

Desenvolvimento de um Sistema Híbrido de Prototipagem Rápida Utilizando Software de Impressão 3D e Arduino

Santos, P. A. Joao; Macedo, P. L. Pedro; Delmondes Rômulo; Araújo A. A. Marcelo

Resumo—Prototipagem rápida é uma tecnologia imprescindível por possibilitar o desenvolvimento de novos produtos, e trazer uma economia de, pelos menos, 70% a 90% nos quesitos tempo e custo. Cada vez mais usadas, em consequência do barateamento das máquinas nos últimos anos. A manufatura híbrida surge com a tarefa de otimizar os processos de produção, combinando o que existe de melhor no método aditivo e subtrativo, para reduzir o volume de material, sem perder em acabamento e qualidade. A relevância da pesquisa está em apresentar uma máquina robusta e de fácil manuseio, que utiliza um sistema eletrônico de baixo custo e código fonte aberto. Que necessita de apenas um *software* de controle, para executar processos de manufatura híbrida, sendo uma opção aos métodos propostos anteriormente. Portanto, o objetivo da pesquisa é descrever os requisitos necessários para que se possa replicar o projeto, identificar melhorias, ilustrar os pontos fracos e apresentar os resultados. Construir um mancal, foi um sucesso, pois, permitiu demonstrar de forma satisfatória, a eficiência do método. Capaz de construir peças complexas, com precisão e agilidade, em uma única estrutura mecânica.

Palavras Chave—manufatura aditiva, comando numérico computadorizado (CNC), manufatura híbrida, manufatura subtrativa, impressão 3D.

I. INTRODUÇÃO

A prototipagem rápida é uma tecnologia que surgiu no final da década de 80. Com isso, foi possível construir peças a partir de um modelo tridimensional feito em programas CAD (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador) [1]. Imprescindível por possibilitar o desenvolvimento de novos produtos em menor tempo e permitir verificar funcionalidades como forma, cor, tempo de manufatura e encaixes das peças [2]. Possibilitando, assim, uma maior interação com o projeto antes de ser produzido em escala, evitando retrabalhos e produtos lançados no mercado com falhas. E mais: a prototipagem pode trazer uma economia de, pelo menos, 70% a 90% nos quesitos tempo e custo [3] [4]. Duas variáveis importantíssimas para as indústrias que precisam manter a sua competitividade no mercado e, ao mesmo tempo, necessitam entregar um produto de alta qualidade e acabamento impecável [5].

Com isso, sistemas híbridos de prototipagem rápida, que combinam tecnologias de deposição e remoção de material, estão sendo utilizados para otimizar a produção, integrando as

características positivas de cada método [6]. A produção se torna mais eficiente quando se reduz o volume de material ao aplicar a manufatura aditiva. Esse método possui acabamento com pouca resolução. Logo, para contornar essa variável, utiliza-se, em conjunto, o processo de manufatura subtrativa, que é caracterizada por usinar as peças, remover rebarbas e eliminar deformações [7].

Para tanto, já existem máquinas híbridas contendo inúmeras ferramentas integradas a uma única estrutura mecânica, que combinam o processo de manufatura aditiva e subtrativa para criar peças otimizadas, como a de produção comercial Integrex i-400 AM [5]. Porém, a utilização desta técnica ainda é baixa, por se tratar de uma tecnologia recente e que tem sido embarcada em máquinas com alto custo de investimento. Logo, a comunidade científica tem publicado estudos visando democratizar a implementação do processo de manufatura híbrida. Para citar dois exemplos: a adaptação de ferramentas de fresagem em impressoras 3D [8], e até mesmo, a criação de uma máquina de 5 eixos, construída a partir do zero [9].

A relevância da pesquisa está em apresentar uma máquina robusta e de fácil manuseio, que utiliza um sistema eletrônico de baixo custo e código fonte aberto. Que necessita de apenas um *software* de controle [10] para executar processos de manufatura híbrida, como opção aos propostos anteriormente [11] [9]. Portanto, o objetivo da pesquisa é descrever os requisitos necessários para que se possa replicar o projeto, identificar melhorias, ilustrar os pontos fracos e apresentar os resultados. Com a efetiva contribuição para a sociedade e meio ambiente, ao otimizar tempo e custo de produção, aproveitar melhor os recursos naturais e possibilitar uma gama maior de aplicações em apenas uma máquina. Sendo capaz de construir peças de alta complexidade, precisão e agilidade, mantendo os usuários competitivos frente aos desafios do mercado.

Por fim, vale ressaltar que esta é uma pesquisa *open source*, que visa apenas o compartilhamento de conhecimento com a comunidade científica, indexada publicamente na plataforma de hospedagem *GitHub*. Lá é possível encontrar toda documentação gerada durante a execução do trabalho como, vídeos, esquemáticos, *firmware*, modelos tridimensionais, fotos, parâmetros de configuração, manuais e artigos de referência [12].

II. TÉCNICAS DE MANUFATURA

A manufatura é empregada em diversos campos, como medicina, educação, decoração, engenharia etc. Existem diversas técnicas e dentre as mais utilizadas podemos destacar duas delas: a aditiva, que consiste na impressão do objeto a partir do zero; e a subtrativa, cujo processo é realizado a partir da remoção do material. Contudo, estes dois métodos apresentam limitações e, se mal utilizados, podem gerar custos excedentes de produção. Nos últimos anos, a manufatura híbrida, método que combina a tecnologia aditiva e subtrativa, tem sido utilizada por reduzir custo e tempo de produção, se comparado com os métodos realizados separadamente [11].

