




Soluções adaptadas de baixo custo para o desenvolvimento de máquina de manufatura híbrida

João Pedro Aguiar dos Santos ^{1*} 

João Inácio Yutaka Ota ¹ 

Pedro de Paula Lopes Macedo ² 

Rômulo da Costa Delmondes ³ 

Marcelo Antônio Adad de Araújo ⁴ 

Resumo

O uso da tecnologia de manufatura híbrida permite o uso mais eficiente de material e a fabricação mais precisa de protótipos ao juntar os benefícios oriundos de diferentes tecnologias de manufatura. Porém, soluções exclusivamente voltadas para a manufatura híbrida apresentam alto custo de investimento. O uso conjunto de equipamentos existentes de manufatura aditiva, subtrativa e conformativa na manufatura híbrida poderia trazer uma redução considerável de custos. No entanto, equipamentos como impressoras 3D e máquinas CNC não estão preparadas para aplicações de manufatura híbrida, o que exige soluções adaptadas. O artigo apresenta o desenvolvimento de uma máquina de manufatura híbrida feita a partir da adaptação de uma fresadora CNC e de um conjunto extrusor em uma única estrutura mecânica. Tal estrutura é controlada por uma eletrônica embarcada de baixo custo com código aberto. Ambas as etapas de manufatura aditiva e subtrativa são gerenciadas por um único software de fatiamento 3D. Embora a solução adaptada de manufatura híbrida seja voltada para um ambiente acadêmico e de ensino de engenharia, ressalta-se que a adaptação de equipamentos já existentes para manufatura híbrida é também aplicável em outros contextos, como a fabricação de protótipos ou produtos em ambientes industriais.

Palavras-chave: Comando numérico computadorizado (CNC); Impressão 3D; Manufatura aditiva; Manufatura híbrida; Manufatura subtrativa; Prototipagem rápida.

Low-cost, adapted solutions for the hybrid manufacturing machine development

Abstract

Hybrid Manufacturing technology allows more efficient use of the materials and high-resolution rapid prototyping parts, blending the benefits of both additive and subtractive manufacturing. However, commercially available solutions yield high cost of acquisition. Nevertheless, while cost reduction is achievable by using existing tools of additive, subtractive, and conformal manufacture, off-the-shelf 3D printing and machining tools do not perform hybrid manufacturing natively. Therefore, adapted solutions are indeed necessary. The paper presents the development of a hybrid manufacturing machine based on existing CNC machining tool and extruder, both adapted to a circuit board printer and controlled by a unique management and slicing software for both additive and subtractive manufacturing. Although the presented prototype is a machine aimed for teaching and learning activities in engineering, hybrid manufacturing by the means of existing equipment in industry or fab labs is applicable as well.

Keywords: Computer numerical control (CNC); 3D printing; Additive manufacturing; Hybrid manufacturing; Subtractive manufacturing; Rapid prototyping.

¹Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

²Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

³Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

⁴Escola de Ciências Exatas e da Computação, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

*Autor correspondente: jpedro.ads@hotmail.com



1 Introdução

A prototipagem rápida surgiu no final da década de 80 e consiste na construção de peças em escala reduzida ou real a partir de um modelo tridimensional feito em programas CAD (do inglês *Computer Aided Design*, ou Desenho Assistido por Computador) [1-3]. Nos últimos anos, a prototipagem rápida tornou-se imprescindível em diversos campos, tais como medicina, educação, design de produtos, decoração, engenharia, entre outros, por viabilizar o manuseio precoce de peças e componentes próximos a seu formato final e a verificação de certos aspectos, tais como a forma, a cor, a integração e montagem de peças avulsas, a durabilidade, as formas de produção em escala, entre outros [4-6]. A produção de protótipos de peças próximas a seu formato final também permite que desenvolvedores interajam com elas antes de sua produção em escala, pois falhas de projeto podem causar atrasos no lançamento de produtos [7]. Outro aspecto positivo da prototipagem rápida é a redução estimada de 70% a 90% no tempo e custo de desenvolvimento de peças e componentes [4]. Além disso, tempo e custo são duas variáveis importantíssimas para a indústria, em razão da competição no mercado e da necessidade de entregar um produto com mais qualidade que o da concorrência [8].

A manufatura é parte integrante e fundamental no contexto da engenharia de fabricação e desenvolvimento de novos produtos. As diversas tecnologias de manufatura podem ser divididas em três grandes grupos com bases nos aspectos construtivos de cada técnica. A primeira é a “manufatura aditiva”, que se caracteriza pela deposição de material, formando a estrutura tridimensional desejada. Tal técnica também é chamada de “impressão 3D”. O uso de técnicas de remoção de material, por sua vez, é conhecido por “manufatura subtrativa”, e caracteriza-se pelo uso das máquinas modernas de CNC (Comando Numérico Computadorizado). Por fim, temos a “manufatura conformativa”, que é caracterizada por peças fabricadas a partir da conformação mecânica e fundição. Esse processo consiste na deformação plástica ou fundição do material utilizando ferramentas, matrizes e moldes até que o material assuma a forma desejada.

Atualmente a opção de combinar as tecnologias de manufatura aditiva, subtrativa e conformativa torna-se interessante para o desenvolvedor por integrar as características positivas de cada método e permitir a otimização da prototipagem de peças [9]. Ou seja, um processo de “Manufatura Híbrida” unifica dois ou mais métodos de manufatura consolidados em uma nova configuração combinada, permitindo a exploração sinérgica das vantagens de cada processo [10-12]. Um grande exemplo do uso de máquinas de manufatura híbrida ocorre ao reduzir o volume de material e o tempo de produção a partir da construção inicial com manufatura aditiva [13], para que em uma etapa posterior de prototipagem o processo de manufatura subtrativa seja utilizado para eliminar deformações e aumentar a precisão do acabamentos, especialmente em impressão com metais.

Máquinas de manufatura híbrida, ou máquinas híbridas, já estão disponíveis comercialmente, como o modelo *Integrex i-400* [14]. No entanto, soluções comerciais de máquinas híbridas ainda possuem um alto custo de investimento [15]. Soluções alternativas adotadas por acadêmicos e indústrias procuram tirar benefício de estrutura ferramental e maquinário já disponíveis para implementar técnicas de manufatura híbrida [16,17]. Um exemplo é a adaptação de ferramentas de fresagem em impressoras 3D [18]. Outro exemplo é a implantação de um dispositivo de manufatura aditiva (FDM, do inglês, *Fused Deposition Modeling*, ou Modelamento por Deposição Fundida) em uma máquina CNC de cinco eixos [19].

O objetivo do presente artigo é apresentar o desenvolvimento de uma máquina híbrida robusta e de fácil manuseio, que utiliza uma máquina destinada a confeccionar PCB (Placas de Circuito Impresso) e um sistema eletrônico de baixo custo programado com código-fonte aberto, que seja capaz de operar com apenas um *software* de controle como proposto por Santos et al. [20], e que seja uma alternativa aos métodos apresentados anteriormente [11,19].

Além disso, o desenvolvimento e a utilização dessa máquina pode ser uma ótima ferramenta de ensino e aprendizado caso seja utilizada em disciplinas da engenharia para ajudar os alunos a desenvolverem conceitos relacionados a manufatura aditiva, subtrativa e híbrida. Disciplinas aplicadas com a utilização de máquinas de alta tecnologia podem tornar os alunos mais preparados e autônomos em sua aprendizagem ao ingressarem no mercado de trabalho [21]. Principalmente se o curso envolver trabalhos em grupo de forma colaborativa ou cooperativa entre integrantes de diferentes cursos de graduação para tornar a integração entre parte mecânica e eletrônica ainda mais efetiva [22,23].

