamento distribuído. Diferente do modelo monolítico convencional, onde um único microcontrolador é responsável por todas as tarefas, o Klipper implementa o conceito de *computational offloading*, transferindo a carga computacional pesada para um computador hospedeiro (*host*) significativamente mais potente, geralmente um Raspberry Pi (O’Connor, 2026).

Nesta configuração, o computador *host* executa o planejamento de trajetória, a análise do G-code e os cálculos cinemáticos complexos. A placa controladora da impressora (MCU) passa a atuar como um periférico de execução, encarregado apenas de gerar os pulsos elétricos nos momentos exatos agendados pelo *host*. Conforme documentado por Klipper Project (2025a), essa comunicação ocorre via protocolo binário otimizado, que garante um determinismo temporal superior e permite atingir frequências de passo (*step rates*) impossíveis em arquiteturas tradicionais.

Essa separação de tarefas e o aumento da capacidade computacional disponível oferecem vantagens técnicas fundamentais para o sucesso de um *retrofit*.

- **Alta Capacidade de Processamento e Precisão Temporal:** Ao utilizar um sistema Linux para os cálculos de física do movimento, o Klipper consegue agendar eventos com precisão de microssegundos, eliminando os gargalos de processamento que causam *stuttering* em placas de 8 ou 32 bits quando submetidas a altas velocidades ou movimentos micro-segmentados (O’Connor, 2026).

- **Algoritmos de Compensação Dinâmica Avançados:** O processamento extra permite a implementação de modelos matemáticos que mitigam limitações físicas do *hardware*, incluindo estratégias de movimentação e funções de compensação complexas demais para um microcontrolador convencional:
 - *Input Shaping* (Compensação de Ressonância): técnica de processamento de sinais que filtra as frequências naturais de vibração da estrutura. De acordo com Klipper Project (2025b), o algoritmo ajusta os perfis de aceleração para cancelar as ondas de choque que causariam *ringing*, o que seria especialmente relevante para estabilizar a cinemática H-Bot em altas acelerações. Sua implementação não foi realizada no escopo deste trabalho por limitação de tempo, sendo indicada como continuidade natural do projeto.
 - *Pressure Advance* (Avanço de Pressão): compensa a elasticidade do filamento e a compressão dentro do sistema de extrusão, ajustando dinamicamente a pressão no bico durante variações de velocidade e garantindo fluxo volumétrico constante em cantos e trocas de direção (O'Connor, 2026).
- **Flexibilidade de Configuração em Tempo de Execução:** Ao contrário de sistemas como o Marlin, que exigem a recompilação do código-fonte para alterações de *hardware*, o Klipper utiliza um arquivo de configuração dinâmica (`printer.cfg`), interpretado pelo computador *host* a cada reinicialização e permitindo ajustes finos de forma ágil e sem *flashing* constante da MCU (O'Connor, 2026).

A implementação do Klipper remove o gargalo de processamento lógico, mas expõe novas demandas ao restante do sistema. Para suportar as altas velocidades e frequências de passo permitidas por esse sistema de controle distribuído, os componentes eletromecânicos precisam de uma infraestrutura elétrica robusta, aspecto abordado na Seção 2.4.3.

A escolha do Klipper para o *retrofit* da Cliever CL2 Pro Plus justifica-se, portanto, pela capacidade de modernizar o comportamento dinâmico de um *hardware* eletrônico obsoleto por meio de inteligência de *software*. Ao transferir a inteligência do sistema para um microcomputador externo, viabiliza-se a aplicação de algoritmos de controle avançados que expandem o aproveitamento do potencial mecânico da H-Bot, transformando uma estrutura proprietária limitada em uma plataforma de manufatura com maior grau de parametrização e controle de processo.

2.4 Hardware e Componentes Críticos

A capacidade de uma impressora 3D atingir altas velocidades com qualidade não depende apenas do *firmware* ou da cinemática, mas também da eficiência

dos componentes eletromecânicos e térmicos. O ecossistema de *hardware* evoluiu para suportar as demandas de aceleração e fluxo volumétrico impostas por *firmwares* modernos como o Klipper.

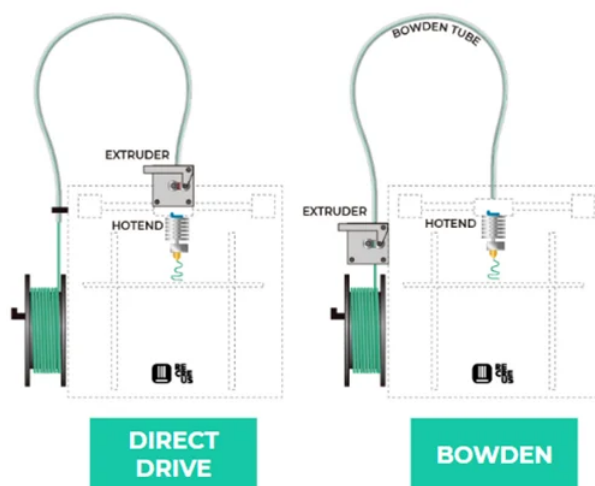
A confiabilidade deste sistema é regida pela capacidade do filamento de transmitir força sem deformar antes de entrar na zona de fusão. Couto (2023) descreve que falhas como a flambagem do filamento ocorrem quando a força necessária para empurrar o material viscoso através do bico excede a rigidez da coluna de filamento não fundido. Este fenômeno é agravado em sistemas Bowden longos ou ao tentar imprimir em altas velocidades sem um *hotend* adequado.

2.4.1 Sistemas de Extrusão: Bowden vs. Direct Drive

Existem duas configurações predominantes para o tracionamento do filamento, cujas diferenças estruturais estão ilustradas na Figura 7.

No sistema **Bowden**, o motor é fixado na estrutura, guiando o filamento até o bico por um tubo longo. Segundo Martins (2021), isso reduz a massa móvel, favorecendo a velocidade, mas introduz histerese (atraso na resposta) devido à elasticidade do filamento no tubo. Já o sistema **Direct Drive** posiciona o motor diretamente sobre o bico. Embora adicione peso, elimina folgas e permite controle preciso da retração e da pressão (*Pressure Advance*), sendo a escolha preferencial para impressões de alta fidelidade e materiais flexíveis.

Figura 7 – Sistemas de Extrusão: Bowden e Direct Drive



Fonte: Filament2Print (2025).

2.4.2 Nivelamento Automático e Compensação de Superfície

A adesão da primeira camada é um dos fatores mais críticos para o sucesso de uma impressão FFF. Em estruturas mecânicas sujeitas a vibrações ou dilatação tér-

mica, garantir planicidade perfeita da mesa apenas com ajustes manuais é um desafio constante.

Para mitigar esses erros, adota-se o Nivelamento Automático da Mesa (ABL). Segundo Nazarenko e Ostroushko (2025), a integração de sistemas modernos de controle permite a execução de rotinas de calibração automática da plataforma, reduzindo o tempo de preparação e aumentando a precisão dimensional das peças ao compensar desvios físicos via *software*.

Do ponto de vista de *hardware*, essa implementação exige a substituição do limitador físico do eixo Z por um sensor de distância. Cadenas (2023) discute o uso de sondas, como sensores indutivos ou de contato (ex: BLTouch), que mapeiam a topografia da mesa em múltiplos pontos. O *firmware* utiliza esses dados para criar uma malha de compensação (*bed mesh*), ajustando dinamicamente a altura do bico durante a impressão para acompanhar as ondulações da superfície.

2.4.3 Tensão de Operação

A tensão de alimentação (V_s) desempenha um papel central no desempenho dinâmico de motores de passo, atuando não apenas como fonte de potência, mas como o principal limitador do desempenho dinâmico de uma impressora 3D em regimes de alta velocidade. Sob a ótica da eletrotécnica, o comportamento da corrente (i) em um enrolamento de motor é regido pela equação diferencial da malha:

$$V_s = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + V_{bemf}(t) \quad (3)$$

onde R representa a resistência, L a indutância do enrolamento e V_{bemf} a Força Contra-Eletromotriz. Segundo Hannifin (2003), o maior desafio em altas rotações é o efeito da indutância: como a corrente não se estabelece instantaneamente, a taxa de subida ($\frac{di}{dt}$) é diretamente proporcional à tensão aplicada. Em sistemas com tensão de alimentação baixa, a diferença de potencial torna-se insuficiente para vencer a impedância do enrolamento em frequências de passo elevadas, impedindo que a corrente atinja seu valor nominal antes da próxima comutação de fase.

Além do gargalo indutivo, o movimento do rotor induz uma tensão oposta à fonte, denominada *Back-EMF*, cuja magnitude é aproximadamente proporcional à velocidade angular do motor. Conforme a velocidade de impressão aumenta, a V_{bemf} aproxima-se do valor da fonte (V_s), reduzindo a tensão líquida disponível para injetar corrente no enrolamento. Esse fenômeno é responsável pela queda acentuada na curva de torque-velocidade, resultando em perda de sincronismo (*missed steps*) em regimes onde a carga inercial exige maior torque (Parker Hannifin, 2003).

A adoção de tensões de alimentação mais elevadas mitiga esses efeitos por dois mecanismos fundamentais:

1. **Resposta Transitória Otimizada:** O incremento na tensão disponível permite que a corrente atinja o pico nominal em intervalo de tempo significativamente menor, garantindo torque total mesmo sob tempos de comutação reduzidos.
2. **Compensação de Back-EMF:** A maior amplitude de V_s provê folga operacional superior, mantendo estabilidade de torque em rotações onde tensões menores falhariam.

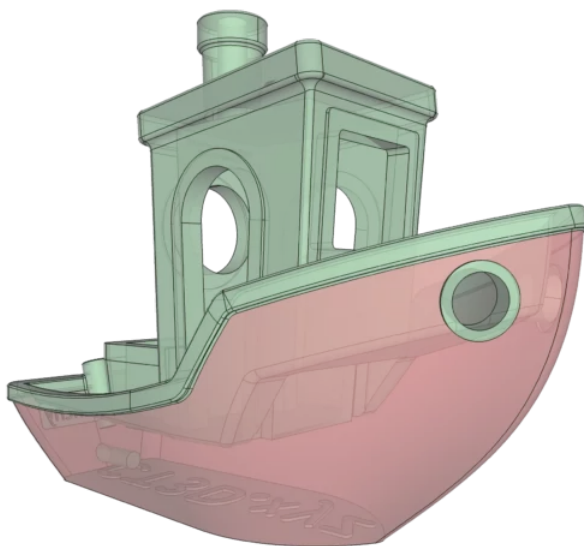
Essa estabilidade dinâmica é o que viabiliza a implementação de perfis de aceleração mais agressivos via *firmware* Klipper, garantindo que os subsistemas térmicos também operem com a potência exigida pelo novo patamar de performance cinemática (Muñoz Cadenas, 2023).

2.5 Metodologia de Avaliação de Desempenho (Benchmarking)

Para validar quantitativamente as melhorias implementadas em um processo de *retrofit*, é necessário estabelecer métricas objetivas de comparação entre o estado original do equipamento e o estado modificado. Na literatura de manufatura aditiva, utilizam-se modelos padronizados de teste (*benchmarks*) que permitem isolar variáveis como precisão dimensional, qualidade das superfícies e capacidade de resfriamento.

2.5.1 Avaliação Geométrica e Visual

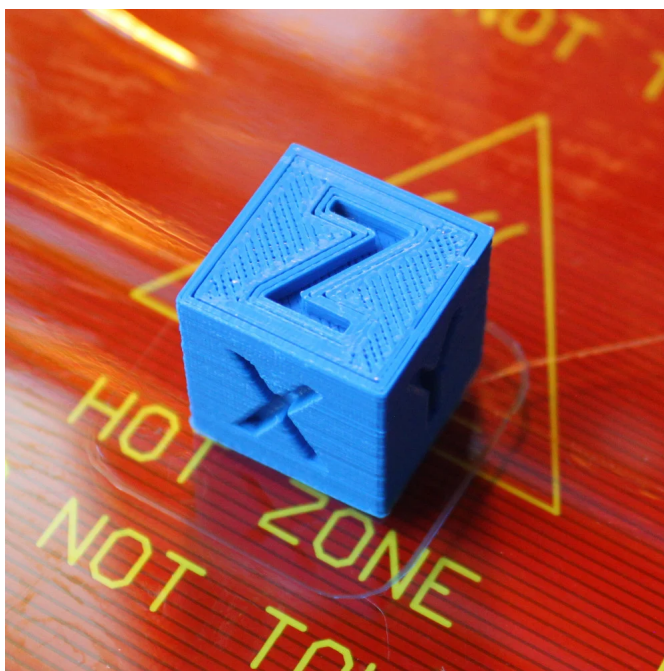
O modelo mais difundido para avaliação qualitativa e geométrica é o “#3DBenchy”, apresentado na Figura 8. Este modelo foi projetado com geometrias desafiadoras, incluindo arcos, pontes (*bridging*) e planos inclinados. Segundo Nazarenko e Ostroushko (2025), o uso deste modelo permite identificar visualmente falhas decorrentes de superaquecimento, vibração mecânica (*ringing*) e inconsistências na retração, sendo o padrão da indústria para testes de velocidade.

Figura 8 – Modelo de teste para avaliação geométrica: #3DBenchy

Fonte: Creative Tools (2025).

2.5.2 Cubo de Calibração (Dimensional e Fluxo)

Para a análise quantitativa da precisão de movimento dos eixos X, Y e Z, utiliza-se o Cubo de Calibração (tipicamente de $20 \times 20 \times 20$ mm), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Modelo de teste para precisão dimensional (Cubo de Calibração)

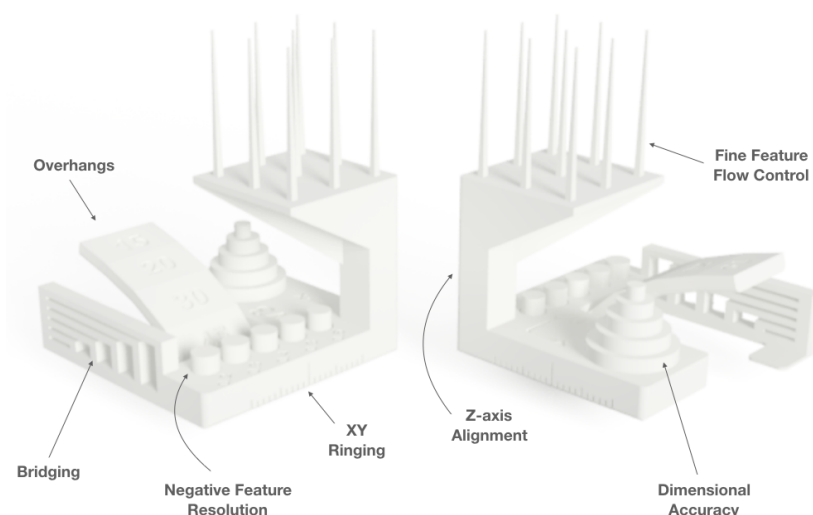
Fonte: 3D Lab (2023).

Holanda (2023) demonstra que a medição deste corpo de prova com um paquímetro digital permite calcular o erro dimensional relativo e a repetibilidade da máquina. Além das dimensões externas, a inspeção visual das faces do cubo auxilia no diagnóstico de problemas de fluxo ou folgas mecânicas nas correias.

2.5.3 Protocolo de Teste de Geometria Autodesk-Kickstarter

Para a validação quantitativa e padronizada do desempenho da impressora, foi adotado o modelo de teste proposto pelo consórcio Autodesk-Kickstarter, ilustrado na Figura 10. Este protocolo estabelece uma métrica objetiva de pontuação (*score*), permitindo a avaliação integrada de múltiplos fenômenos físicos relevantes à manufatura aditiva em um único corpo de prova.

Figura 10 – Modelo de teste quantitativo Autodesk-Kickstarter para calibração de performance



Fonte: Kickstarter e Autodesk (2026).

De acordo com as diretrizes estabelecidas no repositório oficial (Kickstarter; Autodesk, 2026), o desempenho é avaliado com base em sete critérios distintos, abrangendo aspectos geométricos, dinâmicos e de extrusão:

- **Precisão Dimensional (XY):** Avalia o desvio médio em cilindros concêntricos, sendo um indicador direto da fidelidade geométrica e da ortogonalidade do sistema de movimentação.
- **Controle de Fluxo:** Verifica a consistência da deposição do material, avaliando a estabilidade do fluxo e a capacidade de manter dimensões adequadas em elementos sólidos.

- **Stringing:** Avalia a presença de filamentos residuais entre estruturas, sendo diretamente relacionado ao controle de retração e à dinâmica de extrusão.
- **Capacidade de Ponte (*Bridging*):** Mede o colapso do filamentos em vãos horizontais sem suporte, refletindo a interação entre extrusão, viscosidade do material e eficiência do resfriamento.
- **Inclinações (*Overhangs*):** Analisa a qualidade das superfícies em superfícies inclinadas, sendo um indicativo da estabilidade térmica do processo.
- **Ressonância de Eixo (*Ringig*):** Identifica oscilações periódicas nas superfícies verticais, associadas à excitação dos modos naturais da estrutura durante mudanças de direção.
- **Alinhamento do Eixo Z:** Avalia a presença de padrões periódicos ao longo da direção vertical, associados a erros de avanço do fuso (*Z wobble*) e falhas no sincronismo de camadas.

A principal contribuição deste protocolo reside na possibilidade de obtenção de uma pontuação global comparativa, permitindo avaliar quantitativamente a evolução do sistema antes e após a intervenção proposta. Conforme detalhado na Tabela 1, cada critério recebe uma pontuação baseada em limites definidos experimentalmente.

Tabela 1 – Critérios de Pontuação do Teste Autodesk-Kickstarter

Parâmetro	Critério de Medição	Pontos
Precisão Dimensional	Erro médio inferior a 0,1 mm nos eixos XY.	5
Controle de Fluxo	Deposição uniforme sem falhas volumétricas.	5
Stringing	Ausência de filamentos residuais entre estruturas.	5
Ressonância (XY)	Ausência de ondulações visíveis após mudanças de direção.	5
Pontes (<i>Bridging</i>)	Deflexão inferior a 2 mm em vãos de 20 mm.	5
Inclinações	Superfície estável até 45° sem colapso.	5
Alinhamento eixo Z	Ausência de padrões periódicos verticais (<i>wobble</i>).	5

Fonte: Adaptado de Kickstarter e Autodesk (2026).

A aplicação conjunta desses critérios permite correlacionar diretamente os defeitos observados nas amostras com os fenômenos físicos subjacentes, fornecendo uma base robusta para a análise comparativa entre o estado original do equipamento e a configuração pós-*retrofit*.

2.6 Retrofitting e Modernização Tecnológica

O conceito de *retrofitting* (ou modernização) refere-se ao processo de atualização de equipamentos antigos ou obsoletos por meio da incorporação de novas

tecnologias, visando restaurar sua funcionalidade, melhorar seu desempenho ou adicionar novos recursos. No contexto da Indústria 4.0, essa prática permite estender a vida útil de ativos industriais sem a necessidade de descarte e substituição completa do maquinário (Siepamann *et al.*, 2022).

A transição de sistemas proprietários para ecossistemas de código aberto (*open-source*) é uma das principais motivações para o *retrofit*. A literatura da área, como a obra de Santana (2015), destaca que enquanto os sistemas fechados limitam a atuação do operador, as plataformas abertas são essenciais por permitirem o ajuste fino de variáveis críticas do processo.

Nesse contexto, ao substituir uma eletrônica limitada pela arquitetura distribuída do Klipper, o *retrofit* materializa as vantagens apontadas por Santana (2015): desbloqueia-se o potencial latente da mecânica da impressora, elevando-a a um patamar de controle e parametrização comparável a equipamentos de última geração.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos experimentais, os componentes empregados e os critérios técnicos adotados para a execução do *retrofit* da impressora 3D Cliever CL2 Pro Plus. A metodologia foi estruturada a partir de uma abordagem comparativa entre o estado original da máquina, denominado *baseline*, e a configuração modificada, baseada em arquitetura de controle distribuído com firmware Klipper, Raspberry Pi 3 Model B e placa controladora BIGTREETECH Octopus Pro v1.1.

3.1 Visão Geral da Abordagem Metodológica

O estudo caracteriza-se como um ensaio experimental comparativo, orientado à avaliação do desempenho funcional da impressora antes e depois da substituição do sistema de controle original. O fluxo metodológico foi dividido em três fases sequenciais e interdependentes:

1. **Fase de Diagnóstico (*Baseline*):** levantamento quantitativo e qualitativo das limitações operacionais, térmicas, dimensionais e dinâmicas da configuração original da impressora;
2. **Fase de Intervenção de Engenharia (*Retrofit*):** substituição da eletrônica proprietária por uma arquitetura aberta, composta por Raspberry Pi 3 Model B, placa BIGTREETECH Octopus Pro v1.1, drivers TMC2209, alimentação em 24 V e firmware Klipper;
3. **Fase de Calibração, Otimização e Validação Experimental:** parametrização da cinemática, calibração de temperatura de extrusão, calibração de retração, aplicação de recursos avançados do Klipper e reexecução dos ensaios de impressão para comparação com o estado inicial.

Essa organização permitiu que o projeto fosse avaliado não apenas pelo resultado final das peças impressas, mas também pela rastreabilidade das decisões técnicas adotadas durante a integração do novo sistema.

3.2 Levantamento do Estado Inicial (*Baseline*)

A caracterização do sistema original foi necessária para estabelecer uma referência técnica de comparação antes da intervenção. A impressora 3D Cliever CL2 Pro Plus encontrava-se em condição funcional, porém limitada por uma arquitetura proprietária de controle, com baixo acesso aos parâmetros internos de impressão, movimentação, aquecimento e calibração. Dessa forma, o *baseline* foi definido como

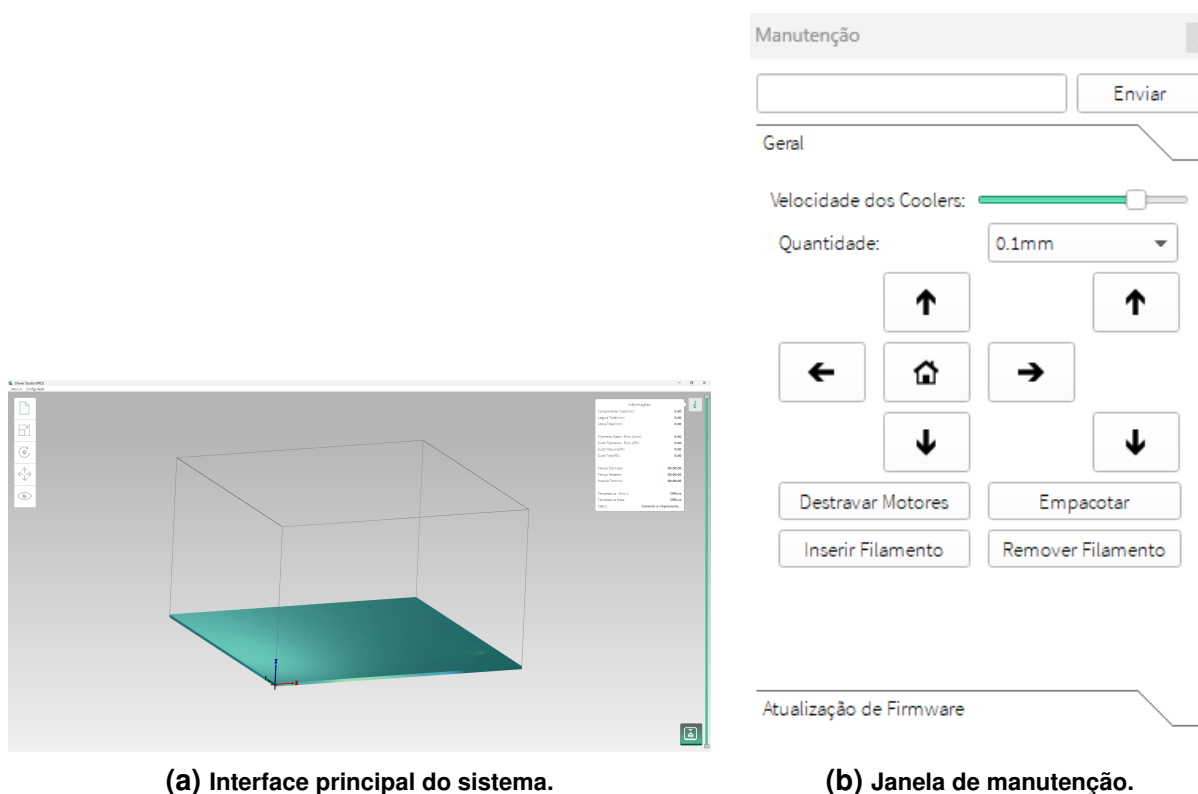
o conjunto de resultados obtidos com a máquina em sua configuração original, sem alteração de *hardware* ou *firmware*.

3.2.1 Análise da Interface e Limitações do Ecossistema Proprietário

O software original da Cliever foi desenvolvido com foco em simplicidade operacional. Embora essa abordagem facilite o uso por operadores iniciantes, ela limita o acesso a variáveis importantes em aplicações de engenharia, como aceleração, corrente dos motores, comandos manuais em G-code, calibração térmica, retração, compensação de pressão de extrusão e filtros de vibração.

A Figura 11 apresenta a interface principal do sistema e a janela de manutenção original. Observa-se que a interface concentra funções básicas de manipulação de modelos tridimensionais, conexão com a impressora e comandos elementares de manutenção. Entretanto, não há um terminal G-code aberto que permita o envio direto de comandos individuais para movimentação, aquecimento, extrusão ou diagnóstico de sensores.

Figura 11 – Interface de usuário e ferramentas de manutenção originais



(a) Interface principal do sistema.

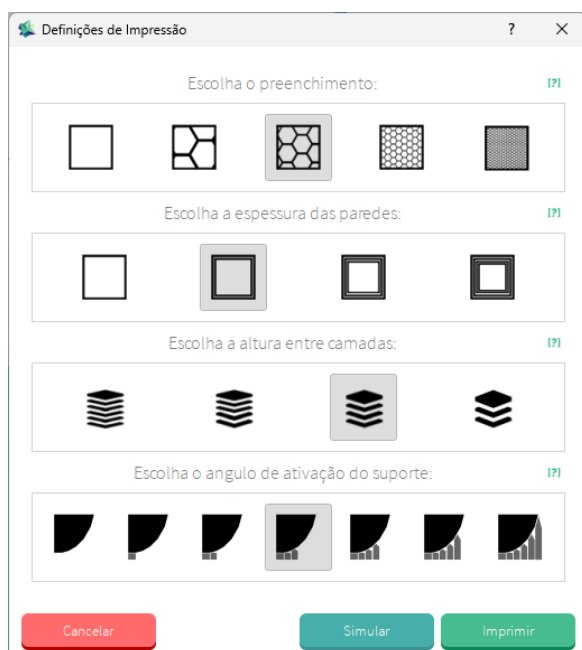
(b) Janela de manutenção.

Fonte: O autor (2026).

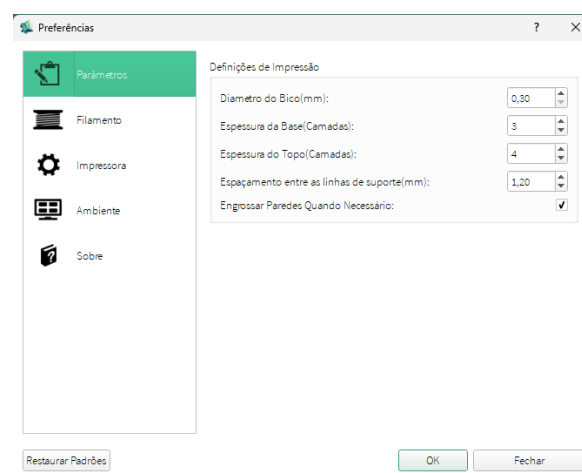
Na janela de manutenção, as funções disponíveis são restritas ao destravamento dos motores, movimentações simples dos eixos e ciclos automáticos de inserção ou remoção de filamento. O processo de fatiamento também opera com alto grau

de abstração: parâmetros como preenchimento, espessura de parede e qualidade de impressão são apresentados por ícones ou níveis predefinidos, sem valores numéricos contínuos diretamente ajustáveis pelo operador, conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Limitações de parametrização no processo de fatiamento



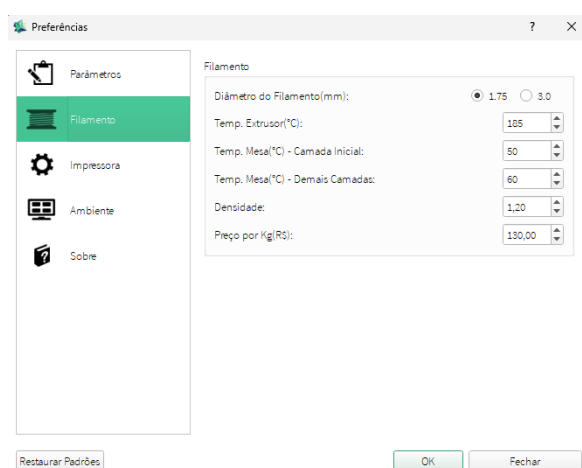
(a) Definições simplificadas de impressão.



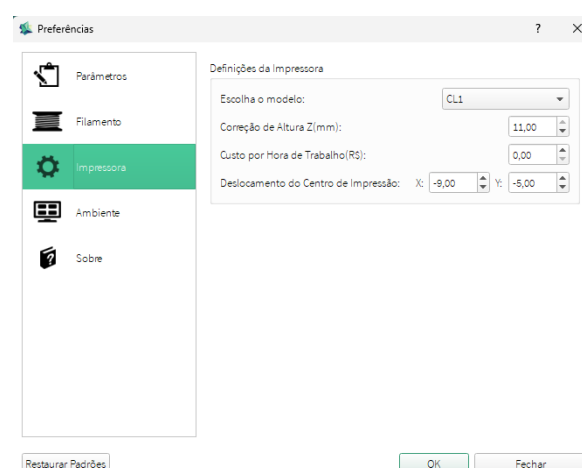
(b) Parâmetros básicos de hardware.

Fonte: O autor (2026).

Figura 13 – Telas de preferências do sistema proprietário



(a) Preferências de filamento.



(b) Definições de modelo e offset.

Fonte: O autor (2026).

Essa condição caracteriza o sistema original como uma arquitetura funcio-

nal, porém fechada. A migração para o Klipper foi metodologicamente justificada pela necessidade de acesso direto aos parâmetros de controle, comandos de diagnóstico, configuração textual da máquina e calibrações avançadas.

3.2.2 Condições Experimentais do Levantamento Inicial

Os resultados obtidos no estado original evidenciaram limitações associadas à dinâmica estrutural, à cinemática acoplada, ao controle térmico e à extrusão. Os principais fenômenos observados foram:

- **Ondulações superficiais (*ringing*):** associadas à vibração estrutural e à ausência de compensação dinâmica;
- **Variações dimensionais nos eixos X e Y:** relacionadas à cinemática acoplada e à ausência de calibração aberta de deslocamento;
- ***Stringing* e acúmulo de material:** relacionados à falta de controle refinado de retração e pressão interna no bico;
- **Instabilidade em detalhes pequenos e regiões suspensas:** associada à combinação entre vazão, temperatura, resfriamento e dinâmica do cabeçote.

A recorrência desses fenômenos indicou que as falhas não eram eventos isolados, mas consequências sistemáticas das limitações do sistema original, justificando a intervenção por *retrofit*. O registro fotográfico desses fenômenos, bem como sua comparação com os resultados obtidos após o retrofit, é apresentado no Capítulo 4.

3.2.3 Síntese dos Resultados do Benchmark Inicial

Os resultados obtidos no estado original evidenciaram limitações associadas à dinâmica estrutural, à cinemática acoplada, ao controle térmico e à extrusão. Os principais fenômenos observados foram:

- **Ondulações superficiais (*ringing*):** associadas à vibração estrutural e à ausência de compensação dinâmica;
- **Variações dimensionais nos eixos X e Y:** relacionadas à cinemática acoplada e à ausência de calibração aberta de deslocamento;
- ***Stringing* e acúmulo de material:** relacionados à falta de controle refinado de retração e pressão interna no bico;
- **Instabilidade em detalhes pequenos e regiões suspensas:** associada à combinação entre vazão, temperatura, resfriamento e dinâmica do cabeçote.

A recorrência desses fenômenos indicou que as falhas não eram eventos isolados, mas consequências sistemáticas das limitações do sistema original, justificando a intervenção por *retrofit*.

3.3 Materiais e Componentes Técnicos do *Retrofit*

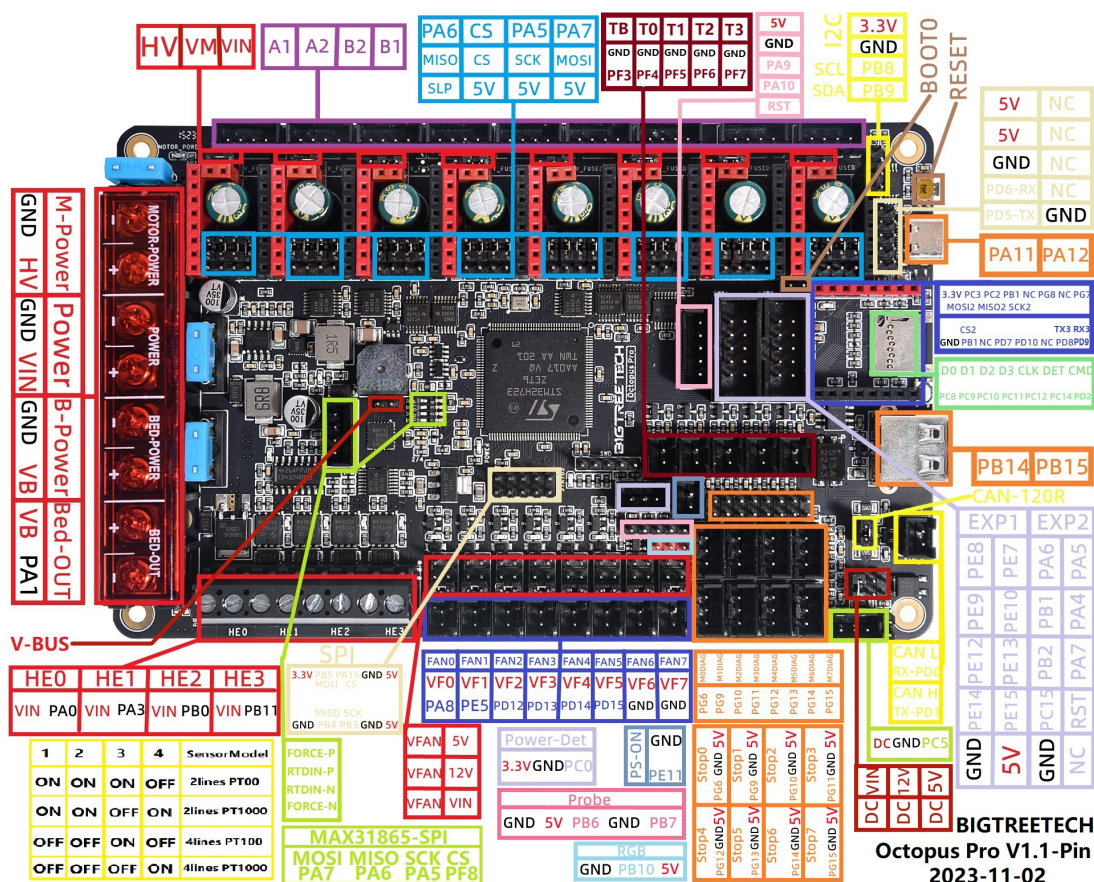
Esta seção apresenta os principais componentes utilizados na modificação da impressora, com justificativa técnica de sua escolha. As etapas físicas de instalação, diagnóstico e validação são apresentadas separadamente na seção seguinte.