A. Manufatura Aditiva

Esse processo é feito em camadas, que se sobrepõe uma a outra, como uma espécie de soldagem do material escolhido. Previamente, é realizado um desenho tridimensional em CAD do objeto. Para somente depois imprimir seu resultado. Hoje, a impressão 3D utiliza inúmeros materiais, como polímeros, pó, cerâmica, metal, compostos alimentícios, gel, concreto, dentre outros [13].

Logo, a tecnologia de manufatura aditiva é escolhida por usuários que visam construir peças de forma rápida e com alta complexidade, mas que não se preocupam tanto com o acabamento das mesmas [2]. Alguns exemplos bastantes conhecidos desse método: LENS (*Laser Engineered Net Shaping* – Modelagem por Laser de Engenharia), SLA (*Stereolithography* - Estereolitografia), SLS (*Selective Laser Sintering* – Sintetização por Laser Seletivo) e SDM (*Shape Deposition Manufacturing*) [14]. Apesar da manufatura aditiva apresentar detalhes de qualidade na impressão, sua popularidade aumenta a cada ano, tanto no meio acadêmico, como no comercial e pessoal. Acredita-se que o uso dessa tecnologia será bem frequente e comum, sendo possível confeccionar componentes elétricos e eletrônicos, como um *smartphone* [15].

B. Manufatura Subtrativa

A máquina de fresagem CNC é o melhor exemplo de máquina de manufatura subtrativa, cuja função principal é controlar os movimentos da ferramenta e peça de trabalho. Ela permite, sempre que necessário, a troca da fresa, broca e outras ferramentas [16]. Alguns métodos são mais utilizados para fazer a extração do material, dando, assim, a forma desejada, como fresamento, perfuração e torneamento.

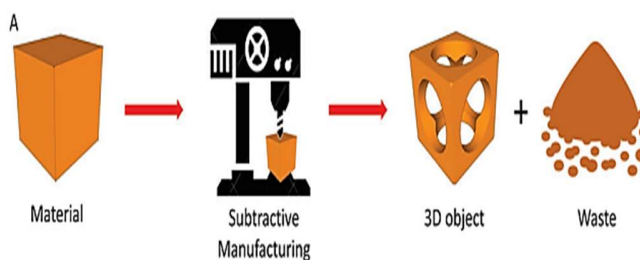


Fig. 1. Processos da tecnologia de manufatura subtrativa

Assim, sabe-se que a alta resistência das peças, ocorre devido sua única camada de matéria prima, fazendo com que o resto do desbaste não seja utilizado, Fig. 1 [17]. Algumas geometrias são incapazes de serem confeccionadas e a longa duração necessária para sua produção é uma das características negativas deste método [17].

C. Manufatura Híbrida

A manufatura híbrida une as melhores características de cada modelo citado, ao executar geometrias complexas, diminuir o tempo de produção e aproveitar melhor a matéria prima. Conforme a Fig. 2 [5], a primeira etapa consiste em adicionar material em camadas para construir um sólido de baixa resolução no menor intervalo de tempo e, em seguida, utilizar a tecnologia de manufatura subtrativa para cortar as rebarbas e melhorar o acabamento [9].

Características individuais presentes em cada processo podem ser encontradas em uma só máquina, que começa a surgir no mercado como a Integrex i-400 AM, modelo industrial que integra diversas tecnologias de manufatura [5].

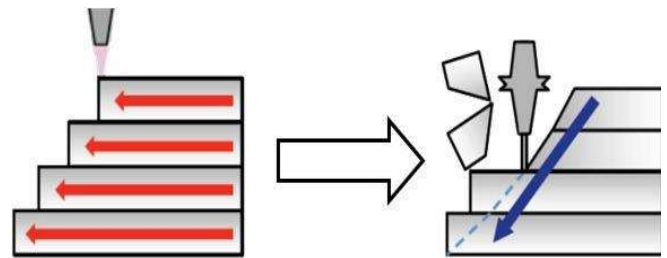


Fig. 2. A esquerda manufatura aditiva e a direita subtrativa.

III. FERRAMENTAS DE MANUFATURA

No mundo contemporâneo cria-se a necessidade de substituir as ferramentas pelas máquinas, a produção artesanal pela industrial e a energia humana pela energia eletromecânica. Dentro desse contexto, surge então a fresadora com comando numérico computadorizado (CNC). Marco relevante na história da indústria, por unir flexibilidade e versatilidade com precisão e um bom acabamento superficial. Diferente dos meios artesanais, que demandavam bastante tempo e não apresentavam a mesma qualidade [18].

Existem vários parâmetros que podem ser alterados no processo de manufatura. Alguns exemplos: determinação de ferramentas de trabalho, profundidade de corte, velocidade de avanço e velocidade de corte. As metodologias de remoção de material mais conhecidas são o torneamento, a fresagem, o aplainamento, a furação e a serragem [19].