2 Técnicas de manufatura

2.1 Manufatura aditiva

A confecção de uma peça a partir da manufatura aditiva é feita através da adição de material em camadas, que se sobrepõem uma à outra, como uma espécie de soldagem do material [24], o que forma por fim o objeto tridimensional, que fora previamente desenhado pelo projetista através de ferramentas CAD. A Figura 1 apresenta o modelo e o objeto resultante da deposição de várias camadas. A manufatura aditiva, também conhecida por impressão 3D, pode ser feita a partir de diferentes materiais, tais como polímeros, pó, cerâmica, metal, compostos alimentícios, gel, concreto, entre outros [26]. Polímeros são os mais utilizados atualmente para impressão, alguns exemplos são o PLA, ABS, policarbonatos, nylon e PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*, ou Polietileno Tereftalato Glicol) [27]. Existem também materiais que se solidificam quando expostos a raios gama ou a óxido de etileno e são comumente usados em aplicações médicas [28].

A manufatura aditiva é indicada a usuários que desejam construir rapidamente peças com alta complexidade geométrica e que não demandam um acabamento impecável [29]. A obtenção de um acabamento impecável em peças produzidas por manufatura aditiva com polímeros é uma consideração crucial para sua aplicabilidade prática. É notável que os métodos de fabricação inicial muitas vezes não resultam em um nível de acabamento adequado para o uso final. Nesse contexto, intervenções pós-processo tornam-se essenciais. Tratamentos térmicos para amolecimento e suavização de superfícies rugosas, bem como a aplicação de solventes, são estratégias eficazes para aprimorar a qualidade superficial das peças [30]. Essas etapas não apenas elevam o padrão estético, mas também garantem que as peças atendam aos requisitos de funcionalidade e durabilidade necessários para a sua aplicação prática. Apesar da manufatura aditiva não ser a técnica mais adequada quando se deseja maior precisão e qualidade no acabamento, sua popularidade aumenta a cada ano, tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial e de uso pessoal.

Se espera que o uso de impressoras 3D seja ainda mais frequente e popular, frente à possibilidade de confecção de componentes elétricos e eletrônicos como os presentes em um *smartphone* [31].

2.2 Manufatura subtrativa

A máquina de fresagem CNC é o melhor exemplo de aplicação da tecnologia de manufatura subtrativa, cujo objetivo principal é controlar os movimentos da ferramenta e/ou da peça de trabalho para extrair material do sólido inicial, formando um novo objeto que corresponda ao modelo tridimensional desenhado [28]. A Figura 2 descreve esse processo.

Assim cabe ao desenvolvedor realizar o desenho do sólido desejado e estabelecer as ferramentas e método de extração a serem utilizados. Aplainar, modelar, furar, tornejar, fresar, brochar, mandrilar, retificar e serrar são os métodos de extração de material mais comuns [32]. A partir deles, é possível construir uma peça com ótimo acabamento e alta resistência mecânica, os quais são umas das principais vantagens da tecnologia de manufatura subtrativa [33]. Em contrapartida, o resto do desbaste decorrente da necessidade de confeccionar uma peça a partir de uma única camada de matéria-prima, a incapacidade de construir sólidos de geometrias complexas e o tempo elevado de produção são as principais desvantagens da manufatura subtrativa [34].

2.3 Manufatura conformativa

Dentro da manufatura conformativa, uma peça pode ser confeccionada por conformação mecânica ou fundição. A conformação mecânica é um processo de fabricação que envolve a aplicação de forças mecânicas (deformação plástica) para modificar um material [35-37]. Sendo uma técnica eficaz para produzir componentes de alta resistência e precisão. A manufatura por fundição é um processo de fabricação, no qual um material é derretido e colocado em

um molde para solidificação, adotando a forma do molde conforme apresentado na Figura 3 [35-37]. Esse método é especialmente eficaz para a produção em massa de peças complexas e detalhadas.

Em geral, a escolha de utilizar a manufatura conformativa dependerá das necessidades específicas do projeto, incluindo o tipo de material, a geometria da peça, o volume de produção e as tolerâncias requeridas [36,37]. É importante considerar as vantagens como redução de desperdício, economia de tempo para a produção em escala e produção de peças complexas. Mas também há desvantagens como custo de ferramentas, necessidade de criação de moldes, custo inicial, limitação de materiais e inadequação a aplicações de prototipagem rápida.

2.4 Manufatura híbrida

A manufatura híbrida representa uma evolução significativa no panorama industrial, integrando de forma sinérgica os princípios fundamentais das técnicas de manufatura aditiva, híbrida e conformativa, sendo possível combinar até 14 diferentes técnicas de confecção [38-41].

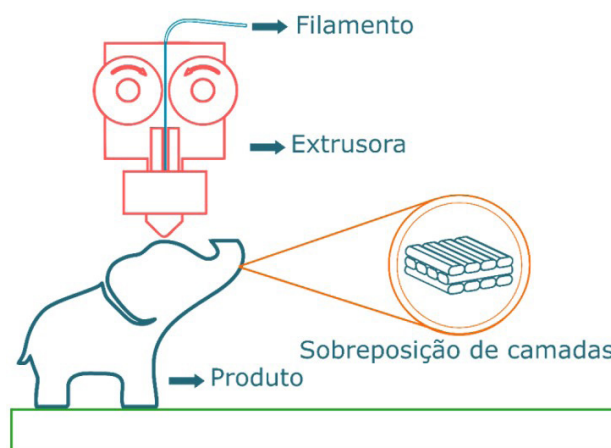


Figura 1. Manufatura aditiva. Adaptado de Patel e Taufik [25].

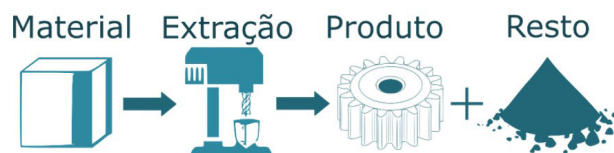


Figura 2. Manufatura Subtrativa. Adaptado de Ambrosi e Pumerá [27].

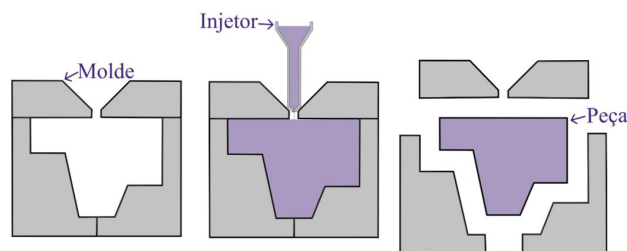


Figura 3. Manufatura Conformativa. Adaptado de Rodwood et al. [36].

Enquanto a manufatura aditiva proporciona a capacidade de criar peças personalizadas por meio da deposição de camadas de material, a manufatura híbrida expande esse potencial ao combinar processos subtrativos, aditivos e conformativos, resultando em componentes ainda mais refinados e versáteis. Combinação esta que pode acontecer de diferentes formas, seja com todas as tecnologias juntas ou pela associação ao menos de duas delas. A integração dessas técnicas não apenas permite a produção de peças altamente otimizadas em termos de desempenho e eficiência, mas também abre novas fronteiras para a inovação na indústria, promovendo a criação de produtos de alta qualidade de maneira mais ágil e econômica (Figura 4) [42-44].

A Figura 5 apresenta as etapas da manufatura híbrida que é desenvolvida neste artigo, composta de manufatura aditiva e manufatura subtrativa. A primeira etapa da manufatura híbrida consiste em adicionar material em camadas a partir da manufatura aditiva (Figura 5a) para construir um sólido de baixa resolução no menor intervalo de tempo [46]. A segunda etapa consiste em utilizar a tecnologia de manufatura subtrativa (Figura 5b) para cortar as rebarbas e melhorar o acabamento da peça. As áreas acadêmica e industrial têm muito interesse na manufatura híbrida, uma vez que diminui a quantidade de material removido, reduz o uso da ferramenta de extração, diminui o tempo de prototipagem e aumenta as áreas de aplicação [12]. Todos esses fatores resultam em uma melhoria da eficiência na produção de novos protótipos.