3.3.1 Placa Controladora: BIGTREETECH Octopus Pro v1.1

A placa BIGTREETECH Octopus Pro v1.1 foi selecionada como unidade controladora principal por disponibilizar múltiplos soquetes para drivers de motores, entradas para sensores, saídas de potência para aquecedores e comunicação USB com o *host*. A placa utilizada possui microcontrolador STM32H723 e capacidade adequada para operação com o firmware Klipper.

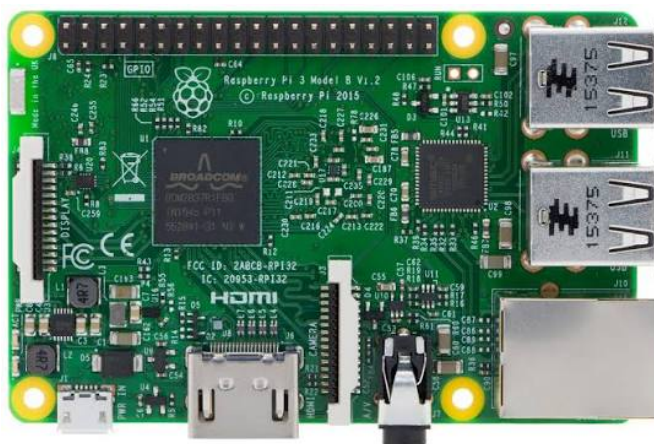
A Figura 14 apresenta o diagrama de pinagem da Octopus Pro v1.1, utilizado como referência durante a identificação dos conectores de motores, sensores, termistores, ventoinhas, aquecedores e portas de comunicação.

Figura 14 – Diagrama de pinagem da placa BIGTREETECH Octopus Pro v1.1



computacional do firmware (O'Connor, 2023).

Figura 15 – Microcomputador Raspberry Pi 3 Model B utilizado na arquitetura distribuída

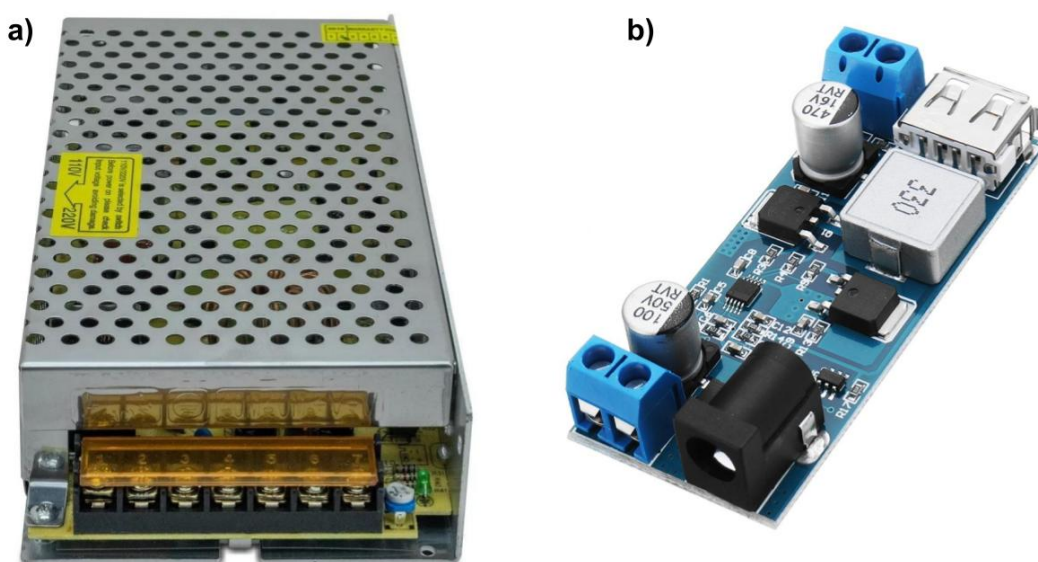


Fonte: Raspberry Pi Foundation (2016).

3.3.3 Sistema de Alimentação Elétrica

A fonte original de 12 V foi substituída por uma fonte chaveada de 24 V, visando melhorar a resposta dinâmica dos motores de passo e atender aos novos requisitos da eletrônica. A Figura 16 apresenta a fonte principal e o módulo conversor CC-CC abaixador utilizados.

Figura 16 – Fonte chaveada 24 V/20 A e módulo conversor CC-CC abaixador para 5 V



Fonte: O autor (2026).

A adoção de 24 V contribui para melhorar a resposta elétrica dos motores de passo, pois tensões mais elevadas aumentam a taxa de crescimento da corrente

nos enrolamentos, reduzindo os efeitos limitantes da indutância em regimes de maior velocidade, conforme fundamentado na Seção 2.4.3.

Para alimentar o Raspberry Pi de forma independente, foi utilizado um conversor CC-CC abaixador dedicado, ajustado para 5 V. Essa separação reduz instabilidades causadas por transientes de corrente, ruídos de comutação e quedas de tensão durante acionamento simultâneo de motores e aquecedores.

Antes da energização completa do sistema, foram realizados testes de continuidade e medições de resistência nos aquecedores. O cartucho aquecedor original era projetado para 12 V e apresentou resistência medida próxima de 15 Ω ; mantê-lo sob 24 V quadruplicaria a potência dissipada, exigindo sua substituição por um cartucho nativo de 24 V com potência nominal de 40 W e resistência calculada de 14,4 Ω , conforme detalhado na Seção 4.2.4. A mesa aquecida apresentou resistência medida de 1,2 Ω , exigindo limitação de ciclo de trabalho via PWM no firmware Klipper, também descrita na Seção 4.2.4.

3.3.4 Sensor de Nivelamento Automático: CR Touch

Para viabilizar o nivelamento automático da mesa (*Automatic Bed Leveling*, ABL), foi integrado ao sistema o sensor CR Touch, fabricado pela Creality. O CR Touch é um sensor de contato baseado em sonda retrátil com pino metálico acionado por solenoide, funcionalmente equivalente ao BLTouch e nativamente compatível com o firmware Klipper por meio do bloco de configuração [bltouch] (O'Connor, 2023).

O sensor é fixado ao conjunto do cabeçote com deslocamento de -24 mm no eixo X e -49 mm no eixo Y em relação ao bico extrusor, parâmetros declarados como `x_offset` e `y_offset` no `printer.cfg`. O eixo Z utiliza o sinal da sonda como *endstop* virtual (`probe:z_virtual_endstop`), eliminando a chave de fim de curso física no eixo Z e delegando a determinação da posição zero ao sensor.

A adoção do CR Touch elimina a dependência de nivelamento manual da mesa, processo suscetível a erros de operador e variações entre sessões de impressão. O firmware Klipper utiliza os dados coletados para gerar uma malha de compensação (*bed mesh*) que ajusta dinamicamente a altura do bico durante a impressão, corrigindo ondulações e irregularidades da superfície da mesa. A implementação detalhada, os parâmetros configurados e os resultados da malha obtida estão documentados na Seção 4.2.6 e no Apêndice C.

3.4 Configuração Lógica e Parametrização do Firmware Klipper

A configuração lógica foi realizada no arquivo `printer.cfg`. Inicialmente, foi criado um arquivo mínimo contendo a inclusão do Mainsail, a identificação da MCU, a

cinemática da impressora e os blocos básicos dos motores, sensores, aquecedores e drivers.

3.4.1 Modelagem Cinemática H-Bot e Parametrização Compatível no Klipper

Conforme detalhado na Seção 2.2.1, a topologia H-Bot da Cliever CL2 Pro Plus opera com os dois motores do plano XY acoplados mecanicamente, de modo que o deslocamento cartesiano resulta da combinação linear dos acionamentos simultâneos.

Durante a configuração do firmware, verificou-se que o Klipper não disponibiliza uma opção direta denominada `hbot` para a cinemática da máquina. Por esse motivo, adotou-se a configuração `corexy`, por ser a alternativa disponível matematicamente equivalente para representar o acoplamento dos motores no plano XY (O'Connor, 2023):

```
[printer]
kinematics: corexy
```

Essa escolha não altera a identificação mecânica da impressora como H-Bot; representa uma aproximação prática de implementação no firmware. A validação da cinemática foi realizada por movimentos incrementais pequenos e controlados, antes da execução de comandos de *homing* geral, confirmando a correspondência entre os comandos enviados pelo Mainsail e os deslocamentos físicos observados na máquina.

3.4.2 Cálculo e Calibração do Fator de Deslocamento Cinemático

No Klipper, a calibração do deslocamento linear não é realizada diretamente por meio da configuração de passos por milímetro (*steps per millimeter*), como ocorre em firmwares como o Marlin. Em seu lugar, utiliza-se o parâmetro `rotation_distance`, que representa a distância linear percorrida pelo eixo durante uma rotação completa do motor. O valor teórico inicial desse parâmetro é obtido por:

$$\text{rotation_distance} = P \cdot N \quad (4)$$

Em que P representa o passo da correia e N o número de dentes da polia motora. Para a correia da Cliever com polia de 20 dentes e passo de 3 mm, o valor teórico inicial é de 60 mm por rotação.

Após a instalação, foram realizados testes práticos de deslocamento para verificar a correspondência entre o movimento comandado e o deslocamento real medido. O ajuste empírico seguiu a relação:

$$\text{rotation_distance}_{\text{nov}} = \text{rotation_distance}_{\text{atual}} \cdot \frac{d_{\text{real}}}{d_{\text{comandada}}} \quad (5)$$

A validação desse ajuste foi realizada em duas etapas: primeiro, mediu-se o deslocamento real com paquímetro digital (resolução 0,01 mm, incerteza $\pm 0,01$ mm) após um comando de deslocamento conhecido; em seguida, com o valor de `rotation_distance` corrigido, imprimiu-se um cubo de calibração para confirmar a acurácia dimensional resultante nos três eixos.

3.5 Controle Térmico e Validação dos Sensores

A validação térmica foi realizada antes dos testes de impressão. Durante o processo, ocorreram erros do tipo `ADC out of range`, associados a termistores desconectados ou blocos de configuração ativos para sensores ainda não conectados. Quando necessário, o bloco `[heater_bed]` foi comentado temporariamente para permitir a continuidade dos testes de motores e comunicação.

Após estabilização da montagem térmica, a calibração PID do bico e da mesa foi executada por meio do comando:

```
PID_CALIBRATE HEATER=extruder TARGET=180
SAVE_CONFIG
```

O procedimento ajusta automaticamente os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador, com o objetivo de eliminar o *overshoot* de aproximadamente 4 °C identificado no sistema original. Os resultados da calibração e a comparação com o *baseline* são apresentados no Capítulo 4.

3.6 Protocolo de Calibração Pré-Ensaio

Antes da execução dos ensaios comparativos pós-*retrofit*, foi necessário estabelecer os parâmetros de impressão adequados ao filamento PLA e ao sistema atualizado. Para isso, foram empregados corpos de prova de calibração específicos, realizados em sequência lógica, garantindo que os ensaios comparativos finais fossem executados em condições otimizadas e rastreáveis.

3.6.1 Calibração de Temperatura de Extrusão

A temperatura de extrusão influencia diretamente a viscosidade do filamento fundido, a adesão entre camadas, a qualidade das superfícies e a ocorrência de *stringing*. Como o sistema atualizado opera com um cartucho aquecedor diferente

do original e com controle PID ativo, foi necessário identificar empiricamente a temperatura ideal para o PLA utilizado nas novas condições. Para isso, foi empregado o corpo de prova *temperature tower*, modelo *PETG temperature tower test* (Cuzzea, 2018), adaptado para PLA com faixa avaliada de 220 °C a 175 °C em degraus de 5 °C. A *temperature tower* é impressa em uma única operação contínua, na qual o fatiador por meio de um *script* de pós-processamento altera automaticamente a temperatura de extrusão a cada segmento de altura predefinido. O resultado é uma peça em forma de torre cujos andares foram impressos cada um em uma temperatura diferente, permitindo comparar visualmente toda a faixa em uma única impressão.

Cada segmento da torre contém elementos para avaliação de *stringing*, pontes horizontais e superfícies em *overhang*, possibilitando identificar a temperatura com melhor equilíbrio entre fluidez, adesão entre camadas e qualidade das superfícies. Foram impressos dois conjuntos de torres para confirmação dos resultados.

3.6.2 Calibração de Retração

A retração é o movimento reverso realizado pelo motor do extrusor imediatamente antes de um deslocamento sem extrusão. Sua função é reduzir a pressão interna no bico, evitando que o material fundido escorra durante o trajeto e forme fios entre regiões do modelo, fenômeno denominado *stringing*. Em sistemas *direct drive*, como o da Cliever pós-*retrofit*, o extrusor está posicionado diretamente sobre o bico, o que permite trabalhar com valores de retração significativamente menores do que em sistemas Bowden.

O modelo empregado foi o *Easy & Quick Retraction Test* (3DPrintinGreece.gr, 2023), cujo corpo de prova consiste em múltiplas torres espaçadas entre si, de forma que o cabeçote percorre o vão entre elas sem extrudir material; a quantidade de fios depositados nesses vãos indica diretamente a qualidade das configurações de retração. Os parâmetros avaliados foram comprimento de retração (0,5 mm a 1,5 mm) e velocidade de retração (20 mm/s a 30 mm/s), conforme referência do fabricante para sistemas *direct drive*.

3.7 Protocolo de Validação Experimental Pós-*Retrofit*

A validação pós-*retrofit* foi estruturada a partir da repetição dos corpos de prova utilizados no *baseline*, permitindo comparação direta entre o sistema original e a configuração modificada. Os ensaios incluem cubos de calibração, modelo #3DBenchy e amostras do protocolo Autodesk-Kickstarter. O diagrama elétrico funcional do sistema pós-*retrofit* está documentado no Apêndice A, juntamente com o manual de instalação no Apêndice B.

3.7.1 Condições Experimentais Pós-*Retrofit*

Para garantir a rastreabilidade e a validade comparativa dos ensaios, as condições de impressão foram registradas conforme apresentado a seguir.

- **Material polimérico:** PLA de diâmetro nominal de 1,75 mm;
- **Temperatura do bico extrusor:** 185 °C, definida a partir dos resultados da *temperature tower* descrita na Seção 3.6.1;
- **Temperatura da mesa:** 60 °C;
- **Velocidade de impressão:** 60 mm/s, configurada diretamente no `printer.cfg`;
- **Aceleração cinemática:** 1000 mm/s², definida no bloco `[printer]` do `printer.cfg`;
- **Firmware de controle:** Klipper com interface Mainsail, executado sobre Raspberry Pi 3 Model B;
- **Cinemática configurada:** `corexy` (aproximação compatível com H-Bot, conforme justificado na Seção 3.4).

3.7.2 Calibrações Avançadas Aplicadas

Antes da execução dos ensaios comparativos, foram realizadas calibrações avançadas disponíveis na arquitetura Klipper, indisponíveis no sistema proprietário original:

- **Calibração PID do bico e da mesa:** executada via `PID_CALIBRATE`, com objetivo de reduzir o *overshoot* térmico de aproximadamente 4 °C identificado no *baseline*;
- **Pressure Advance:** aplicado para compensar a elasticidade do filamento e reduzir acúmulo de material em cantos e transições de velocidade.

A calibração de *Input Shaping*, recurso do Klipper que atua sobre as frequências naturais de vibração da estrutura para mitigar ativamente o *ringing* decorrente do *racking* H-Bot, foi identificada como procedimento de interesse para o escopo deste trabalho, mas não pôde ser executada dentro do prazo disponível para a fase experimental. Sua implementação exige a medição das frequências de ressonância do pórtico com acelerômetro dedicado, etapa que demandaria tempo adicional incompatível com o cronograma de conclusão. A ausência desta calibração constitui uma limitação do estudo, discutida na Seção 4.5.5, e é apontada como continuidade natural do projeto para trabalhos futuros.

3.7.3 Critérios de Avaliação

Os testes pós-*retrofit* foram avaliados com base em três grupos principais de critérios:

1. **Estabilidade térmica:** análise das oscilações de temperatura do bico e da mesa, medidas pelo termistor do *hotend*, com PID calibrado, comparando com o *overshoot* registrado no sistema original;
2. **Precisão dimensional e cinemática:** medição dos corpos de prova com paquímetro digital, utilizando as mesmas equações e dimensões nominais adotadas no *baseline*, permitindo comparação direta dos erros nos eixos X, Y e Z;
3. **Qualidade das superfícies e dinâmica de extrusão:** inspeção visual dos defeitos de *ringing*, *stringing*, acúmulo em cantos, falhas de parede, sobre-extrusão e sub-extrusão, avaliados com base no mesmo protocolo Autodesk-Kickstarter descrito na Seção 2.5. Cabe destacar que, em razão da não execução do *Input Shaping*, a avaliação do *ringing* neste estudo reflete o desempenho do sistema retrofitado sem compensação ativa de ressonância, constituindo uma referência para comparação com trabalhos futuros que incorporem essa calibração.

Essa estrutura garante que os ganhos de desempenho obtidos com o *retrofit* possam ser quantificados diretamente, vinculando cada melhoria observada à intervenção técnica correspondente realizada no sistema.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas duas fases do estudo: a caracterização do sistema original (*baseline*) e a avaliação do sistema após o processo de *retrofit*. A organização segue a lógica metodológica descrita no Capítulo 3: primeiro documenta-se o estado original da máquina, em seguida apresenta-se a validação funcional do sistema atualizado, as etapas de calibração realizadas antes dos ensaios comparativos, e por fim os resultados dos ensaios pós-intervenção com a comparação direta entre os dois estados.

4.1 Resultados do Sistema Original (*Baseline*)

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos com a impressora em sua configuração original, sem qualquer alteração de *hardware* ou *firmware*. O conjunto de ensaios abrange desempenho térmico, acurácia dimensional, avaliação qualitativa e protocolo padronizado Autodesk-Kickstarter, estabelecendo a linha de base quantitativa para comparação posterior.

4.1.1 Desempenho térmico do sistema original

A eficiência térmica do sistema original, operando sob barramento de 12 V, foi aferida para estabelecer o perfil de prontidão do equipamento. Os ensaios foram realizados em três dias distintos, partindo de temperatura ambiente média de 25,3°C, e seus resultados estão sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaios térmicos do sistema original (12 V)

Ensaio	T. Inicial (°C)	T. Alvo (°C)	Tempo Total	Pico (°C)
Mesa – Dia 1	26,0	50	15 min 30 s	–
Mesa – Dia 2	26,0	50	18 min 16 s	–
Mesa – Dia 3	24,1	50	16 min 59 s	–
Média Mesa	25,3	50	16 min 55 s	–
DP Mesa		1 min 23 s		–
CV Mesa (%)		8,2%		–
Bico – Dia 1	30,0	160	3 min 35 s	164,0
Bico – Dia 2	30,0	160	3 min 38 s	164,4
Bico – Dia 3	26,0	160	3 min 49 s	163,8
Média Bico	28,6	160	3 min 41 s	164,1
DP Bico		7 s		0,3
CV Bico (%)		3,3%		0,2%

Fonte: O autor (2026).

Três limitações foram identificadas: (a) tempo médio de 16 min 55 s para atingir 50°C na mesa, com barreira física em 57°C que inviabiliza materiais técnicos

como PETG ou ABS; (b) *overshoot* médio de 4,1°C no bico, sintomático de controle PID inacessível ao operador; e (c) oscilações operacionais nos sensores originais, comprometendo a repetibilidade do processo.

4.1.2 Tempo de impressão e planejamento de trajetória

Observou-se discrepância sistemática entre o tempo estimado pelo *software* proprietário e o tempo real de execução, indicando ineficiência nos algoritmos de aceleração e *jerk*. Os resultados estão consolidados na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre tempo estimado e real de impressão: Baseline

Modelo	Estimado	Real	Erro (%)
Cubo 1	00h 43min 32s	00h 58min 56s	35,4%
Cubo 2	00h 54min 43s	00h 59min 05s	8,0%
Cubo 3	00h 53min 18s	00h 57min 41s	8,2%
Média Cubos	00h 50min 31s	00h 58min 34s	15,9%
DP Cubos	06min 05s	00min 46s	15,8%
CV Cubos (%)	12,1%	1,3%	91,6%
#3DBenchy	02h 37min 10s	02h 45min 40s	5,4%
Autodesk fdmtest	08h 50min 16s	09h 08min 53s	3,5%

Fonte: O autor (2026).

O erro médio de 15,9% nos cubos demonstra que o fatiador original ignora as rampas de aceleração físicas da máquina. A discrepância de 18 minutos no modelo de longa duração reforça que o processamento monolítico da placa original não mantém determinismo temporal em geometrias complexas.

4.1.3 Análise dimensional dos cubos de calibração

A avaliação dimensional utilizou três cubos de 20,00 mm de lado, medidos com paquímetro digital (resolução 0,01 mm, incerteza $\pm 0,01$ mm). Para cada cubo foram realizadas três medições por eixo, adotando-se o valor médio como resultado representativo. O desvio percentual foi calculado pela Equação 6:

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\text{Valor Medido} - \text{Valor Nominal}}{\text{Valor Nominal}} \times 100 \quad (6)$$

Tabela 4 – Análise dimensional dos cubos de calibração: Baseline

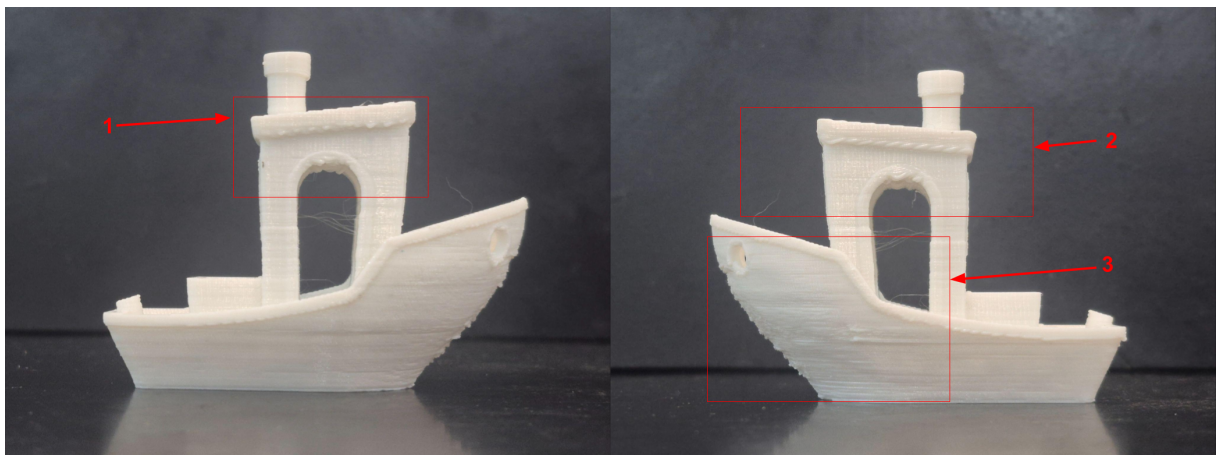
Amostra	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Erro X	Erro Y	Erro Z
Cubo 1	19,99	20,30	20,05	−0,05%	+1,50%	+0,25%
Cubo 2	20,01	20,27	20,03	+0,05%	+1,35%	+0,15%
Cubo 3	20,17	20,38	19,97	+0,85%	+1,90%	−0,15%
Média	20,06	20,32	20,02	+0,30%	+1,60%	+0,10%
DP	0,10	0,06	0,04	0,49%	0,28%	0,21%
CV (%)	0,5%	0,3%	0,2%		–	

Fonte: O autor (2026).

O erro positivo sistemático no eixo Y (+1,60% em média) confirma a presença de esforços de torção associados ao *racking*, característico da topologia H-Bot sem compensação ativa. O eixo Z manteve erros inferiores a $\pm 0,25\%$ em todas as amostras, evidenciando estabilidade do sistema de movimentação vertical. A baixa dispersão relativa entre os três cubos ($CV \leq 0,5\%$ nas dimensões absolutas) indica que o processo de medição e a repetibilidade da máquina não introduzem ruído relevante nessa análise, reforçando que o padrão sistemático observado no eixo Y é atribuível ao efeito cinemático de *racking*, e não à variabilidade experimental.

4.1.4 Avaliação qualitativa do modelo #3DBenchy

O modelo #3DBenchy foi utilizado como ensaio qualitativo, com tempo real de execução de 02 h 45 min 40 s contra estimativa de 02 h 37 min 10 s (erro de 5,4%).

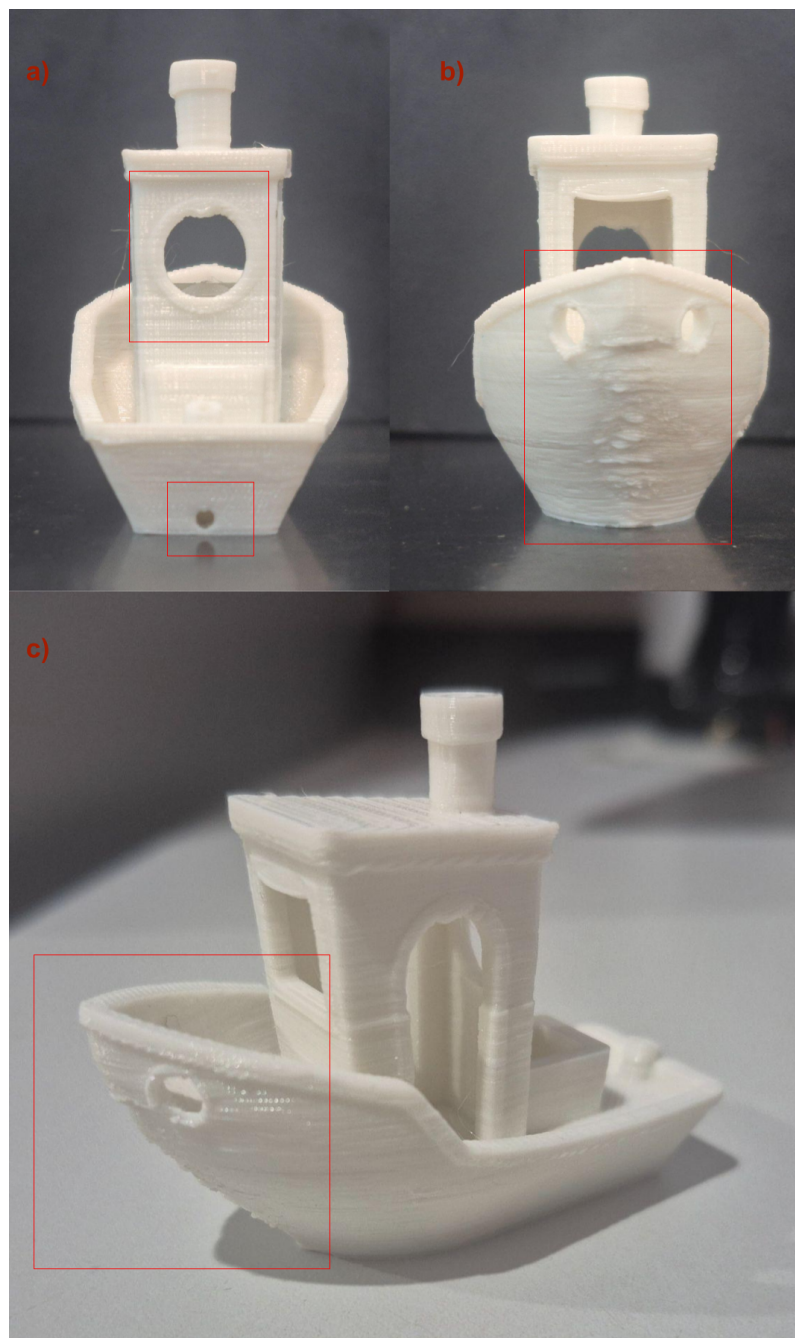
Figura 17 – Modelo #3DBenchy: vistas laterais (Baseline)

Fonte: O autor (2026).

A geometria global foi reproduzida de forma funcional, sem falhas estruturais críticas. Entretanto, a inspeção visual, com os pontos de interesse destacados na Figura 17, revelou quatro artefatos sistemáticos: (a) *ringing* de baixa amplitude

nas paredes verticais frontais, decorrente da ausência de compensação dinâmica; (b) acabamento satisfatório na região traseira, indicando estabilidade em trajetórias de menor complexidade; (c) degradação nas regiões (1) e (2), correspondentes ao *overhang* e ao telhado da cabine, decorrente do posicionamento desfavorável da ventoinha de resfriamento original, limitação de natureza mecânico-estrutural independente do *firmware*; e (d) persistência do efeito de *Z-banding* na região (3), cuja origem mecânica é discutida na Seção 4.5.5.

Figura 18 – Modelo #3DBenchy: vistas frontal, traseira e perspectiva (Baseline)



Fonte: O autor (2026).

Os demais ângulos, apresentados na Figura 18, complementam essa análise. Em (a), a vista frontal evidencia *stringing* residual no interior da abertura da janela da cabine, além de uma pequena imperfeição pontual no convés. Em (b), a vista traseira revela uma faixa vertical de textura irregular, compatível com a linha de *seam* do perímetro externo – o ponto em que o extrusor inicia e finaliza cada camada, gerando uma pequena cicatriz vertical mesmo em impressões com bom acabamento geral, consistente com a estabilidade observada nessa região. Em (c), a vista em perspectiva evidencia a continuidade desse mesmo padrão ao longo do casco, na região de transição entre o convés e a lateral do barco.

Cabe destacar que a limitação de resfriamento apresentou efeito relativamente contido no *baseline*. A hipótese levantada é que o baixo desempenho dinâmico do sistema proprietário, evidenciado pelo tempo de 02 h 45 min 40 s para o #3DBenchy, pode ter favorecido indiretamente a qualidade em regiões de *overhang*: velocidades reduzidas aumentam o tempo de exposição de cada camada ao ambiente, proporcionando resfriamento passivo adicional mesmo com fluxo de ar insuficiente. Nos ensaios pós-*retrofit*, com impressão mais rápida, essa limitação tornou-se mais evidente, motivando a intervenção no sistema de resfriamento descrita na Seção 4.3.

4.1.5 Protocolo Autodesk-Kickstarter no sistema original

Três amostras do protocolo Autodesk-Kickstarter foram avaliadas. Os erros dimensionais foram calculados pela Equação 6. As métricas de síntese adotadas foram o erro médio global (Avg Err) e a anisotropia entre eixos (Δ_{XY}), definidas respectivamente pelas Equações 7 e 8. A primeira condensa em um único valor a magnitude média dos desvios dimensionais nos dois eixos, funcionando como um indicador geral de acurácia da amostra; a segunda quantifica o quanto o erro em X diverge do erro em Y, servindo como indicador do grau de assimetria cinemática entre os eixos acoplados da topologia H-Bot. Quanto maior o Δ_{XY} , maior a distorção angular entre as direções de deslocamento.

$$\text{Avg Err} = \frac{|\bar{E}_X| + |\bar{E}_Y|}{2} \quad (7)$$

$$\Delta_{XY} = |\bar{E}_X - \bar{E}_Y| \quad (8)$$

Tabela 5 – Erros dimensionais e métricas consolidadas: protocolo Autodesk (Baseline)

Alvo (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Err X	Err Y	Err X	Err Y	Err X	Err Y
25	+0,40%	−0,56%	−0,08%	−0,72%	+0,72%	−0,40%
20	+0,30%	−0,70%	+0,10%	−0,30%	+0,70%	−0,90%
15	+0,67%	−0,40%	+0,67%	+0,13%	+0,67%	−0,13%
10	+1,20%	−0,40%	+1,60%	−0,40%	0,00%	+2,00%
5	+5,60%	−1,60%	+2,00%	+2,00%	+4,80%	+8,40%
Média X	+1,63%		+0,86%		+1,38%	
Média Y	−0,73%		+0,14%		+1,79%	
Avg Err	1,18%		0,50%		1,59%	
Δ_{XY}	2,36%		0,72%		0,41%	

Fonte: O autor (2026).

Observa-se, na Tabela 5, um padrão comum às três amostras: o erro percentual cresce de forma acentuada à medida que o alvo dimensional diminui, tornando-se crítico no alvo de 5 mm, em que a Amostra 1 atinge +5,60% em X, e a Amostra 3 chega a +4,80% em X e +8,40% em Y. Esse comportamento é esperado, uma vez que, em alvos muito pequenos, a mesma incerteza absoluta de medição e os mesmos efeitos de borda (*stringing* e arredondamento de cantos) representam uma parcela percentual muito maior do valor nominal. Nota-se ainda uma tendência de sinais opostos entre os eixos: enquanto o erro médio em X é predominantemente positivo nas três amostras (+1,63%, +0,86% e +1,38%), o erro médio em Y tende a ser negativo ou próximo de zero (−0,73%, +0,14% e +1,79%), reforçando a hipótese de anisotropia entre os eixos característica da cinemática H-Bot. A Amostra 2 apresentou o melhor equilíbrio entre os critérios, com o menor Avg Err (0,50%) e a menor anisotropia ($\Delta_{XY} = 0,72\%$), enquanto a Amostra 3 apresentou a maior dispersão, puxada principalmente pelo desvio extremo no alvo de 5 mm.