Uma infinidade de materiais de manufatura pode existir quando se trata de produção aditiva e subtrativa. E podem ainda abranger diversas áreas, desde a confeitaria à corrida aeroespacial. Tratando-se de manufatura subtrativa, boa parte dos elementos conhecidos ou confeccionados pelo homem estão aptos para este método. Já na aditiva se destacam alguns, em específico, na forma de polímeros, como o PLA (*Poly Lactic Acid* - Políácido Láctico) e o ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* – Copolímero de Acrilonitrila) [2].

A. Ferramentas de Corte

A remoção do cavaco da peça é feita por usinagem, por meio de uma ferramenta de corte. A alta qualidade do processo está atrelada à eficiência desta ferramenta. Já o tempo de vida útil é diretamente proporcional ao tempo de corte efetivo das suas arestas de trabalho - antes de amolar ou fazer a troca da ferramenta [19].

O modelo mais comum de ferramenta de corte é a fresa. Bastante versátil, o instrumento é capaz de executar várias operações, como confeccionar roscas, abrir ranhuras e superfícies planas, e ainda fazer o processamento de engrenagens, dentre outras habilidades. Seus principais parâmetros: velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração, taxa de remoção do material e tempo de produção. Existem quatro modelos diferentes de fresadoras; as verticais, as horizontais, as especiais e a universal. Elas podem ser utilizadas de duas maneiras – desde que sempre rotacione a ferramenta. Na fresagem cilíndrica, o eixo é paralelo à superfície; e na fresagem de topo (ou frontal), está perpendicular à área de trabalho. Conforme a Fig. 3 [18].

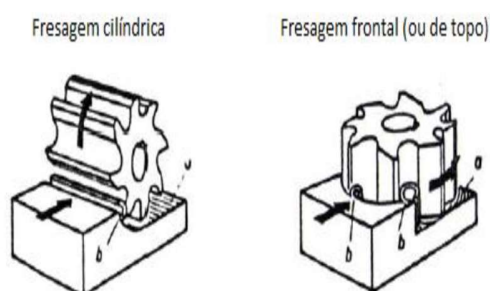


Fig. 3. Métodos de fresagem

B. Materiais de Impressão

Diversos materiais podem ser utilizados para a confecção de objetos 3D, incluindo metais, cerâmicas, polímeros, compostos alimentícios e sistemas biológicos [13]. São, basicamente, três estágios de manipulação: líquido, pó ou sólido base [7]. Em tese, os polímeros são os mais utilizados atualmente para impressão. Exemplos: PLA, ABS, policarbonatos, nylon e PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol* – Polietileno Tereftalato Glicol). Existem também materiais que, caso exposto a raios gama ou à óxido de etileno, se solidificam, comumente usados em tecnologias médicas [16].

O PLA é o filamento mais utilizado por não ser tóxico, ser biodegradável e possuir baixa temperatura para ponto de fusão, tornando-o mais ecologicamente sustentável [20]. Mesmo apresentando características mecânicas superiores e custo reduzido, o ABS não é tão usual quanto os demais. Isso devido à liberação de gases tóxicos e à maior exigência de temperatura de trabalho da extrusora, assim como da mesa aquecida. O PETG é considerado como o meio termo entre ABS e PLA, sendo mais durável e flexível que o PLA, e ainda mais fácil de imprimir que o ABS [21].

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Pesquisa exploratória e experimental, iniciada como tema de Trabalho de Conclusão de Curso, em 2016 [22], com foco na construção de uma máquina capaz de confeccionar placas de circuito impresso, de estrutura robusta e intercambiável. Conforme Fig. 4 [22]. Em 2017, novos objetivos foram traçados, a fim de tornar a movimentação da máquina intercambiável entre impressora 3D e fresadora CNC. Nessa, nova fase, damos continuidade ao trabalho, para que sejam feitas modificações na estrutura mecânica, elétrica e eletrônica. Objetivo: torná-la híbrida, de fácil manuseio e com troca rápida de ferramentas de fixação. Para isso, mantemos a proposta inicial de ser uma máquina modular, robusta e de fácil manuseio.

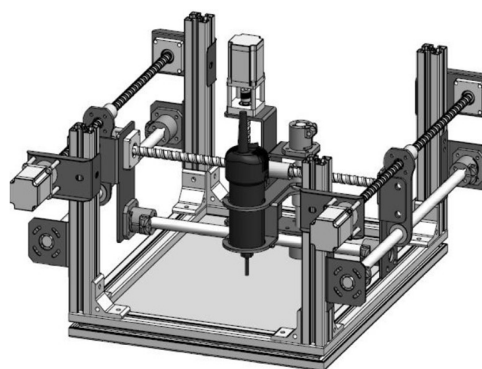


Fig. 4. Máquina intercambiável

A eletrônica da máquina é composta pelo sistema embarcado Arduino Mega, conectada ao módulo complementar de acionamento, Ramps 1.4. O Arduino é carregado com o *firmware* Marlin, que possui rotinas e estruturas lógicas adequadas ao projeto, todos de código fonte aberto, com atualizações constantes. Máquinas industriais empregam apenas um *software* de controle com funções nativas, para executar processos de manufatura híbrida. Porém, esses programas possuem rotinas de criptografia que bloqueiam a utilização em máquinas que não sejam produzidas por esses fabricantes. Até o presente momento, a pesquisa não identificou um *software* aberto aos usuários, com funções nativas de manufatura híbrida. Entretanto, alguns estudos têm apresentado alternativas que possibilitam a utilização desta técnica.