3 Desenvolvimento

3.1 Proposta de máquina híbrida de baixo custo e software unificado

A Figura 6 apresenta a estrutura mecânica usada para a máquina híbrida desenvolvida, que consiste em uma máquina intercambiável entre impressora 3D e fresadora CNC. Propôs-se o uso da estrutura mecânica móvel e programável proposta e construída por Delmondes e Rodrigues [47] e aplicada inicialmente na confecção de placas de circuito impresso, e na metodologia de Santos et al. [20], a qual incluiu na estrutura novos elementos que permitiram a implantação de troca de ferramentas.

Para a eletrônica embarcada da máquina híbrida, foi instalado o sistema embarcado Arduino Mega conectado ao módulo complementar de acionamento Ramps versão 1.4. O sistema Arduino é programado pelo usuário através do *firmware* de código-fonte aberto Marlin [48], o qual possui rotinas e estruturas lógicas adequadas ao projeto de manufatura aditiva e subtrativa. Em geral, máquinas industriais utilizam apenas um *software* de controle com funções nativas para executar processos de manufatura híbrida. Porém, tais programas são protegidos de maneira a bloquear seu uso em máquinas que não sejam produzidas pelos mesmos fabricantes. Até o presente momento, os autores só identificaram *softwares* protegidos com funções nativas de manufatura híbrida.

Porém, existem algumas alternativas para possibilitar a manufatura híbrida. Uma alternativa é apresentada [13], em que se utiliza três *softwares*, sendo um comercial e dois elaborados pelos autores, utilizados em conjunto para gerar o caminho da ferramenta e converter o caminho em instruções que podem ser reconhecidas pelos controladores.

Como alternativa, neste trabalho é apresentada uma metodologia que utiliza apenas o *software* não protegido de impressão *Simplify3D* [49], com algumas modificações não usuais, desenvolvidas pelos autores, para permitir a manufatura híbrida [50].

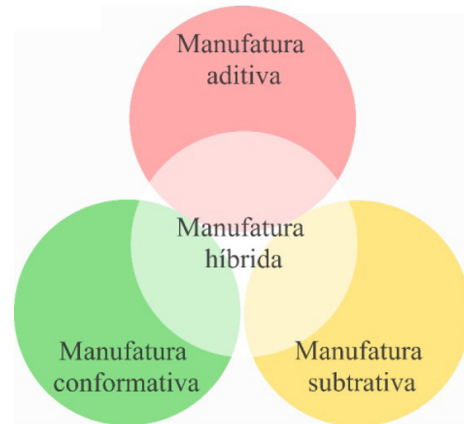


Figura 4. Processos de manufatura. Adaptado de Zhu et al. [12].

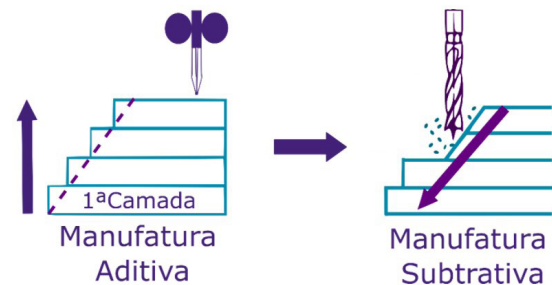


Figura 5. Exemplo de um processo de manufatura híbrida. Adaptado de Zao et al. [45].

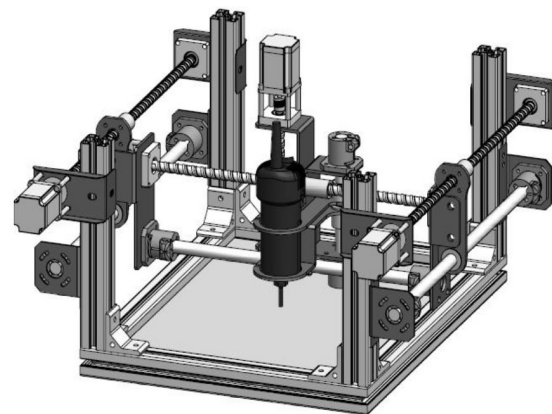


Figura 6. Máquina intercambiável e estrutura mecânica. Adaptado de Delmondes e Rodrigues [47].

3.2 Configuração e testes para manufatura subtrativa

Para a realização da manufatura subtrativa, foi instalada na estrutura mecânica uma tupa elétrica de 530 watts com velocidade regulada entre 0 e 30.000 rotações por minuto. A tupa passa a ser controlada pelo novo sistema embarcado instalado na máquina e é responsável por rotacionar uma fresa instalada em seu eixo, tornando possível a fresa no sentido vertical de sólidos de diversos materiais, tais como alumínio, madeira e plástico [47].

A Figura 7 apresenta a montagem da tupa na estrutura mecânica. A tupa em questão é da marca Makita, da linha Industrial, modelo 3709. Possui uma potência de 530W e é projetada para operar com uma tensão de 220V. Sua capacidade de pinça é de 6mm. Suas dimensões são as seguintes: altura de 19,9 cm, largura de 9 cm e comprimento de 8,2 cm. Além disso, a tupa pesa aproximadamente 1,5 kg. Após a montagem da tupa, as dimensões úteis de trabalho para manufatura subtrativa são 300, 400 e 70 mm, para os eixos x, y e z, respectivamente (Figura 7b).

Após a instalação da tupa (Figura 7a), efetuou-se testes para corrigir os parâmetros de movimentação decorrente do peso acrescentado à estrutura mecânica. Para validar a utilização da máquina em processos de manufatura subtrativa, os autores elaboraram um modelo tridimensional no *software* de modelagem Blender. A Figura 8 apresenta o modelo elaborado no *software Simplify3D*. O modelo possui espessura uniforme de 3 mm e foi manufaturado em três materiais: MDF (do inglês *Medium-Density Fiberboard*, ou madeira de fibra de média densidade), acrílico e placa de fenolite. Uma placa de fenolite, também conhecida como placa de baquelite, é um material laminado composto

principalmente de papel impregnado com resina fenólica e endurecido sob alta pressão e calor. Após a preparação do substrato, é aplicado um filme metálico, frequentemente de cobre, sobre a superfície da placa [51]. Esse filme é essencial, pois a partir dele é possível formar trilhas condutoras que conectam componentes eletrônicos na placa, formando assim uma PCB para aplicações diversas envolvendo sistemas eletrônicos.

Como as peças fresadas tinham no máximo 3 mm de altura, foi imprescindível o uso da função de auto-nivelamento. Essa função otimiza a produção por compensar os desníveis e irregularidades da superfície, mapeando diversos pontos da área de trabalho [52]. Um sensor mede a altura em vários pontos, permitindo ajustes dinâmicos durante a operação. Isso evita problemas como adesão inadequada em impressoras 3D e assegura cortes uniformes em máquinas CNC. Ao término do processo de autonivelamento, os dados de superfície são gravados automaticamente na memória não volátil (*EEPROM*) do microcontrolador Atmega 2560 do Arduino Mega. Funções especiais foram habilitadas e configuradas pelos autores para permitir que o *Simplify3D* executasse a manufatura subtrativa, tendo em vista que ele não possuiu funções e suporte nativo para este tipo de aplicação. Tais funções especiais e parâmetros podem ser encontrados no material suplementar na pasta *Router CNC Configuration* [50].

A Figura 9 mostra o resultado da validação da manufatura subtrativa nos três materiais. A Tabela 1 apresenta os parâmetros usados para a manufatura extrativa de cada material. A análise visual e qualitativa atestou que a manufatura subtrativa ocorreu da maneira esperada para os três materiais.