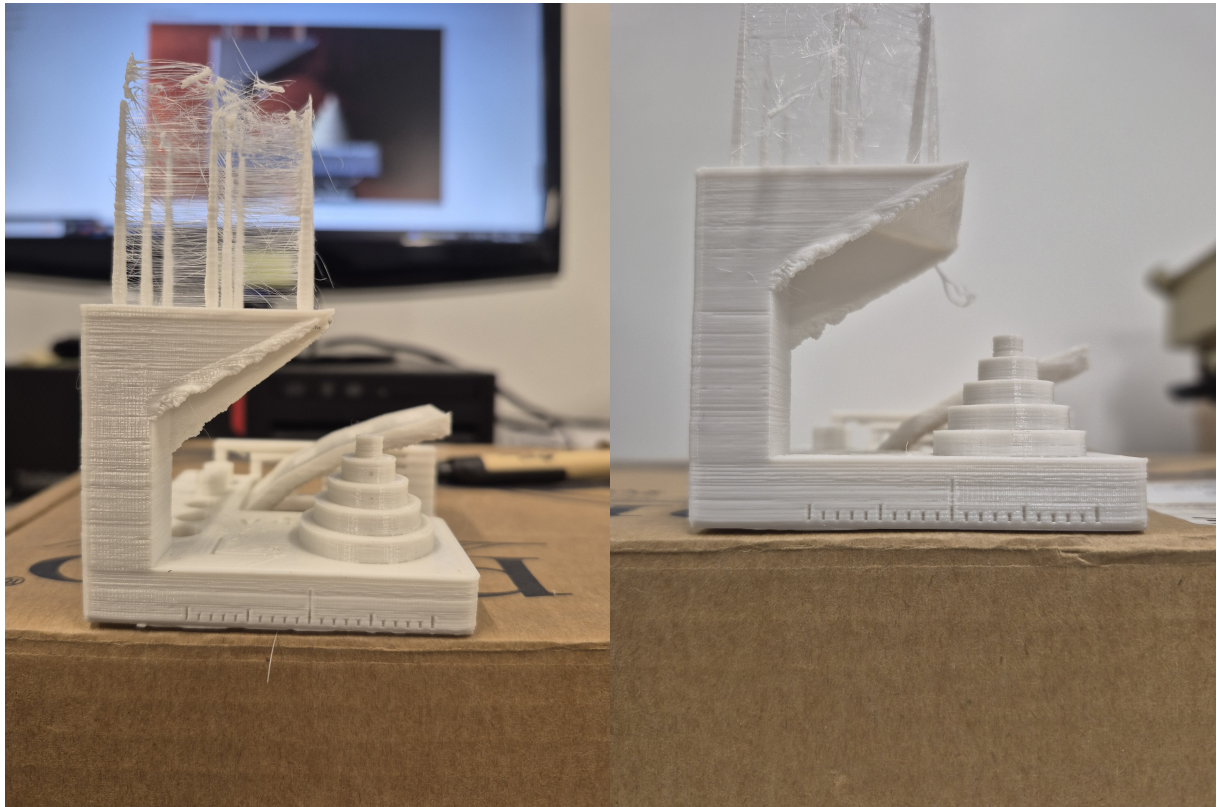
Convertendo para valores absolutos, obteve-se: Amostra 1 com Avg Err = 0,11 mm (Score 4); Amostra 2 com Avg Err = 0,08 mm (Score 5); e Amostra 3 com Avg Err = 0,16 mm (Score 3). Os demais critérios qualitativos estão consolidados na Tabela 6.

Tabela 6 – Scores do protocolo Autodesk-Kickstarter: Baseline

Critério	Score	Justificativa resumida
Precisão dimensional (XY)	3–5	Variabilidade entre amostras (Avg Err 0,08–0,16 mm)
Controle de fluxo	2,5	Pinos >30 mm, mas <i>stringing</i> entre eles
Recursos negativos	3	3 pinos removíveis; demais aderidos
Inclinações (<i>Overhangs</i>)	1	Colapso já em 15°–30°
Pontes (<i>Bridging</i>)	2	3 pontes com contato na superfície inferior
Ressonância XY (<i>Ringings</i>)	0	Ondulações periódicas visíveis
Alinhamento eixo Z	0	<i>Z-banding</i> sistemático

Fonte: O autor (2026).

Figura 19 – Controle de fluxo nas três amostras (Baseline)



(a) Amostra 1

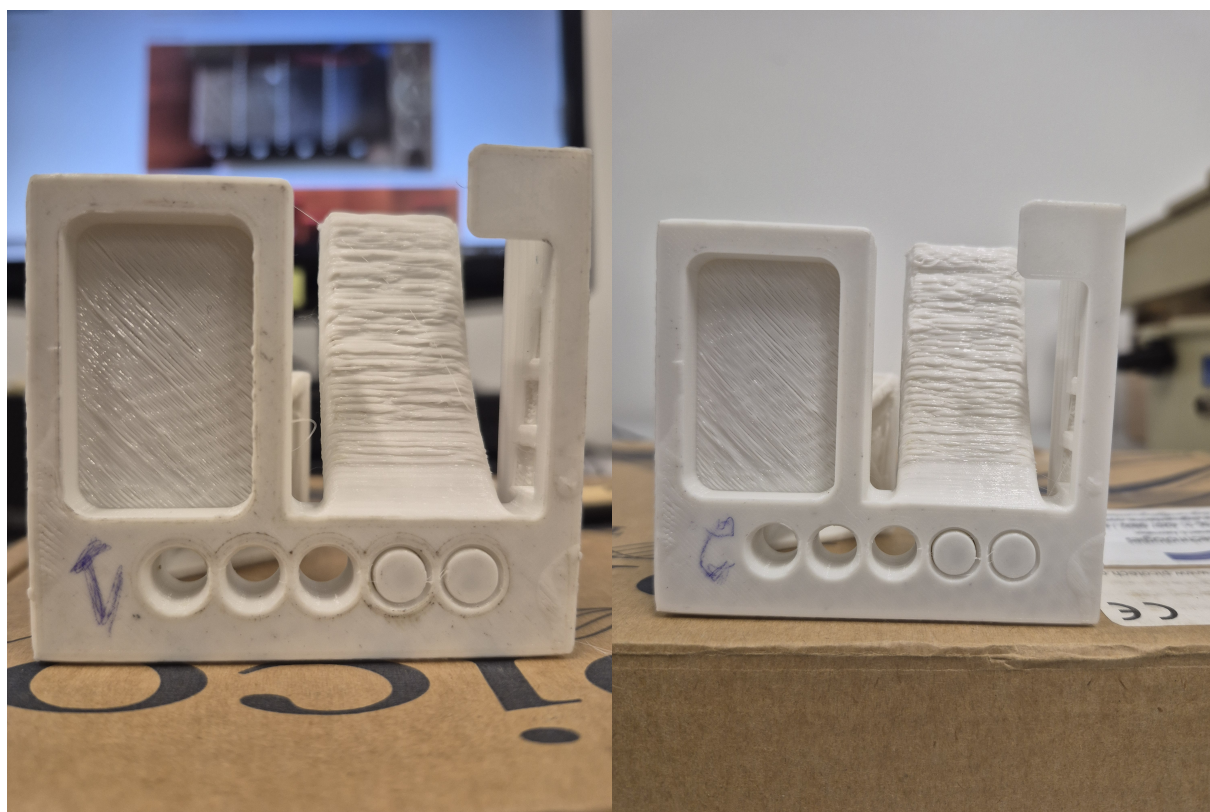
(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Fonte: O autor (2026).

Figura 20 – Recursos negativos nas três amostras (Baseline)



(a) Amostra 1

(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Fonte: O autor (2026).

Figura 21 – Capacidade de ponte nas amostras analisadas (Baseline)



(a) Amostra 1

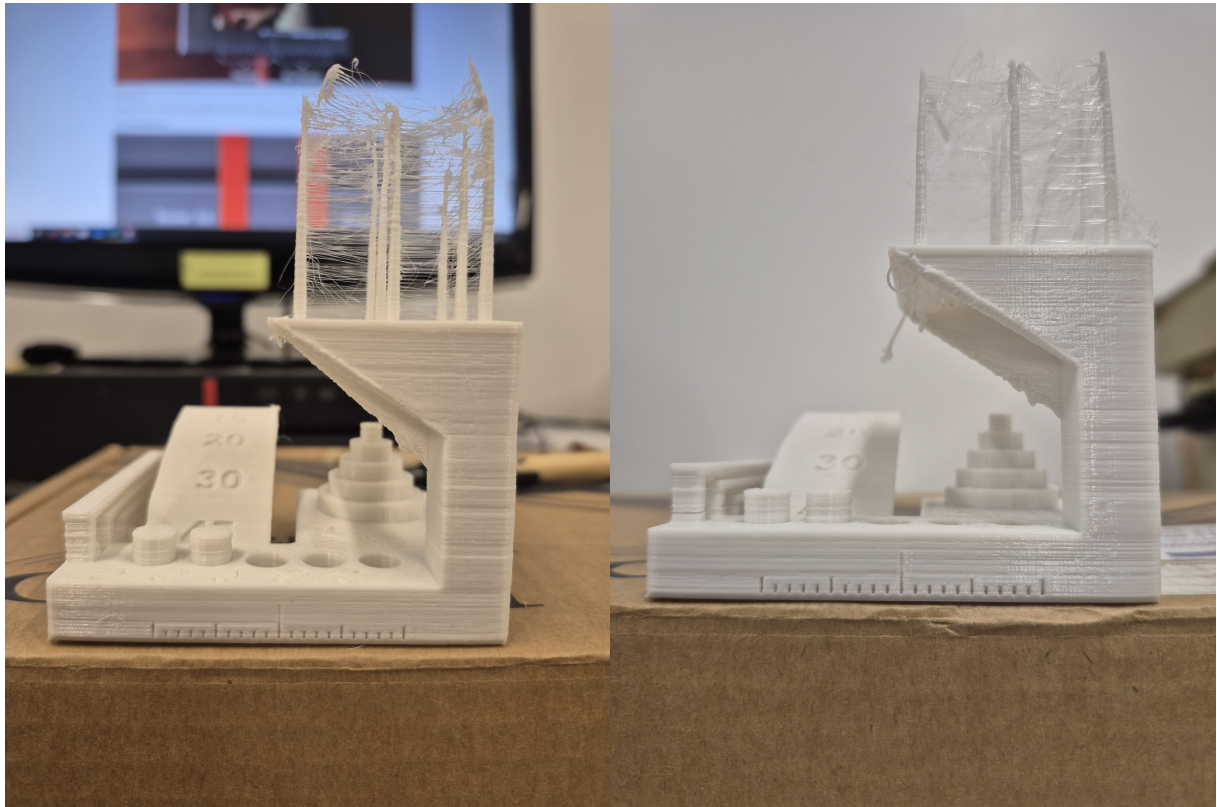
(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Fonte: O autor (2026).

Figura 22 – Ressonância XY (*Ringing*) nas três amostras (Baseline)



(a) Amostra 1

(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Fonte: O autor (2026).

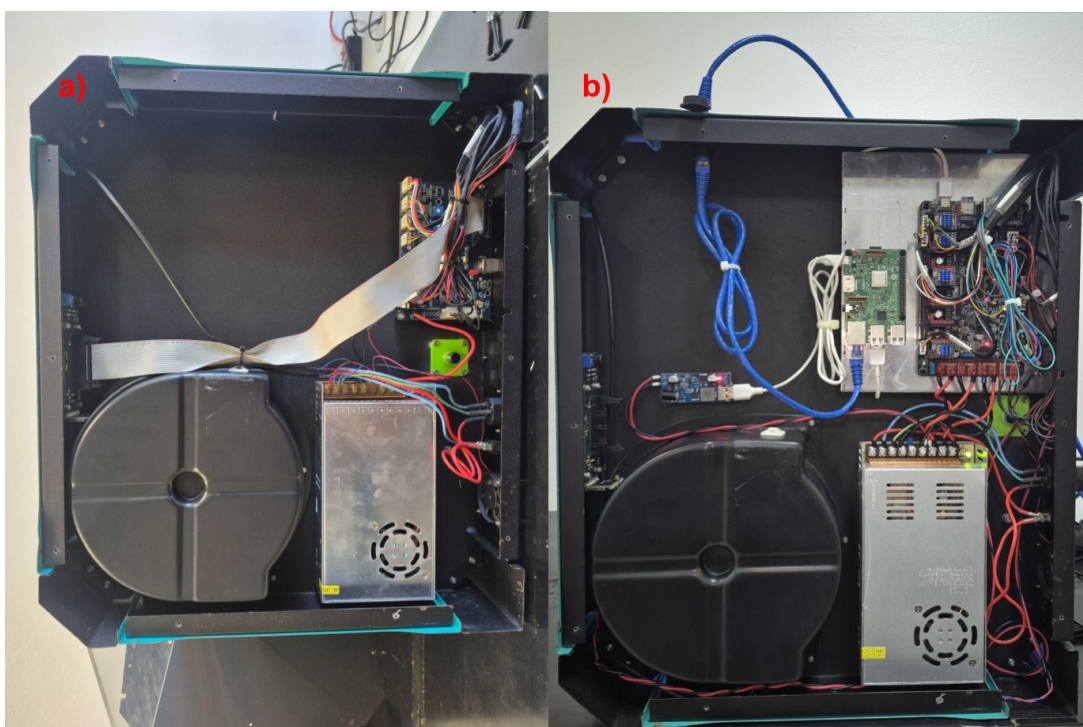
4.1.6 Síntese das limitações do sistema original

De forma integrada, os ensaios revelaram limitações sistêmicas e multifatoriais: o erro positivo persistente no eixo Y (+1,60%) confirma o *racking* da cinemática H-Bot; os scores de *ringing* (0) e alinhamento Z (0) evidenciam ausência de compensação dinâmica; o desvio de 15,9% nos tempos de impressão aponta limitação no planejamento de trajetória; e a barreira térmica em 57°C restringe o uso a materiais básicos. Esses resultados estabelecem a linha de base quantitativa para avaliação dos ganhos obtidos com o *retrofit*.

4.2 Validação Funcional do Sistema Atualizado

Antes da execução dos ensaios de impressão, foi realizada uma etapa de validação funcional do sistema instalado, verificando individualmente cada subsistema eletrônico e lógico.

Figura 23 – Comparação do compartimento eletrônico antes (a) e após (b) o *retrofit*

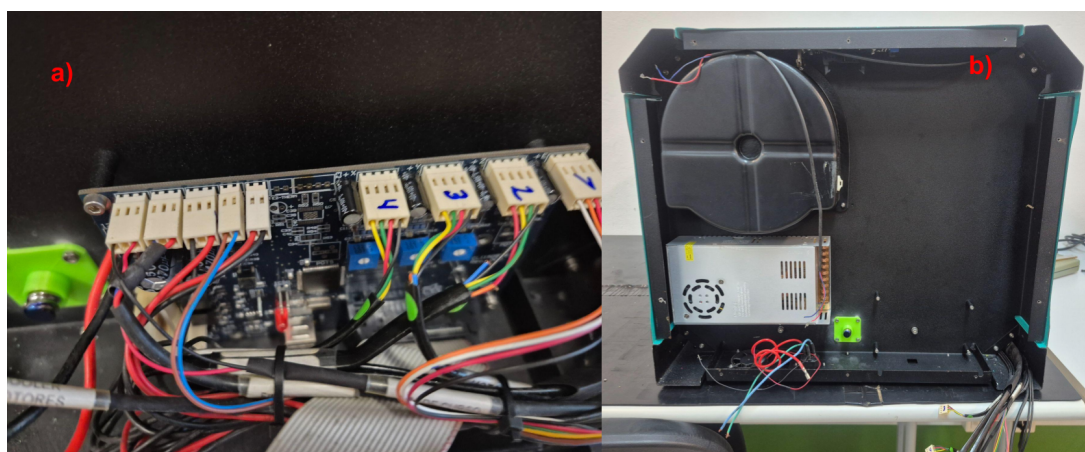


Fonte: O autor (2026).

A Figura 23 ilustra o contraste entre os dois sistemas. Em (a), observa-se a eletrônica original da Cliever, com o chicote elétrico em fita plana cruzando o compartimento e a fonte de alimentação original fixada ao lado do carretel de filamento. Em (b), já com o sistema retrofitado, nota-se a placa controladora instalada sobre a chapa de alumínio, o Raspberry Pi acoplado ao seu lado, a nova fonte de alimentação e o cabeamento reorganizado em conectores individuais, substituindo o chicote original. A

substituição da eletrônica original exigiu adaptações mecânicas na estrutura interna: foi fabricada uma chapa de alumínio para servir como base de montagem, aproveitando os furos de fixação originais. Espaçadores de nylon foram utilizados para evitar curtos-circuitos. O chicote elétrico foi integralmente substituído por conectores JST XH compatíveis com a Octopus Pro.

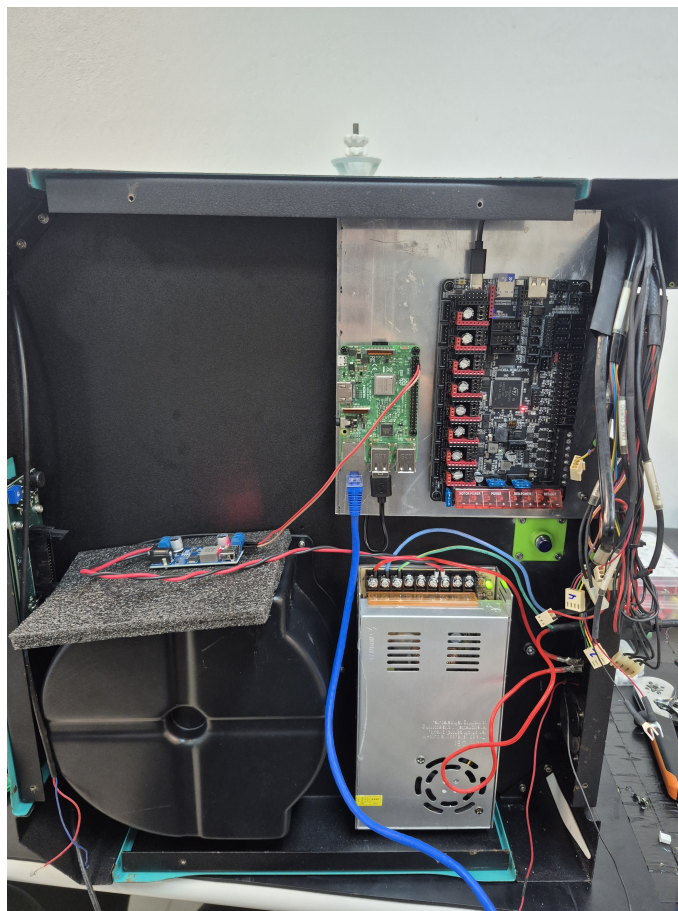
Figura 24 – Estado original dos conectores (a) e compartimento antes da desmontagem (b)



Fonte: O autor (2026).

A Figura 24 detalha esses elementos antes da intervenção. Em (a), destaca-se a régua de conectores originais da Cliever, com os terminais JST distribuídos lado a lado e o cabeamento em cores variadas ainda ligado à placa proprietária. Em (b), tem-se o compartimento eletrônico já após a desmontagem da placa original, evidenciando os pontos de fixação onde a placa proprietária estava montada na base da impressora.

Figura 25 – Sistema retrofitado instalado: nova eletrônica, chapa de alumínio e organização de cabos



Fonte: O autor (2026).

A Figura 25 registra a etapa de testes isolados realizada antes da integração final do sistema: primeiro com o Raspberry Pi sozinho, e em seguida com a placa Octopus Pro acoplada, ambos posicionados provisoriamente sobre a chapa de alumínio para a instalação e verificação inicial dos *softwares* e *firmwares* (Raspberry Pi OS, Klipper, Moonraker e Mainsail), antes da fixação definitiva do cabeamento e da organização final dos componentes no compartimento eletrônico.

4.2.1 Reconhecimento da MCU e comunicação com o Klipper

Após a gravação do *firmware*, o comando `ls /dev/serial/by-id/` retornou o endereço serial estável da Octopus Pro, confirmando que o STM32H723 saiu do modo DFU e estabeleceu comunicação funcional via USB com o Raspberry Pi. A interface Mainsail carregou sem erros de conexão, com os serviços Klipper e Moonraker ativos.

4.2.2 Validação dos sensores de fim de curso

O comando `QUERY_ENDSTOPS` identificou falhas em dois eixos. No eixo X, mau contato nos conectores localizados na parte superior da impressora foi corrigido por recrimpagem. No eixo Z, o sensor estava fisicamente danificado e foi substituído. Após as correções, os três eixos passaram a alternar corretamente entre `open` e `TRIGGERED`.

4.2.3 Validação dos *drivers* TMC2209 via UART

O comando `DUMP_TMC STEPPER=stepper_x`, aplicado a cada eixo, retornou os registradores `GCONF`, `DRV_STATUS`, `CHOPCONF` e `IFCNT` para todos os *drivers*, confirmando comunicação UART funcional.

4.2.4 Validação térmica e calibração PID

Substituição do cartucho aquecedor

O cartucho original de 12 V foi substituído por modelo Ender nativo de 24 V (40 W, $R = 14,4 \, \Omega$, $I \approx 1,67 \, \text{A}$), dentro da margem de segurança dos MOSFETs da Octopus Pro.

Adequação da mesa aquecida via PWM

A mesa original de 12 V foi mantida temporariamente em operação com 24 V mediante limitação de ciclo de trabalho a 34% (`max_power: 0.34`), resultando em potência média de $\approx 163 \, \text{W}$ contra os 120 W originais, dentro dos limites do fusível de 15 A da placa.

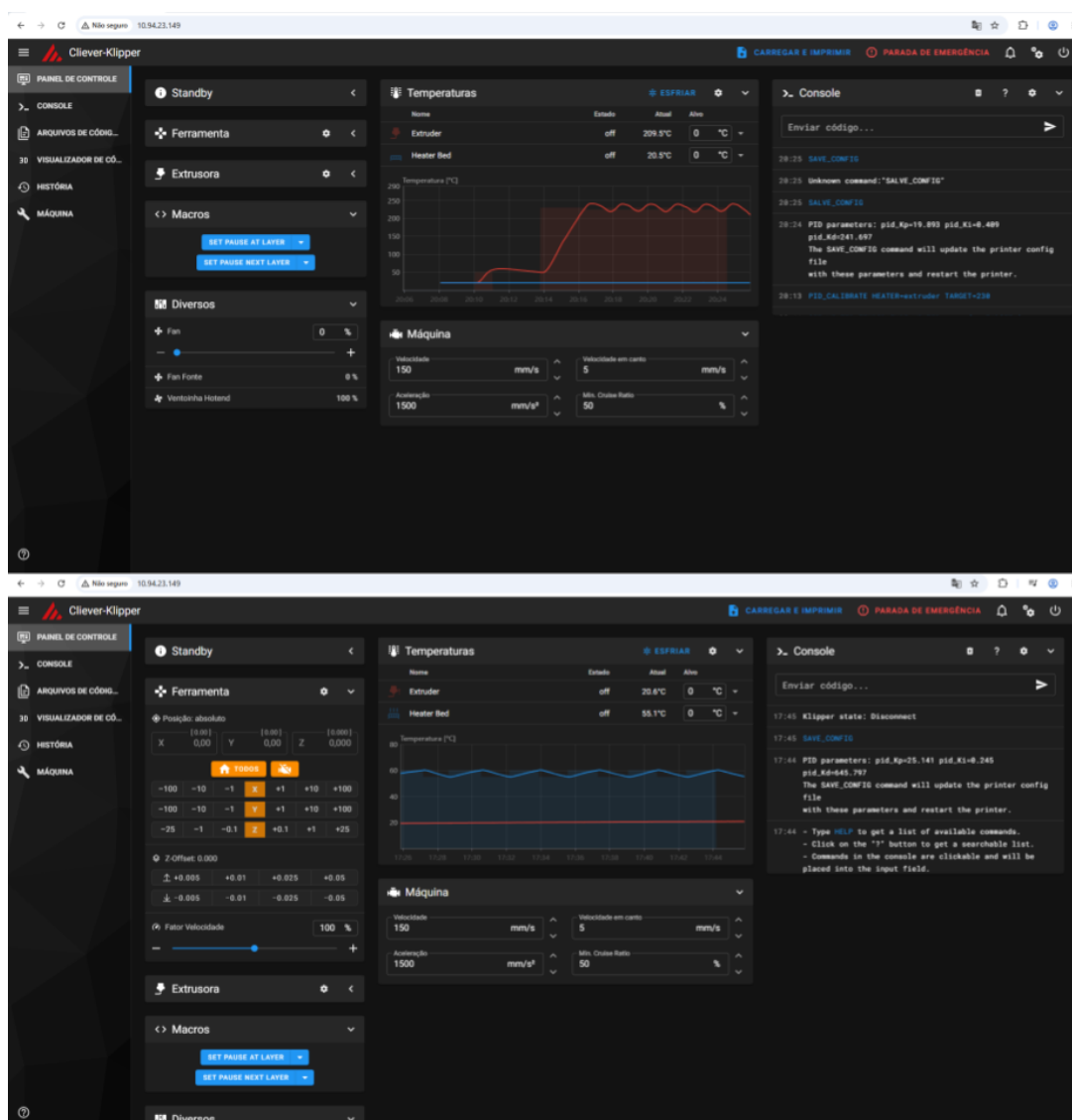
Calibração PID

A calibração PID foi executada via `PID_CALIBRATE`, cujos ganhos obtidos estão apresentados na Tabela 7, com as curvas de resposta registradas na Figura 26.

Tabela 7 – Ganhos PID obtidos após calibração do *hotend* e da mesa

Elemento	Target (°C)	Kp	Ki	Kd
Hotend (extruder)	180	13,634	0,242	192,245
Mesa (heater_bed)	60	25,141	0,245	645,797

Fonte: O autor (2026).

Figura 26 – Curvas de resposta da calibração PID do *hotend* registradas no Mainsail

Fonte: O autor (2026).

4.2.5 Validação da cinemática e calibração do *rotation_distance*

Os motores foram validados individualmente via STEPPER_BUZZ, confirmando correspondência entre eixo configurado e movimento físico. O parâmetro *rotation_distance* foi calibrado empiricamente, resultando nos valores finais de 59,34 mm para o eixo X, 60,80 mm para o eixo Y e 3,951 mm para o eixo z.

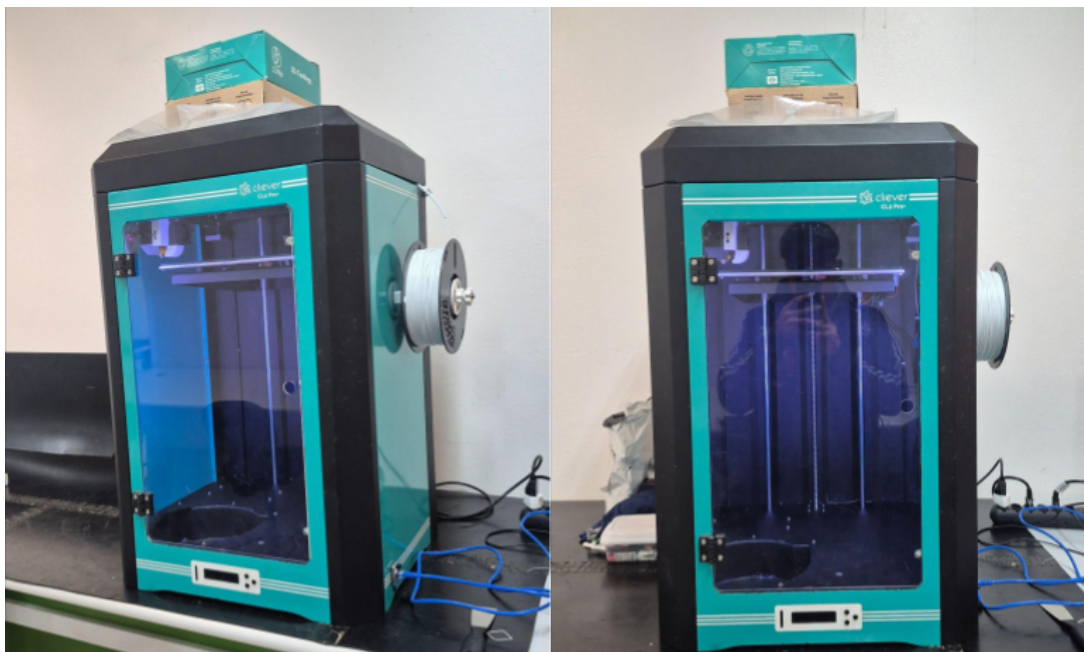
4.2.6 Instalação e Validação do CR Touch

O sensor CR Touch foi conectado à placa Octopus Pro v1.1 nos pinos PB7 (sinal da sonda) e PB6 (controle do solenoide), e configurado no `printer.cfg` conforme descrito a seguir. A validação foi realizada em três etapas sequenciais:

1. **Verificação do acionamento mecânico:** o comando `BLTOUCH_DEBUG COMMAND=pin_down` confirmou o acionamento do pino, e `pin_up` verificou o retorno à posição de repouso. Ambos os movimentos ocorreram de forma correta e repetível, sem falhas de sinal.
2. **Calibração do *z_offset*:** o procedimento `PROBE_CALIBRATE` foi executado para determinar a distância entre a ponta do sensor e o bico extrusor em relação à superfície da mesa. O valor obtido e salvo automaticamente via `SAVE_CONFIG` foi de `z_offset = 0,429 mm`.
3. **Geração da malha de nivelamento:** o comando `BED_MESH_CALIBRATE` mapeou a superfície da mesa em uma grade de 5×5 pontos, com área de medição definida entre as coordenadas `mesh_min: 24, 49` e `mesh_max: 276, 178 mm`, respeitando o deslocamento físico do sensor em relação ao bico. O algoritmo bi-cúbico (`bicubic`) foi utilizado para interpolação da superfície. A malha resultante foi salva no perfil `cliever` via `BED_MESH_PROFILE SAVE=cliever`.

A malha obtida revelou variação de $-0,028$ mm a $+0,099$ mm ao longo da superfície da mesa, com amplitude total de $0,127$ mm. Esse perfil indica que a mesa apresenta leve inclinação com elevação progressiva no sentido do canto traseiro esquerdo, característica típica de mesas aquecidas sujeitas à dilatação térmica diferencial. A compensação dinâmica aplicada pelo Klipper durante a impressão corrige esses desvios camada a camada, contribuindo para a uniformidade da primeira camada em todas as sessões de ensaio.

Para garantir a aplicação automática da compensação em todos os ensaios, a macro `START_PRINT` foi configurada para carregar o perfil `cliever` antes de cada impressão, com recalibração automática caso o perfil não esteja disponível. A sequência completa de *homing* foi implementada via `[homing_override]`, garantindo que os eixos X e Y sejam referenciados pelos *endstops* físicos antes do *homing* do eixo Z pelo CR Touch, com posicionamento do cabeçote em $X = 174$ mm, $Y = 164$ mm (centro efetivo da área de sondagem) antes da descida da sonda.

Figura 27 – Impressora Cliever CL2 Pro Plus após a conclusão do *retrofit*

Fonte: O autor (2026).

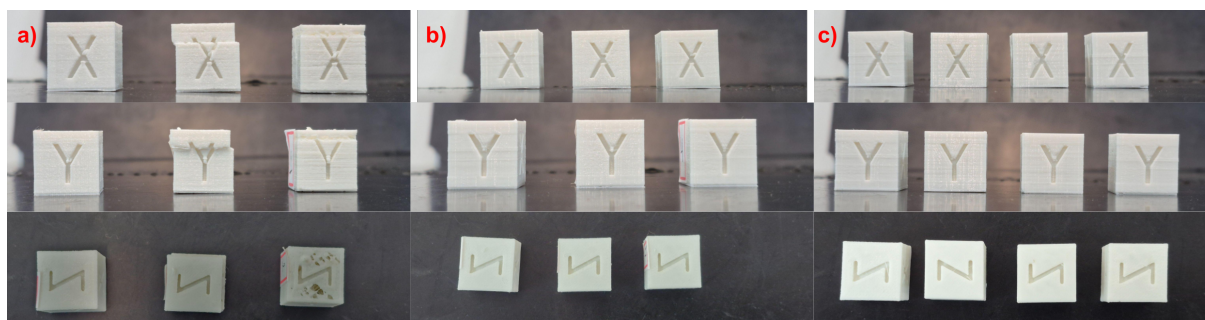
A Figura 27 apresenta a impressora Cliever CL2 Pro Plus em sua configuração final pós-*retrofit*, com o filamento posicionado externamente ao gabinete, cabos organizados e o sistema em condição operacional. A porta frontal de acrílico original foi mantida, preservando a integridade estrutural do equipamento.

4.3 Calibração do Sistema Pós-Retrofit

Antes dos ensaios comparativos, foi necessário realizar uma etapa de calibração do sistema retrofitado, pois os parâmetros de operação não podiam ser importados de perfis genéricos; cada configuração precisou ser identificada e validada empiricamente para adequar-se às características físicas reais da máquina.

4.3.1 Identificação dos parâmetros iniciais: cubos de calibração

A impressão de cubos de calibração de $20 \times 20 \times 20$ mm permitiu avaliar a acurácia dimensional e o comportamento geral do perfil de impressão. Os valores de *rotation_distance* foram ajustados iterativamente com base nas medições do paquímetro digital, conforme ilustrado na Figura 28.