A primeira delas [11] consiste em utilizar dois *softwares* de controle distintos, para executar a manufatura aditiva e subtrativa, em ambientes de controle e supervisão separados. Pois, são encontrados inúmeros *softwares* abertos e dedicados à tecnologia, com suporte para serem empregados em conjunto com o sistema embarcado Arduino Mega. Em outro estudo [7], utiliza-se um *software* aberto e comercial, em conjunto com um programa desenvolvido pelos pesquisadores, que permite movimentar as ferramentas em uma máquina de cinco eixos. Como alternativa, apresentamos uma metodologia que utiliza apenas o *software* aberto de impressão, *Simplify3D*, que depende apenas de algumas modificações não usuais, para construir uma peça efetivamente híbrida [12].

V. RESULTADOS

A primeira tarefa foi reinstalar [22] a tupa elétrica de 530 watts - com velocidade regulada de 0 a 30 mil rotações por minuto - à estrutura mecânica. Conforme a Fig. 5. Ela é responsável por rotacionar uma fresa instalada em seu eixo, tornando possível fresar na vertical sólidos de diversos materiais, como alumínio, madeira e plástico.

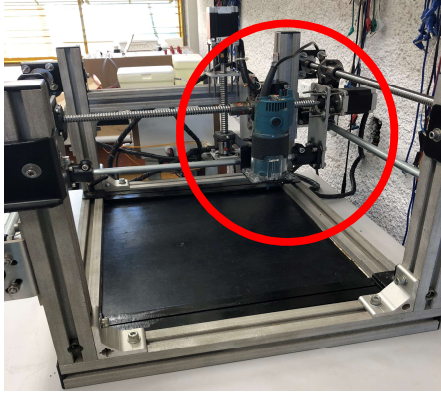


Fig. 5. Tupa fixada na máquina

A regulagem de altura é feita de forma manual, rápida e sem a utilização de ferramentas. Assim, após a instalação da tupa, que possuiu cerca de 1500 gramas, testes foram realizados para corrigir os parâmetros de movimentação decorrente do peso acrescentado à estrutura mecânica. A Tabela 1 apresenta as novas velocidades de trabalho da máquina, reconfiguradas no *firmware* Marlin.

TABELA I. DADOS DE VELOCIDADE

Parâmetros Configurados no <i>Software</i> Simplify3D				
<i>Retraction Speed</i>	<i>Default Printing Speed</i>	<i>X/Y Axis Movement Speed</i>	<i>Z Axis Movement Speed</i>	<i>X/Y Probe Speed</i>
(mm/min)	(mm/min)	(mm/min)	(mm/min)	(mm/min)
402.0	600.0	600.0	600.0	300.0

Para validar a utilização da máquina em processos de manufatura subtrativa foi elaborado um modelo tridimensional no *software* de modelagem Blender. Esse modelo possuiu espessura uniforme de 3 mm, carregado no *Simplify3D*, conforme a Fig. 6, para ser manufaturado em três materiais: MDF (*Medium-Density Fiberboard*), acrílico e placa de fenolite. Como as peças que seriam fresadas tem no máximo 3mm de profundidade, é imprescindível o uso da função de auto nivelamento. Ela compensa em *software* os desníveis da superfície, mapeando diversos pontos da área de trabalho [23] [10]. Com o término do processo, os dados são gravados na memória não volátil do microcontrolador Atmega 2560, presente no Arduino Mega. Isso possibilita a leitura dos dados mesmo após desenergizar o sistema. Dessa forma, o processo é executado apenas quando a estrutura é movimentada.

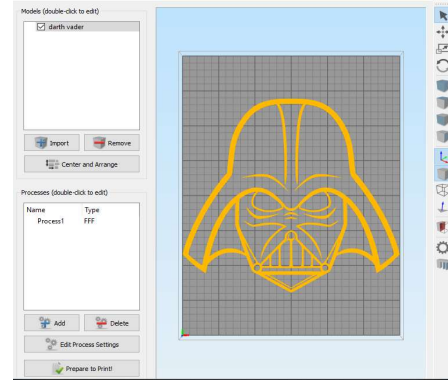


Fig. 6. Modelo tridimensional

Após o nivelamento, algumas funções foram habilitadas e configuradas, para permitir que o *software* execute processos de manufatura subtrativa, tendo em vista que ele não possuiu funções e suporte nativo para este tipo de aplicação, conforme os parâmetros presentes no *folder* (*Router CNC Configuration*), hospedado no *GitHub* [12]. Possibilitando, assim, o início dos testes de validação da tecnologia de manufatura subtrativa, o primeiro material utilizado foi o MDF, por apresentar características mecânicas favoráveis de fresagem. Na Fig. 7 é apresentado o resultado do processo que utilizou uma fresa reta de 6mm de diâmetro acoplada à tupa e metade da velocidade nominal, o modelo foi fatiado em três camadas de 1mm, para que a ferramenta penetrasse o MDF gradualmente.



Fig. 7. Manufatura subtrativa em MDF

Outros dois materiais foram selecionados para serem fresados conforme a Fig. 8, o acrílico na parte superior, com configurações idênticas ao utilizado no MDF, e na parte inferior da Fig. 8, uma placa de fenolite com penetração unitária de 1 mm, fresa reta de 3.2 mm de diâmetro e velocidade nominal da tupa. Ao término, foi iniciada a implementação da tecnologia de manufatura aditiva à máquina. Para tal, foi necessário introduzir novos componentes elétricos e eletrônicos ao sistema, como mesa aquecida, extrusora, sensores de temperatura, relé de estado sólido e troca dos conectores do módulo Ramps por um modelo que possui proteção contra inversão de polaridade e maior resistência mecânica.