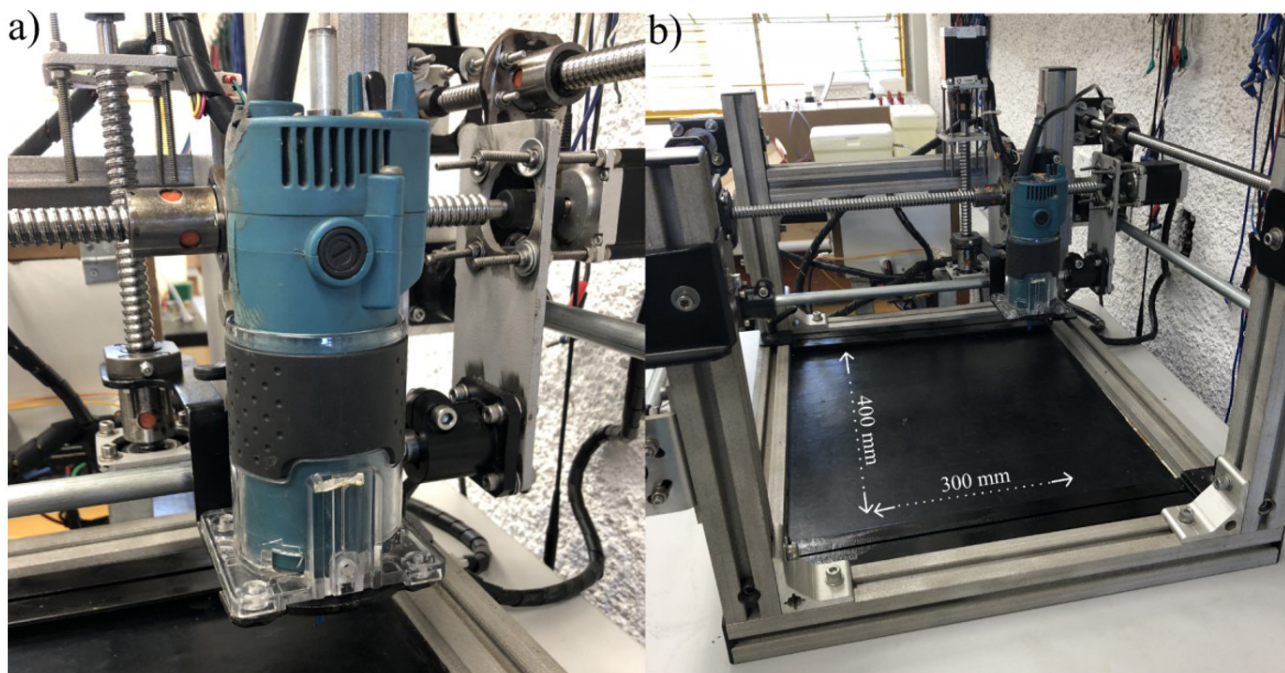


Figura 7. (a) Tupa fixada na máquina. (b) Área de trabalho para fresagem CNC. Adaptado de Delmondes e Rodrigues [47].

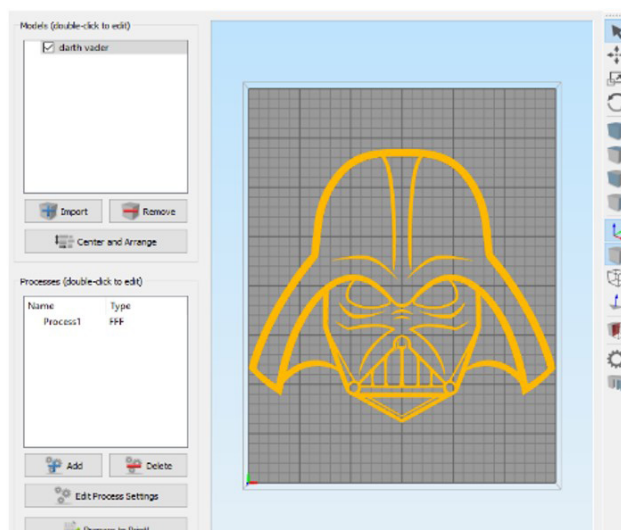


Figura 8. Modelo tridimensional no *Simplify3D* para manufatura subtrativa.

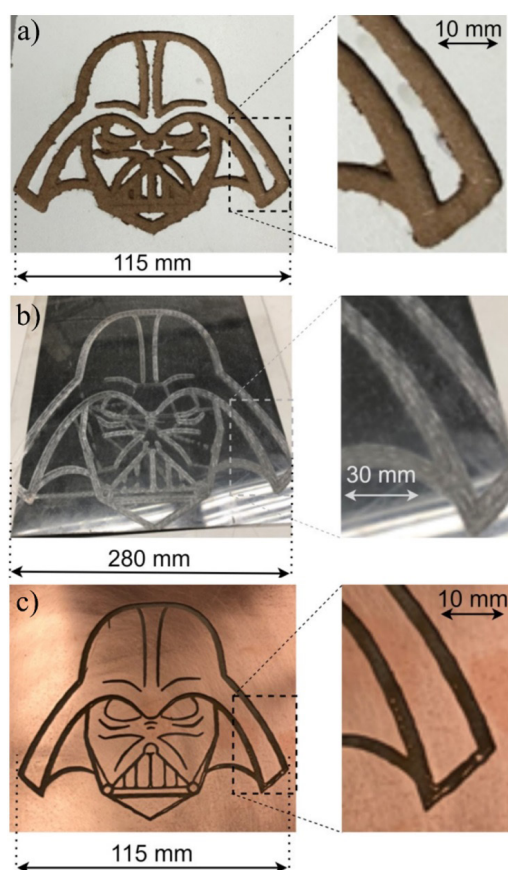


Figura 9. Manufatura subtrativa em (a) MDF, (b) acrílico e (c) placa de fenolite.

3.3 Configuração e testes para manufatura aditiva em ABS

Para a implantação da manufatura aditiva na máquina híbrida, foi necessário incluir uma mesa aquecida, extrusora, *hotend*, sensores de temperatura e relé de estado sólido na estrutura mecânica. Foi feita também a troca dos conectores do módulo Ramps por um modelo que possui proteção contra inversão de polaridade e maior resistência mecânica. Em virtude do conjunto de impressão (extrusora, *cooler*, *hotend*) não possuir o mesmo formato da tupa, um novo suporte mecânico foi construído para o conjunto ser posicionado no mesmo lugar. A extrusora escolhida (modelo: MK8 da fabricante SPAR) possui o *hotend* integrado, esse conjunto opera em uma faixa de tensão de 12V a 24V. A extrusora é responsável por impulsionar a engrenagem de tração que movimentava o filamento até passar por bico de latão com 0,4 mm. A tração do filamento é feita por um motor de passo NEMA 17. O *hotend* é responsável por fundir o material e conta com um termistor para monitorar a temperatura de operação, garantindo a extrusão adequada do material. Adicionalmente, um *cooler* é integrado para resfriar o *hotend* e evitar superaquecimento. A extrusora MK8 é projetada com consideração ao peso, sendo suficientemente leve para não sobrecarregar o sistema de movimentação da impressora 3D. Além disso, ela é concebida para lidar com uma variedade de diâmetros de filamento, como 1,75 mm ou 3 mm, dependendo da configuração da impressora 3D.

A Figura 10a apresenta o novo suporte para a inclusão da extrusora e *hotend* na máquina híbrida. Esse suporte possui dois componentes móveis para o ajuste da posição do bico da extrusora em relação à superfície de impressão. Utilizou-se quatro ímãs de neodímio com 10 mm de diâmetro por 4 mm de espessura para facilitar a fixação do suporte do conjunto de impressão à estrutura mecânica no eixo vertical. A Figura 10b apresenta a mesa aquecida e as guias metálicas. Duas guias metálicas ajustáveis foram inseridas para fixar a mesa aquecida. A principal função das guias é descartar a necessidade de furar qualquer ponto da estrutura, caso o usuário precise modificar a posição da mesa aquecida. Após a montagem da mesa aquecida as dimensões úteis de trabalho para manufatura subtrativa são 200, 200 e 70 mm, para os eixos x, y e z, respectivamente.

O material selecionado para o processo de impressão 3D foi o ABS. Esse material precisa ser aquecido pela extrusora, em temperaturas entre 230°C e 240°C. Para controlar a temperatura do *hotend* com estabilidade, foi utilizado um controlador proporcional integral derivativo (PID), conforme o controle de malha fechada apresentado na Figura 11.