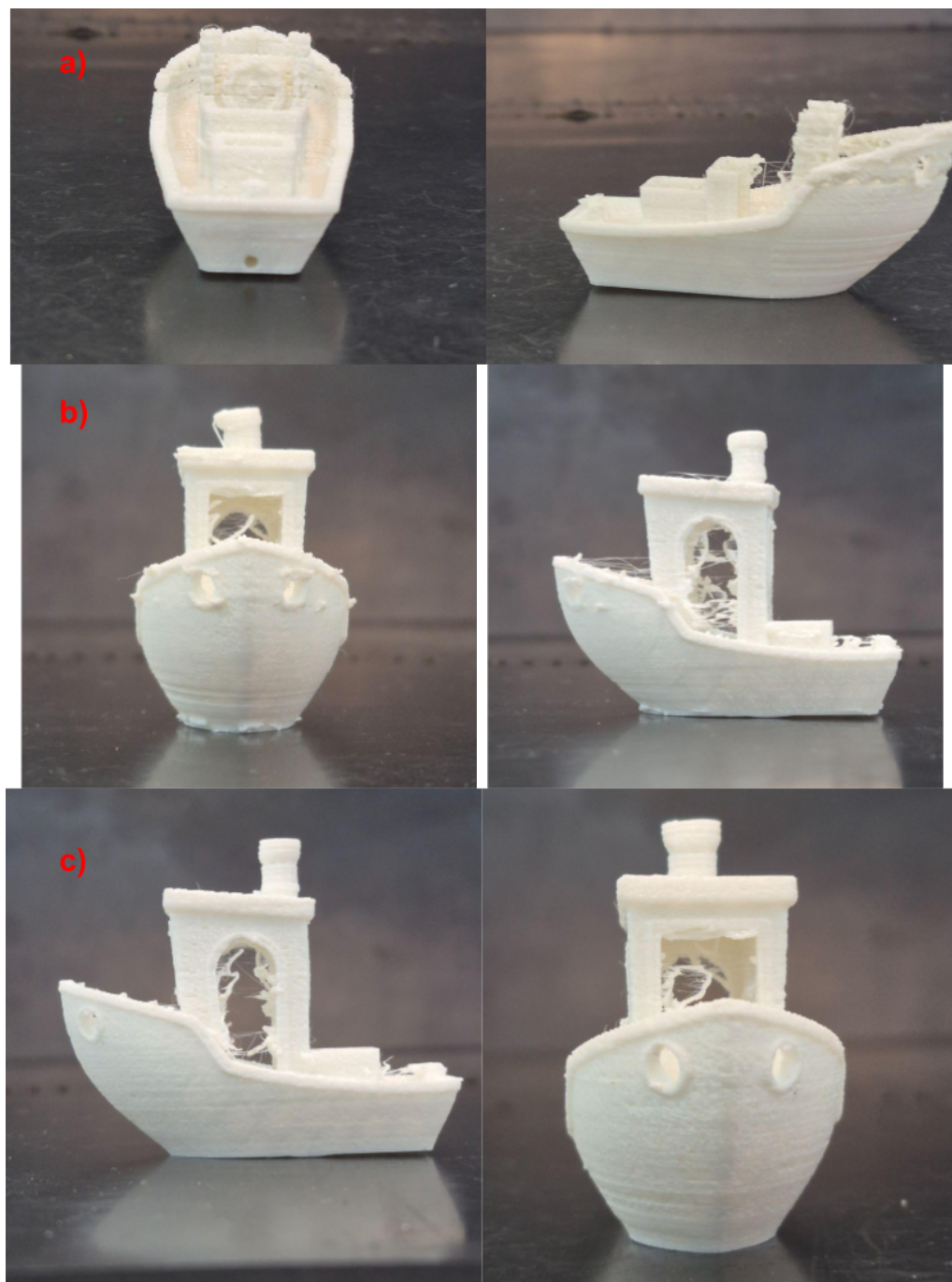
Figura 28 – Cubos de calibração XYZ: iterações de ajuste dos parâmetros iniciais pós-retrofit

Fonte: O autor (2026).

4.3.2 Avaliação preliminar e identificação da necessidade de ajustes

Com os parâmetros dimensionais estabilizados, foi realizada uma impressão preliminar do #3DBenchy. O resultado revelou *stringing* entre regiões distantes, irregularidades nas pontes horizontais e textura rugosa nas superfícies externas, conforme apresentado na Figura 29. Esses defeitos indicaram que a temperatura de extrusão e o sistema de resfriamento precisavam de otimização antes dos ensaios comparativos.

Figura 29 – Modelo #3DBenchy na avaliação preliminar, antes dos ajustes de temperatura e resfriamento



Fonte: O autor (2026).

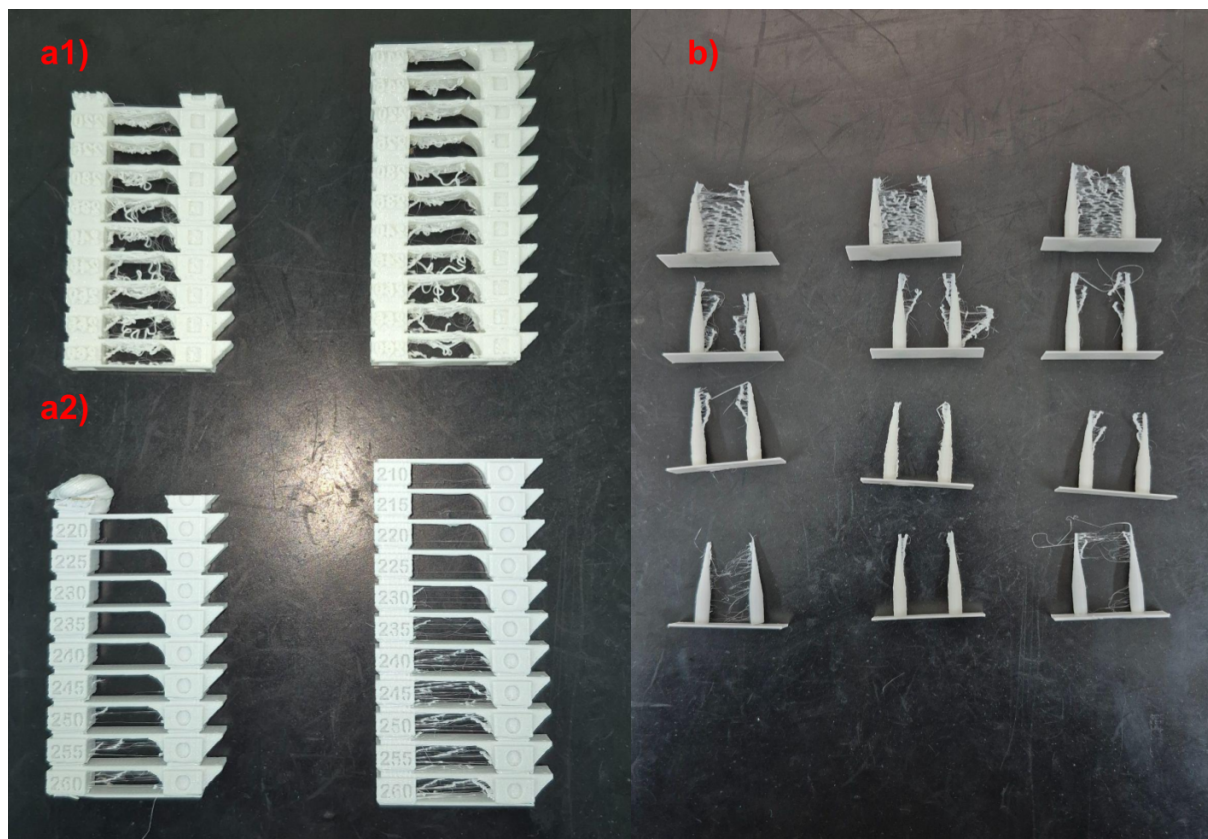
4.3.3 Calibração de temperatura e retração

Para identificar a temperatura de extrusão adequada, foram empregados a *temperature tower* e o *Q_retract_test*, conforme descrito na Seção 3.6.1. Os resultados, apresentados na Figura 30, indicaram que temperaturas acima de 200 °C agravavam o *stringing*, enquanto abaixo de 185 °C comprometiam a adesão entre camadas.

A temperatura de **185 °C** demonstrou o melhor equilíbrio para o PLA utilizado.

O *Q_retract_test* evidenciou colapso de material nas pontes, indicando que o problema central era o resfriamento insuficiente após a deposição, e não a temperatura em si, motivando a intervenção descrita na seção seguinte.

Figura 30 – Torres de temperatura (a) e *Q_retract_test*/pontes (b)



Fonte: O autor (2026).

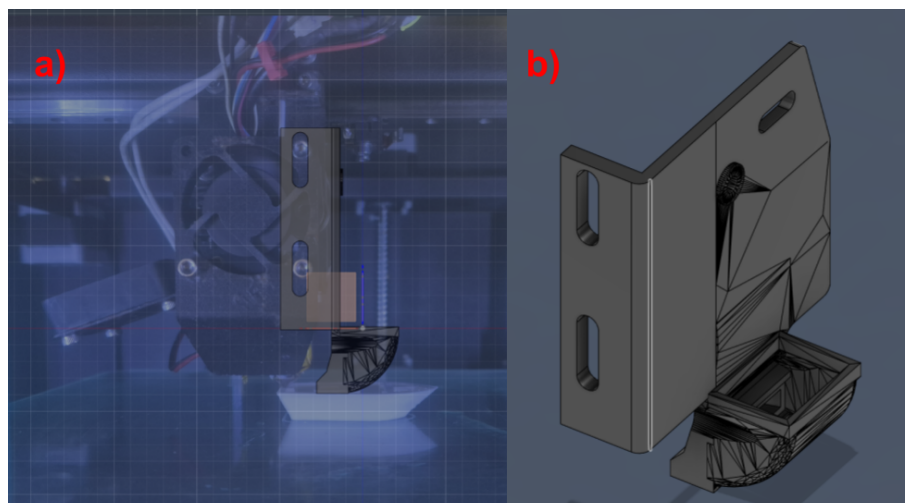
4.3.4 Intervenção no sistema de resfriamento

A ventoinha de resfriamento de peça da Cliever estava posicionada de forma inadequada em relação ao bico extrusor, dispersando o fluxo de ar sem atingir eficientemente a região de deposição do filamento. Com o sistema retrofitado operando em maior velocidade, esse problema, que no *baseline* era parcialmente mascarado pela lentidão do sistema proprietário, tornou-se determinante para a qualidade das peças.

Para corrigir o problema sem modificar permanentemente a estrutura original, foi projetado um suporte de redirecionamento de ar customizado para o conjunto do cabeçote da Cliever. Como ponto de partida, utilizou-se uma geometria de referência disponível em repositório público, adaptada às dimensões específicas do *hotend* da máquina. A modelagem foi realizada no Autodesk Fusion 360 (versão gratuita para

uso educacional), conforme ilustrado na Figura 31, utilizando o recurso de importação de imagem em escala real como referência dimensional para posicionamento e ajuste da geometria, possibilitando a criação de um componente com encaixe preciso ao bloco do cabeçote original.

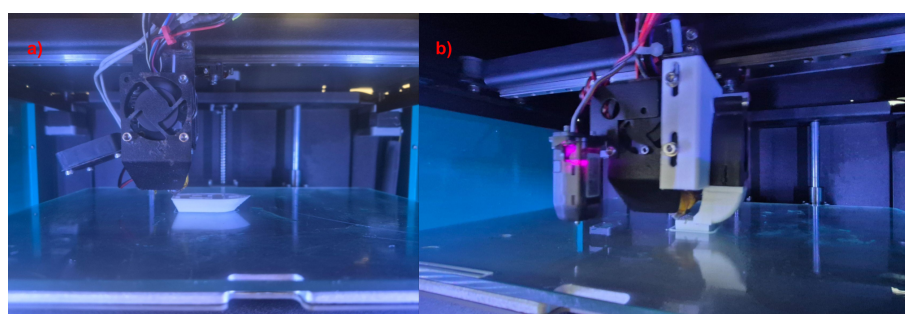
Figura 31 – Modelagem do suporte de resfriamento customizado no Autodesk Fusion 360



Fonte: O autor (2026).

O suporte foi fabricado em PLA e acopla-se ao conjunto do cabeçote, direcionando o fluxo de ar diretamente para a saída do bico extrusor. A Figura 32 ilustra a comparação entre a configuração original da ventoinha e a configuração após a instalação do suporte, evidenciando a melhora no direcionamento do fluxo de ar para a região de deposição.

Figura 32 – Configuração da ventoinha antes (a) e após (b) a instalação do suporte de resfriamento



Fonte: O autor (2026).

Adicionalmente, o filamento utilizado nos ensaios do *baseline* apresentava sinais de absorção de umidade decorrente de armazenamento inadequado, fator que compromete a viscosidade do material e a qualidade superficial das peças. Para garantir a rastreabilidade e a validade comparativa dos ensaios pós-*retrofit*, o rolo de

filamento foi substituído por um novo, nas mesmas especificações nominais (PLA 1,75 mm). Essa substituição é registrada como variável de controle experimental.

Com o sistema de resfriamento corrigido, temperatura definida em 185 °C, filamento renovado e parâmetros dimensionais validados, o sistema estava preparado para a execução dos ensaios comparativos.

4.4 Ensaios de Desempenho Térmico Pós-Retrofit

Os ensaios térmicos pós-*retrofit* foram realizados com o sistema operando em 24 V com calibração PID ativa, utilizando as mesmas condições de temperatura-alvo do *baseline*. Os resultados estão sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Ensaios térmicos do sistema pós-*retrofit* (24 V com PID)

Ensaio	T. Inicial (°C)	T. Alvo (°C)	Tempo Total	Pico (°C)
Mesa – Dia 1	18,9	50	09 min 15 s	–
Mesa – Dia 2	20,6	50	07 min 45 s	–
Mesa – Dia 3	20,6	50	08 min 29 s	–
Média Mesa	20,0	50	08 min 30 s	–
DP Mesa		45 s		–
CV Mesa (%)		8,8%		–
Bico – Dia 1	18,5	160	02 min 05 s	165,2
Bico – Dia 2	21,0	160	02 min 04 s	164,6
Bico – Dia 3	22,3	160	01 min 39 s	168,2
Média Bico	20,6	160	01 min 56 s	166,0
DP Bico		15 s		1,9
CV Bico (%)		12,7%		1,2%

Fonte: O autor (2026).

Os resultados evidenciam ganho expressivo no desempenho térmico em relação ao *baseline*: a mesa reduziu o tempo de aquecimento de 16 min 55 s para 8 min 30 s em média, redução de aproximadamente 50%, decorrente da maior potência disponível em 24 V com limitação PWM de 34%. O bico também apresentou redução no tempo de aquecimento, de 3 min 41 s para 1 min 56 s em média.

O *overshoot* do bico manteve-se presente nos ensaios pós-*retrofit*, com pico médio de 166 °C para *setpoint* de 160 °C ($\Delta \approx 6$ °C). Esse comportamento indica que a calibração PID, embora funcional para estabilização em regime permanente, apresentou *overshoot* ligeiramente superior ao do *baseline* durante a rampa de aquecimento. Uma hipótese é que os ganhos foram calibrados com o bico frio e em condição estática, podendo não ser ótimos para a rampa de aquecimento inicial. Refinamentos adicionais do PID são indicados como trabalho futuro.

4.5 Ensaios de Impressão Pós-Retrofit

Os ensaios comparativos foram conduzidos com temperatura de extrusão de 185 °C, temperatura de mesa de 60 °C, velocidade de 60 mm/s e aceleração de 1000 mm/s², replicando os mesmos protocolos do *baseline*.

4.5.1 Tempo de impressão pós-retrofit

Os tempos de impressão registrados no sistema pós-*retrofit* estão consolidados na Tabela 9. Diferentemente do *baseline*, no sistema pós-*retrofit*, os parâmetros de velocidade e aceleração passaram a ser definidos diretamente no ambiente Klipper. Entretanto, as estimativas do fatiador apresentaram discrepâncias elevadas em relação ao tempo real, indicando que o perfil configurado no Cura ainda não representa adequadamente as rampas reais de aceleração, desaceleração, comandos de preparação e limitações dinâmicas do sistema.

Tabela 9 – Comparação entre tempo estimado e real de impressão: Pós-retrofit

Modelo	Estimado	Real	Erro (%)
Cubo 1	00h 23min 00s	00h 31min 24s	36,5%
Cubo 2	00h 23min 00s	00h 30min 40s	33,3%
Cubo 3	00h 23min 00s	00h 31min 33s	37,2%
Média Cubos	00h 23min 00s	00h 31min 12s	35,7%
DP Cubos	00min 00s	00min 28s	2,1%
CV Cubos (%)	0,0%	1,5%	5,8%
#3DBenchy	01h 04min 00s	01h 36min 56s	51,5%
Autodesk fdmtest	02h 48min 00s	04h 23min 03s	56,6%

Fonte: O autor (2026).

O erro de estimativa nos cubos manteve-se elevado (média de 35,7%), indicando que o fatiador subestima o tempo ao desconsiderar as rampas de aceleração e desaceleração reais do perfil cinemático. Para o #3DBenchy, o tempo real de 01 h 36 min 56 s representa uma redução de aproximadamente 42% em relação aos 02 h 45 min 40 s do *baseline*. O modelo Autodesk foi concluído em 04 h 23 min 03 s, redução de aproximadamente 52% frente às 09 h 08 min 53 s do *baseline*, demonstrando ganho substancial de *throughput* decorrente das maiores velocidades e aceleração configuradas via Klipper.

4.5.2 Análise dimensional dos cubos pós-retrofit

A avaliação dimensional utilizou três cubos de 20,00 mm de lado, medidos com o mesmo paquímetro digital empregado no *baseline* (resolução 0,01 mm, incerteza $\pm 0,01$ mm). Para cada cubo foram realizadas três medições por eixo, adotando-

se o valor médio como resultado representativo. O desvio percentual foi calculado pela Equação 6.

Tabela 10 – Análise dimensional dos cubos de calibração: Pós-*retrofit*

Amostra	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Erro X	Erro Y	Erro Z
Cubo 1	20,08	20,07	20,21	+0,40%	+0,35%	+1,05%
Cubo 2	20,03	20,08	20,02	+0,15%	+0,40%	+0,10%
Cubo 3	20,13	20,13	20,12	+0,65%	+0,65%	+0,60%
Média	20,08	20,09	20,12	+0,40%	+0,45%	+0,60%
DP	0,05	0,03	0,10	0,25%	0,16%	0,48%
CV (%)	0,2%	0,2%	0,5%		–	

Fonte: O autor (2026).

O resultado mais expressivo é a redução do erro no eixo Y: de +1,60% no *baseline* para +0,45% no sistema pós-*retrofit*, representando redução de aproximadamente 72% no erro sistemático associado ao *racking* H-Bot. Essa melhora reflete a capacidade do Klipper de executar calibrações precisas de deslocamento cinemático e de operar os drivers TMC2209 no modo *spreadCycle*, que entrega torque mais estável nos movimentos acoplados dos eixos X e Y, reduzindo os efeitos de perda de passo que amplificam o erro dimensional nessa topologia.

O eixo X manteve erro positivo (+0,40%), comparável ao *baseline* (+0,30%), dentro da margem de incerteza instrumental. O eixo Z apresentou erro médio de +0,60%, ligeiramente superior ao *baseline* (+0,10%), variação atribuída a possíveis diferenças no nivelamento da mesa entre as sessões de ensaio.

4.5.3 Avaliação qualitativa do #3DBenchy pós-*retrofit*

O modelo #3DBenchy foi impresso em 01 h 36 min 56 s contra estimativa de 01 h 04 min 00 s (erro de 51,5%), com redução de aproximadamente 42% no tempo de execução em relação ao *baseline* (02 h 45 min 40 s).

Figura 33 – Modelo #3DBenchy: vistas frontal, traseira, perspectiva e lateral (Pós-retrofit)

Fonte: O autor (2026).

A inspeção visual das quatro vistas apresentadas na Figura 33 revelou avanços qualitativos expressivos em relação ao *baseline*, além de limitações persistentes de natureza mecânica. Os principais achados são descritos a seguir:

Ausência de *ringing*: as paredes verticais da cabine e do casco não apresentaram ondulações periódicas características do *ringing* nas mudanças de direção, fenômeno que estava presente no *baseline*. Esse resultado é atribuído à adoção do modo *spreadCycle* nos drivers TMC2209, que aumentou a estabilidade de torque nos movimentos acoplados da cinemática H-Bot, e à aceleração configurada em 1000 mm/s^2 , valor conservador que limita a excitação dos modos naturais da estrutura.

Eliminação do *stringing* externo: as superfícies externas do modelo não exibiram fios residuais entre regiões distantes, demonstrando efetividade da calibração de retração e da ativação do *Pressure Advance*. Internamente, contudo, observou-se *stringing* residual no interior da cabine e das janelas laterais, possivelmente decorrente

da limitação do fluxo de ar nessas regiões confinadas, onde o suporte de resfriamento instalado não direciona o ar de forma eficiente.

Melhora nos *overhangs*: o telhado da cabine e as regiões de superfície suspensa foram preservados sem colapso ou *sagging* perceptível, em contraste com a degradação observada no *baseline*. Essa melhora está diretamente vinculada à intervenção no sistema de resfriamento descrita na Seção 4.3.4.

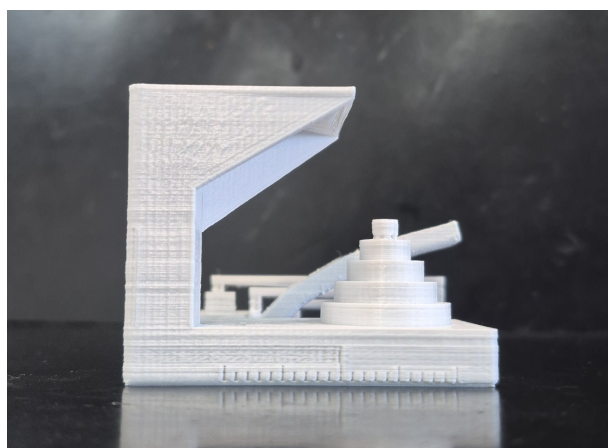
Persistência do *Z-banding*: as linhas horizontais periódicas ao longo do casco lateral e traseiro permaneceram presentes, confirmando que a origem desse artefato é mecânica, especificamente excentricidade do fuso ou imperfeições no acoplamento motor-eixo Z, e independente da intervenção de *firmware*. Esse comportamento era esperado com base no diagnóstico apresentado na análise do *baseline* e reforça a necessidade de intervenção mecânica no fuso como trabalho futuro.

De forma geral, a comparação entre o #3DBenchy do *baseline* e o pós-*retrofit* evidencia ganhos qualitativos concretos em dinâmica de extrusão e estabilidade cinemática, dentro das limitações impostas pelo sistema de resfriamento e pela mecânica do fuso.

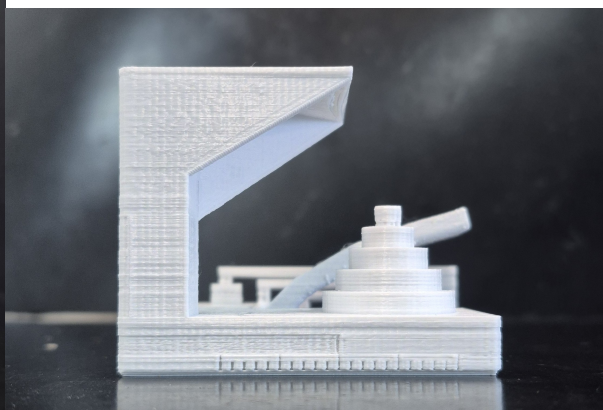
4.5.4 Protocolo Autodesk-Kickstarter pós-*retrofit*

Três amostras do protocolo Autodesk-Kickstarter foram impressas e avaliadas sob as mesmas condições dos ensaios comparativos (185 °C, 60 °C de mesa, 60 mm/s, 1000 mm/s²). Os critérios visuais foram avaliados por inspeção fotográfica sistemática, com as vistas organizadas por critério nas Figuras 34 a 37.

Figura 34 – Inclinações (*overhangs*) e recursos negativos nas três amostras (Pós-retrofit)



(a) Amostra 1



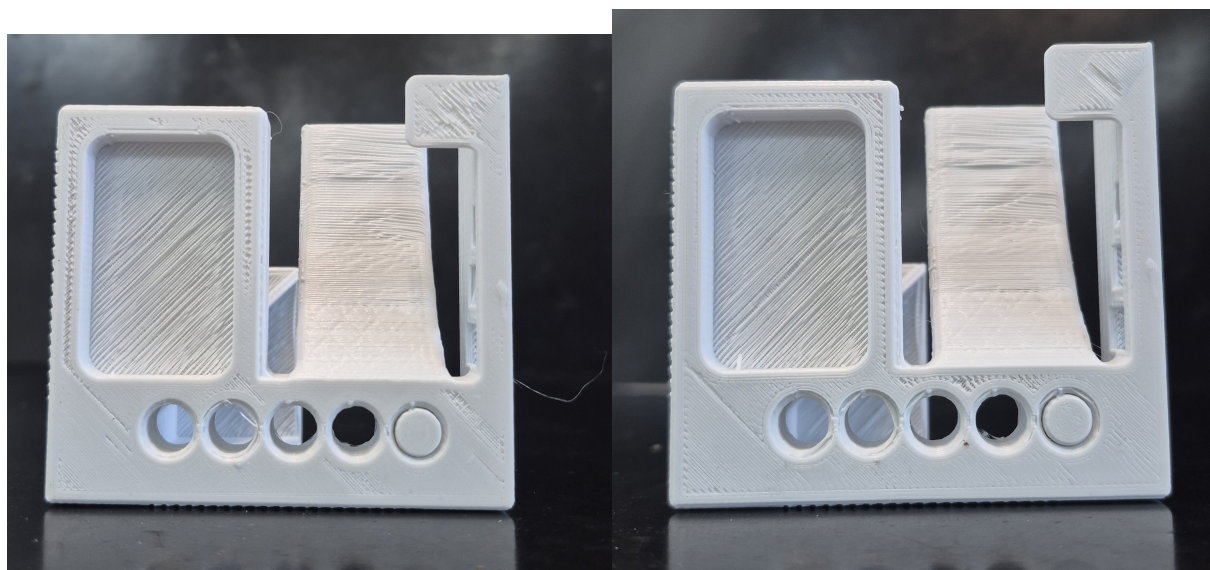
(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

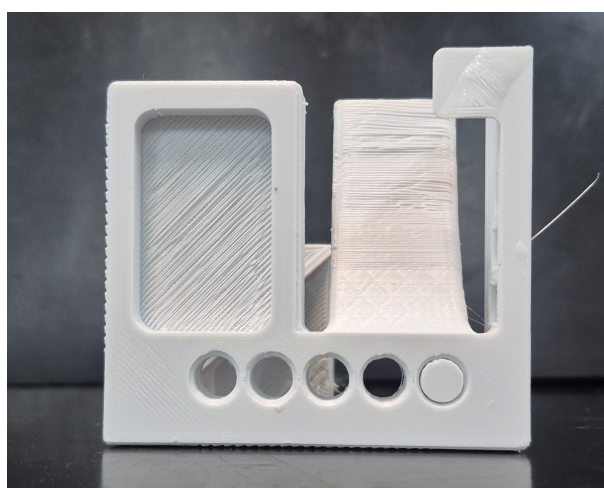
Fonte: O autor (2026).

Figura 35 – Controle de fluxo e recursos negativos nas três amostras (Pós-retrofit)



(a) Amostra 1

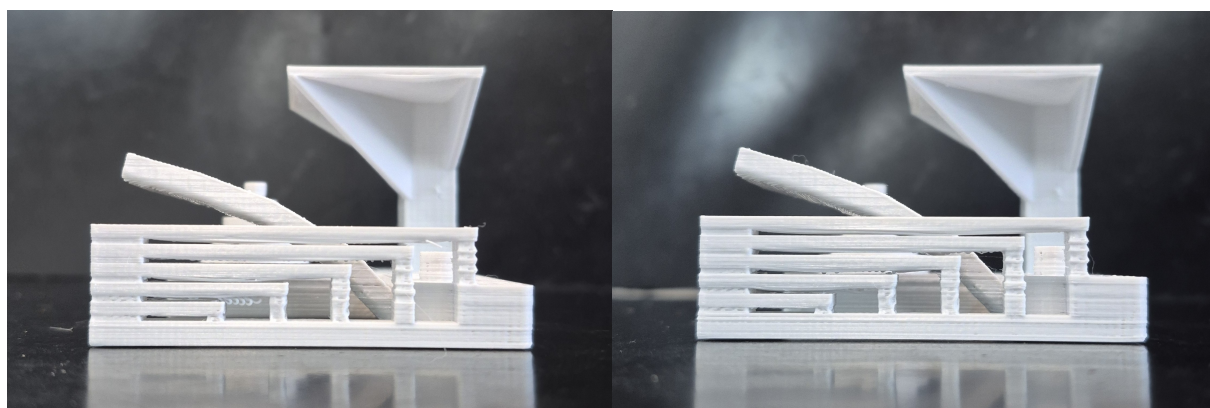
(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Fonte: O autor (2026).

Figura 36 – Capacidade de ponte e ressonância XY nas três amostras (Pós-retrofit)



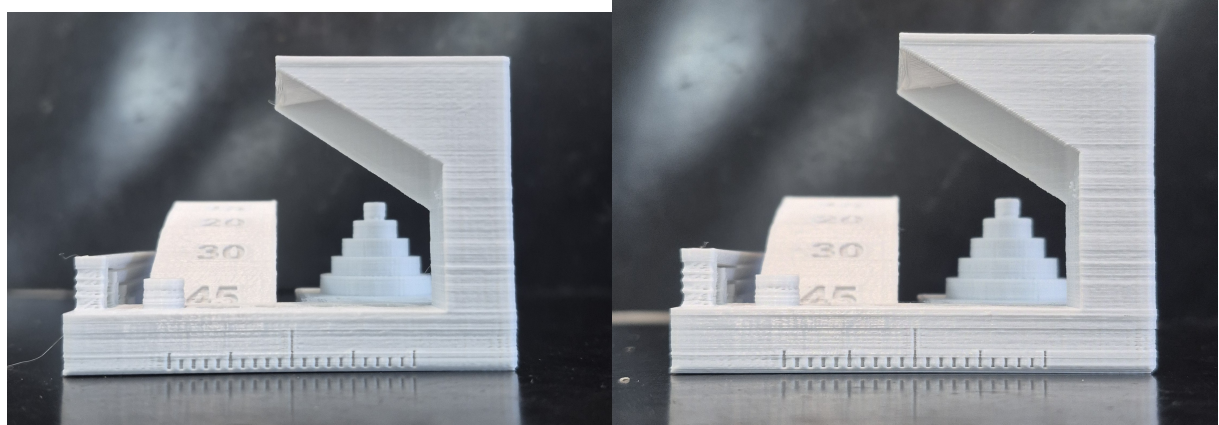
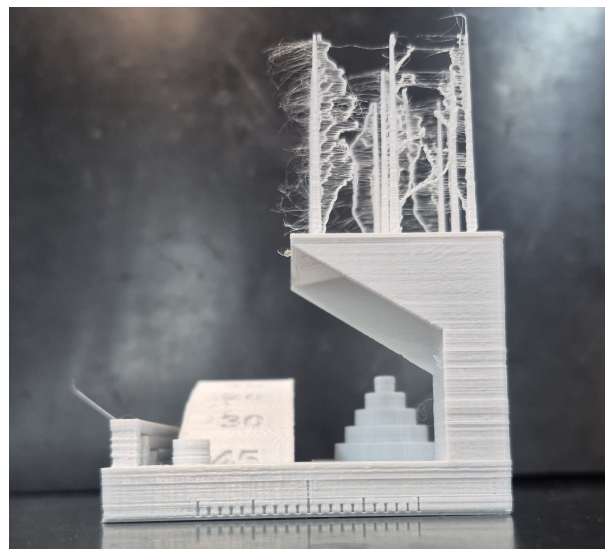
(a) Amostra 1

(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Fonte: O autor (2026).

Figura 37 – Vista geral e alinhamento de eixo Z nas três amostras (Pós-retrofit)**(a) Amostra 1****(b) Amostra 2****(c) Amostra 3**

Fonte: O autor (2026).

Os erros dimensionais medidos nas três amostras estão consolidados na Tabela 11, e os *scores* obtidos na Tabela 12.

Tabela 11 – Erros dimensionais e métricas consolidadas: protocolo Autodesk (Pós-retrofit)

Alvo (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Err X	Err Y	Err X	Err Y	Err X	Err Y
25	+0,40%	−0,40%	−0,08%	+0,56%	+0,44%	−0,04%
20	+0,20%	−0,95%	−0,30%	+0,50%	+0,05%	−0,80%
15	−0,40%	−1,73%	+0,67%	−1,20%	−0,27%	−1,07%
10	+0,30%	−1,80%	−0,60%	−2,00%	+2,30%	−1,50%
5	+2,00%	−1,40%	+1,60%	−2,00%	−1,20%	−0,40%
Média X	+0,50%		+0,26%		+0,26%	
Média Y	−1,26%		−0,83%		−0,76%	
Avg Err	0,88%		0,54%		0,51%	
Δ_{XY}	1,76%		1,09%		1,03%	

Fonte: O autor (2026).

Convertendo para valores absolutos, obteve-se: Amostra 1 com Avg Err = 0,113 mm (Score 4); Amostra 2 com Avg Err = 0,104 mm (Score 4); e Amostra 3 com Avg Err = 0,095 mm (Score 5). A média global de 0,104 mm é ligeiramente inferior à média do *baseline* (0,12 mm, com variação de 0,08 a 0,16 mm), indicando uma melhora modesta neste critério específico – a maior parte do ganho percebido no protocolo Autodesk-Kickstarter concentra-se em outros critérios, notadamente *bridging* e recursos negativos, conforme discutido na Seção 4.6.4.

Tabela 12 – Scores do protocolo Autodesk-Kickstarter: Pós-retrofit

Critério	Score Baseline	Score Pós-retrofit	Justificativa resumida
Precisão dimensional (XY)	3–5	4–5	Avg Err entre 0,095 e 0,113 mm; A3 atingiu Score 5
Controle de fluxo	2,5	1	Base soltou em A1 e A2; A3 concluiu com pinos >40 mm
Recursos negativos	3	4	Até 4 pinos removíveis nas três amostras
Inclinações (<i>Overhangs</i>)	1	1	Desempenho similar ao <i>baseline</i>
Pontes (<i>Bridging</i>)	2	5	Nenhuma ponte tocou a superfície inferior
Ressonância XY (<i>Ringings</i>)	0	0	Ondulações periódicas ainda visíveis
Alinhamento eixo Z	0	0	<i>Z-banding</i> de origem mecânica persiste

Fonte: O autor (2026).

A análise por critério é apresentada a seguir.

Controle de fluxo: nas Amostras 1 e 2, a base das torres soltou da mesa durante a impressão, indicando adesão insuficiente decorrente de variações de fluxo

e temperatura no início da execução. A Amostra 3 concluiu a impressão com pinos superiores a 40 mm, porém com *stringing* presente entre as estruturas. A variabilidade entre amostras aponta para necessidade de refinamento adicional nos parâmetros de temperatura e extrusão, resultando em Score 1.