Fig. 8. Manufatura subtrativa em acrílico e placa de fenolite

Portanto, visto que a extrusora não possuiu o mesmo formato que a tupa, um suporte mecânico foi construído para que ela possa ser inserida no mesmo local. Conforme a Fig. 9. Esse suporte possui dois componentes móveis, para ajustar a posição do bico da extrusora em relação à superfície de impressão. Para executar uma troca rápida entre tupa e extrusora, foram utilizados quatro ímãs de neodímio com 10 mm de diâmetro por 4 mm de espessura, que atraem o suporte da extrusora à estrutura mecânica do eixo Z, excluindo o uso de ferramentas para fixação. Conforme a Fig. 9. A troca é feita aplicando um esforço com as mãos no sentido contrário ao campo magnético do ímã.

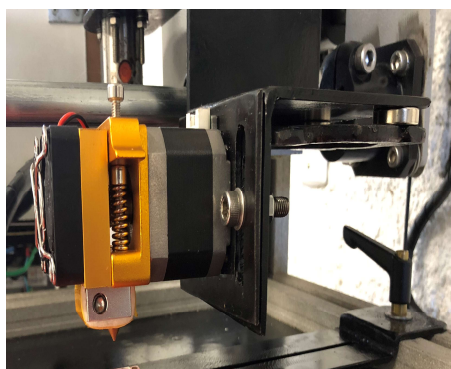


Fig. 9. Suporte de fixação da extrusora com ímãs de neodímio

Em seguida, duas guias metálicas ajustáveis foram inseridas para fixar a mesa aquecida. De acordo com a Fig. 10. A principal função das guias é descartar a necessidade de furar qualquer ponto da estrutura, caso seja necessário modificar a posição da mesa. Para iniciar o processo de impressão, foi selecionado o material ABS, que precisa ser aquecido pela extrusora, em temperaturas que vão de 230°C à 240°C.

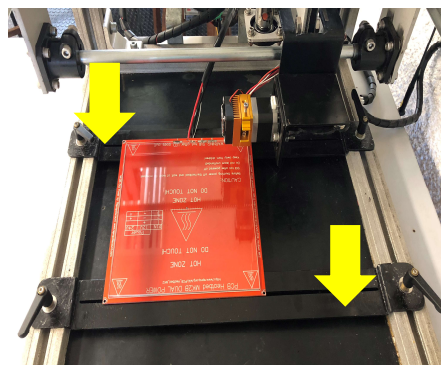


Fig. 10. Suporte da mesa aquecida

Entretanto, foi necessário controlar a temperatura da extrusora por um controlador proporcional integral derivativo (PID), obtendo maior estabilidade e precisão do sistema. Conforme o controle de malha fechada apresentada na Fig. 11. Desta maneira, a temperatura da extrusora é controlada, variando a tensão média sobre os terminais da resistência de aquecimento por PWM (Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso). Pois a temperatura da resistência varia em função da tensão aplicada.

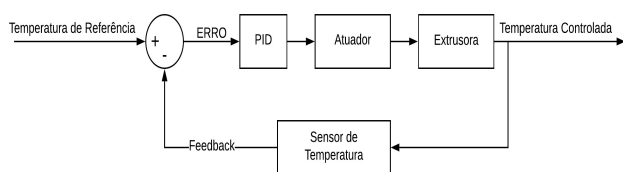


Fig. 11. Controle de Malha Fechada

Para facilitar a implementação do PID, o *firmware* Marlin apresenta uma rotina no código chamada de *PID Autotune*, que utiliza o método de ajuste Ziegler-Nichols [24]. Esse é um método heurístico que define os termos dos controladores proporcional, integral e derivativo - automaticamente. Apresentamos, na Tabela 2, os valores medidos experimentalmente, que definem o desempenho do controlador, em função da quantidade de ciclos de otimização.

TABELA II. DESEMPENHO DO CONTROLADOR PID

Parâmetros Medidos em Laboratório			
Ciclos	8	10	20
Controlador Proporcional (KP)	16,87	15,75	15,95
Controlador Integral (KI)	1,2	1,06	1,09
Controlador Derivativo (KD)	59,43	58,51	58,14
Set Point (°c)	230	230	230
Temperatura Inicial (°c)	25	26	26,5
Tempo de Assentamento (s)	101	132	139
Tempo de Pico (s)	101	115	104
Ultrapassagem Percentual (%)	0,87	0,3	0,41
Erro Permanente (°c)	4	1,56	1,81

Para imprimir com ABS, a mesa também precisa ser aquecida com uma temperatura de aproximadamente 100°C, para auxiliar a aderência do filamento sobre a superfície.

Porém, não foi necessário realizar o controle PID, pois a temperatura máxima alcançada ficou próximo de 100°C. Assim, a mesa só é acionada antes de iniciar a impressão. E desligada após o término, pelo relé de estado sólido. Concluindo, neste momento, todas as modificações pertinentes. Resultado que pode ser visto no diagrama de blocos da Fig. 12.