Tabela 1. Parâmetros de manufatura subtrativa

Material	Tipo de fresa e diâmetro	Profundidade	Velocidade da tupa
MDF	Fresa de topo reta (6 mm)	3 camadas de 1 mm	15000 rpm
Acrílico	Fresa de topo reta (6 mm)	3 camadas de 1 mm	15000 rpm
Fenolite	Fresa de topo reta (3,2 mm)	1 camada de 1 mm	30000 rpm

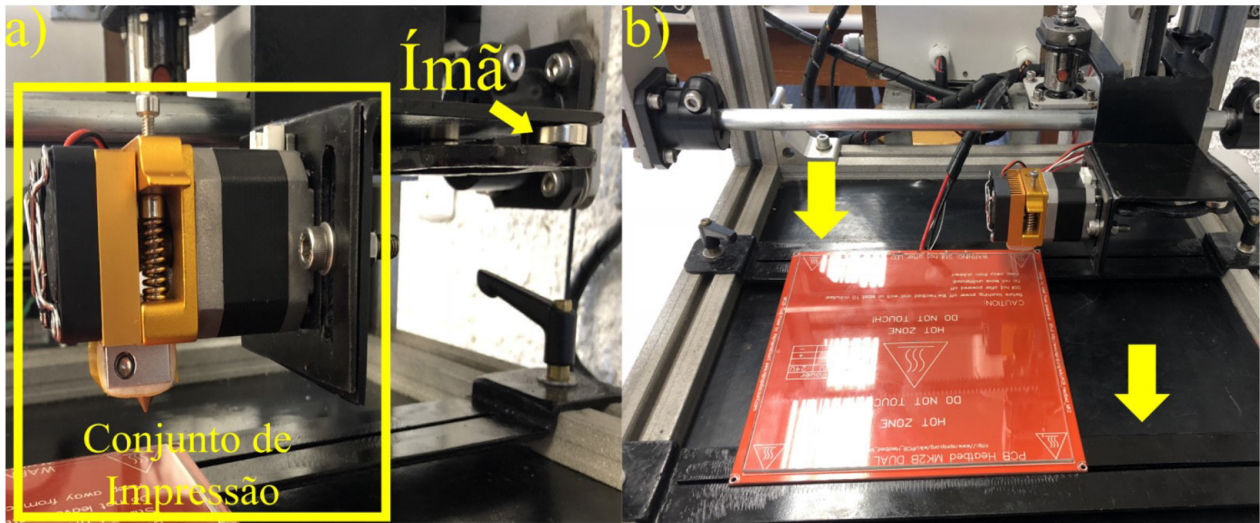


Figura 10. (a) Suporte de fixação do conjunto de impressão feita por ímãs. (b) Suporte da mesa aquecida.

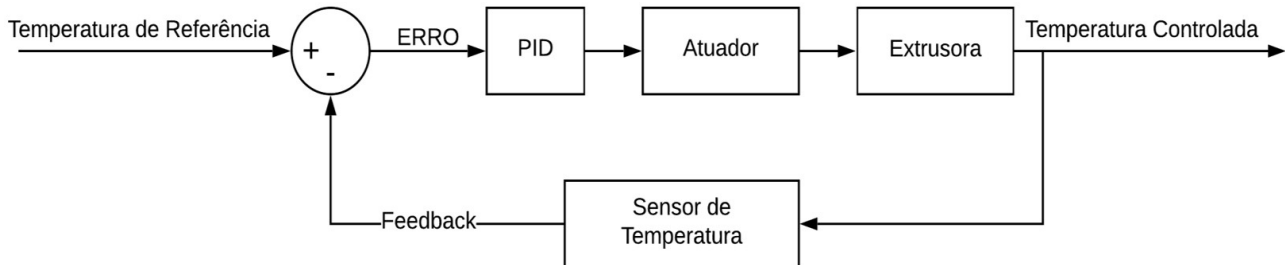


Figura 11. Controle de malha fechada.

O controle preciso da temperatura do *hotend* em uma impressora 3D é essencial para garantir uma impressão de alta qualidade. A temperatura correta é crucial para fundir o filamento de maneira eficaz, evitando problemas como camadas mal aderidas ou deformações.

O controlador PID regula a temperatura da extrusora pela variação da tensão média sobre os terminais da resistência de aquecimento, a qual é feita através de Modulação por Largura de Pulso (ou PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*). Para a implantação do controlador PID, utiliza-se a rotina PID Autotune do firmware Marlin [48], que utiliza o método de ajuste Ziegler-Nichols [53]. Esse é um método heurístico que define os ganhos proporcional, integral e derivativo automaticamente. Para a manufatura aditiva com ABS, é necessário o uso de uma mesa aquecida com temperatura de 80 a 110 °C para auxiliar a aderência do filamento sobre a superfície. Nesse caso não foi realizado o controle PID, pois a temperatura máxima alcançada pela mesa variou entre 95 e 104 °C.

3.4 Testes para manufatura híbrida

Um mancal é selecionado para ser confeccionado a partir da manufatura híbrida, que neste trabalho une a técnica de fresagem CNC (manufatura subtrativa) e impressão 3D de polímeros (manufatura aditiva). Nesse sentido,

a Figura 12 apresenta o mancal com as dimensões detalhadas. Primeiramente, o mancal foi impresso através da manufatura aditiva conforme o projeto apresentado na Figura 12a. Em seguida, a partir da manufatura subtrativa é removido material no centro e extremidades da peça conforme as dimensões apresentadas na Figura 12b.

A Figura 13a mostra o resultado da manufatura aditiva. Esse processo demorou onze horas e doze minutos e gastou 48 gramas de filamento, em um total de 15,6 metros. Logo após a impressão, a extrusora foi substituída pela tupa, para o fresamento e o acabamento da peça, até o desenho projetado. Uma ferramenta de corte com diâmetro de 3,2 mm foi fixada na tupa para fresar quatro furos nas extremidades. O processo levou cerca de dois minutos para ser concluído. O resultado é apresentado na Figura 13b. Note que esses furos foram feitos com a fresa porque a técnica subtrativa apresenta melhor precisão e acabamento do que a impressão 3D.

Por fim, a parte interna da peça foi fresada com a tupa em velocidade nominal, para evitar o travamento do eixo de rotação. É importante ressaltar que o acabamento observado na Figura 13 foi influenciado pelo uso do filamento de ABS e pela calibração da máquina de impressão 3D na ocasião. Além disso, o menor preenchimento interno foi intencionalmente configurado em 30% para diminuir o tempo de impressão da peça, resultando em uma superfície externa rígida e partes internas com menor densidade.