Recursos negativos: até quatro pinos foram removíveis nas três amostras, representando melhora em relação ao *baseline* (Score 3). Esse resultado reflete a maior precisão do Klipper no planejamento de trajetória e o efeito do *Pressure Advance* na redução do excesso de material depositado nas interfaces dos pinos, permitindo sua separação sem fusão com a estrutura principal.

Inclinações (*Overhangs*): o desempenho foi similar ao *baseline*, sem melhora perceptível nas regiões inclinadas, resultando em Score 1.

Pontes (*Bridging*): nenhuma das pontes horizontais estabeleceu contato com a superfície inferior, critério definido pelo protocolo para pontuação máxima. Observou-se deformação geométrica nas primeiras camadas das pontes, com leve abaulamento, sem caracterizar colapso estrutural. Score 5 representa melhora expressiva em relação ao *baseline* (Score 2), atribuída à maior estabilidade cinemática e controle de extrusão do sistema retrofitado.

Ressonância XY (*Ringings*): ondulações periódicas nas paredes verticais foram identificadas na inspeção visual das amostras, indicando que o efeito de *racking* da cinemática H-Bot ainda se manifesta sem a compensação ativa do *Input Shaping*. Score 0, equivalente ao *baseline*.

Alinhamento eixo Z: o *Z-banding* persistiu nas amostras pós-*retrofit*, confirmando sua origem mecânica no sistema de fuso e a independência desse artefato em relação ao *firmware*. Score 0, equivalente ao *baseline*.

A discrepância entre a ausência de *ringing* observada no #3DBenchy (Seção 4.5.3) e sua persistência no protocolo Autodesk-Kickstarter não representa uma inconsistência: as duas geometrias foram impressas sob os mesmos parâmetros (185 °C, 60 mm/s, 1000 mm/s²), porém as torres do protocolo Autodesk-Kickstarter possuem segmentos de parede mais curtos e mudanças de direção mais frequentes, o que as torna mais sensíveis à excitação da frequência de ressonância natural do pórtico H-Bot do que a geometria do Benchy. Esse comportamento reforça a necessidade do *Input Shaping* como solução ativa, independente da geometria impressa.

4.5.5 Limitações observadas durante os ensaios

Duas limitações estruturais foram identificadas como persistentes após o *retrofit*, independentemente da configuração de *firmware*:

O *Z-banding* observado no *baseline* persiste no sistema pós-*retrofit*, pois

sua origem é mecânica, especificamente excentricidade do fuso ou desalinhamento do acoplamento motor-eixo, e não é corrigida por intervenção de *firmware*.

A limitação do sistema de resfriamento, embora parcialmente mitigada pelo suporte impresso, permanece como fator residual: a ventoinha original não foi projetada para a posição do cabeçote da Cliever e a solução adotada é provisória. A substituição por um sistema de resfriamento dedicado é indicada como trabalho futuro.

A calibração de *Input Shaping*, que permitiria mitigar ativamente o *ringing* por compensação das frequências naturais do pórtico, não foi realizada no escopo deste trabalho por limitação de tempo. Sua implementação é apontada como continuidade natural do projeto, com potencial de melhora direta nos scores de ressonância XY do protocolo Autodesk-Kickstarter.

Por fim, cabe uma ressalva metodológica sobre a comparação entre os dois cenários: entre o levantamento do *baseline* e os ensaios pós-*retrofit*, três variáveis mudaram simultaneamente, a saber, o sistema de controle (proprietário para Klipper), o rolo de filamento (substituído por apresentar sinais de absorção de umidade) e, consequentemente, a temperatura de extrusão validada como ideal (de 160 °C para 185 °C). Do ponto de vista estritamente experimental, isso significa que a comparação *baseline* vs. pós-*retrofit* não isola a contribuição isolada do *retrofit* eletrônico: os ganhos relatados neste capítulo refletem o efeito combinado da nova arquitetura de controle e da normalização das condições de material e processo, não sendo possível, com o desenho experimental adotado, quantificar separadamente a fração de cada fator. Essa limitação é inerente a um estudo de caso único em condições de bancada, no qual a preservação de um material já comprometido por umidade inviabilizaria uma comparação justa em si mesma. Ainda assim, os resultados dimensionais mais diretamente atribuíveis à cinemática, notadamente a redução do erro sistemático no eixo Y associado ao *racking*, mantêm relação causal plausível com a mudança de arquitetura de controle, uma vez que a precisão de deslocamento angular depende primariamente do algoritmo de planejamento de trajetória e da resposta dos *drivers*, e não das propriedades do material extrudado. Já as métricas de qualidade superficial e processo de extrusão (*stringing*, controle de fluxo, temperatura de aquecimento) devem ser interpretadas com essa ressalva em mente, e são apontadas como oportunidade para um estudo de continuidade com controle experimental mais rigoroso (mesmo material em ambos os cenários, variando isoladamente o sistema de controle).

4.6 Comparação entre Sistema Original e Sistema Retrofitado

4.6.1 Tabela consolidada de métricas

Tabela 13 – Comparação consolidada entre Baseline e Pós-retrofit

Métrica	Baseline	Pós-retrofit
Tempo aquec. mesa (50°C)	16 min 55 s	08 min 30 s
Redução tempo aquec. mesa	—	≈50%
Tempo aquec. bico (160°C)	3 min 41 s	1 min 56 s
<i>Overshoot</i> bico	+4,1°C	+6,0°C
Erro médio eixo X (cubos)	+0,30%	+0,40%
Erro médio eixo Y (cubos)	+1,60%	+0,45%
Avg Err Autodesk (média amostras)	1,09%	0,64%
Score ringing	0	0
Score controle de fluxo	2,5	1
Score bridging	2	5
Score overhang	1	1
Score recursos negativos	3	4
Erro estimativa #3DBenchy	5,4%	51,5%
Tempo real #3DBenchy	02h 45min 40s	01h 36min 56s
Tempo real Autodesk	09h 08min 53s	04h 23min 03s

Fonte: O autor (2026).

4.6.2 Comparação térmica

O ganho mais expressivo e imediatamente quantificável do *retrofit* está no desempenho térmico. A migração para 24 V com limitação PWM de 34% resultou em redução de aproximadamente 50% no tempo de aquecimento da mesa (de 16 min 55 s para 8 min 30 s), aproximando a operação de patamares práticos para sessões de impressão mais curtas. O bico também apresentou melhora significativa, com tempo médio de 1 min 56 s contra 3 min 41 s no *baseline*, redução de aproximadamente 47%.

O *overshoot* do bico, contudo, aumentou de 4,1°C para 6,0°C. Isso indica que, embora o PID esteja ativo e funcional, os ganhos obtidos na calibração estática não são ótimos para a dinâmica de aquecimento do novo cartucho de 40 W, que possui maior potência e resposta mais rápida que o original. Ajuste fino dos ganhos PID é recomendado como trabalho futuro.

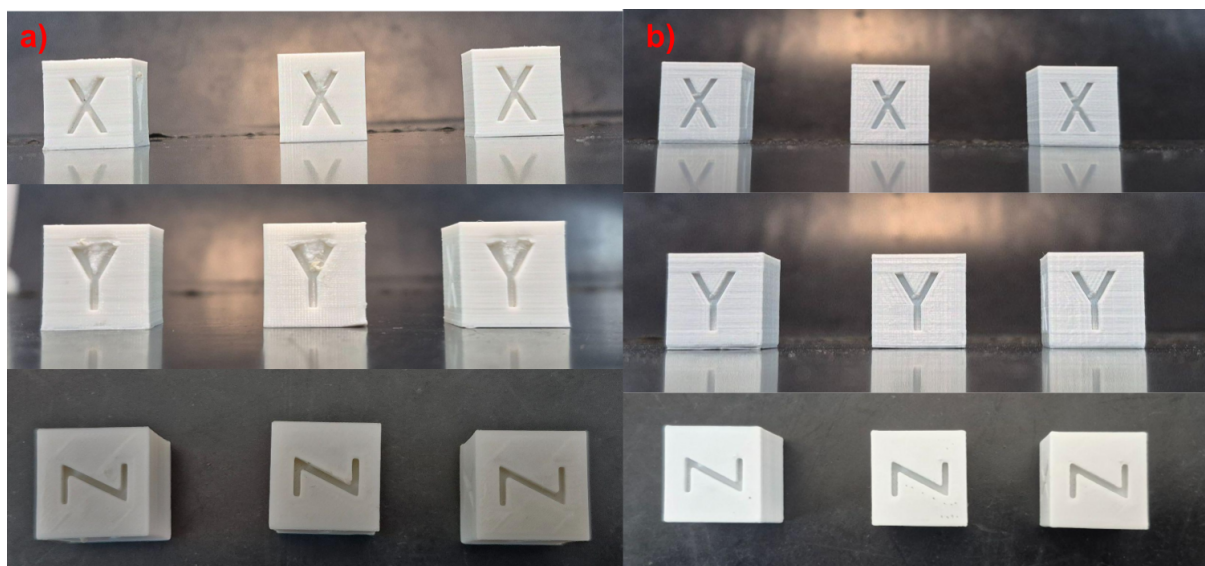
4.6.3 Comparação dimensional e cinemática

O *retrofit* resultou em melhora expressiva na acurácia dimensional do eixo Y, que reduziu de +1,60% para +0,45%, representando redução de aproximadamente 72% no erro sistemático associado ao *racking* H-Bot. O eixo X permaneceu estável (+0,30% para +0,40%), dentro da margem de incerteza instrumental. No protocolo

Autodesk-Kickstarter, o Avg Err médio passou de 1,09% para 0,64%, com a Amostra 3 atingindo Score 5 pela primeira vez.

A comparação qualitativa dos cubos de calibração está ilustrada na Figura 38, que apresenta os três corpos de prova do *baseline* (a) ao lado dos três pós-*retrofit* (b), nas faces X, Y e Z.

Figura 38 – Comparação dos cubos de calibração: *baseline* (a) e pós-*retrofit* (b)



Fonte: O autor (2026).

A inspeção visual evidencia três diferenças qualitativas relevantes entre os dois sistemas:

Face Y (linha central): os cubos do *baseline* apresentam empenamento (*warping*) visível na face Y, com as bordas inferiores levantadas da superfície de impressão. Esse fenômeno indica adesão insuficiente da primeira camada, agravado pela irregularidade da mesa sem compensação ativa. No sistema pós-*retrofit*, a face Y está plana e sem deformações, resultado direto da compensação dinâmica aplicada pelo CR Touch por meio da malha de nivelamento, combinada à maior estabilidade térmica da mesa em 24 V.

Primeiras camadas: a base dos cubos pós-*retrofit* apresenta assentamento mais uniforme e regular em comparação ao *baseline*, onde variações de altura na primeira camada comprometem a geometria das camadas subsequentes. A malha de nivelamento com amplitude de 0,127 mm mapeada pelo CR Touch corrigiu as ondulações da mesa ao longo de toda a área de impressão.

Acabamento superficial geral: as faces dos cubos pós-*retrofit* apresentam maior uniformidade nas linhas de camada, com textura mais regular nas três faces. A diferença de cor entre os grupos (tonalidade amarelada no *baseline* e branca no

pós-*retrofit*) reflete a substituição do filamento, necessária pela absorção de umidade do rolo original, conforme descrito na Seção 4.3.4.

Esses ganhos qualitativos foram obtidos com redução simultânea de aproximadamente 46% no tempo de impressão por cubo (de 58 min 34 s para 31 min 12 s em média), demonstrando que a arquitetura Klipper permitiu elevar a velocidade de operação sem comprometer a qualidade das peças.

4.6.4 Comparação da qualidade das superfícies

A comparação dos *scores* do protocolo Autodesk-Kickstarter revela um quadro misto: há ganhos expressivos em critérios específicos, mas também regressões e manutenção de limitações do *baseline*.

O ganho mais expressivo ocorreu no critério de pontes (*bridging*), que subiu de Score 2 para Score 5: nenhuma ponte tocou a superfície inferior nas três amostras, resultado atribuído à maior estabilidade cinemática e ao controle de extrusão do sistema Klipper. O critério de recursos negativos também melhorou (de 3 para 4), com até quatro pinos removíveis em todas as amostras, reflexo da maior precisão no planejamento de trajetória e no controle de fluxo via *Pressure Advance*.

Por outro lado, o critério de controle de fluxo regrediu em relação ao *baseline* (de 2,5 para 1), com a base das torres soltando durante a impressão nas Amostras 1 e 2. Esse resultado indica que as condições de temperatura e adesão precisam de refinamento adicional, sendo um ponto de atenção para trabalhos futuros.

Os critérios de *ringing* (0) e alinhamento Z (0) mantiveram-se equivalentes ao *baseline*: o *ringing* persiste pela ausência do *Input Shaping*, e o *Z-banding* é de origem mecânica e independe do *firmware*. O critério de *overhangs* também não apresentou melhora perceptível (Score 1), mantendo o padrão do *baseline*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um processo de *retrofit* para a impressora 3D Cliever CL2 Pro Plus, substituindo seu sistema proprietário original por uma arquitetura aberta baseada no *firmware* Klipper, placa controladora BIGTREETECH Octopus Pro v1.1, Raspberry Pi 3 Model B, *drivers* TMC2209, alimentação em 24 V e sensor de nivelamento automático CR Touch. A proposta surgiu da necessidade de recuperar um equipamento institucional subutilizado, cuja operação era limitada pela descontinuidade do suporte do fabricante e pela impossibilidade de intervenção direta sobre variáveis fundamentais de calibração, diagnóstico e controle de movimento.

A etapa inicial consistiu na caracterização do sistema original (*baseline*), estabelecendo uma referência quantitativa para comparação. Os ensaios evidenciaram limitações térmicas, dimensionais e dinâmicas significativas. A mesa aquecida apresentou tempo médio de 16 min 55 s para atingir 50 °C, enquanto o bico extrusor atingiu 160 °C em 3 min 41 s, com *overshoot* médio de 4,1 °C. Adicionalmente, os cubos de calibração apresentaram erro médio positivo de +1,60% no eixo Y, comportamento compatível com os efeitos associados ao acoplamento cinemático da topologia H-Bot e ao fenômeno de *racking*. Nos ensaios qualitativos, foram observados defeitos como *ringing*, *stringing*, deformações em *overhangs* e *Z-banding*.

A implementação física e lógica do *retrofit* foi concluída com sucesso. A nova arquitetura distribuída viabilizou a comunicação estável entre a Octopus Pro e o Raspberry Pi, a validação dos sensores de fim de curso, o acionamento dos *drivers* TMC2209 via UART, o controle térmico por PID, o nivelamento automático com o CR Touch e a parametrização cinemática direta no arquivo de configuração do Klipper. Além disso, a modelagem e fabricação de um suporte direcionador de fluxo de ar, projetado no Autodesk Fusion 360 e fabricado na própria impressora retrofitada, contribuiu para mitigar parcialmente as deficiências de arrefecimento do cabeçote original.

Os resultados térmicos pós-*retrofit* demonstraram ganhos expressivos. O tempo médio de aquecimento da mesa para 50 °C foi reduzido em aproximadamente 50%, passando de 16 min 55 s para 08 min 30 s. O bico extrusor também apresentou redução significativa no tempo de aquecimento para 160 °C, de 3 min 41 s para 1 min 56 s, redução de aproximadamente 47%. Esses dados validam o impacto positivo da migração para o barramento de 24 V. Contudo, o *overshoot* do bico aumentou de 4,1 °C para 6,0 °C, indicando que, embora o controle PID esteja funcional, a rampa de aquecimento para o novo cartucho de 40 W demanda refinamento adicional de sintonia.

Nos ensaios dinâmicos de impressão, o sistema sintonizado apresentou reduções expressivas nos tempos reais de ciclo. O modelo #3DBenchy teve seu tempo de execução reduzido em 42%, passando de 02 h 45 min 40 s para 01 h 36 min 56 s, ao passo que o modelo do protocolo Autodesk-Kickstarter foi reduzido em 52%, de 09 h 08 min 53 s para 04 h 23 min 03 s. Esses ganhos de produtividade correlacionam-se à liberdade de configuração de velocidades e acelerações sob o Klipper. As discrepâncias observadas entre as estimativas do fatiador Cura e os tempos reais indicam que o perfil cinemático de fatiamento ainda exige calibração de rampas dinâmicas para se alinhar ao comportamento de execução do *firmware*.

Do ponto de vista metrológico, o principal avanço ocorreu no eixo Y dos cubos de calibração. O erro dimensional médio foi reduzido de +1,60% no *baseline* para +0,45% no sistema modificado, representando uma redução de aproximadamente 72% no desvio sistemático do acoplamento XY, atribuída ao modo *spreadCycle* dos *drivers* TMC2209 e à parametrização cinemática do Klipper. O eixo X manteve estabilidade próxima à condição inicial, enquanto o eixo Z registrou desvio médio ligeiramente superior, indicando restrições de natureza mecânica na transmissão vertical. A integração do sensor CR Touch estabilizou o assentamento da primeira camada, gerando uma malha de compensação planar com amplitude total de 0,127 mm.

No protocolo Autodesk-Kickstarter, o sistema apresentou desempenho misto. Constatou-se melhora na precisão posicional global e avanços significativos no critério de pontes (*bridging*), que evoluiu de Score 2 para Score 5, pois nenhuma ponte tocou a superfície inferior. Também houve avanço no critério de recursos negativos, que passou de Score 3 para Score 4. Em contrapartida, registrou-se regressão no controle de fluxo, com descolamento da base de torres em algumas amostras, além da persistência de *ringing* e *Z-banding*. Esses resultados demonstram que a transição lógica e elétrica foi bem-sucedida, mas que a otimização plena da qualidade das superfícies ainda depende de calibrações dinâmicas adicionais, melhorias no resfriamento e correções mecânicas.

Em síntese, a hipótese de que o sistema original apresentava restrições relevantes associadas à arquitetura proprietária fechada, à operação em 12 V e à baixa disponibilidade de parametrização foi confirmada pelos resultados do *baseline*. A hipótese de melhoria do controle via Klipper e transição para 24 V foi parcialmente confirmada: houve ganhos térmicos, dimensionais no eixo Y, de produtividade e de repetibilidade da primeira camada, embora persistam limitações relacionadas ao controle de fluxo, *ringing*, *overhangs* e *Z-banding*. Por fim, o projeto cumpriu a meta institucional de transformar um ativo obsoleto em uma plataforma mecatrônica aberta de elevado valor acadêmico para o IFSC, apta a ser utilizada para estudos de controle de movimento, eletrônica embarcada, manutenção de sistemas e manufatura aditiva.

Conclui-se, portanto, que o *retrofit* da Cliever CL2 Pro Plus foi tecnicamente viável e trouxe ganhos objetivos de desempenho, acessibilidade de configuração e capacidade de diagnóstico. O trabalho não encerra o processo de otimização da máquina, mas estabelece uma base funcional, documentada e replicável para que novas intervenções sejam realizadas de forma sistemática. Dessa forma, a impressora deixa de ser um equipamento limitado por um ecossistema fechado e passa a atuar como uma plataforma aberta de ensino, pesquisa e desenvolvimento em Engenharia Mecatrônica.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade natural para o desenvolvimento deste projeto mecatrônico, recomendam-se as seguintes intervenções técnicas:

- **Implementação do *Input Shaping*:** instalar um acelerômetro ADXL345 no cabeçote de extrusão para mapear as frequências naturais de ressonância dos eixos X e Y, permitindo a atenuação ativa das marcas de *ringing* na cinemática H-Bot;
- **Ajuste mecânico do eixo Z:** investigar o conjunto de fuso, acoplamento motor-eixo, guias lineares e fixações da mesa, visando reduzir o erro periódico associado ao *Z-banding*. Como alternativas, podem ser avaliadas a substituição do acoplamento rígido por um acoplamento flexível do tipo *spider* ou a adoção de uma solução do tipo *Belted Z*;
- **Substituição da mesa aquecida por modelo nativo de 24 V:** integrar um elemento resistivo de mesa projetado para operação em 24 V, eliminando a necessidade de limitação por PWM e aumentando a margem de segurança elétrica e térmica do sistema;
- **Avaliação de novos materiais de impressão:** realizar ensaios com filamentos de maior exigência térmica, como PETG e ABS, cuja viabilidade foi expandida pela migração para 24 V e pela melhora no desempenho térmico da mesa e do bico;
- **Substituição do conjunto do bico e *hotend*:** avaliar a troca do cabeçote original por sistema compatível com o padrão Ender ou outro conjunto comercial amplamente documentado, facilitando manutenção, reposição de peças e integração de resfriamento mais eficiente;
- **Substituição integral da fiação:** realizar a troca completa dos chicotes elétricos originais, incluindo motores, sensores, ventoinhas, termistores e aquecedores, reduzindo falhas intermitentes, mau contato e ruído elétrico;

- **Otimização do arrefecimento de peça:** desenvolver um duto de resfriamento bilateral com ventoinhas tipo *blower* 5015, preferencialmente em material de maior resistência térmica, melhorando a qualidade de *overhangs*, pontes e regiões internas de baixa circulação de ar;
- **Sintonia dinâmica do controle PID:** executar novos ensaios de calibração PID em condições reais de operação, a fim de reduzir o *overshoot* de 6,0 °C observado com o cartucho de 40 W;
- **Calibração do perfil de fatiamento:** ajustar acelerações, velocidades perimetrais e de preenchimento no Cura, compatibilizando as estimativas de tempo de ciclo com os tempos físicos reais medidos pelo *host* Klipper.

REFERÊNCIAS

- 3D Lab. *Tipos de Impressão 3D: conheça os seus benefícios!* 2018. Blog da 3D Lab. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/>>. Acesso em: 30 nov. 2025. 17
- 3D Lab. *Como calibrar sua impressora 3D: Guia completo.* 2023. Blog da 3D Lab. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/calibrar-sua-impressora-3d/>>. Acesso em: 03 dez. 2025. 29
- 3DPrintinGreece.gr. *Easy & Quick Retraction Test.* 2023. MakerWorld. Disponível em: <<https://makerworld.com/pt/models/28900>>. Acesso em: 15 jun. 2026. 43
- ANTONELLI, L. A. *Impressora 3D de Baixo Custo.* Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica)) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcos Roberto Bombacini. 19
- AZEVEDO, F. M. d. *Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D.* Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-13022014-104725/>. Acesso em: 30 nov. 2025. 17
- BIGTREETECH. *BIGTREETECH Octopus Pro User Guide.* [S.l.], 2021. Disponível em: <https://github.com/bigtreotech>. 38
- CADENAS, O. M. *Optimización de una impresora 3D tipo Core XY: Memoria y anejos.* Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, abr 2023. 19, 27, 28
- COUTO, D. M. S. d. *Desenvolvimento e implementação de um algoritmo para deposição variável de camadas aplicado ao processo aditivo por extrusão.* Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica)) — Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2023. 17, 18, 26
- Creative Tools. *#3DBenchy - The jolly 3D printing torture-test.* 2025. Site oficial do projeto. Disponível em: <https://www.3dbenchy.com/>. Acesso em: 30 nov. 2025. 29
- CUZZEA. *PETG temperature tower test (for CURA).* 2018. Thingiverse. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:2862812>. Acesso em: 15 jun. 2026. 43
- ERWIŃSKI, K.; USTASZEWSKI, P. Jerk limited feedrate profile optimization for nurbs toolpaths in cnc machines with h-bot kinematics. *Acta Mechanica et Automatica*, v. 19, n. 4, p. 665, 2025. 14, 23
- Filament2Print. *Extrusão Directa vs Bowden.* 2025. Blog. Disponível em: <https://filament2print.com/pt/blog/extrusao-directa-bowden>. Acesso em: 30 nov. 2025. 26
- HADISUJOTO, B.; WIJAYA, R. Development and accuracy test of a fused deposition modeling (fdm) 3d printing using h-bot mechanism. *International Journal of Computing and Engineering Disciplines (IJoCED)*, v. 3, n. 1, p. 46–52, 2021. 14, 22

HANNIFIN, P. *Tecnologia Eletromecânica: Apostila 1600.231.01 BR*. Jacareí, SP, 2003. Acesso em: 07 abr. 2026. 27

HOLANDA, I. J. G. *Análise da confiabilidade dimensional da impressora 3D tipo Core XY na produção de furos circulares*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)) — Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2023. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/75176>. 20, 30

IDÀ, E.; NANETTI, F.; MOTTOLA, G. An alternative parallel mechanism for horizontal positioning of a nozzle in an fdm 3d printer. *Machines*, MDPI, v. 10, n. 7, p. 542, 2022. 14, 22

KICKSTARTER; AUTODESK. *Kickstarter-Autodesk 3D-Printer Test*. [S.l.]: GitHub, 2026. <https://github.com/kickstarter/kickstarter-autodesk-3d>. Acesso em: 07 abr. 2026. 30, 31

Klipper Project. *Klipper Documentation*. 2025. Disponível em: <https://www.klipper3d.org/Overview.html>. Acesso em: 21 out. 2025. 20, 24

Klipper Project. *Resonance Compensation*. [S.l.], 2025. Documentação oficial. Disponível em: https://www.klipper3d.org/Resonance_Compensation.html. Acesso em: 03 dez. 2025. 25

Les Imprimantes 3D .fr. *Impression 3D pour les nuls : le guide pour tout comprendre*. 2025. Guia introdutório sobre impressão 3D. Disponível em: <https://www.lesimprimantes3d.fr/impression-3d-pour-les-nuls/>. Acesso em: 30 nov. 2025. 20

MARTINS, J. d. S. *Otimização de uma impressora 3D: implementação de um sistema para impressão em multicores e multimateriais*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica)) — Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2021. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/10996>. 26

MAXIMIANO, G. *Desenvolvimento de Sistema de Movimentação CoreXY para Impressora 3D*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica)) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2015. 17

NAZARENKO, V.; OSTROUSHKO, B. Comparative research of 3d printer main control parameters and characteristics utilising klipper firmware. *Machinery & Energetics*, Kyiv, v. 16, n. 1, p. 81–90, 2025. 14, 19, 27, 28

O'Connor, K. *Klipper Firmware Documentation*. 2023. <https://www.klipper3d.org>. 39, 40, 41

O'CONNOR, K. *Klipper Documentation: Kinematics*. [S.l.], 2026. Acesso em: 06 abr. 2026. Disponível em: <https://www.klipper3d.org/Kinematics.html>. 21, 22, 24, 25

OLEKSYSHEN, V. *et al.* Determination of geometric and kinematic characteristics of fdm 3d print process. *Technology audit and production reserves*, n. 2/1 (52), p. 19–24, 2020. 15, 24

PORTELA, S. *O que é firmware? Entenda sua importância na impressão 3D*. 2023. 3D Lab. Postado em Nível avançado. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/o-que-e-firmware/>. Acesso em: 30 nov. 2025. 24

Raspberry Pi Foundation. *Raspberry Pi 3 Model B Technical Specifications*. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org>. 39

Recreate 3D. *Recreate 3D Website*. 2025. Disponível na página inicial. Disponível em: <https://www.recreate3d.co.za>. Acesso em: 30 nov. 2025. 18

SANTANA, L. ***Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA***. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 14, 15, 17, 32

SIEPAMANN, M. R. *et al.* **Retrofitting de impressora 3D com monitoração e impressão online**. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 12, p. 80416–80438, dec 2022. ISSN 2525-8761. 14, 15, 32

Top 3D Shop. *3D Printers with Different Kinematics: Comparison, Advantages and Disadvantages*. 2019. Disponível em: <https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained>. Acesso em: 30 nov. 2025. 19, 20, 21

GLOSSÁRIO

- Bridging** Capacidade do sistema de extrudar e esticar cordões de filamento no ar entre dois pontos de suporte sem o auxílio de estruturas de suporte.
- Feedrate** Velocidade linear de avanço do cabeçote de impressão ou da taxa de extrusão durante a execução do código G, expressa habitualmente em mm/min ou mm/s.
- Ghosting** Defeito visual em peças impressas caracterizado por marcas leves de sombreamento ou duplicação de contornos próximo a cantos vivos, decorrente de vibrações mecânicas não amortecidas.
- Input Shaping** Técnica de controle de malha aberta utilizada pelo firmware para pré-filtrar os comandos de movimentação, cancelando as frequências de ressonância mecânica do sistema e mitigando o *ringing*.
- Jerk Limited** Estratégia de controle cinemático que limita a taxa instantânea de variação da aceleração (tranco) para proporcionar perfis de movimento mais suaves e reduzir estresses mecânicos.
- Moonraker** Servidor web desenvolvido em Python que atua como API intermediária entre o firmware Klipper e as interfaces de usuário (como Mainsail ou Fluidd).
- Overhangs** Geometrias ou superfícies de um modelo 3D que se projetam para fora no espaço sem suporte mecânico direto da camada imediatamente inferior.
- Pressure Advance** Algoritmo de compensação dinâmica de pressão no *hotend* que ajusta a vazão do extrusor durante acelerações e desacelerações para garantir largura de linha constante.
- Racking** Torção ou desalinhamento angular no pórtico de uma impressora 3D (especialmente em cinemáticas H-Bot e CoreXY) causado pela assimetria de forças nas correias ao longo da movimentação.
- Ringing** Ondulações ou marcas superficiais repetitivas em paredes impressas resultantes do efeito de ressonância e vibração transitória do chassi após desacelerações bruscas.
- Sagging** Deformação por cedeutura ou dezo de filamento fundido em pontes e saliências (*overhangs*) antes do resfriamento e solidificação do polímero.
- spreadCycle** Algoritmo proprietário de modulação de alta precisão presente em *drivers* da Trinamic (ex.: TMC2209) que maximiza o torque dinâmico e o desempenho em altas velocidades.

Stringing Formação indesejada de finos fiapos de polímero ao longo dos trajetos de deslocamento em vazio (*travel*) da cabeça de extrusão.

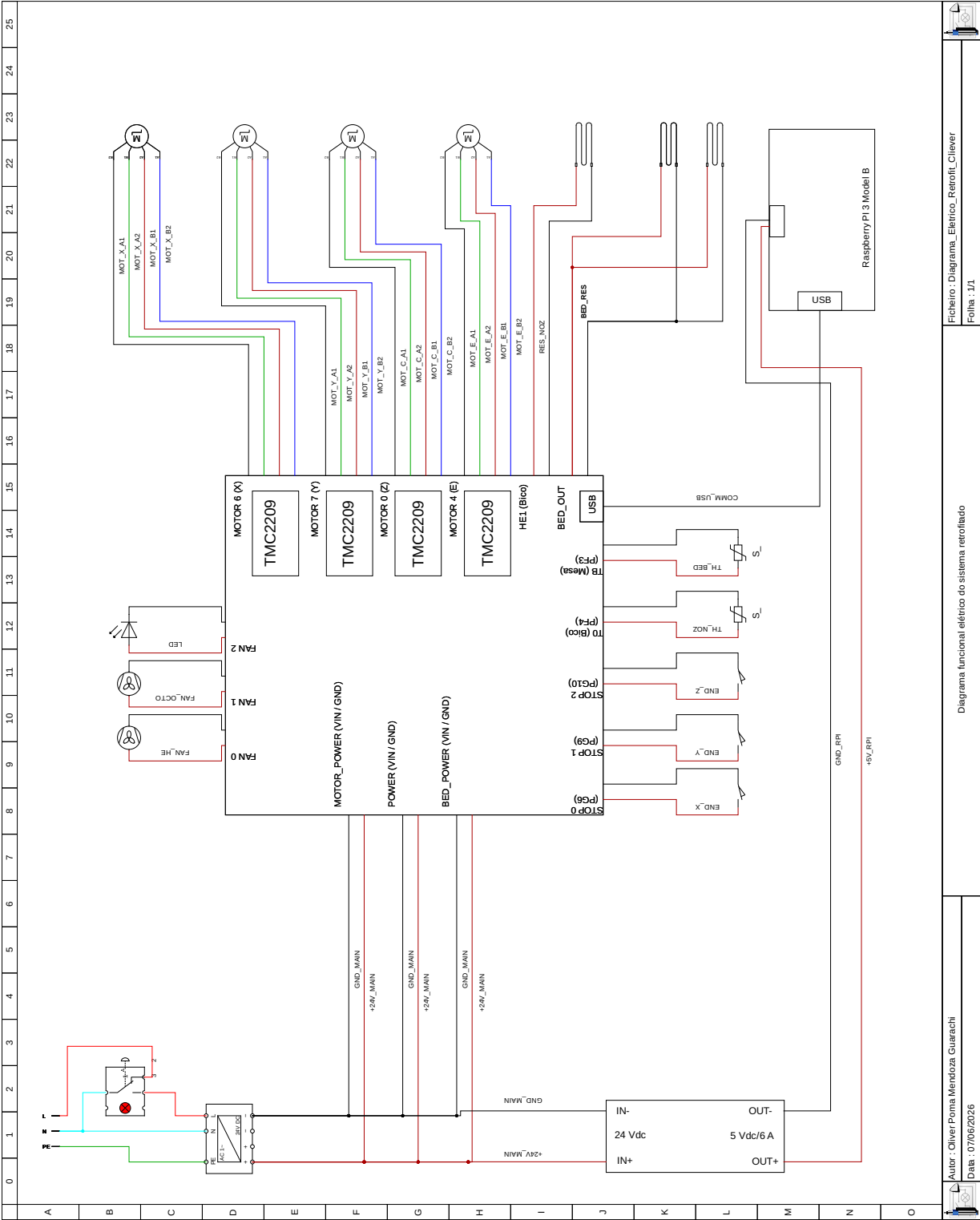
Stuttering Comportamento de pequenas interrupções imperceptíveis ou micros-pausas no movimento da impressora, causado por gargalo no processamento de comandos do código G pelo microcontrolador.

Z-banding Imperfeição na textura externa de uma peça caracterizada por linhas horizontais periódicas ao longo do eixo Z, originada por excentricidade nos fuso, folga mecânica ou oscilações térmicas de mesa.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DIAGRAMA FUNCIONAL ELÉTRICO

O diagrama apresentado a seguir representa a arquitetura de interconexão elétrica do sistema retrofitado, incluindo as ligações entre a fonte de alimentação 24 V, a placa controladora BIGTREETECH Octopus Pro v1.1, os drivers TMC2209, os motores de passo, os sensores de fim de curso, os elementos térmicos e o Raspberry Pi 3 Model B via conversor CC-CC dedicado de 5 V/6 A.