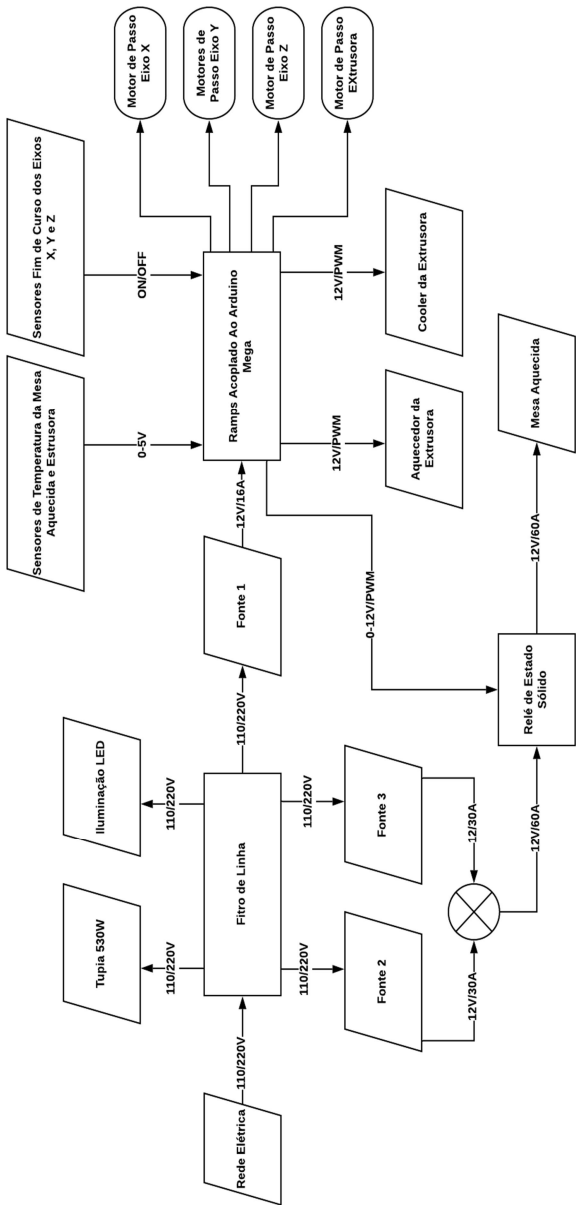


Fig. 12. Diagrama de Blocos da Máquina

Para encontrar os parâmetros de funcionamento da função de impressão 3D, algumas peças foram impressas em pequena escala para avaliar quais valores poderiam ser otimizados. Conforme Tabela 3. Pois, como o modelo mecânico da máquina é único, não foi possível usar dados de outra máquina como referência. Vale ressaltar, ainda, que todas as peças impressas foram feitas utilizando ABS de 1.75mm e bico extrusor de 0.6mm de diâmetro.

TABELA 3. CONFIGURAÇÃO UTILIZADA NO PROCESSO DE IMPRESSÃO

Parâmetros Configurados no Software Simplify3D				
Retraction Speed (mm/min)	Default Printing Speed (mm/min)	X/Y Axis Movement Speed (mm/min)	Z Axis Movement Speed (mm/min)	Infill Percentage (%)
350	450	450	250	50

O sólido selecionado para ser impresso foi um mancal. Por fazer parte dos requisitos necessários para melhorar a estabilidade da máquina. Esta peça demorou aproximadamente onze horas e doze minutos para ser impressa e gastou 48 gramas de filamento - em um total de 15,6 metros. Conforme Fig. 13. Logo após, a extrusora é substituída pela tupa, para que a peça seja fresada e acabada, até chegar ao estado final projetado. Esse modelo foi concebido para ser confeccionado utilizando a tecnologia de manufatura híbrida.

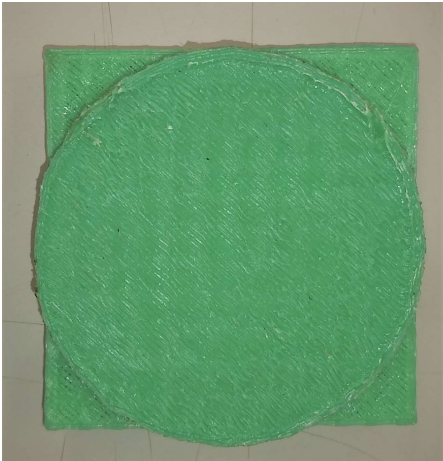


Fig. 13. Mancal Impresso

Com isso, uma ferramenta de corte de 3.2 mm de diâmetro é fixada junto à tupa, para fresar quatro furos nas extremidades. Conforme Fig. 14. O processo levou cerca de dois minutos para ser concluído, utilizando os parâmetros de velocidade apresentados na Tabela 1. Esses furos, vale frisar, não foram feitos inicialmente, porque a técnica subtrativa apresenta características mais favoráveis, como precisão e acabamento



Fig. 14. Primeira Parte do Fresamento

Por fim, é dada continuidade ao processo, fresando a parte interna da peça, com a tupaia em velocidade nominal – evitando assim o travamento do eixo de rotação. Esse processo demorou apenas seis minutos para ser finalizado, apresentando um bom acabamento interno. Conforme Fig. 15. Portando, esta peça apresenta o resultado, do sistema híbrido de prototipagem rápida utilizando *software* de impressão 3D e Arduino.