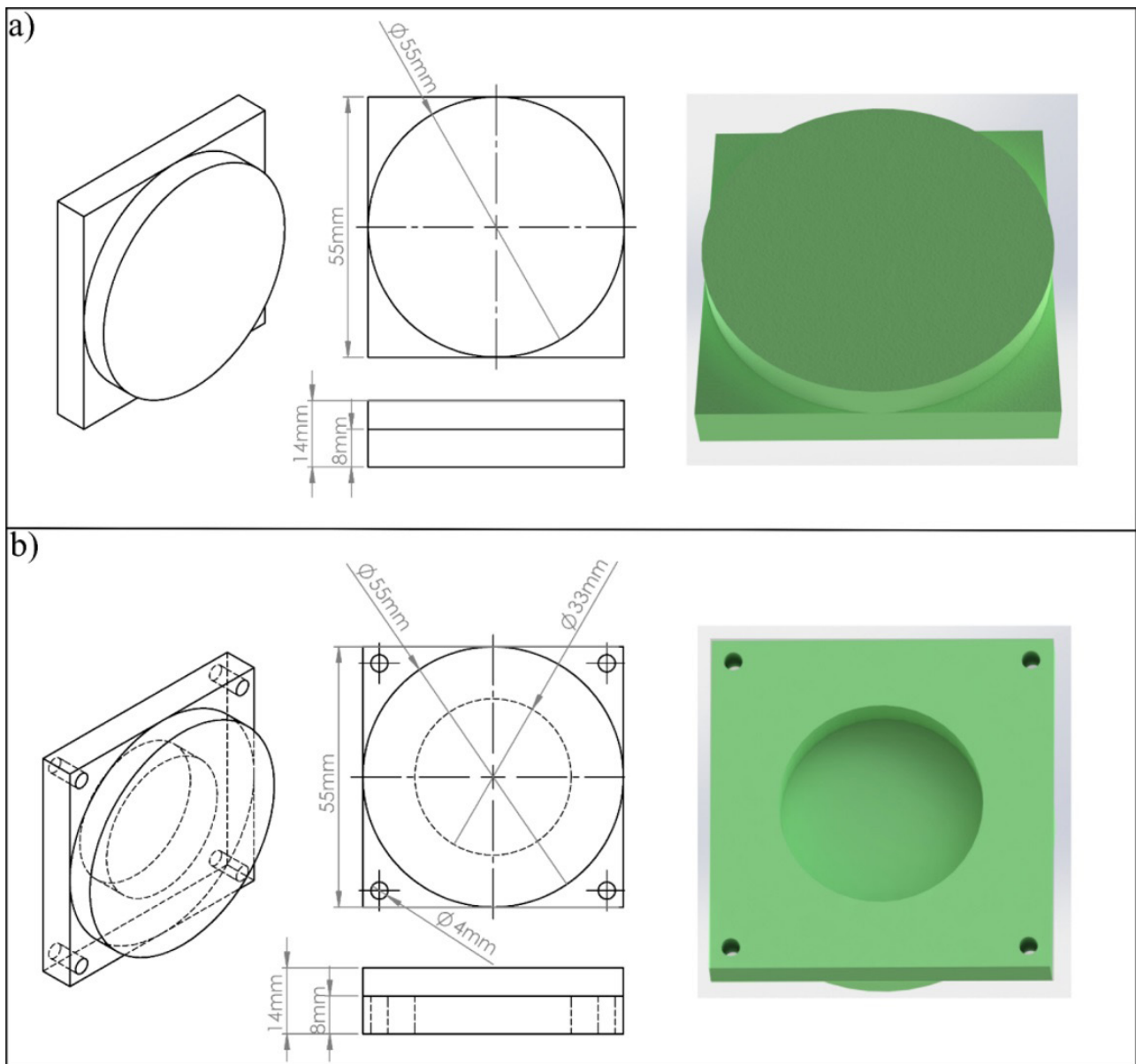


Figura 12. Modelo dimensionado para ser construído a partir da manufatura híbrida. (a) Adição de material por impressão 3D. (b) Remoção de material por fresagem CNC.

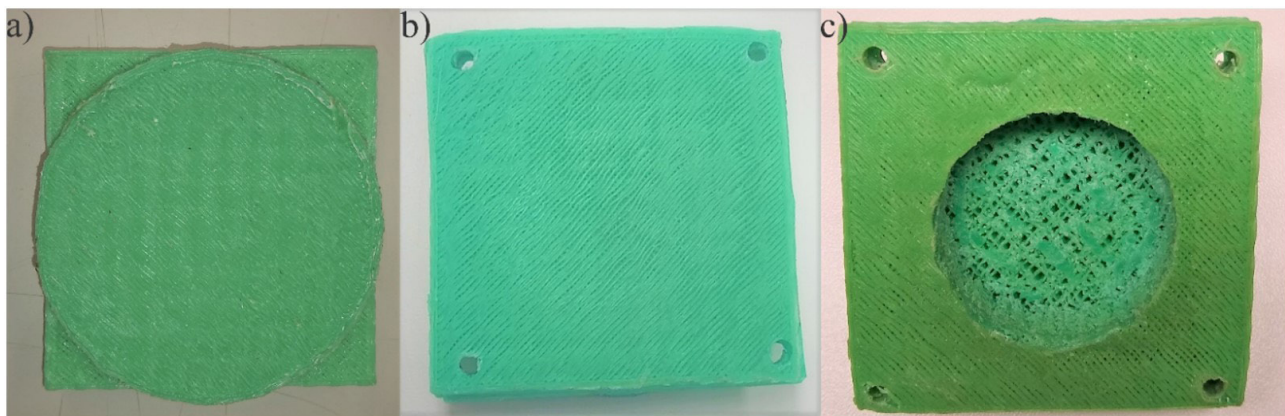


Figura 13. (a) Mancal impresso em ABS. (b) Mancal com furos nas extremidades. (c) Acabamento do mancal.

A Figura 13c apresenta o produto após a etapa de manufatura subtrativa. A máquina híbrida demorou apenas seis minutos para executar esse processo de fresagem. O acabamento do desbaste central é característico de processos de manufatura subtrativa por apresentar superfície uniforme.

Os resultados foram satisfatórios e mostram que o uso do Arduino Mega, do módulo Ramps 1.4 e do único *software Simplify3D* são efetivos para a confecção de peças por manufatura híbrida.

4 Resultados e discussões

4.1 Montagem final da máquina híbrida

A Figura 14a apresenta um diagrama de blocos com a estrutura necessária para a realização da manufatura subtrativa e da manufatura aditiva na máquina híbrida proposta. O resultado da máquina, com todos os periféricos devidamente instalados e configurados, pode ser visto na Figura 14b. Um acervo com a documentação completa da máquina está indexado publicamente na plataforma de repositórios GitHub [50].

4.2 Discussões acerca do desenvolvimento da máquina híbrida

A instalação da tupa na estrutura mecânica resultou em um aumento do esforço realizado pelos motores para movimentação da mesa. Contudo, a corrente fornecida pelos acionadores foi elevada para aumentar a faixa de torque, juntamente com a diminuição da velocidade dos eixos. Isso permitiu que a máquina conseguisse, além de movimentar o peso excedente, realizar maior esforço ao fresar materiais mais duros, p. ex., o acrílico.

Porém, o acionamento e o controle de velocidade da tupa ainda são feitos de forma manual. Portanto, assim que o processo de manufatura termine, o usuário precisa desligar a tupa manualmente.

Note que para tornar o processo de manufatura subtrativa mais eficiente é necessário sempre selecionar a ferramenta mais adequada para cada processo.

As fresas utilizadas foram todas selecionadas de acordo com o material de trabalho, evitando quaisquer esforços excedentes pela máquina. O *software Simplify3D* permitiu o uso e deslocamento da tupa mesmo sem suporte nativo para este tipo de ferramenta. Uma desvantagem, porém, é que o caminho pelo qual a fresa percorre pode não ser o mais otimizado. A instalação do suporte com ímãs, conforme mostrada anteriormente na Figura 10a, permitiu que a troca entre a tupa e a extrusora fosse feita rapidamente e com pouca dificuldade. O mesmo suporte também permitiu uma redução de custo de fabricação e maior facilidade de implantação, quando comparado com máquinas industriais que possuem sistemas automatizados de troca.

Durante os primeiros testes para a extrusão, observou-se que as bordas das peças começaram a curvar-se para cima, o que resultou no descolamento das camadas inferiores. Esse problema impossibilitava o término do processo de impressão 3D, pois o bico da extrusora deslocava a peça e a inutilizava devido ao aumento de altura da peça. Em um dos testes, o vidro que cobre a mesa aquecida acabou quebrando, e danificou os acoplamentos dos motores. Para contornar este problema, um gabinete foi construído, conforme pode ser visto na Figura 13b. O objetivo do gabinete é manter a temperatura interna constante, pois o ABS é um termoplástico que sofre contração quando exposto à variação de temperatura. Adicionalmente, é importante destacar que a área de trabalho para manufatura aditiva pode ser ampliada para 400 mm no eixo x e 300 mm no eixo y, mediante o uso de uma mesa aquecida de maiores dimensões.

Por fim, vale ressaltar que o estudo avaliou o acabamento das peças produzidas por manufatura aditiva e subtrativa, destacando sua importância como justificativa para a aplicação de uma máquina de manufatura híbrida. Contudo, ressalta-se que melhorias na estrutura da máquina seriam necessárias para aprimorar a qualidade das peças.