APÊNDICE B – MANUAL DE INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO KLIPPER

Este manual apresenta o passo a passo estruturado para a instalação do ecossistema Klipper na impressora Cliever CL2 Pro Plus modificada. O documento completo, composto por 40 páginas, abrange desde a preparação do sistema operacional Raspberry Pi OS até a integração dos serviços auxiliares Moonraker e da interface gráfica Mainsail, conforme apresentado a seguir.

Manual de Engenharia Mecatrônica: Instalação, Configuração Avançada, Diagnóstico e Segurança do Ecossistema Klipper para Retrofit

ÍNDICE:

ÍNDICE:	1
0. Como usar este manual na bancada	3
0.1 Diagnóstico rápido por sintoma	3
1. Protocolos Homologados de Segurança Elétrica e Diagnóstico de Bancada	4
1.1 Testes de Continuidade e Isolamento Galvânico	4
1.2 Validação Paramétrica dos Elementos Térmicos (Cálculo de Potência)	4
2. Arquitetura Operacional do Firmware Klipper (Divisão Host-MCU)	5
2.1 Pré-requisitos de bancada	5
3. Preparação e Instalação do Host Remoto (Raspberry Pi 3)	6
3.1 Resolução de Erros de Verificação Física no MicroSD (Uso do DiskPart)	6
3.2 Configuração inicial no Raspberry Pi Imager (Wi-Fi 2.4 GHz)	7
3.3 Diagnóstico de Boot por Código de Luzes (LEDs PWR e ACT)	8
4. Conectividade de Rede, Terminal SSH e Limpeza de Cache Criptográfico	9
4.1 Descoberta do Endereço IP do Host	10
4.2 Quebra de Conflito de Assinaturas de Segurança Criptográfica	10
5. Implantação Automatizada do Ecossistema de Software via KIAUH	11
6. Compilação, Gravação do Firmware e Mapeamento Serial da Placa Octopus Pro	13
6.2 Recuperação da Octopus Pro quando o firmware não grava: modo bootloader/DFU	14
7. Configuração da Cinemática CoreXY e Definição Estrutural de Performance	16
8. Mapeamento Lógico de Entradas Digitais e Diagnóstico do Endstop do Eixo X	16
8.1 Estudo de Caso de Engenharia: Anomalia de Cabo Rompido no Eixo X	17
9. Parametrização dos Drivers Inteligentes TMC2209 via Barramento UART	17
9.1 Endereçamento Unívoco em Barramentos UART Compartilhados	18
9.2 Teste e Depuração do Barramento UART	18
9.3 Teste de Movimentação Incremental Segura (Comando STEPPER_BUZZ)	19
10. Erros de Laço Aberto Térmico (ADC Out of Range) e Mapeamento da Mesa	20
10.1 Engenharia de Duplicação de Barramento Eletrotérmico da Mesa Cliever	20
11. Extensão de Cabos e Pinagem de Segurança para Sensores Niveladores CR Touch / BLTouch	21
11.1 Especificações do Condutor e Emendas	21
11.2 Mapeamento Rígido de Sinais e Riscos de Inversão de Tensão	21
12. Validação Cinemática Tridimensional e Blindagem do Eixo Vertical Z	22
12.1 Resolução Matemática de Erros de Limite Geométrico no Bloco do Eixo Z	22
12.2 Código Seguro Homologado para o Eixo Vertical	23
13. Biblioteca Avançada de Automação Mecatrônica por Macros de G-code	24
13.1 Macro de Inicialização Geral e Purga Dinâmica (START_PRINT)	24

13.2 Macro de Finalização e Evacuação Ergonômica (END_PRINT)	25
14. Interfaceamento Homologada com Fatiadores e Análise de Riscos Volumétricos	25
14.1 Sintonização de Gatilhos de Código (Start e End G-code)	25
14.2 Ajustes Críticos de Configuração de Extrusão	27
15. Procedimentos Práticos de Bancada e Recuperação	27
15.1 Fluxo recomendado de recuperação quando a Raspberry não conecta no Wi-Fi	27
15.1.1 Recuperação sem HDMI usando somente o microSD	27
15.1.2 Quando usar IP fixo e quando evitar	28
15.2 Sequência Segura para Validar Configuração Antes de Acionar Motores	28
15.2.1 Uso correto do SET_KINEMATIC_POSITION	28
15.3 TMC2209: Validação por UART Antes do Movimento	29
16. Calibração Térmica Avançada via Algoritmo PID (PID Tuning)	29
17.1. Fundamentação Teórica de Controle Térmico	29
16.2. Metodologia de Calibração em Malha Fechada	30
16.2.1. Procedimento Prático para o Extrusor (Hotend)	30
16.2.2. Procedimento Prático para a Mesa Aquecida (Heater Bed)	30
16.3. Consolidação e Persistência dos Parâmetros	31
16. Comandos rápidos de bancada	31
17. Configuração de IP Fixo via Cabo RJ45 (Ethernet)	32
17.1 Diagnóstico inicial da interface eth0	32
17.2 Procedimento de configuração	32
17.3 Comportamento resultante	33
18. Alteração da Rede Wi-Fi	33
18.1 Método via nmcli (recomendado, com acesso SSH ativo)	33
18.2 Método sem acesso SSH (editando o microSD no Windows)	33
18.3 Verificação após troca de rede	34

Este manual técnico foi desenvolvido para servir como guia definitivo e registro de engenharia para o processo de retrofit eletroeletrônico e lógico da impressora 3D Cliever. O projeto consiste na substituição completa do sistema proprietário original por uma arquitetura moderna baseada no firmware Klipper, utilizando um computador de placa única Raspberry Pi 3 como host computacional de processamento avançado e uma placa de controle industrial BigTreeTech Octopus Pro H723 dotada de microcontrolador STM32H723 de alta performance.

0. COMO USAR ESTE MANUAL NA BANCADA

Use a leitura em duas camadas: primeiro consulte o sumário operacional e o quadro de diagnóstico rápido; depois leia a seção completa apenas quando precisar entender a causa técnica.

Em caso de erro vermelho no Mainsail, pare a movimentação, copie exatamente a mensagem e consulte o quadro "Erro -> causa provável -> ação" antes de fazer novo homing.

Nunca execute G28 geral antes de validar todos os endstops individualmente com QUERY_ENDSTOPS.

0.1 DIAGNÓSTICO RÁPIDO POR SINTOMA

Sintoma na bancada	Causa provável	Ação imediata
ACT verde apagado no boot	Raspberry não leu o microSD	Regravar cartão; verificar fonte, leitor e encaixe.
ERR_CONNECTION_REFUSED no navegador	Mainsail/Moonraker não instalado ou parado	Verificar serviços: <code>sudo service moonraker status</code> .
REMOTE HOST IDENTIFICATION HAS CHANGED	Sistema foi reinstalado e a chave SSH mudou	Executar: <code>ssh-keygen -R IP_DA_RASPBERRY</code> .
ADC out of range / -80 C	Termistor aberto, solto ou pino errado	Verificar conector T0/TB; se ausente, comentar bloco temporariamente.
Endstop sempre TRIGGERED	Lógica invertida ou cabo rompido	Testar <code>QUERY_ENDSTOPS</code> ; corrigir ^/! ou refazer cabo.
STEPPER_BUZZ não move	TMC sem UART, VMOT ausente ou pino errado	Usar <code>DUMP_TMC</code> , conferir jumpers e alimentação 24 V.
Motor vibra e não gira	Bobinas A/B cruzadas	Identificar pares no multímetro e recrimpar conector.

1. PROTOCOLOS HOMOLOGADOS DE SEGURANÇA ELÉTRICA E DIAGNÓSTICO DE BANCADA

O processo de retrofit mecatrônico lida diretamente com circuitos de potência (linhas de 24 V e altas correntes), laços de indução eletromagnética de motores e elementos de alta dissipação térmica (aquecedores). Qualquer falha de isolamento, crimpagem inadequada ou inversão de polaridade pode resultar na queima instantânea de componentes semicondutores críticos ou em princípios de incêndio. Portanto, antes de energizar qualquer elemento lógico ou de potência, os seguintes procedimentos de instrumentação devem ser executados pelo operador:

1.1 TESTES DE CONTINUIDADE E ISOLAMENTO GALVÂNICO

Com o auxílio de um multímetro calibrado na escala de continuidade sonora (Bip), verifique sistematicamente a ausência de curto-circuito entre as linhas positivas (V+) e os canais de aterramento (GND) da fonte de alimentação de +24 V, bem como nos barramentos de entrada da Octopus Pro. Certifique-se de que a carcaça metálica da impressora esteja adequadamente aterrada e isolada eletricamente de qualquer pino de sinal lógico (+5 V ou +3.3 V) proveniente dos sensores de fim de curso e sondas.

1.2 VALIDAÇÃO PARAMÉTRICA DOS ELEMENTOS TÉRMICOS (CÁLCULO DE POTÊNCIA)

Os cartuchos aquecedores e a mesa térmica agem puramente como resistores puros de potência. Utilizando a Lei de Ohm e as equações térmicas fundamentais, é possível validar a integridade elétrica de emendas e cabos medindo a resistência estática diretamente nas extremidades dos fios que se conectam aos bornes da placa controladora. O cálculo da potência teórica gerada e a corrente consumida em regime permanente são regidos pelas equações:

$$I = V / R \qquad P = V^2 / R$$

Periférico Térmico	Resistência Medida (R)	Tensão Aplicada (V)	Corrente Calculada (I)	Potência Resultante (P)	Diagnóstico de Segurança de Bancada
Cartucho Aquecedor (Bico)	~15,0 Ohms	24,0 Volts	1,60 Amperes	38,4 Watts	Condição nominal perfeita para blocos aquecedores do tipo V6/Volcano. Leituras acima de 500 kOhms indicam cabos rompidos, crimpagem esmagada ou emendas abertas.
Mesa Aquecida (Barramento Duplicado)	~1,6 Ohms	24,0 Volts	15,00 Amperes	360,0 Watts	Corrente extremamente elevada. O circuito opera no limite de tolerância física dos fusíveis automotivos da Octopus Pro (15 A). Requer fiação com bitola mínima de 14 AWG (2,5 mm ²) e conectores perfeitamente torquados para evitar sobreaquecimento por efeito Joule nos bornes.

2. ARQUITETURA OPERACIONAL DO FIRMWARE KLIPPER (DIVISÃO HOST-MCU)

Para compreender as técnicas de diagnóstico de rede e falhas de comunicação abordadas neste manual, é mandatório dominar a separação conceitual de processamento empregada pelo Klipper, que rompe com os limites de firmwares monolíticos legados como o Marlin:

- **O Computador Host (Raspberry Pi 3):** Atua como o centro de processamento de alto nível. Sob o sistema operacional Linux, o Klipper executa cálculos complexos de compressão cinemática avançada. Ele lê o arquivo G-code pesado e planeja os momentos milimetricamente exatos em que cada passo do motor deve acontecer.

- **A MCU Controladora (BigTreeTech Octopus Pro H723):** Perde a função de "fatiar" o código e passa a atuar exclusivamente como um executor rígido programado por tempo em nível de hardware. Ela recebe os buffers de comandos cronometrados vindos do Host através do cabo USB e comuta em escala de microsegundos os pinos físicos dos drivers de passo, o acionamento PWM de saídas de potência de aquecedores e a leitura contínua dos canais analógicos de conversores ADC (termistores) e entradas digitais (endstops).

2.1 PRÉ-REQUISITOS DE BANCADA

Categoria	Itens recomendados
Hardware	Raspberry Pi 3, fonte 5 V / 2,5 A ou superior, microSD confiável, cabo USB de dados, Octopus Pro H723, fonte 24 V, drivers TMC2209.
Ferramentas	Multímetro, alicate de crimpagem, termorretrátil, ferro de solda, chaves e computador com terminal SSH.
Conhecimentos mínimos	SSH, edição com nano, leitura de pinout, continuidade e identificação de bobinas de motor de passo.
Segurança	Não energizar aquecedores sem termistor funcional; não executar G28 sem validar endstops; não deixar fiação de potência sem isolamento.

3. PREPARAÇÃO E INSTALAÇÃO DO HOST REMOTO (RASPBERRY PI 3)

O Host computacional exige um sistema enxuto, otimizado e livre de interfaces gráficas pesadas para mitigar variações de latência que poderiam travar o agendamento de passos dos motores. Portanto, o sistema operacional padrão homologado para este retrofit é o **Raspberry Pi OS Lite (32-bit)**.

3.1 RESOLUÇÃO DE ERROS DE VERIFICAÇÃO FÍSICA NO MICROSD (USO DO DISKPART)

Durante o processo de gravação do sistema operacional utilizando o software *Raspberry Pi Imager*, um erro comum e crítico pode surgir no estágio final: *"O conteúdo do cartão SD é diferente do que foi gravado nele"*. Essa falha de verificação indica corrupção estrutural de partições lógicas antigas, mau contato elétrico nos terminais do leitor USB ou setores danificados no silício do cartão SD. Para restaurar o dispositivo a um estado limpo de fábrica de forma profunda, execute o procedimento de baixo nível via terminal do Windows:

1. Abra o terminal de comandos (Prompt de Comando) do Windows como Administrador e execute o utilitário: diskpart
2. Solicite a listagem das mídias físicas conectadas ao computador: list disk
3. Identifique o número correspondente ao cartão MicroSD comparando rigorosamente a capacidade total exibida na tabela. Selecione o disco: select disk X (Substitua 'X' pelo número identificado. **Atenção:** Selecionar o índice incorreto apagará permanentemente os dados do disco rígido principal do computador).
4. Execute a limpeza profunda de tabelas de partições e mbr: clean
5. Encerre o utilitário: exit

Após esse procedimento, abra novamente o Raspberry Pi Imager e proceda com a gravação direta. O software se encarregará de reformatar e criar a tabela de alocação de arquivos adequada.

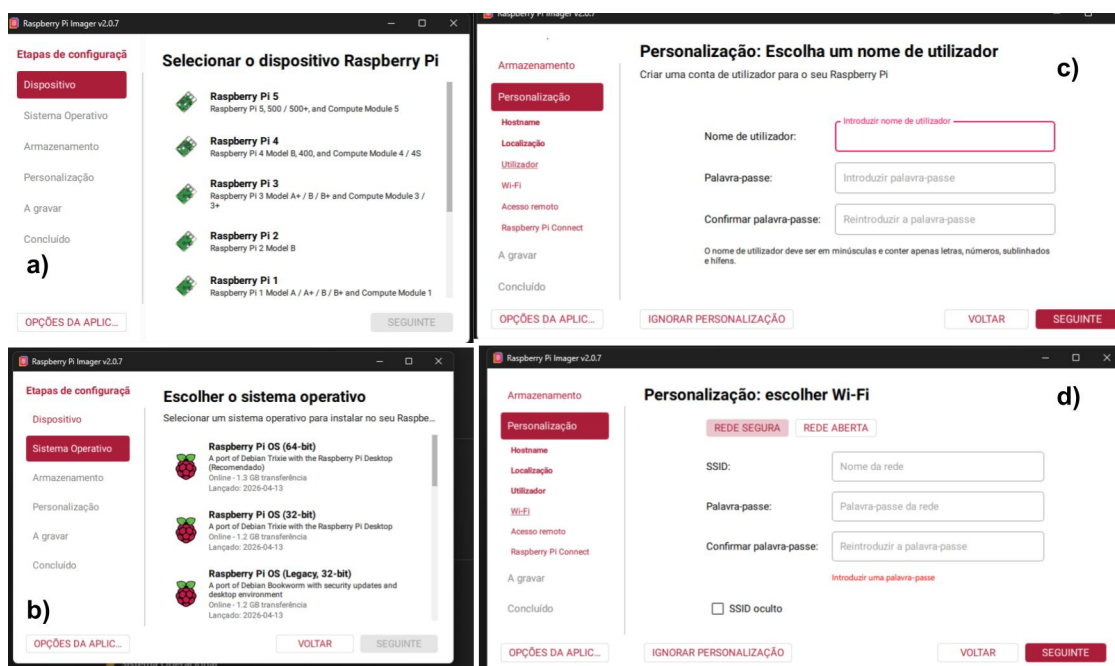
3.2 CONFIGURAÇÃO INICIAL NO RASPBERRY PI IMAGER (WI-FI 2.4 GHZ)

Antes de clicar no botão de gravação do Imager, acesse o menu de personalização avançada de imagem (ícone de engrenagem) e configure os parâmetros obrigatórios descritos abaixo para garantir o emparelhamento com a bancada física do projeto:

A Figura 1 resume visualmente as quatro telas principais do Raspberry Pi Imager usadas nesta etapa: seleção da Raspberry Pi, escolha do sistema, criação do usuário e configuração do Wi-Fi.

Figura 1 — Configuração inicial no Raspberry Pi Imager: seleção do dispositivo,

sistema operacional, usuário e Wi-Fi.



Fonte: captura de tela do próprio projeto, adaptada pelo autor.

- **a) Dispositivo:** Selecione a raspberry do seu projeto para fazer a instalação no cartão SD
- **b) Sistema Operacional:** Para a instalação do Klipper, a opção recomendada para a Raspberry Pi 3 é o Raspberry Pi OS Lite (32-bit), pelo fato de ser leve e poder ser usado pelo cmd as configurações, sem a necessidade de interface para raspberry.
- **c) Hostname:** Defina o rótulo de identificação de rede como cliever-klipper. Isto possibilita o acesso direto via protocolo mDNS digitando apenas cliever-klipper.local no navegador, suprimindo a necessidade de mapear IPs dinâmicos voláteis.
- **Acesso SSH:** Habilite obrigatoriamente o serviço de terminal seguro selecionando a opção de autenticação por senha. Crie o usuário master do sistema como cliever e atribua uma senha segura de sua preferência.
- **d) Restrição de Banda Wi-Fi (SSID):** Insira o nome exato e a credencial do ponto de acesso Wi-Fi ou roteador que será utilizado. **Nota de Projeto Crucial:** A placa mãe da Raspberry Pi 3 Model B (do projeto) possui um transceptor de rede sem fio nativo simplificado que opera estritamente na faixa de frequência de 2.4 GHz. Se o operador configurar a rede em um hotspot de smartphone ou roteador operando exclusivamente em 5 GHz, a placa jamais estabelecerá conexão. Certifique-se de configurar a rede do dispositivo de ancoragem ou roteador em modo misto de 2.4 GHz ou selecione explicitamente a opção "Maximizar Compatibilidade" nas configurações do roteador móvel. Defina o código do país do Wi-Fi como BR.

Figura 2 — Tela de revisão antes da gravação da imagem no cartão SD, com hostname, conta de usuário, Wi-Fi e SSH habilitados.

Gravar imagem

Rever as suas escolhas e gravar a imagem no dispositivo de armazenamento

Resumo

Dispositivo: **Raspberry Pi 3**
Sistema operativo: **Raspberry Pi OS Lite (64-bit)**
Armazenamento: **Mass Storage Device USB Device**

Personalizações a aplicar:

- Hostname configurado
- Localização configurada
- Conta de utilizador configurada
- Wi-Fi configurado
- SSH ativado

Fonte: captura de tela do próprio projeto, adaptada pelo autor. Observação: a captura pode variar conforme a versão do Imager; para a Raspberry Pi 3 deste projeto, a recomendação operacional do manual é utilizar Raspberry Pi OS Lite (32-bit).

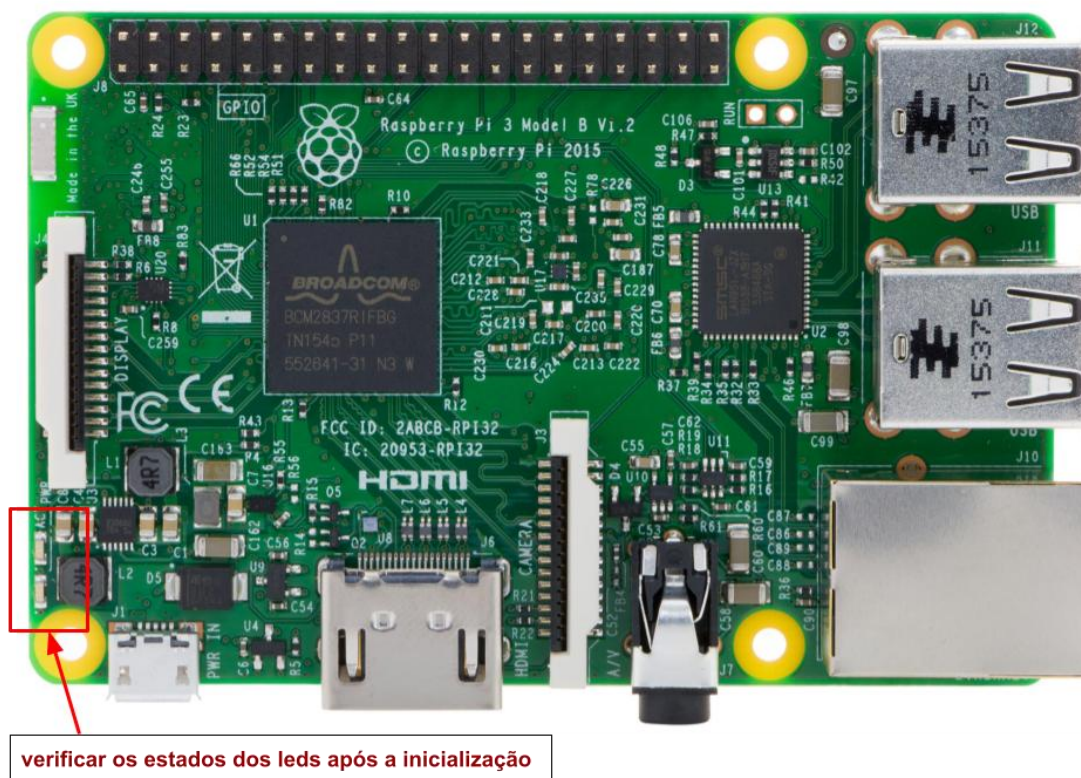
3.3 DIAGNÓSTICO DE BOOT POR CÓDIGO DE LUZES (LEDs PWR E ACT)

Insira o MicroSD gravado no slot da Raspberry Pi 3 e aplique alimentação de energia de alta qualidade. Se o Host não se conectar à rede, o diagnóstico inicial não deve ser feito tateando parâmetros lógicos do Wi-Fi, mas sim avaliando o comportamento ótico dos LEDs de status da placa mãe:

A Figura 2 mostra a tela de revisão do Imager antes da gravação. A Figura 3 indica a posição dos LEDs PWR e ACT usados para confirmar se o boot realmente iniciou.

Figura 3 — Localização dos LEDs PWR e ACT na Raspberry Pi 3 para diagnóstico

de alimentação e boot.



Fonte: imagem técnica utilizada no projeto, adaptada pelo autor.

- **LED PWR (Vermelho):** Deve permanecer aceso de forma contínua e estável. Se o LED vermelho oscilar, piscar de forma intermitente ou apresentar intensidade fraca, há uma queda severa de tensão elétrica na linha de entrada de 5 V. Isto é causado por fontes de baixa capacidade (corrente abaixo de 2.5 A) ou cabos micro-USB muito finos que geram alta queda de tensão por resistência. Substitua o conjunto de alimentação para evitar travamentos randômicos de barramento.
- **LED ACT (Verde):** Indica atividade de leitura física e execução de código do cartão de memória. O comportamento esperado é piscar intensamente e de forma irregular nos primeiros 30 segundos após ligar a placa. Se o LED verde permanecer totalmente apagado ou acender fixo sem piscar, significa que o estágio de boot inicial falhou por completo: o chip Broadcom não conseguiu ler os arquivos básicos da partição de boot ou o MicroSD está com mau contato elétrico no slot físico da placa mãe. Reinsira o cartão ou refaça o processo de gravação do zero.

4. CONECTIVIDADE DE REDE, TERMINAL SSH E LIMPEZA DE CACHE CRIPTOGRÁFICO

Com os LEDs operando em regime nominal (PWR estável e ACT indicando leitura), o Host estabelecerá conexão com a rede Wi-Fi configurada.

4.1 DESCOBERTA DO ENDEREÇO IP DO HOST

Se o protocolo mDNS falhar em resolver o hostname cliever-klipper.local no ambiente de rede Windows, abra o terminal do Windows (cmd) e execute uma varredura de vizinhança de rede consultando a tabela ARP:

```
arp -a
```

Filtre a lista de resultados buscando por dispositivos cujos endereços físicos MAC se iniciem com os prefixos regulamentados da fundação Raspberry Pi: b8-27-eb ou dc-a6-32. Ao localizar o endereço IP correspondente na tabela (ex: IP_DA_RASPBERRY), prossiga para a conexão segura.

4.2 QUEBRA DE CONFLITO DE ASSINATURAS DE SEGURANÇA CRIPTOGRÁFICA

Ao tentar o comando de conexão remota no terminal:

```
ssh cliever@IP_DA_RASPBERRY
```

O terminal pode travar e disparar uma mensagem alarmante em bloco vermelho:

A Figura 4 exemplifica esse erro no terminal Windows. Ele é esperado quando a Raspberry foi reinstalada e passou a apresentar uma nova chave SSH.

Figura 4 — Erro de assinatura SSH “REMOTE HOST IDENTIFICATION HAS

CHANGED” após reinstalação do sistema.

```

pi@10.202.110.149's password:
Connection closed by 10.202.110.149 port 22

C:\Users\P&D>ssh pi@10.202.110.149
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@    WARNING: REMOTE HOST IDENTIFICATION HAS CHANGED!    @
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
IT IS POSSIBLE THAT SOMEONE IS DOING SOMETHING NASTY!
Someone could be eavesdropping on you right now (man-in-the-middle attack)!
It is also possible that a host key has just been changed.
The fingerprint for the ED25519 key sent by the remote host is
SHA256:uOVFg50+K8Wo++2K/Gurzj0/60G/PbQLrZUGv4ZpGnk.
Please contact your system administrator.
Add correct host key in C:\\Users\\P&D\\.ssh\\known_hosts to get rid of this message.
Offending ED25519 key in C:\\Users\\P&D\\.ssh\\known_hosts:1
Host key for 10.202.110.149 has changed and you have requested strict checking.
Host key verification failed.

C:\Users\P&D>

```

Fonte: captura de tela do terminal Windows do próprio projeto.

Este erro ocorre por segurança criptográfica quando um dispositivo na rede é reinstalado ou substituído, fazendo com que a nova chave de identificação pública gerada pelo Host discorde da chave antiga armazenada no cache local do computador do usuário (arquivo `known_hosts`). Para quebrar esse bloqueio de segurança legitimamente e permitir a troca de dados, purgue o registro da chave antiga utilizando o comando de remoção direcionada:

```
ssh-keygen -R IP_DA_RASPBERRY
```

Após a execução, refaça o comando de conexão por SSH. O sistema solicitará a validação da nova impressão digital criptográfica; digite `yes` e insira a senha cadastrada para acessar o terminal Linux do Host.

5. IMPLANTAÇÃO AUTOMATIZADA DO ECOSSISTEMA DE SOFTWARE VIA KIAUH

No primeiro acesso ao IP do Host pelo navegador, o erro clássico *"Connection Refused"* é esperado e normal, visto que a pilha de servidores web do Mainsail e Moonraker ainda não foi compilada no Linux. Para orquestrar a instalação limpa dos pacotes sem erros de compilação, clonamos a ferramenta KIAUH (*Klipper Installation And Update Helper*):

```

sudo apt update && sudo apt install git -y
cd git clone https://github.com/dw-0/kiauh.git

```

```
cd                                                                    kiahuh
./kiahuh.sh
```

Dentro da interface de menu textual interativa do KIAUH, navegue até a opção de instalação (1. Install) e execute a instalação dos três componentes principais respeitando rigorosamente a seguinte sequência lógica de dependências de software:

A Figura 5 mostra o menu do KIAUH já aberto no terminal. A instalação deve seguir a sequência Klipper, Moonraker e Mainsail.

Figura 5 — Interface KIAUH após clonagem do repositório e abertura do instalador.

```
remote: Total 5651 (delta 1092), reused 944 (delta 942), pack-reused 4353 (f
Receiving objects: 100% (5651/5651), 2.38 MiB | 1.80 MiB/s, done.
Resolving deltas: 100% (3852/3852), done.
cliever@Cliever-Klipper:~ $ cd kiahuh
cliever@Cliever-Klipper:~/kiahuh $ ./kiahuh.sh
```

[KIAUH]	
Klipper Installation And Update Helper	
[Main Menu]	
0) [Log-Upload]	Klipper: Not installed Owner: - Repo: -
1) [Install]	Moonraker: Not installed Owner: - Repo: -
2) [Update]	
3) [Remove]	
4) [Advanced]	
5) [Backup]	Mainsail: Not installed Fluidd: Not installed Client-Config: -
5) [Settings]	
Community:	
E) [Extensions]	KlipperScreen: Not installed Crowsnest: Not installed
v6.2.1	Changelog: https://git.io/JnmlX
Q) Quit	

```
##### Perform action: _
```

Fonte: captura de tela do próprio projeto.

1. **Klipper:** Compila a base do firmware em Python no Linux (Ao ser questionado sobre o número de instâncias de impressora desejadas, configure 1).
2. **Moonraker:** Estabelece a infraestrutura do servidor de API estável para pontes de rede e recepção de arquivos de G-code.

3. **Mainsail:** Cria o servidor HTTP front-end que serve a interface web. Quando o instalador questionar sobre o mapeamento de portas lógicas, mantenha a porta padrão 80 para permitir o carregamento imediato ao digitar o IP.

Nota de Vinculação Crítica aos Grupos de Sistema: Durante o processo de compilação do Klipper pelo KIAUH, o script emitirá um alerta via terminal questionando se deve adicionar automaticamente o usuário master 'cliever' ao grupo de sistema de baixo nível 'tty' e 'dialout'. Responda obrigatoriamente que SIM (tecla Y). Sem este vínculo de direitos administrativos no Linux, os serviços lógicos do Klipper não terão permissão de segurança para abrir a porta serial física USB do Raspberry para se comunicar com a placa Octopus.

Concluída a instalação, reinicie o Host para aplicar as novas permissões do grupo e certifique-se de que os daemons de segundo plano estão rodando de forma saudável no sistema:

```
sudo # Após o retorno da placa, verifique os reboot
sudo service klipper status
sudo service moonraker status
```

O status retornado em texto no terminal para ambos os serviços deve ser categoricamente active (running).

6. COMPILAÇÃO, GRAVAÇÃO DO FIRMWARE E MAPEAMENTO SERIAL DA PLACA OCTOPUS PRO

Conecte a placa BigTreeTech Octopus Pro H723 ao Raspberry Pi utilizando um cabo de dados USB de alta blindagem com malha metálica. Para validar o reconhecimento físico do barramento USB pelo kernel Linux, execute o comando:

```
lsusb
```

Se a placa mãe Octopus Pro retornar na listagem de hardware contendo a string descritiva "STM32 DFU Mode", significa que o microcontrolador está travado em modo de bootloader nativo de fábrica (modo de gravação bruta via cabo), aguardando uma imagem binária. Para compilar o firmware adequado, acesse o menu interno do Klipper no Host:

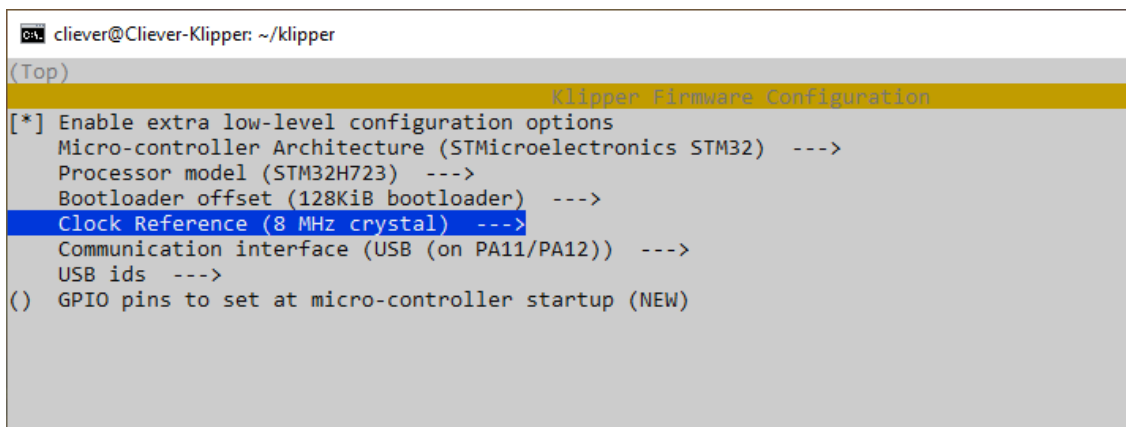
```
cd ~/klipper
make menuconfig
```

Configure rigorosamente os parâmetros de compilação de hardware específicos para a variante de processador H723 da Octopus Pro conforme a matriz abaixo:

A Figura 6 ilustra a tela do menuconfig usada para definir o processador STM32H723, o offset do bootloader e a comunicação USB.

- **Micro-controller Architecture:** Selecione STMicroelectronics STM32
- **Processor model:** Selecione o modelo exato STM32H723
- **Bootloader offset:** Defina o deslocamento padrão como 128KiB bootloader
- **Clock Reference:** Configure para cristal oscilador externo de 25 MHz crystal
- **Communication interface:** Escolha a interface estável de barramento USB (on PA11/PA12)

Figura 6 — Menu de configuração do firmware Klipper para a Octopus Pro H723.



Fonte: captura de tela do próprio projeto.