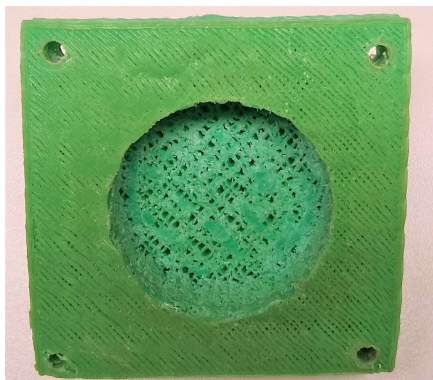


Fig. 15. Acabamento Final

O resultado da máquina, com todos os periféricos devidamente instalados e configurados, pode ser visto na Fig. 16. Um acervo com a documentação completa da máquina, está indexado publicamente na plataforma online *GitHub* [12].



Fig. 16. Máquina Híbrida Utilizada

VI. DISCUSSÕES

A instalação da tupaia à estrutura resultou no aumento do esforço realizado pelos motores para movimentar a mesa. Contudo, a intensidade de corrente fornecida 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, realizasse esforços ao fresar materiais mais duros como o acrílico. Porém, o acionamento e o controle de velocidade da tupaia ainda são feitos de forma manual. Assim, caso o processo de manufatura termine, o usuário precisa desligar a tupaia manualmente.

Vale ressaltar: para tornar o processo mais eficiente é necessário utilizar de forma consciente as ferramentas de trabalho, selecionando sempre a mais adequada para cada material [24]. As fresas utilizadas foram todas selecionadas de acordo com o material fresado, evitando esforços excedentes

pela máquina realizar o corte. Testes utilizando materiais mais duros, como ligas metálicas, por exemplo, podem requisitar mais torque dos motores. Contudo, os ensaios desses materiais não foram executados porque a extrusora não é capaz de utilizar materiais metálicos.

O *software* Simplify3D foi capaz de suportar a utilização da tupaia mesmo sem suporte para este tipo de ferramenta. Entretanto, o fatiamento do modelo tridimensional - que define como a ferramenta irá se movimentar - é dedicado aos processos de manufatura aditiva. Com isso, o caminho pelo qual a fresa irá percorrer pode não ser o mais otimizado para este tipo de aplicação. A utilização do suporte com ímãs nas extremidades permitiu que a troca de ferramentas seja feita de forma rápida e descomplicada. O método, comparado com máquinas industriais que possuem sistemas automatizados de troca, possibilitou a redução de custo de fabricação e a maior facilidade de implementação.

Quanto à impressão 3D, inicialmente, a mesa aquecida não estava alimentada pela tensão da fonte de 12 volts, sendo apenas ligada e desligada pelo relé de estado sólido. A ideia era aplicar a tensão da rede de 220V sobre a mesa, variando o valor médio da tensão por PWM, utilizando o controlador PID. A principal vantagem estaria em alcançar os valores de *setpoint*, de forma mais rápida. Porém, a resistência de 0,3 Ohm é muito baixa para este tipo de aplicação. Pois, caso o sistema embarcado trave, a mesa pode exigir uma corrente de aproximadamente 733 amperes, causando o acionamento do sistema de proteção contra curto circuito da instalação elétrica.

Já na parte de extrusão, as peças começaram a empenar as bordas curvando se para cima, descolando as primeiras camadas, esse problema impossibilitava o término do processo. Pois, devido ao aumento de altura da peça, o bico da extrusora acabava empurrando a peça para outra posição, inutilizando o protótipo. Em um dos casos o problema foi tão sério, que o vidro que fica em cima da mesa aquecida acabou quebrando, junto aos acoplamentos dos motores. Pois, a peça conseguiu bloquear um dos eixos da máquina. Para contornar este problema, um gabinete foi construído. Conforme Fig. 16. Com o intuito de manter a temperatura interna constante, pois o ABS é um termoplástico que sofre contração, caso a peça seja exposta à variação de temperatura.

Outro ponto que merece bastante atenção, está relacionado com os problemas de EMC (Electromagnetic Compatibility – Compatibilidade Eletromagnética) que impedem que a máquina complete qualquer trabalho de impressão. O primeiro, causado por EMI (Eletromagnetic Interference – Interferência Eletromagnética), reiniciava o microcontrolador, devido à proximidade do Arduino Mega, em relação aos cabos pelo qual fluía toda corrente alternada, drenada pelas fontes chaveadas. O problema foi resolvido apenas aumentando a distância do cabo, em relação ao Arduino. No segundo caso, o microcontrolador travava, sem que qualquer mensagem de erro fosse retornada, voltando ao normal só após resetar o microcontrolador. Resolvido, trocando o cabo de comunicação - do Arduino com o computador - por um modelo com blindagem eletrostática e filtro de supressão de ruídos de alta frequência, conhecido como *Ferrite Bead*.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do conjunto de baixo custo e *open source*, Arduino Mega, módulo Ramps 1.4 e *firmware* Marlin, combinados com o *software* aberto de controle e supervisão, Simplify3D. Foi um sucesso por permitir que processos de manufatura híbrida, fossem realizados facilmente a partir de um único *software*. Embarcados em uma estrutura mecânica robusta e de fácil manuseio, viabilizado pela utilização de ímãs e conectores de engate rápido com proteção contra inversão de polaridade, tornando a troca de periféricos mais rápida e segura.