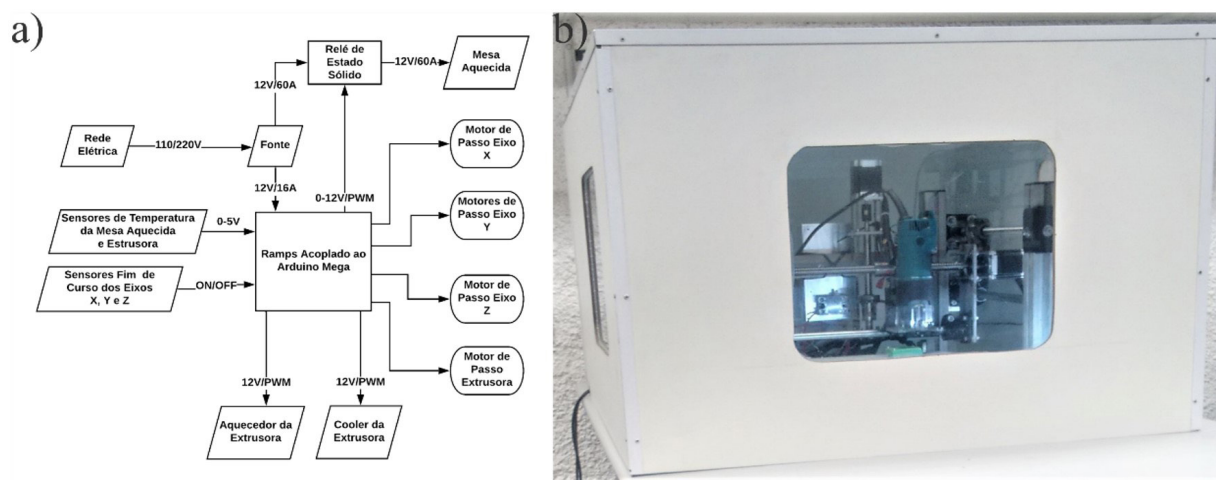


Figura 14. (a) Diagrama de Blocos da Máquina Híbrida. (b) Máquina Híbrida após as modificações.

No momento, trata-se de uma prova de conceito. O foco primário é validar a utilização da máquina e demonstrar a viabilidade da abordagem apresentada.

4.3 Considerações econômicas na construção de uma máquina de manufatura híbrida

Uma máquina de manufatura híbrida que combina tecnologias aditivas e subtrativas oferece uma ampla gama de possibilidades na produção de peças e componentes. No entanto, essa versatilidade também reflete nos custos em termos de capital e treinamentos associados à tecnologia de manufatura híbrida. Mesmo ao considerar as tecnologias de manufatura subtrativa e aditiva separadamente, os custos de investimento vão variar bastante conforme as demandas de aplicação.

O preço médio de uma impressora 3D pode variar amplamente com base em fatores como a complexidade da tecnologia, o volume de impressão, a precisão e a marca. Aqui estão algumas estimativas aproximadas. As impressoras 3D de nível de entrada podem custar a partir de R\$ 1.000,00 a R\$ 4.000,00. Para impressoras 3D de médio alcance, o preço pode variar entre R\$ 4.000,00 a R\$ 10.000,00. Já impressoras 3D de alta qualidade e profissionais, podem ter preços acima de R\$ 10.000,00. As fresadoras CNC também podem variar consideravelmente com base em fatores como a área de trabalho, a precisão, a potência do motor e a marca. Fresadoras pequenas e de menor porte para “hobbyistas” e pequenas produções, podem ter preços que variam de R\$ 2.000,00 a R\$ 20.000,00.

Por outro lado, máquinas de alta qualidade destinadas a aplicações industriais e de produção em grande escala podem ter preços que variam de R\$ 80.000,00 a vários milhões de reais. No caso das máquinas de manufatura híbrida, os preços podem variar consideravelmente dependendo da marca, especificações e funcionalidades específicas. Em média, essas máquinas podem variar de R\$ 27.000,00 como no caso da máquina multifuncional modelo A350T da fabricante Snapmaker a R\$ 1.500.000,00 ou mais.

Desde 2016 até a data atual, os autores conduziram uma análise dos custos envolvidos na montagem da máquina híbrida apresentada, sem considerar a influência da inflação ou alteração no preço dos produtos, principalmente com relação aos componentes mecânicos adquiridos em 2016.

Ao considerar essa ressalva, o resultado revelou um investimento total de R\$ 7.034,00. Desse montante, 50,1% foram alocados para os componentes mecânicos, abrangendo desde estruturas robustas até mecanismos de movimentação essenciais. Os dispositivos elétricos e eletrônicos representaram 29,4% do custo, incluindo componentes como controladores, motores elétricos e fonte de alimentação. Por fim, os serviços mecânicos e de acabamento constituíram 20,5% do investimento, abarcando etapas vitais como usinagem de precisão e acabamento superficial. Essa análise proporciona informações valiosas sobre a alocação de recursos na construção de máquinas híbridas, servindo como referência para futuros projetos e melhorias na eficiência econômica da produção. A determinação de um prazo preciso para a montagem de uma máquina híbrida é uma tarefa desafiadora, dada a complexidade e variações inerentes ao processo. No entanto, é crucial destacar que foram dedicados quatro anos de atividades à máquina híbrida, desde sua concepção mecânica.

5 Conclusões

O uso do conjunto de eletrônica embarcada de baixo custo e de código-fonte aberto composto pelo Arduino Mega, módulo Ramps 1.4 e firmware Marlin combinado com o software não protegido de controle e supervisão Simplifly3D permitiu que processos de manufatura híbrida fossem realizados a partir de um único software [21]. A combinação da técnica de fresagem CNC e impressão 3D foi possível apenas em função da estrutura mecânica robusta e de fácil instalação tanto para a tupa quanto para o conjunto de impressão 3D. A estrutura mecânica robusta permitiu integrar todos os periféricos necessários de cada tecnologia à máquina, enquanto a facilidade de manuseio foi viabilizada pela utilização de ímãs e conectores de engate rápido.

Além disso, do ponto de vista didático, a máquina híbrida apresentada pode ser uma ótima ferramenta para tornar o aprendizado de conceitos de manufatura aditiva, subtrativa, conformativa e híbrida mais efetiva em cursos de engenharia. Outra vantagem é que a construção dessa máquina pode ser feita de forma colaborativa em diferentes cursos de graduação, como resultado a construção do conhecimento se torna ainda mais próxima do cotidiano e dos desafios que engenheiros encontram na prática profissional.

Referências

- 1 Jiménez M, Romero L, Domínguez IA, Espinosa MM, Domínguez M. Additive Manufacturing Technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects. *Complexity*. 2019;2019:1-30. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/9656938>.
- 2 Ahmed N. Direct metal fabrication in rapid prototyping: a review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;42:167-191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.001>.
- 3 Chua CK, Leong KF, An J. Introduction to rapid prototyping of biomaterials. In: Narayan R, editor. *Rapid prototyping of biomaterials*. Duxford: Woodhead Publishing; 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00001-0>