Pressione a tecla Q para sair e Y para salvar as especificações de compilação. Compile a imagem binária executando o comando:

```
make clean && make
```

O compilador gerará um arquivo de firmware final chamado klipper.bin dentro do diretório oculto ~/klipper/out/. Grave esse arquivo no MicroSD da placa Octopus (renomeando-o obrigatoriamente para firmware.bin), insira-o no slot da Octopus com a impressora desligada e ligue-a para que a placa faça a gravação automática. Após a inicialização bem-sucedida, a placa mudará do modo DFU bruto para o modo estável de comunicação serial do Klipper. Execute a listagem de mapeamento estável de periféricos de barramento no terminal Linux:


```
ls /dev/serial/by-id/
```

O sistema deve retornar a string de endereço estável e exclusiva que representa o barramento de comunicação do seu chip, semelhante ao padrão de bancada verificado no projeto:

```
/dev/serial/by-id/SERIAL_DA_SUA_MCU
```

Copie integralmente essa string única retornada pela sua placa, abra a interface web do Mainsail no seu navegador, navegue até a aba de arquivos de código, acesse o arquivo mestre de parametrização **printer.cfg** e vincule a linha de conexão sob o bloco estrutural do microcontrolador:

```
[mcu]
serial: /dev/serial/by-id/SERIAL_DA_SUA_MCU
```

6.2 RECUPERAÇÃO DA OCTOPUS PRO QUANDO O FIRMWARE NÃO GRAVA: MODO BOOTLOADER/DFU

Quando a gravação pelo cartão SD não gera a porta serial em `/dev/serial/by-id/` ou a placa continua aparecendo apenas como STM32 DFU Mode no comando `lsusb`, a Octopus Pro não entrou no firmware Klipper operacional. Nesse caso, o problema normalmente está no bootloader, no arquivo `firmware.bin` ou na etapa de gravação automática pelo cartão SD.

O caso encontrado na bancada foi o seguinte: o comando `ls /dev/serial/by-id/` não retornava a MCU, mas o `lsusb` indicava a placa como STMicroelectronics STM Device in DFU Mode. Isso significa que a placa estava viva eletricamente e era detectada pelo Linux, porém ainda estava presa no modo de bootloader/DFU, aguardando um firmware válido. As Figuras 7 a 9 documentam essa sequência de diagnóstico.

Antes de repetir a gravação, confirme três pontos: use um cabo USB que tenha dados, mantenha a alimentação da Octopus estável e confira se o arquivo gerado foi renomeado exatamente para `firmware.bin`. Não use nomes como `klipper.bin`, `firmware(1).bin` ou `firmware.bin.txt`. No Windows, ative a visualização de extensões para confirmar que o nome final não ficou como `firmware.bin.txt`.

```
cd ~/klipper
make menuconfig
make clean && make
```

No `menuconfig`, para a Octopus Pro H723, use a arquitetura STM32,

processador STM32H723, bootloader offset de 128 KiB, clock externo de 25 MHz e comunicação USB em PA11/PA12. Após compilar, copie o arquivo `~/klipper/out/klipper.bin` para o cartão SD da Octopus e renomeie-o para `firmware.bin`.

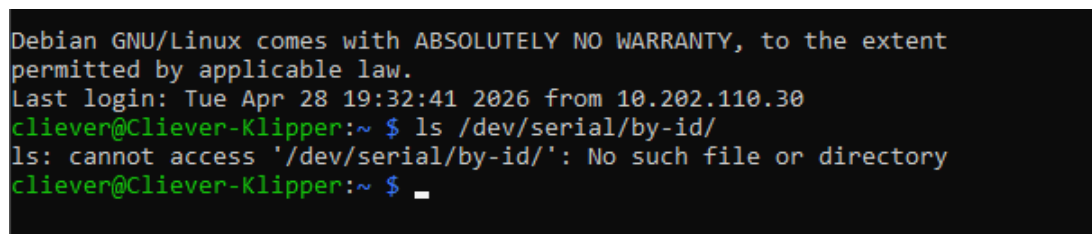
Com a placa desligada, insira o cartão SD na Octopus Pro e energize a placa. Aguarde alguns segundos. Se a gravação ocorrer corretamente, o `firmware.bin` será consumido pela placa e a Octopus passará a aparecer no Linux como um dispositivo serial do Klipper.

```
ls /dev/serial/by-id/
```

O resultado esperado é uma linha semelhante a `/dev/serial/by-id/usb-Klipper_stm32h723xx_...-if00`. Essa linha deve ser copiada integralmente para o bloco `[mcu]` do arquivo `printer.cfg`.

Se a placa continuar em DFU Mode, repita a gravação com outro cartão SD ou outro cabo USB de dados. Se a pasta do cartão SD mostrar apenas uma pasta ou arquivo chamado `FIRMWARE`, mas a serial não aparecer no Linux, a gravação não foi concluída corretamente e deve ser refeita.

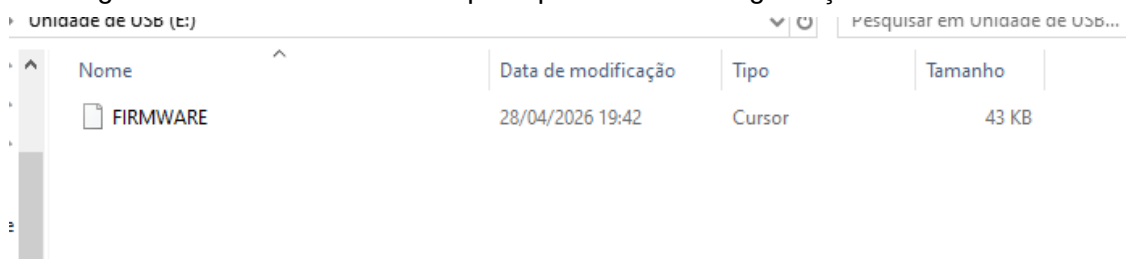
Figura 7 — Diagnóstico inicial sem retorno em `/dev/serial/by-id/`, indicando que a MCU ainda não foi exposta como serial Klipper.



```
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Tue Apr 28 19:32:41 2026 from 10.202.110.30
cliever@Cliever-Klipper:~ $ ls /dev/serial/by-id/
ls: cannot access '/dev/serial/by-id/': No such file or directory
cliever@Cliever-Klipper:~ $
```

Fonte: captura de tela do terminal do próprio projeto.

Figura 8 — Cartão SD da Octopus após tentativa de gravação do firmware.



Unidade de USB (E:)					Pesquisar em Unidade de USB...
	Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho	
	FIRMWARE	28/04/2026 19:42	Cursor	43 KB	

Fonte: captura de tela do explorador de arquivos do próprio projeto.

Figura 9 — Placa Octopus Pro detectada via `lsusb` como dispositivo STM32 em

modo DFU, indicando necessidade de gravação/recuperação do bootloader.

```

cliever@Cliever-Klipper:~$ lsusb
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
Bus 001 Device 002: ID 0424:9514 Microchip Technology, Inc. (formerly SMSC) SMC9514 Hub
Bus 001 Device 003: ID 0424:ec00 Microchip Technology, Inc. (formerly SMSC) SMC9512/9514 Fast Ethernet Adapter
Bus 001 Device 004: ID 0483:df11 STMicroelectronics STM Device in DFU Mode
cliever@Cliever-Klipper:~$

```

Fonte: captura de tela do terminal do próprio projeto.

7. CONFIGURAÇÃO DA CINEMÁTICA COREXY E DEFINIÇÃO ESTRUTURAL DE PERFORMANCE

Um erro teórico conceitual muito recorrente no retrofit de chassis da marca Cliever reside na parametrização da cinemática de movimentação. Estruturalmente, a disposição física de correias da máquina assemelha-se a um sistema H-Bot. Todavia, no ecossistema lógico do Klipper, as equações diferenciais de acoplamento vetorial que regem a comutação paralela dos motores planares esquerdo e direito (onde os eixos trabalham em conjunto para gerar vetores de movimento puro em X ou Y) funcionam de forma idêntica à modelagem matemática de uma impressora CoreXY. Configurar o firmware sob a diretiva de cinemática errada resultará em movimentos espelhados, eixos invertidos em 45 graus ou colisões mecânicas imediatas nas laterais.

Acesse o bloco geral [printer] e declare a cinemática correta, estabelecendo os limites iniciais conservadores de velocidade e dinâmica acelerativa para o início seguro dos testes práticos de bancada:

```

[include mainsail.cfg]      # Diretiva mandatória: vincula as macros básicas e o canal de
comunicação                                                         web

[printer]
kinematics: corexy          # Equações de acoplamento de motores X/Y acoplados
max_velocity: 150           # Velocidade linear máxima reduzida de segurança para testes
(mm/s)
max_accel: 1500             # Aceleração linear controlada de segurança (mm/s²)
max_z_velocity: 10          # Limite de translação vertical lenta do fuso do eixo Z (mm/s)
max_z_accel: 50             # Aceleração controlada do eixo vertical (mm/s²)

```

8. MAPEAMENTO LÓGICO DE ENTRADAS DIGITAIS E DIAGNÓSTICO DO ENDSTOP DO EIXO X

A validação dos sensores de fim de curso (endstops) é a barreira principal que impede danos estruturais graves na impressora. Antes de realizar qualquer comando de

posicionamento geral (Homing / “G28”), o operador deve testar a integridade lógica de cada entrada através do comando do console:

```
QUERY_ENDSTOPS
```

O firmware retornará o estado instantâneo lido de cada pino físico. O comportamento esperado e seguro em nível de engenharia é:

- **Pino Livre / Chave Aberta:** O console deve exibir categoricamente o estado open.
- **Pino Pressionado / Chave Clicada:** O console deve exibir instantaneamente o estado TRIGGERED.

Se uma entrada apresentar inversão lógica (exibindo TRIGGERED com a chave solta e open com ela pressionada), acesse a definição do pino correspondente no printer.cfg (ex: endstop_pin: PG9) e adicione o caractere de exclamação para inverter o sinal lógico em nível de software no microcontrolador: endstop_pin: !PG9. Adicione o caractere circunflexo ^ para ativar o resistor interno de pull-up da placa Octopus: endstop_pin: ^PG9.

8.1 ESTUDO DE CASO DE ENGENHARIA: ANOMALIA DE CABO ROMPIDO NO EIXO X

Durante a montagem da bancada do projeto, detectou-se um problema crítico no monitoramento do fim de curso do eixo X: a entrada correspondente permanecia travada no estado TRIGGERED de forma perpétua no Mainsail, ignorando totalmente o clique físico manual na chave microswitch. Para sanar essa falha por completo, o seguinte fluxo de diagnóstico eletrônico estruturado foi executado:

1. **Isolamento da Chave:** Desconectou-se o conector do sensor do chicote elétrico principal da impressora. Aplicou-se o multímetro diretamente nos terminais metálicos expostos do microswitch na escala de continuidade sonora. Ao pressionar a alavanca mecânica, o multímetro emitiu o sinal sonoro de forma perfeita, confirmando que a chave interna física e os contatos mecânicos do sensor estavam 100% operacionais e sem defeitos de fabricação.
2. **Medição de Impedância de Linha:** Conectou-se o sensor novamente e mediu-se a continuidade galvânica a partir da outra extremidade do cabo longo, diretamente no conector que se acopla aos pinos da Octopus Pro. Constatou-se que o multímetro falhou em emitir o sinal sonoro ao clicar na chave, indicando uma impedância resistiva anormalmente alta ou circuito aberto na linha de transmissão.
3. **Conclusão Técnica e Solução:** O diagnóstico confirmou a existência de um fio interno rompido no meio do chicote móvel, um esmagamento de condutor na estrutura de dobra ou uma crimpagem defeituosa com mau contato molecular

nos terminais JST do conector. A falha foi sanada através da substituição dos terminais JST dotados de crimpagem nova homologada, restaurando a transição imediata dos estados lógicos entre open e TRIGGERED no console.

Regra de Segurança Absoluta de Bancada: Enquanto o comportamento individual de cada endstop não alternar perfeitamente entre os estados nominalmente abertos e fechados no console via comando manual, nunca execute o comando G28 geral. Se o firmware falhar em ler a transição de um fim de curso por cabo partido ou lógica invertida, os motores continuarão forçando o movimento mecânico destrutivamente contra as extremidades metálicas do chassi, quebrando suportes plásticos e empenando eixos e fusos.

9. PARAMETRIZAÇÃO DOS DRIVERS INTELIGENTES TMC2209 VIA BARRAMENTO UART

A placa BigTreeTech Octopus Pro gerencia as correntes elétricas e os modos de interpolação de passos dos motores através da comunicação serial digital direta com os chips drivers TMC2209 usando barramento UART. No arquivo de configuração do Klipper, cada eixo exige o bloco de movimentação física do motor ([stepper_x]) e o bloco de parametrização lógica do chip driver correspondente ([tmc2209 stepper_x]).

9.1 ENDEREÇAMENTO UNÍVOCO EM BARRAMENTOS UART COMPARTILHADOS

Uma das maiores causas de travamento de software na inicialização da Octopus Pro é o erro de conflito de comunicação UART compartilhada. Os pinos de recepção e transmissão de dados seriais da placa de controle podem convergir para caminhos físicos comuns no circuito impresso dependendo do slot físico escolhido (do Slot M0 ao Slot M7). Para permitir que o microcontrolador STM32 direcione os comandos de corrente e micro-passos de forma isolada para cada driver sem sofrer colisão de dados no barramento, o operador deve obrigatoriamente declarar o parâmetro `uart_address` exclusivo para cada bloco configurado, conforme a engenharia de distribuição de pinos da placa:

```
[stepper_x]
step_pin:
dir_pin:
enable_pin:
microsteps:
rotation_distance:
```

PF13
!PF12
!PF14
16
40

```

endstop_pin: ^PG6
position_endstop: 300
position_max: 300

[tmc2209 stepper_x]
uart_pin: PC4
uart_address: 0
run_current: 0.800
hold_current: 0.500
stealthchop_threshold: 999999

[stepper_y]
step_pin: PG0
dir_pin: !PG1
enable_pin: !PF15
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PG9
position_endstop: 230
position_max: 230

[tmc2209 stepper_y]
uart_pin: PD11
uart_address: 1
run_current: 0.800
hold_current: 0.500
stealthchop_threshold: 999999

```

Aviso de Bancada: Certifique-se de validar a posição física real dos drivers nos slots físicos da sua placa Octopus Pro e confira a serigrafia do pinout exato do fabricante antes de fixar as linhas de mapeamento de pinos e endereços acima.

9.2 TESTE E DEPURAÇÃO DO BARRAMENTO UART

Após salvar as alterações lógicas e reiniciar o firmware, valide se a Octopus conseguiu ler e escrever nos chips drivers digitando no console:

```
DUMP_TMC STEPPER=stepper_x
```

Se o barramento estiver operacional, o console despejará uma lista complexa contendo os estados internos de registradores como GCONF, DRV_STATUS e CHOPCONF. Caso o sistema retorne o erro crítico "Unable to read tmc uart...", o microcontrolador está cego. O operador deve investigar fisicamente a ausência do jumper vermelho seletor de modo UART embaixo do driver na placa, drivers mal encaixados nos pinos pretos ou erro de digitação nos parâmetros uart_pin ou uart_address.

9.3 TESTE DE MOVIMENTAÇÃO INCREMENTAL SEGURA (COMANDO STEPPER_BUZZ)

Para verificar o sentido físico de rotação dos motores e garantir que os cabos de bobinas não estão invertidos, nunca use comandos globais de movimentação linear

como G1 X10. Esses comandos exigem homing prévio e assumem acelerações plenas. O recurso mecatrônico mais seguro para testes iniciais de motores isolados chama-se:

```
STEPPER_BUZZ STEPPER=stepper_x
```

Este comando ignora completamente os sensores de fim de curso e faz o motor selecionado executar um movimento infinitesimal controlado: ele gira suavemente 1 mm para frente e retorna exatamente 1 mm para trás, repetindo esse ciclo dez vezes seguidas. Se o eixo vibrar intensamente fazendo barulho metálico e falhar em se deslocar, os pares de bobinas elétricas internas do motor estão cruzados ou em ordem errada no conector. Corrija a pinagem física dos fios do motor seguindo a matriz de sintomas abaixo:

Sintoma Dinâmico Verificado	Causa Raiz Provável do Problema	Ação de Correção Técnica na Bancada
O motor permanece totalmente inerte, sem torque e sem calor estático.	O pino de habilitação lógica (`enable_pin`) está incorreto ou invertido com o caractere `!`, ausência de alimentação de potência de 24 V na linha VMOT, ou driver desconectado da UART.	Verifique o estado físico da fiação de potência de 24 V nos bornes e revise a inversão lógica do pino de enable no arquivo de configuração do eixo.
O motor apresenta torque estático (trava o eixo manual), mas falha por completo em girar ao comando.	Mapeamento dos pinos de passo (`step_pin`) ou direção (`dir_pin`) incorretos no arquivo de texto, ou cruzamento de bobinas com pares incorretos.	Consulte o diagrama oficial do fabricante para conferir a trilha exata dos pinos da Octopus Pro H723.
O motor vibra intensamente de forma ruidosa, perde o sincronismo magnético e não translada.	Fios das bobinas internas do estator conectados em ordem errada no terminal metálico JST da placa (Incompatibilidade de pinagem de fases A e B do motor).	Utilize o multímetro em modo ohmímetro para identificar os dois pares de bobinas independentes. Agrupe o primeiro par nos pinos centrais ou externos do conector conforme o padrão do driver.
Ao comandar o `STEPPER_BUZZ` em um eixo específico, um eixo físico totalmente diferente se move.	Erro de mapeamento lógico de pinos de slots de motores cruzados dentro do arquivo `printer.cfg`.	Troque a fiação física de posição nos bornes da placa controladora ou remapeie a pinagem dos eixos no código de configuração do Klipper.

10. ERROS DE LAÇO ABERTO TÉRMICO (ADC OUT OF RANGE) E MAPEAMENTO DA MESA

Por diretivas rígidas de proteção contra incêndios, o Klipper monitora continuamente

os conversores analógico-digitais (ADC) conectados aos termistores. Se a leitura de tensão do canal analógico flutuar para os extremos da tabela de calibração do chip, o firmware interpreta que o laço de feedback térmico foi rompido e trava instantaneamente o sistema exibindo o erro: "MCU 'mcu' shutdown: ADC out of range".

Se o painel do Mainsail registrar leituras estáticas anormais contendo valores negativos extremos de -80 °C ou -88 °C, o termistor correspondente encontra-se em circuito aberto devido a um fio quebrado, pino ADC incorreto no arquivo de texto, conector frouxo com oxidação ou queima física do sensor de temperatura. Investigue os canais elétricos padrão:

- **Termistor do Hotend (Bico):** Verifique as conexões físicas no canal T0 (Pino PF4 na Octopus Pro) e garanta a integridade mecânica dos finos fios de vidro isolados com Teflon na cabeça de impressão.
- **Termistor da Mesa Aquecida:** Conecte o sensor de temperatura da mesa no canal de leitura analógica TB (Pino PF3 na Octopus Pro).

Procedimento de Contingência em Bancada: Durante o desenvolvimento estruturado do projeto, se o termistor físico da mesa aquecida estiver ausente ou danificado e o operador necessitar continuar testando os eixos mecânicos e motores sem sofrer o travamento impeditivo por 'ADC out of range' na inicialização, o bloco inteiro correspondente à mesa aquecida [heater_bed] deve ser totalmente isolado e desativado temporariamente adicionando o caractere hash (#) na frente de cada uma de suas linhas, conforme exemplificado no código de bancada:

```
#[heater_bed]
#heater_pin:                                PA1
#sensor_type:                               EPCOS          100K          B57560G104F
#sensor_pin:                                PF3
#control:                                   watermark
#min_temp:                                  0
#max_temp: 130
```

10.1 ENGENHARIA DE DUPLICAÇÃO DE BARRAMENTO ELETROTÉRMICO DA MESA CLIEVER

A mesa aquecida original do chassi Cliever submetido ao retrofit apresenta uma fiação contendo quatro condutores elétricos independentes saídos da malha interna. Para realizar a interface correta com os bornes de potência de saída da Octopus Pro, realizou-se o mapeamento paramétrico de resistências elétricas cruzadas entre as pontas de fios utilizando o multímetro em escala de precisão de Ohms, revelando a seguinte assinatura estrutural:

- A medição galvânica entre o Fio 1 e o Fio 4 retornou o valor estático de 0 Ohms (Continuidade metálica direta perfeita).
- A medição galvânica entre o Fio 2 e o Fio 3 retornou o valor estático de aproximadamente 0,2 Ohms (Continuidade metálica direta perfeita com mínima resistência interna de cabo).
- A medição galvânica cruzada entre os dois grupos independentes (conectando as pontas de teste entre o Fio 1 e o Fio 2) revelou a resistência nominal real da malha de aquecimento interna, marcando estáveis 1,6 Ohms.

Conclusão da Análise de Engenharia: Esta assinatura elétrica prova que a mesa não possui duas resistências térmicas independentes acessíveis separadamente, mas sim um único circuito de aquecimento interno de altíssima potência dotado de linhas de fiação duplicadas em paralelo na fábrica para dividir a pesada corrente elétrica e mitigar falhas por fadiga térmica nos cabos móveis. Portanto, para conectar o conjunto de forma correta e segura nos bornes de saída de potência da Octopus Pro (BED_OUT), o operador deve obrigatoriamente unificar os cabos em pares paralelos simétricos:

- **Polo Positivo Principal (BED_OUT +):** Junte o Fio 1 e o Fio 4 firmemente no mesmo terminal metálico.
- **Polo Negativo Principal (BED_OUT -):** Junte o Fio 2 e o Fio 3 firmemente no mesmo terminal metálico.

11. EXTENSÃO DE CABOS E PINAGEM DE SEGURANÇA PARA SENSORES NIVELADORES CR TOUCH / BLTOUCH

A implementação de sensores de nivelamento geométrico automático do tipo CR Touch ou BLTouch na placa de controle Octopus Pro exige a extensão física do chicote elétrico original de cinco vias para vencer o curso completo até a cabeça de impressão da impressora Cliever. Como os sinais lógicos que trafegam por essas vias operam sob correntes na escala de miliamperes e pulsos digitais sensíveis a ruídos, o operador deve seguir rigorosamente as especificações mecânicas e de pinagem descritas abaixo:

11.1 ESPECIFICAÇÕES DO CONDUTOR E EMENDAS

Utilize cabos flexíveis de cobre com bitola nominal entre 24 AWG e 26 AWG para estender as linhas do sensor. Condutores muito espessos adicionam peso indevido e inércia mecânica ao carro de impressão, enquanto fios extremamente finos

(acima de 28 AWG) apresentam fragilidade mecânica a flexões repetidas, quebrando facilmente no meio da esteira porta-cabos. Todas as emendas físicas de extensão devem ser soldadas com estanho em nível molecular e isoladas individualmente com fita isolante de alta qualidade ou espaguete termoretrátil para blindar o circuito contra curtos-circuitos causados pelo atrito mecânico móvel.

11.2 MAPEAMENTO RÍGIDO DE SINAIS E RISCOS DE INVERSÃO DE TENSÃO

Aviso Crítico de Engenharia: As cores dos fios fornecidas nos chicotes comerciais de sensores BLTouch e CR Touch mudam constantemente dependendo do lote ou fabricante. Nunca confie cegamente nas cores dos cabos para realizar as conexões nos pinos de sensores da Octopus Pro. Conectar o pino de alimentação de 5 V invertido com o pino de aterramento (GND) destruirá instantaneamente o circuito integrado interno do sensor por sobrecorrente térmica, além de poder danificar o regulador de tensão linear de 5 V da placa controladora. O operador deve consultar o manual técnico específico do lote do sensor e cruzar com os pinos físicos do conector de servo/probe da Octopus seguindo a lógica de sinais estruturada na tabela:

Função Lógica do Sinal	Pino Alvo Oficial (Octopus Pro)	Descrição Técnica Mecatrônica do Sinal
+5 V (Power)	Pino de VCC (+5V) do Bloco de Servos	Linha de alimentação de corrente contínua estável para ativação do solenoide magnético interno e alimentação do sensor Hall.
GND (Ground Lógico)	Pino de GND do Bloco de Servos	Canal de aterramento comum e referência de potencial elétrico para a linha lógica de alimentação do sensor.
Servo / Control (PWM)	Pino de Controle PWM (ex: PB0 / Servo)	Linha de transmissão de ondas de pulso modificado (PWM) enviadas pelo Klipper para comandar a retração ou extensão física do pino agulha do sensor.
GND do Probe	Pino de GND do Bloco de Sensor/Endstop	Linha de aterramento isolada ou comum dedicada exclusivamente para mitigar ruídos eletromagnéticos no sinal de leitura digital do switch.

Função Lógica do Sinal	Pino Alvo Oficial (Octopus Pro)	Descrição Técnica Mecatrônica do Sinal
Sinal do Probe (OUT)	Pino de Entrada Digital (ex: PB7 / Probe)	Canal de entrada digital de interrupção que envia o pulso lógico ao Klipper no instante milisegundo em que o pino agulha toca a mesa física.

12. VALIDAÇÃO CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL E BLINDAGEM DO EIXO VERTICAL Z

A correta parametrização geométrica e cinemática do eixo vertical Z é a etapa de maior refinamento matemático do firmware. Como a impressora Cliever possui o bico montado no topo e a mesa se deslocando fisicamente para baixo ao longo do eixo mecânico, o acionamento do sensor de fim de curso (microswitch) acontece na base inferior da estrutura da máquina, caracterizando uma configuração de Z-Max físico.

12.1 RESOLUÇÃO MATEMÁTICA DE ERROS DE LIMITE GEOMÉTRICO NO BLOCO DO EIXO Z

Durante os testes práticos de nivelamento e ajuste de primeira camada na bancada, após descer o bico até que ele belisque a folha de papel para marcar o ponto de contato mecânico de referência zero absoluto ($Z = 0$), o operador executa o comando automático `SAVE_CONFIG`. O Klipper processa a cinemática reversa e calcula que a distância real total percorrida a partir do clique físico do sensor óptico/mecânico de Z-Max lá embaixo até encostar no bico é de, por exemplo, 450.270 mm.

O firmware tenta gravar esse valor real calibrado de forma automatizada no arquivo de texto. Todavia, se o operador mantiver o parâmetro primitivo `position_max` definido estritamente como 450 no bloco principal `[stepper_z]`, o Klipper entrará em conflito lógico imediato durante a inicialização e travará a impressora exibindo a tela vermelha de erro impeditivo: "position_endstop in section 'stepper_z' must be between position_min and position_max".

Esse travamento de segurança ocorre por uma restrição algorítmica matemática simples: o Klipper recusa a inicialização porque o valor real de fim de

curso medido pela máquina (450.270) extrapolou o teto máximo de software permitido pelo parâmetro `position_max` (450). Para quebrar esse erro lógicos de validação e blindar a impressora contra colisões ou danos estruturais destrutivos em futuras impressões, aplique estritamente as regras de restrição simétrica de segurança no bloco:

1. **Ajuste Enxuto do Fundo (`position_max`: 451.0):** Altere o limite superior para 451.0 mm. Ao estender o teto de software em menos de 1 mm além do ponto real do clique físico do switch (450.27), garantimos que o firmware aceite inicializar o sistema de forma limpa. Ao mesmo tempo, limitamos fisicamente a descida: se houver uma falha de código, a mesa andará no máximo 0,73 mm após acionar o microswitch, uma distância mínima totalmente absorvida pelo curso elástico da alavanca metálica da chave, impedindo que a mesa esmague e quebre o sensor físico ou bata contra a base metálica do chassi.
2. **Proteção Anti-Esmagamento de Primeira Camada (`position_min`: -0.5):** Reduza drasticamente o limite negativo mínimo padrão (como -5.0 mm) para apenas -0.5 mm. O parâmetro `position_min` dita o quão profundamente a mesa tem permissão de subir além do ponto zero de contato do papel. Restringir este valor a no máximo -0.5 mm garante que o operador consiga fazer o ajuste fino milimétrico da primeira camada (*Live Z-Offset / Babystepping*) sem problemas, mas cria uma blindagem matemática inviolável: se o fatiador gerar um arquivo contendo um comando negativo absurdo ou errôneo, a mesa parará imediatamente ao atingir meio milímetro além do bico, bloqueando colisões violentas que quebrariam a mesa de vidro ou empenariam o cabeçote.

12.2 CÓDIGO SEGURO HOMOLOGADO PARA O EIXO VERTICAL

O bloco definitivo seguro do eixo vertical no seu arquivo `printer.cfg` deve ser estruturado conforme o exemplo de engenharia abaixo:

```
[stepper_z]
step_pin:                                PF14
dir_pin:                                 !PF13
enable_pin:                              !PF15
microsteps:                              16
rotation_distance:                        4
endstop_pin:                             ^PG10
homing_speed:                             10
position_max: 451.0                       # Limite superior expandido de segurança (Fundo enxuto)
position_min: -0.5                         # Blindagem anti-esmagamento contra a mesa de vidro (Topo
seguro)
homing_positive_dir: true                 # Indica orientação cinemática em direção ao Z-Max físico
(Fundo)
homing_retract_dist:                      5.0
```

Aviso Crítico de Edição Manual: As linhas de parâmetros calculadas e salvas automaticamente pelo comando `SAVE_CONFIG` são injetadas pelo firmware de forma isolada nas últimas linhas do arquivo, dentro de um bloco delimitado por comentários contendo as tags `## <----- SAVE_CONFIG ----->`. Nunca

tente editar, apagar ou reorganizar manualmente os valores contidos naquela seção final. Modifique exclusivamente os blocos principais localizados no topo do arquivo.

13. BIBLIOTECA AVANÇADA DE AUTOMAÇÃO MECATRÔNICA POR MACROS DE G-CODE

As macros estendem as capacidades do Klipper ao encapsular lógicas condicionais complexas baseadas na sintaxe do interpretador Jinja2 e comandos G-code puros, convertendo rotinas de bancada em botões automatizados inteligentes e simplificando o interfaceamento com softwares de fatiamento de mercado.

13.1 MACRO DE INICIALIZAÇÃO GERAL E PURGA DINÂMICA (START_PRINT)

Esta macro gerencia todo o ritual de preparação térmica e mecânica pré-impressão. Ela intercepta as variáveis de temperatura do filamento geradas pelo fatiador, liga a mesa aquecida e executa o comando de Homing (G28) somente com o plano aquecido (garantindo que as dilatações térmicas dos metais da estrutura sejam computadas no cálculo do zero físico). Na sequência, ela aquece o bico até a temperatura estável e executa uma trilha geométrica de purga de dupla camada no canto esquerdo da mesa para limpar o bocal e pressurizar a extrusora antes do desenho da peça:

```
[gcode_macro START_PRINT]
description: Ritual automatizado de preparação térmica, sincronismo e linha de purga lateral
gcode:
    # Coleta de variáveis dinâmicas enviadas pelo fatiador com fallbacks de segurança
    {% set BED_TEMP = params.BED_TEMP|default(60)|float %}
    {% set EXTRUDER_TEMP = params.EXTRUDER_TEMP|default(200)|float %}

    M117 Estabilizando termicamente a mesa...
    M140 S{BED_TEMP} # Inicia aquecimento da mesa sem prender a CPU
    M190 S{BED_TEMP} # Comando de bloqueio ativo: aguarda estabilização térmica da mesa
    total da mesa

    M117 Sincronizando eixos (Homing)...
    G28 # Executa o Homing mecânico com a estrutura estabilizada quente

    G90 # Ativa modo de coordenadas absolutas
    G1 X5 Y5 Z10 F5000 # Deslocamento rápido para o ponto frontal esquerdo de espera segura

    M117 Elevando hotend ao ponto de fusão...
    M104 S{EXTRUDER_TEMP} # Inicia aquecimento do bico
    M109 S{EXTRUDER_TEMP} # Comando de bloqueio ativo: aguarda ponto estável de fusão do polímero
```

```

M117      Executando      purga      e      limpeza      de      bocal...
G1 Z0.3 F300      # Seta altura da primeira linha colada na mesa
G91      # Ativa temporariamente o modo de coordenadas relativas
G1 X100 E20 F1200      # Trilha linear frontal imprimindo e expelindo 20mm de
plástico
G1 Y3 F1200      # Afastamento de segurança lateral em Y
G1 X-100 E20 F1200      # Trilha linear de retorno depositando mais 20mm de
plástico
G90      # Restabelece o modo de coordenadas absolutas de forma
mandatória
G92 E0      # Reseta o contador linear do motor de extrusão para zero
M117 Primeira camada liberada.

```

13.2 MACRO DE FINALIZAÇÃO E EVACUAÇÃO ERGONÔMICA (END_PRINT)

Garante que, ao término da impressão de um modelo, a cabeça de impressão não permaneça parada em cima da peça derretendo o topo do plástico e acumulando calor. A macro executa uma retração de alívio rápido de pressão interna, levanta o bico e desloca a mesa inteira para a frente, desligando os aquecedores de forma segura:

```

[gcode_macro      END_PRINT]
description: Evacuação de segurança, alívio de pressão térmica e desativação de periféricos
gcode:
  G91      # Ativa modo de movimento relativo
  G1 E-2 Z5 F2400      # Retrai 2mm de filamento (anti-baba) e afasta o bico 5mm
para      cima      da      peça
  G90      # Retorna para o modo absoluto
  G1 X0 Y220 F5000      # Afasta o bico para a lateral X=0 e projeta a mesa para
a      frente      (Y=220)      para      coleta

  # Desconexão controlada de potências elétricas por segurança ativa
  M104 S0      # Desliga o aquecedor do bico (Extruder = 0C)
  M140 S0      # Desliga o aquecedor da mesa (Bed = 0C)
  M106 S0      # Desliga a ventoinha de resfriamento da peça (Cooler
fan)
  M84 X Y E      # Desativa motores X, Y e Extrusora (Mantém Z energizado
contra      quedas      por      gravidade)
  M117      Impressao      finalizada      com      sucesso.