Fresar a placa de fenolite, permitiu identificar que ainda é possível produzir placas de circuito impresso. Conforme visto na parte inferior da Fig. 8. Apenas modificando alguns parâmetros de movimentação, preservando a concepção inicial da máquina [22]. A construção do mancal permitiu demonstrar de forma satisfatória a proposta do estudo. Porém, acreditasse que o processo poderia ter sido otimizado imprimindo a peça com os cinco furos, com o diâmetro um pouco menor do que o esperado. Logo, a ferramenta cortaria menos material, sendo usada apenas para dar acabamento, reduzindo a quantidade de matéria prima, e o tempo necessário para imprimir e fresar.

Recomenda-se, que os trabalhos futuros se concentrem em: desenvolver um sistema embarcado que seja imune aos problemas de EMI encontrados, repensar o *layout* da estrutura mecânica, desenvolver um *software* com funções nativas, imprimir com metal, criar laços com empresas e institutos de pesquisa que tenham interesse em investir no projeto. Como também, produzir protótipos encomendados pela comunidade, com o intuito de financiar bolsas de pesquisa, melhorias e aquisição de equipamentos para o laboratório. E, utilizá-la como ferramenta de popularização da ciência e tecnologia, preservando as características *open source* do projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Fogiatto, "O uso da prototipagem rápida na área médico-odontológica", *Revista Tecnologia & Humanismo*, no. 30, pp. 60-68, 2006.
- [2] J. Nagel, "Hybrid Manufacturing System Design and Development", in *38th Design Automation Conference*, Chicago, 2012, pp. 189-198.
- [3] C. Ahrens and N. Volpato, *Prototipagem rápida*, 1st ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.
- [4] A. Gorni, "Introdução à prototipagem rápida e seus processos." *Plástico Industrial*, pp. 230-239, 2001.
- [5] T. Yamazaki, "Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining", in *18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII)*, Oguchi, 2016, pp. 81-86.
- [6] Z. Zhu, V. Dhokia and S. T. Newman, "A novel process planning approach for hybrid manufacturing consisting of additive, subtractive and inspection processes," *2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Hong Kong, 2012, pp. 1617-1621.
- [7] W. Lee, C. Wei and S. CHUNG, "Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 241, no. 11, pp. 2366-2374, 2014.
- [8] G. Anzalone, B. Wijnen and J. Pearce, "Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta RepRap 3-D printer", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 506-519, 2015.
- [9] A. Kale, A. Kumar, M. Kumar and M. Prakash, "Optimization of hybrid manufacturing process parameters by using FDM in CNC machine", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kattankulathur*, 2018, p. 012088.
- [10] J. Santos, "Investigação e Aperfeiçoamento de um Sistema de Impressão 3D e Fresagem Intercambiável", 4th Brazilian Technology Symposium, 2018.
- [11] P. Jorge Rodriguez, I. Pavel and A. Choudhury, "Development of a 3-D Printer and CNC Milling Desktop Machine for Manufacturing Labs", in *ASEE Annual Conference & Exposition*, New Orleans, 2016.
- [12] J. Santos and P. Macedo, "JoaoPedroAguiar/Hybrid_Machine", *GitHub*, 2019. [Online]. Available: https://github.com/JoaoPedroAguiar/Hybrid_Machine. [Accessed: 25-May- 2019].
- [13] W. Frazier, "Metal Additive Manufacturing: A Review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 1917-1928, 2014.
- [14] K. Karunakaran, S. Suryakumar, V. Pushpa and S. Akula, "Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, no. 5, pp. 490-499, 2010.
- [15] D. Espalín, D. Muse, E. MacDonald and R. Wicker, "3D Printing multifunctionality: structures with electronics", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 963-978, 2014.
- [16] M. Müller and E. Wings, "An Architecture for Hybrid Manufacturing Combining 3D Printing and CNC Machining", *International Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 2016, pp. 1-12, 2016.
- [17] K. Boivie, S. Dolinsek and D. Homar, "Hybrid manufacturing; integration of additive technologies for competitive production of complex tools and products", in *15th International Research/Expert Conference*, Prague, 2011.
- [18] D. Pereira, "Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e acabamento superficial para diferentes ferramentas de fresagem", Master, Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [19] A. Souza, "Aplicação de multisensores no prognóstico da vida de ferramenta de corte no torneamento", Doctor, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [20] A. Ambrosi and M. Pumera, "3D-printing technologies for electrochemical applications", *Chemical Society Reviews*, vol. 45, no. 10, pp. 2740-2755, 2016.
- [21] K. Hamad, M. Kaseem, H. Yang, F. Deri and Y. Ko, "Properties and medical applications of polylactic acid: A review", *Express Polymer Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 435-455, 2015.
- [22] R. Delmondes and L. Rodrigues, "Cnc intercambiável aplicada a confecção de placas de circuito impresso.", Graduate, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2016.
- [23] D. Knop, "Aspectos técnicos e contribuições na graduação: o surgimento de uma impressora 3D.", in *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, Campina Grande, 2018, p. 22.
- [24] J. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [25] K. Karunakaran, V. Pushpa, S. Akula and S. Suryakumar, "Techno-economic analysis of hybrid layered manufacturing", *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, vol. 4, no. 12, p. 161, 2008.