- 4 Pham DT, Gault RS. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1998;38(10-11):1257-1287. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
- 5 Chua CK, Chou SM, Wong TS. A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1998;14(2):146-152. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01322222>.
- 6 Garg A, Tai K, Savalani MM. State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(2):164-178. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-08-2012-0072>.
- 7 Thomas DS, Gilbert SW. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: a literature review and discussion. Gaithersburg: NIST; 2014. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>.
- 8 Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*. 2016;42:81-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>.
- 9 Cortina M, Arrizubieta JI, Ruiz JE, Ukar E, Lamikiz A. Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations. *Materials (Basel)*. 2018;11(12):2583. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11122583>.
- 10 Zhu Z, Dhokia V, Newman ST. A novel process planning approach for hybrid manufacturing consisting of additive, subtractive and inspection processes. In: *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. New York: IEEE; 2012. p. 1617-21. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEM.2012.6838020>.
- 11 Rodriguez J, Ikononov P, Choudhury AA. Development of a 3D Printer and CNC milling desktop machine for manufacturing labs. In: *Annual Conference & Exposition Proceedings*. Washington: ASEE; 2016. <https://doi.org/10.18260/p.26788>
- 12 Zhu Z, Dhokia VG, Nassehi A, Newman ST. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2013;26(7):596-615. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>.
- 13 Lee W, Wei C, Chung S-C. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(11):2366-2374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004>.
- 14 Mazak Corporation. INTEGREX i-400 AM [página da internet]. 2022 [acesso em 1 abr. 2022]. Disponível em: <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am>
- 15 Brecher C, Jeschke S, Schuh G, Aghassi S, Arnoscht J, Bauhoff F, et al. *Integrative production technology for high-wage countries*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012. p. 17-76. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-21067-9_2.
- 16 Zivanovic ST, Popovic MD, Vorkapic NM, Pjevic MD, Slavkovic NR. An overview of rapid prototyping technologies using subtractive, additive and formative processes. *FME Transactions*. 2020;48(1):246-253. <http://dx.doi.org/10.5937/fmet2001246Z>.
- 17 Li L, Haghghi A, Yang Y. A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;33:150-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.008>.
- 18 Anzalone GC, Wijnen B, Pearce JM. Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta RepRap 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*. 2015;21(5):506-519. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0113>.
- 19 Kale A, Lakshman Kumar A, Murali Krishna Kumar M, Prakasah M. Optimization of hybrid manufacturing process parameters by using FDM in CNC machine. *Materials Science and Engineering*. 2018;402:012088. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012088>.
- 20 Santos JPA, Delmondes RC, Araújo MAA, Ferreira VR. Investigação e aperfeiçoamento de um sistema de impressão 3D e fresagem intercambiável. In: *Brazilian Technology Symposium*. Cham: Springer; 2018. p. 102-106.
- 21 Santos JPA, Ota JIY. Proposta multimetodológica de ensino para a disciplina de design de placas de circuito impresso. In: *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. Brasília: ABENGE; 2020. <https://doi.org/10.37702/COBENGE.2020.3079>.
- 22 Guedes LGR, Santos JPA. Diagnóstico e avaliação da aplicação de metodologias ativas nos cursos de engenharia da pontifícia universidade Católica de Goiás e da Universidade Federal de Goiás. *Brazilian Journal of Development*. 2019;5(9):16897-16910. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n9-219>.
- 23 Guedes LGR, Santos JPA. Clustered social representation of active methodologies in engineering courses a case study at Goiás State, Brazil. *International Journal on Alive Engineering Education*. 2019;6:129-138. <http://dx.doi.org/10.5216/ijaedu.v6.60180>.

- 24 Liu G, Zhang X, Chen X, He Y, Cheng L, Huo M, et al. Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145, 100596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.
- 25 Patel A, Taufik M. Extrusion-based technology in additive manufacturing: a comprehensive review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-022-07539-1>.
- 26 Frazier WE. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(6):1917-1928. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
- 27 Ambrosi A, Pumera M. 3D-printing technologies for electrochemical applications. *Chemical Society Reviews*. 2016;45(10):2740-2755. <http://dx.doi.org/10.1039/C5CS00714C>.
- 28 Müller M, Wings E. An architecture for hybrid manufacturing combining 3D printing and CNC machining. *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;2016:1-12. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8609108>.
- 29 Oropallo W, Piegl LA. Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*. 2016;32(1):135-148. <http://dx.doi.org/10.1007/s00366-015-0407-0>.
- 30 Dizon JRC, Gache CCL, Cascolan HMS, Cancino LT, Advincula RC. Post-processing of 3D-printed polymers. *Technologies*. 2021;9(3):61. <http://dx.doi.org/10.3390/technologies9030061>.
- 31 Espalin D, Muse DW, MacDonald E, Wicker RB. 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;72(5-8):963-978. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-5717-7>.
- 32 Kazanas HC, Lerwick LP. Manufacturing processes technology. In: Mayers RA, editor. *Encyclopedia of physical science and technology*. Cambridge: Academic Press; 2003. p. 95-119. <http://dx.doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00402-6>.
- 33 Sathish K, Kumar SS, Magal RT, Selvaraj V, Narasimharaj V, Karthikeyan R, et al. A comparative study on subtractive manufacturing and additive manufacturing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022:1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/6892641>.
- 34 Du W, Bai Q, Zhang B. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. *Procedia Manufacturing*. 2016;5:1018-1030. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.067>.
- 35 Silveira JVBD. Síntese e caracterização de compósitos ABS/Polipirrol produzidos via manufatura aditiva através da técnica FDM [dissertação]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2022.
- 36 Redwood B, Schoöffer F, Garet B. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs; 2017.
- 37 DeBoer B, Nguyen N, Diba F, Hosseini A. Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;115(1-2):413-432. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07173-5>.
- 38 Chu W, Kim C, Lee H, Choi J, Park J, Song J, et al. Hybrid manufacturing in micro/nano scale: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2014;1(1):75-92. <http://dx.doi.org/10.1007/s40684-014-0012-5>.
- 39 Rossi A, Lanzetta M. Integration of hybrid additive/subtractive manufacturing planning and scheduling by metaheuristics. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;144:106428. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2020.106428>.
- 40 Korkmaz ME, Waqar S, Garcia-Collado A, Gupta MK, Krolczyk GM. A technical overview of metallic parts in hybrid additive manufacturing industry. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;18:384-395. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.085>.
- 41 Chen W, Xu L, Zhao L, Han Y, Wang X, Hu C, et al. Application of hybrid additive manufacturing technology for performance improvement of martensitic stainless steel. *Additive Manufacturing*. 2022;51:102648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2022.102648>.
- 42 Ren L, Sparks T, Ruan J, Liou F. Integrated process planning for a multi-axis hybrid manufacturing system. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2010;132(2):021006. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4001122>.
- 43 Nau B, Roderburg A, Klocke F. Ramp-up of hybrid manufacturing technologies. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2011;4(3):313-316. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.04.003>.
- 44 Manogharan G, Wysk RA, Harrysson OLA. Additive manufacturing-integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: Economic model and analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2016;29(5):473-488. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067920>.
- 45 Tao Y, Yin Q, Li P. An additive manufacturing method using large-scale wood inspired by laminated object manufacturing and plywood technology. *Polymers*. 2021;13(1):144. <https://doi.org/10.3390/polym13010144>.

- 46 Lalegani Dezaki M, Serjouei A, Zolfagharian A, Fotouhi M, Moradi M, Ariffin MKA, et al. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process. *Advanced Powder Materials*, 1(4), 100054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>
- 47 Delmondes R, Rodrigues L. Cnc intercambiável aplicada a confecção de placas de circuito impresso. [dissertação]. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás; 2016.
- 48 Marlin. Marlin Versão 1.1.8 [página da internet]. GitHub; 2017 [acesso em 1 abr. 2022]. Disponível em: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>.
- 49 Simplify3D V4 [página da internet]. 2017 [acesso em 1 abr. 2022]. Disponível em: <https://www.simplify3d.com>.
- 50 Aguiar dos Santos JP. Hybrid Machine [página da internet]. GitHub; 2020 [acesso em 1 abr. 2022]. Disponível em: https://github.com/JoaoPedroAguiar/Hybrid_Machine.
- 51 Guo J, Rao Q, Xu Z. Application of glass-nonmetals of waste printed circuit boards to produce phenolic moulding compound. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;153(1-2):728-734. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.029>.
- 52 Hsieh CT. Developing low cost and smart laser-based paper cutter based on open source 3D printer. In: *International Conference on Advanced Manufacturing*. New York: IEEE; 2019. p. 103-112. <https://doi.org/10.1109/AMCON.2018.8614958>.
- 53 Ziegler JG, Nichols NB. Optimum settings for automatic controllers. *Journal of Fluids Engineering*. 1942;64(8):759-765. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4019264>.

Recebido em: 30 Maio 2023

Aceito em: 8 Nov. 2023