```

14. INTERFACEAMENTO HOMOLOGADA COM FATIADORES E ANÁLISE DE RISCOS VOLUMÉTRICOS

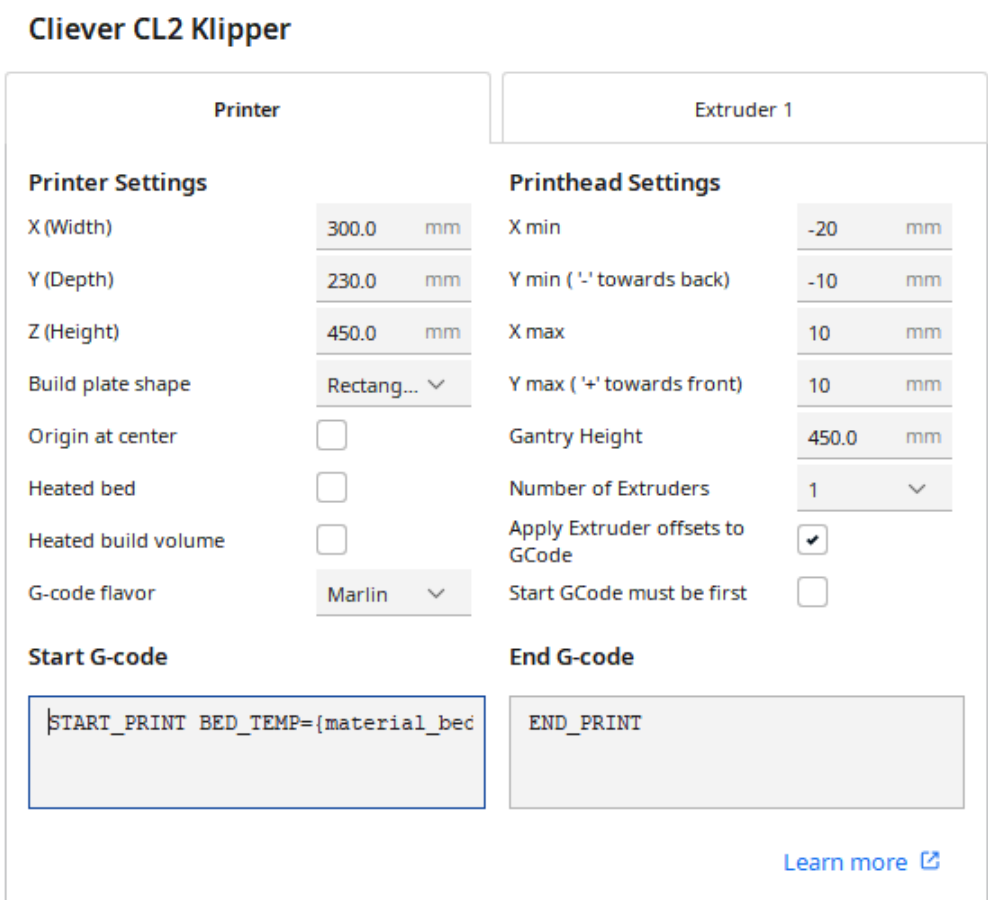
Transferida toda a inteligência de preparação e rituais operacionais para dentro do Klipper através das macros construídas, o software fatiador passa a atuar de forma limpa, servindo puramente como um gerador de coordenadas matemáticas planares e espaciais de deposição. Você está totalmente livre para utilizar o fatiador de sua preferência (Ultimaker Cura, OrcaSlicer ou PrusaSlicer).

14.1 SINTONIZAÇÃO DE GATILHOS DE CÓDIGO (START E END G-CODE)

Para que o fatiador converse com as macros do seu printer.cfg de forma automatizada, acesse as configurações de perfil da impressora customizada dentro do fatiador escolhido e limpe as caixas textuais nativas, inserindo exclusivamente os comandos dinâmicos mapeados na tabela:

A Figura 10 mostra um exemplo de perfil no Cura com as dimensões principais da máquina e os comandos START_PRINT e END_PRINT configurados.

Figura 10 — Configuração do perfil da impressora no Ultimaker Cura e comandos START_PRINT/END_PRINT.



Fonte: captura de tela do próprio projeto, adaptada pelo autor.

Software Fatiador	Texto Exato OBRIGATÓRIO na caixa "Start G-code"	Texto Exato na caixa "End G-code"
Ultimaker Cura	START_PRINT BED_TEMP={material_bed_tem perature_layer_0} EXTRUDER_TEMP={material_pr int_temperature_layer_0}	END_PRINT

Software Fatiador	Texto Exato OBRIGATÓRIO na caixa "Start G-code"	Texto Exato na caixa "End G-code"
OrcaSlicer	START_PRINT BED_TEMP=[first_layer_bed_temperature] EXTRUDER_TEMP=[first_layer_temperature]	END_PRINT
PrusaSlicer	START_PRINT BED_TEMP=[first_layer_bed_temperature] EXTRUDER_TEMP=[first_layer_temperature]	END_PRINT

14.2 AJUSTES CRÍTICOS DE CONFIGURAÇÃO DE EXTRUSÃO

Ao criar o perfil da impressora customizada (*Custom FFF Printer*) na aba de configurações da extrusora, o operador deve atentar-se com rigor máximo a dois parâmetros:

- **Heated Bed (Mesa Aquecida):** Esta caixinha de seleção deve ser obrigatoriamente MARCADA. Se o operador esquecer essa opção desmarcada, o fatiador assumirá que a máquina é desprovida de resistência na mesa, injetando sempre o valor estático BED_TEMP=0 na macro inicial, impedindo o aquecimento elétrico da plataforma.
- **Nozzle Size (Tamanho Nominal do Bico):** O valor padrão que costuma carregar nas definições do Cura é 0.3 mm. Todavia, a imensa maioria dos bocais instalados fisicamente em projetos de retrofit utiliza a medida padrão de 0.4 mm. Se o bico real fixado na máquina for de 0.4 mm e o fatiador processar o código assumindo a variável como 0.3 mm, o fatiador calculará uma vazão volumétrica de filamento muito menor do que o canal físico necessita. Isto resultará em uma sub-extrusão crônica severa, gerando camadas cheias de furos, linhas descoladas, aspecto esponjoso e peças frágeis que quebram ao mínimo toque manual. Altere o valor para 0.4 mm.

15. PROCEDIMENTOS PRÁTICOS DE BANCADA E RECUPERAÇÃO

Esse complemento não substitui nenhuma etapa anterior do manual: ele acrescenta procedimentos operacionais, checklists e correções de bancada levantadas durante a instalação real da Raspberry Pi, da Octopus Pro H723 e do Klipper. Use esta parte como roteiro prático quando estiver na bancada, especialmente quando não houver monitor HDMI disponível.

15.1 FLUXO RECOMENDADO DE RECUPERAÇÃO QUANDO A RASPBERRY NÃO CONECTA NO WI-FI

Quando a Raspberry aparece no hotspot mas não completa a conexão, ou quando o Mainsail para de abrir após reinicializar pela tomada, não assuma imediatamente defeito no Klipper. Primeiro separe o problema em três camadas: boot, rede e serviços.

Camada	Sintoma	Acao Recomendada
Boot	LED ACT verde apagado ou sem piscar	Refazer a gravação do microSD. Se o Imager acusar erro de verificação, limpar com DiskPart clean e regravar.
Rede	Raspberry aparece no hotspot, mas não conecta ou não recebe IP	Reiniciar hotspot, conferir SSID/senha, confirmar rede 2.4 GHz e remover IP fixo incorreto.
Serviços	SSH funciona, mas http://IP não abre	Instalar/verificar Moonraker e Mainsail. Connection refused em sistema limpo e normal antes do KIAUH.

15.1.1 Recuperação sem HDMI usando somente o microSD

Se não houver monitor HDMI, teclado ou acesso SSH, retire o microSD, conecte no Windows e edite somente arquivos da partição de boot. Evite clicar em reparar automaticamente no Windows quando ele oferecer a opção, pois isso pode alterar estruturas de partição Linux.

Exemplo de network-config com DHCP para retornar a um estado simples é recuperável:

```
network:
  version: 2
  ethernet:
    eth0:
      dhcp4: true
      optional: true
  wifi:
    wlan0:
      dhcp4: true
      optional: true
      access-points:
        "NOME_DA_SUA_REDE":
          password: "SUA_SENHA_WIFI"
```

Depois de salvar, ejete o cartão corretamente. Ao ligar a Raspberry, aguarde de 60 a 120 segundos antes de procurar o IP no hotspot ou pelo comando arp -a.

15.1.2 Quando usar IP fixo e quando evitar

IP fixo facilita acessar o Mainsail sempre no mesmo endereço, mas pode bloquear totalmente o acesso se o gateway ou a faixa da rede mudarem. Em hotspot de celular, o modo DHCP costuma ser mais seguro durante a fase de montagem. Use IP fixo apenas depois de confirmar o gateway com `ip route`.

Comandos de verificação:

```
ip
ip                                addr          show          route
sudo                               service       klipper        wlan0
sudo service moonraker status    status
```

15.2 SEQUÊNCIA SEGURA PARA VALIDAR CONFIGURAÇÃO ANTES DE ACIONAR MOTORES

Nunca comece testando pelos botões de movimento do Mainsail. O Klipper bloqueia movimento normal antes do homing por segurança, e uma configuração incorreta pode levar o eixo a bater no chassi. A ordem segura é a seguinte:

1. Confirmar que o Mainsail abre e que não há erro vermelho de `printer.cfg`.
2. Executar `QUERY_ENDSTOPS` e confirmar cada chave alternando entre `open` e `TRIGGERED` manualmente.
3. Executar `DUMP_TMC` nos drivers para confirmar UART antes de mover qualquer motor.
4. Usar `STEPPER_BUZZ` em um eixo por vez para validar que o motor correto se movimenta.
5. Somente depois executar `G28` em eixos individuais, nunca `G28` geral enquanto algum endstop estiver duvidoso.

15.2.1 Uso correto do `SET_KINEMATIC_POSITION`

Se o comando `SET_KINEMATIC_POSITION` aparecer como `Unknown command`, normalmente falta habilitar o módulo `force_move`. Esse recurso deve ser usado apenas em bancada e com extrema cautela, pois ignora referências de homing.

Adicionar temporariamente ao `printer.cfg`:

```
[force_move]
enable_force_move: True
```

Depois de reiniciar o firmware, o comando passa a ficar disponível:

```
SET_KINEMATIC_POSITION          X=0          Y=0          Z=0
```

Recomendação: remova ou mantenha documentado esse bloco após finalizar a validação, para evitar uso acidental em operação normal.

15.3 TMC2209: VALIDAÇÃO POR UART ANTES DO MOVIMENTO

O comando DUMP_TMC é mais confiável que tentar mover o eixo diretamente. Se ele retorna registradores como GCONF, DRV_STATUS, CHOPCONF e IFCNT, o driver está respondendo pela UART. Se aparece Unable to read tmc uart, o problema esta no pino UART, jumper, slot físico ou encaixe do driver.

Resultado do DUMP_TMC	Interpretação	Próxima ação
Lista de registradores aparece	UART do driver esta comunicando	Testar STEPPER_BUZZ e confirmar eixo físico correto.
Unable to read tmc uart	UART não comunica	Verificar uart_pin, uart_address, jumper UART, orientacao e encaixe do TMC.
Erro de UART compartilhada	Dois drivers usam mesma UART sem endereço único	Adicionar uart_address exclusivo ou corrigir pinagem de slots.
Motor trava mas não gira	Enable e corrente existem, mas STEP/DIR ou fases podem estar errados	Conferir step_pin/dir_pin e pares das bobinas.

16. CALIBRAÇÃO TÉRMICA AVANÇADA VIA ALGORITMO PID (PID TUNING)

17.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE CONTROLE TÉRMICO

O sistema de plastificação por extrusão (*hotend*) e a plataforma de deposição (mesa aquecida) de uma impressora FDM são sistemas dinâmicos que apresentam inércia térmica significativa e atrasos de transporte (*dead time*). Para garantir a estabilidade dimensional e a reologia ideal do polímero durante a deposição, a flutuação de temperatura deve ser minimizada.

O firmware Klipper utiliza um controlador linear do tipo Proporcional-Integral-

Derivativo (PID) para regular a potência injetada pelos cartuchos aquecedores através de modulação por largura de pulso (PWM). A ação de controle é descrita matematicamente por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot de(t)/dt$$

Onde $e(t)$ representa o erro instantâneo entre a temperatura alvo (setpoint) e a temperatura real medida pelo termistor.

- Ganho Proporcional (K_p): Determina a resposta à amplitude do erro atual. Valores excessivos causam overshoot e oscilação contínua.
- Ganho Integral (K_i): Elimina o erro em regime permanente através do acúmulo histórico do desvio.
- Ganho Derivativo (K_d): Amortece a resposta do sistema avaliando a taxa de variação do erro, antecipando perturbações (como o acionamento da ventoinha de resfriamento da peça).

16.2. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO EM MALHA FECHADA

O Klipper possui um algoritmo de autossintonização (*autotune*) baseado no método de oscilação de relé. O procedimento força o sistema a oscilar em torno do *setpoint* para identificar numericamente as constantes de tempo e os ganhos críticos do sistema físico.

Devido às características de montagem física de retrofits (ex: termistores posicionados na face externa do bloco de alumínio, gerando gradiente térmico), a calibração deve ser realizada sob condições reais de operação.

16.2.1. Procedimento Prático para o Extrusor (Hotend)

1. Posicione o cabeçote de impressão no centro volumétrico da área de trabalho (Xcentro, Ycentro, Z10).
2. Configure a ventoinha de resfriamento da peça (*part cooling fan*) para 100% de operação através do painel de controle (Mainsail/Fluidd) para simular a maior taxa de perda convectiva de calor.
3. Envie o comando de calibração via console, determinando o alvo com base na temperatura nominal de trabalho estabilizada para o filamento utilizado (ex: 170 °C para operação com perfil otimizado de PLA):
4. G-Code

```
PID_CALIBRATE HEATER=extruder TARGET=170
```

5. Aguarde a execução dos ciclos de amostragem pelo firmware. O processo cessará automaticamente assim que a variância dos picos senoidais decair.

16.2.2. Procedimento Prático para a Mesa Aquecida (Heater Bed)

A mesa possui maior massa e capacidade térmica, demandando ciclos de chaveamento mais longos.

1. Garanta que a superfície de impressão (vidro/placa PEI) esteja limpa e montada.
2. Execute o comando de sintonização definindo o alvo térmico calibrado para mitigação de defeitos superficiais de base (ex: 50 °C):
3. G-Code

```
PID_CALIBRATE HEATER=heater_bed TARGET=50
```

16.3. CONSOLIDAÇÃO E PERSISTÊNCIA DOS PARÂMETROS

Ao término de cada rotina, o Klipper exibirá no console os valores calculados de Kp, Ki e Kd. Para registrar permanentemente esses coeficientes na memória não-volátil e atualizar o arquivo de configuração de blocos do hardware (printer.cfg) como mostrado na Figura 11, execute o comando:

G-Code

```
SAVE_CONFIG
```

Figura 11 — Configuração do controle do PID do bicoe da mesa.



Fonte: captura de tela do próprio projeto, adaptada pelo autor.

O firmware reescreverá automaticamente as linhas correspondentes dentro do bloco reservado de salvamento automático no rodapé do documento e reiniciará a unidade de controle (MCU).

16. COMANDOS RÁPIDOS DE BANCADA

#	Rede	e	acesso
arp			-a
ssh-keygen		-R	IP_DA_RASPBERRY
ssh			cliever@IP_DA_RASPBERRY
#			Serviços
sudo	service	klipper	status
sudo	service	moonraker	status
sudo	service	klipper	restart
sudo	service	moonraker	restart
#	Serial	da	Octopus
ls			/dev/serial/by-id/
#	Validacao	no	Mainsail
QUERY_ENDSTOPS			
DUMP_TMC			STEPPER=stepper_x
DUMP_TMC			STEPPER=stepper_y
DUMP_TMC			STEPPER=stepper_z
STEPPER_BUZZ			STEPPER=stepper_x
STEPPER_BUZZ			STEPPER=stepper_y
STEPPER_BUZZ			STEPPER=stepper_z

```
FIRMWARE_RESTART
```

```
#                                                                    Backup  
cp      ~/printer_data/config/printer.cfg    ~/printer_data/config/printer.cfg.bak
```

17. CONFIGURAÇÃO DE IP FIXO VIA CABO RJ45 (ETHERNET)

Este capítulo documenta o procedimento realizado para habilitar o acesso ao Mainsail via cabo de rede RJ45 (Ethernet), sem depender da rede Wi-Fi. O sistema operacional utiliza o NetworkManager como gerenciador de rede, o que exige que a configuração seja feita via ferramenta nmcli em vez de arquivos estáticos do Netplan.

17.1 DIAGNÓSTICO INICIAL DA INTERFACE ETH0

Ao verificar o estado das interfaces de rede via SSH, o comando `ip addr show` revelou que a interface `eth0` (cabo RJ45) estava no estado UP mas sem endereço IPv4 atribuído — apenas com um endereço IPv6 local (`fe80::`), inutilizável para acesso pelo navegador. A interface `wlan0` (Wi-Fi) operava normalmente com IP dinâmico 10.181.161.149. Os arquivos de configuração Netplan em `/etc/netplan/` existiam mas estavam completamente vazios, indicando que o NetworkManager gerenciava as interfaces sem diretivas definidas para o cabo.

O comando `nmcli connection show` confirmou a existência de uma conexão cadastrada chamada “Wired connection 1” do tipo ethernet, porém sem dispositivo vinculado (coluna `DEVICE` vazia). O dispositivo `eth0` aparecia como `disconnected` no `nmcli device status`.

17.2 PROCEDIMENTO DE CONFIGURAÇÃO

A solução foi configurar um IP fixo na conexão “Wired connection 1” e vinculá-la explicitamente ao dispositivo `eth0` via `nmcli`. O endereço 192.168.1.200/24 foi escolhido para a Raspberry Pi, com o computador de acesso configurado em 192.168.1.100 na mesma sub-rede. Os comandos executados via SSH foram:

```
sudo nmcli connection modify "Wired connection 1" \  
  ipv4.addresses 192.168.1.200/24 \  
  ipv4.method manual \  
  ipv4.gateway "" \  
  ipv6.method disabled  
sudo nmcli connection modify "Wired connection 1" connection.interface-name eth0  
sudo nmcli connection up "Wired connection 1"
```

A verificação com `ip addr show eth0` confirmou a atribuição do IP: `inet`

192.168.1.200/24. O teste de conectividade via ping 192.168.1.200 a partir do Windows retornou 4 de 4 pacotes recebidos com 0% de perda e latência inferior a 1 ms. O Mainsail passou a ser acessível pelo cabo em <http://192.168.1.200>.

17.3 COMPORTAMENTO RESULTANTE

A configuração é permanente e persiste após reinicializações. As duas interfaces operam simultaneamente sem conflito: o cabo RJ45 mantém o IP fixo 192.168.1.200 na sub-rede 192.168.1.x, enquanto o Wi-Fi opera dinamicamente em 10.181.161.149 na sub-rede 10.181.161.x. Para acessar o Mainsail via cabo, basta conectar o RJ45 diretamente entre o computador e a Raspberry Pi e navegar para <http://192.168.1.200>, sem necessidade de rede Wi-Fi.

18. ALTERAÇÃO DA REDE WI-FI

Este capítulo descreve como trocar a rede Wi-Fi configurada na Raspberry Pi quando o ambiente de bancada muda (novo roteador, hotspot diferente ou troca de senha). Como o sistema utiliza NetworkManager, a alteração é feita via nmcli ou editando o arquivo de conexão diretamente.

18.1 MÉTODO VIA NMCLI (RECOMENDADO, COM ACESSO SSH ATIVO)

Se ainda houver acesso SSH pela rede atual (Wi-Fi ou cabo RJ45), utilize os comandos abaixo. Primeiro liste as conexões Wi-Fi disponíveis para identificar o nome exato do SSID da nova rede:

```
sudo nmcli device wifi list
```

Para conectar em uma nova rede, substituindo a anterior:

```
sudo nmcli device wifi connect "NOME_DA_REDE" password "SENHA_DA_REDE"
```

O NetworkManager cria automaticamente um novo perfil de conexão e tenta conectar. Se a rede anterior ainda existir nos perfis cadastrados, ela pode ser removida para evitar conflito de reconexão automática indesejada:

```
sudo nmcli connection show  
sudo nmcli connection delete "NOME_DA_CONEXAO_ANTIGA"
```

18.2 MÉTODO SEM ACESSO SSH (EDITANDO O MICROSD NO WINDOWS)

Se não houver acesso SSH (Raspberry Pi sem rede ativa), desligue a placa,

retire o microSD e conecte-o ao computador Windows. A partição de boot (visível no Explorador de Arquivos) contém o arquivo `wpa_supplicant.conf` em sistemas baseados em Raspberry Pi OS Lite mais antigos. Em sistemas com NetworkManager ativo (como o desta instalação), a abordagem correta é criar um arquivo de configuração de rede na partição de boot para ser processado no próximo boot.

Na raiz da partição de boot do microSD, crie um arquivo chamado `network-config` (sem extensão) com o conteúdo abaixo, substituindo o SSID e senha pela nova rede desejada. Atenção: a Raspberry Pi 3 opera exclusivamente em 2.4 GHz — redes 5 GHz não serão detectadas.

```
network:
  version: 2
  wifis:
    wlan0:
      dhcp4: true
      optional: true
      access-points:
        "NOME_DA_NOVA_REDE":
          password: "SENHA_DA_NOVA_REDE"
```

Ejete o microSD corretamente pelo Windows antes de remover fisicamente. Reinsira na Raspberry Pi, ligue e aguarde 60 a 120 segundos para a conexão ser estabelecida. Localize o novo IP pelo comando `arp -a` no terminal do Windows ou pelo painel administrativo do roteador/hotspot.

18.3 VERIFICAÇÃO APÓS TROCA DE REDE

```
ip addr show wlan0
sudo nmcli connection show
sudo service moonraker status
sudo service klipper status
```

O comando `ip addr show wlan0` deve exibir um endereço `inet` com o novo IP atribuído pela rede. Confirme que Klipper e Moonraker permanecem em estado `active` (`running`). Se o Moonraker tiver caído durante a troca de rede, reinicie com `sudo systemctl restart moonraker`.

APÊNDICE C – ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO DO KLIPPER (printer.cfg)

O arquivo `printer.cfg` centraliza toda a configuração lógica do sistema re-trofitado: definição da cinemática, parâmetros dos motores e drivers, configuração dos sensores, limites térmicos, macros de operação e parâmetros salvos pelo `SAVE_CONFIG`. O arquivo completo, tal como operado nos ensaios, é transcrito a seguir.

```

1 [include mainsail.cfg]
2
3 [mcu]
4 serial: /dev/serial/by-id/usb-Klipper_stm32h723xx_<SERIAL>-if00
5
6 [printer]
7 kinematics: corexy
8 max_velocity: 150
9 max_accel: 1500
10 max_z_velocity: 5
11 max_z_accel: 30
12
13 # EIXO X
14 [stepper_x]
15 step_pin: PE2
16 dir_pin: !PE3
17 enable_pin: !PD4
18 microsteps: 16
19 rotation_distance: 59.34
20 endstop_pin: ^PG6
21 position_endstop: 300
22 position_max: 300
23 homing_speed: 40
24
25 [tmc2209 stepper_x]
26 uart_pin: PE1
27 run_current: 0.600
28 stealthchop_threshold: 999999
29
30 # EIXO Y
31 [stepper_y]
32 step_pin: PE6
33 dir_pin: !PA14
34 enable_pin: !PE0
35 microsteps: 16
36 rotation_distance: 60.80
37 endstop_pin: ^PG9
38 position_endstop: 0
39 position_max: 230

```

```
40 homing_speed: 40
41
42 [tmc2209 stepper_y]
43 uart_pin: PD3
44 run_current: 0.600
45 stealthchop_threshold: 999999
46
47 # EIXO Z - BLTouch como endstop virtual
48 [stepper_z]
49 step_pin: PF13
50 dir_pin: !PF12
51 enable_pin: !PF14
52 microsteps: 16
53 rotation_distance: 3.951
54 endstop_pin: probe:z_virtual_endstop
55 homing_speed: 10
56 second_homing_speed: 3
57 homing_retract_dist: 5.0
58 position_max: 451
59 position_min: -2.0
60
61 [tmc2209 stepper_z]
62 uart_pin: PC4
63 run_current: 0.850
64 stealthchop_threshold: 0
65
66 # HOMING OVERRIDE
67 [homing_override]
68 axes: xyz
69 gcode:
70     G90
71     {% if "z" not in printer.toolhead.homed_axes %}
72         SET_KINEMATIC_POSITION Z=0
73         G1 Z10 F600
74     {% endif %}
75     G28 X
76     G28 Y
77     G1 X174 Y164 F5000
78     G28 Z
79 set_position_z: 0
80
81 # EXTRUSORA
82 [extruder]
83 pressure_advance: 0.04
84 step_pin: PF9
85 dir_pin: PF10
86 enable_pin: !PG2
```

```
87 microsteps: 16
88 rotation_distance: 33.500
89 nozzle_diameter: 0.400
90 filament_diameter: 1.750
91 heater_pin: PA3
92 sensor_type: HT-NTC100K
93 sensor_pin: PF4
94 min_temp: 0
95 min_extrude_temp: 100
96 max_temp: 280
97
98 [thermistor HT-NTC100K]
99 temperature1: 25
100 resistance1: 100000
101 temperature2: 175
102 resistance2: 2100
103 temperature3: 250
104 resistance3: 700
105
106 [tmc2209 extruder]
107 uart_pin: PF2
108 run_current: 0.600
109 stealthchop_threshold: 0
110
111 # MESA AQUECIDA - 12V em 24V com PWM 34%
112 [heater_bed]
113 heater_pin: PA1
114 sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
115 sensor_pin: PF3
116 max_power: 0.34
117 pwm_cycle_time: 0.100
118 min_temp: 0
119 max_temp: 110
120
121 # CR TOUCH
122 [bltouch]
123 sensor_pin: ^PB7
124 control_pin: PB6
125 x_offset: -24
126 y_offset: -49
127 speed: 5.0
128 samples: 2
129 sample_retract_dist: 3.0
130
131 # BED MESH
132 [bed_mesh]
133 speed: 120
```

```
134 horizontal_move_z: 5
135 mesh_min: 24, 49
136 mesh_max: 276, 178
137 probe_count: 5, 5
138 algorithm: bicubic
139 fade_start: 1.0
140 fade_end: 10.0
141 mesh_pps: 2, 2
142
143 # VENTOINHAS
144 [fan]
145 pin: PE5
146
147 [heater_fan ventoinha_hotend]
148 pin: PD12
149 heater: extruder
150 heater_temp: 50.0
151
152 [output_pin fan_fonte]
153 pin: PA8
154 pwm: False
155 value: 1
156
157 ### <--- SAVE_CONFIG (gerado automaticamente) --->
158 ### [extruder]
159 ### control = pid
160 ### pid_kp = 13.634
161 ### pid_ki = 0.242
162 ### pid_kd = 192.245
163 ###
164 ### [heater_bed]
165 ### control = pid
166 ### pid_kp = 25.141
167 ### pid_ki = 0.245
168 ### pid_kd = 645.797
169 ###
170 ### [bltouch]
171 ### z_offset = 0.429
172 ###
173 ### [bed_mesh cliever]
174 ### version = 1
175 ### points =
176 ###      -0.009375, -0.028125, -0.016875,  0.017500,  0.012500
177 ###      0.015625,  0.020000,  0.008750,  0.046875,  0.027500
178 ###      0.044375,  0.035625, -0.001250,  0.031875,  0.021250
179 ###      0.059375,  0.040625,  0.013750,  0.041875,  0.012500
180 ###      0.098750,  0.055000,  0.013125,  0.038125,  0.026250
```

```
181 ### algo = bicubic
182 ### min_x = 24.0 max_x = 276.0
183 ### min_y = 49.0 max_y = 178.0
```

Código C.1 – Arquivo printer.cfg completo do sistema retrofitado

APÊNDICE D – DADOS DE MEDIÇÃO: BASELINE

Este apêndice registra as medições individuais realizadas com paquímetro digital (resolução 0,01 mm, incerteza $\pm 0,01$ mm) durante os ensaios do sistema original (*baseline*). Para cada corpo de prova, são apresentadas as três leituras por eixo que originaram os valores médios reportados na Tabela 4 e na Tabela 5 do Capítulo 4.

D.1 Cubos de Calibração (Baseline)

Três cubos nominais de 20,00 × 20,00 × 20,00 mm foram impressos e medidos. Para cada eixo foram realizadas três medições em posições distintas da face, adotando-se a média como valor representativo.

Tabela 14 – Medições individuais dos cubos de calibração: Baseline

Cubo / Eixo	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)
Cubo 1 — X	19,98	20,03	19,97	19,99
Cubo 1 — Y	20,29	20,33	20,29	20,30
Cubo 1 — Z	20,03	20,11	20,01	20,05
Cubo 2 — X	20,01	20,03	19,99	20,01
Cubo 2 — Y	20,26	20,24	20,32	20,27
Cubo 2 — Z	20,06	19,99	20,05	20,03
Cubo 3 — X	20,17	20,18	20,15	20,17
Cubo 3 — Y	20,38	20,39	20,37	20,38
Cubo 3 — Z	20,01	20,00	19,91	19,97

Fonte: O autor (2026).

Os erros percentuais calculados a partir das médias acima estão consolidados na Tabela 4. O erro sistemático positivo no eixo Y (média +1,60%) é consistente nas três amostras, confirmando o padrão associado ao *racking* da cinemática H-Bot.

D.2 Protocolo Autodesk-Kickstarter (Baseline)

Três amostras do protocolo Autodesk-Kickstarter foram impressas e medidas com paquímetro digital nos cinco alvos nominais (5, 10, 15, 20 e 25 mm) em dois eixos ortogonais (X e Y). Os dados brutos de cada amostra são apresentados a seguir.

Tabela 15 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 1 (Baseline)

Alvo (mm)	X medido (mm)	Err X	Y medido (mm)	Err Y
25	25,10	+0,40%	24,86	−0,56%
20	20,06	+0,30%	19,86	−0,70%
15	15,10	+0,67%	14,94	−0,40%
10	10,12	+1,20%	9,96	−0,40%
5	5,28	+5,60%	4,92	−1,60%
Avg Err				0,11 mm

Fonte: O autor (2026).

Tabela 16 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 2 (Baseline)

Alvo (mm)	X medido (mm)	Err X	Y medido (mm)	Err Y
25	24,98	−0,08%	24,82	−0,72%
20	20,02	+0,10%	19,94	−0,30%
15	15,10	+0,67%	15,02	+0,13%
10	10,16	+1,60%	9,96	−0,40%
5	5,10	+2,00%	5,10	+2,00%
Avg Err				0,08 mm

Fonte: O autor (2026).

Tabela 17 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 3 (Baseline)

Alvo (mm)	X medido (mm)	Err X	Y medido (mm)	Err Y
25	25,18	+0,72%	24,90	−0,40%
20	20,14	+0,70%	19,82	−0,90%
15	15,10	+0,67%	14,98	−0,13%
10	10,00	0,00%	10,20	+2,00%
5	5,24	+4,80%	5,42	+8,40%
Avg Err				0,16 mm

Fonte: O autor (2026).

O Avg Err médio das três amostras foi de 0,11 mm, com variação expressiva entre amostras (0,08 a 0,16 mm), evidenciando a falta de repetibilidade do sistema original. Os erros percentuais consolidados por amostra estão apresentados na Tabela 5 do Capítulo 4.

APÊNDICE E – DADOS DE MEDIÇÃO: Pós-retrofit

Este apêndice registra as medições individuais realizadas com paquímetro digital (resolução 0,01 mm, incerteza $\pm 0,01$ mm) durante os ensaios do sistema pós-retrofit. Para cada corpo de prova, são apresentadas as três leituras por eixo que originaram os valores médios reportados na Tabela 10 e na Tabela 11 do Capítulo 4.

E.1 Cubos de Calibração (Pós-retrofit)

Três cubos nominais de $20,00 \times 20,00 \times 20,00$ mm foram impressos e medidos nas mesmas condições dos ensaios do *baseline*, com o mesmo paquímetro digital. Para cada eixo foram realizadas três medições em posições distintas da face, adotando-se a média como valor representativo.

Tabela 18 – Medições individuais dos cubos de calibração: Pós-retrofit

Cubo / Eixo	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)
Cubo 1 — X	20,13	20,08	20,04	20,08
Cubo 1 — Y	20,10	20,06	20,05	20,07
Cubo 1 — Z	20,25	20,19	20,20	20,21
Cubo 2 — X	20,00	20,05	20,04	20,03
Cubo 2 — Y	20,16	20,07	20,02	20,08
Cubo 2 — Z	19,98	20,03	20,05	20,02
Cubo 3 — X	20,17	20,14	20,09	20,13
Cubo 3 — Y	20,18	20,16	20,06	20,13
Cubo 3 — Z	20,13	20,11	20,12	20,12

Fonte: O autor (2026).

A comparação direta com o Apêndice D evidencia a redução da dispersão no eixo Y: no *baseline*, as três médias do eixo Y foram 20,30, 20,27 e 20,38 mm; no pós-retrofit, foram 20,07, 20,08 e 20,13 mm, representando uma convergência expressiva em torno do valor nominal, consistente com a redução do erro sistemático de +1,60% para +0,45% reportada no Capítulo 4.

E.2 Protocolo Autodesk-Kickstarter (Pós-retrofit)

Três amostras do protocolo Autodesk-Kickstarter foram impressas e medidas nos cinco alvos nominais (5, 10, 15, 20 e 25 mm) em dois eixos ortogonais (X e Y). Os dados brutos de cada amostra são apresentados a seguir.

Tabela 19 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 1 (Pós-retrofit)

Alvo (mm)	X medido (mm)	Err X	Y medido (mm)	Err Y
25	25,10	+0,40%	24,90	−0,40%
20	20,04	+0,20%	19,81	−0,95%
15	14,94	−0,40%	14,74	−1,73%
10	10,03	+0,30%	9,82	−1,80%
5	5,10	+2,00%	4,93	−1,40%
Avg Err				0,11 mm

Fonte: O autor (2026).

Tabela 20 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 2 (Pós-retrofit)

Alvo (mm)	X medido (mm)	Err X	Y medido (mm)	Err Y
25	24,98	−0,08%	25,14	+0,56%
20	19,94	−0,30%	20,10	+0,50%
15	15,10	+0,67%	14,82	−1,20%
10	9,94	−0,60%	9,80	−2,00%
5	5,08	+1,60%	4,90	−2,00%
Avg Err				0,10 mm

Fonte: O autor (2026).

Tabela 21 – Medições individuais Autodesk-Kickstarter — Amostra 3 (Pós-retrofit)

Alvo (mm)	X medido (mm)	Err X	Y medido (mm)	Err Y
25	25,11	+0,44%	24,99	−0,04%
20	20,01	+0,05%	19,84	−0,80%
15	14,96	−0,27%	14,84	−1,07%
10	10,23	+2,30%	9,85	−1,50%
5	4,94	−1,20%	4,98	−0,40%
Avg Err				0,10 mm

Fonte: O autor (2026).

O Avg Err médio das três amostras pós-*retrofit* foi de 0,10 mm (variação de 0,10 a 0,11 mm), representando melhora em relação ao *baseline* (0,11 mm, variação de 0,08 a 0,16 mm). A menor dispersão entre amostras indica ganho de repetibilidade, atribuído à maior estabilidade cinemática e ao nivelamento automático por CR Touch. Os erros percentuais consolidados por amostra estão apresentados na Tabela 11 do Capítulo 4.