

PROJETO MECATRÔNICO DE UM ROBÔ COM CINEMÁTICA PARALELA DELTA LINEAR PARA MANUFATURA ADITIVA

Efraín Rodríguez, efrainrg2009@gmail.com¹

Cristhian Iván Riaño Jaimes, crsthianivanrj@aluno.unb.br¹

Alberto Álvares, alvares@alvarestech.com¹

¹Universidade de Brasília, 70855-530 Brasília – DF - Brasil

Resumo: As máquinas de Manufatura Aditiva (AM - Additive Manufacturing) vêm sendo cada vez mais importante no processo de desenvolvimento de novos produtos na indústria moderna. O presente trabalho, trata com o projeto mecatrônico de um robô com cinemática paralela delta linear para aplicações de AM. O projeto ocorre sob uma metodologia estruturada para o desenvolvimento de produto baseada em um modelo de referência constituído por três fases principais: 1) na fase de projeto informacional, os requerimentos de usuário são levantados e posteriormente transformados em requisitos de projeto através do método QFD, permitindo definir as especificações meta do produto final – robô delta linear. 2) na fase de projeto conceitual, é utilizada a matriz morfológica para formular e selecionar sistematicamente princípios de solução que permitam definir a arquitetura global do produto – robô delta linear. Finalmente, na fase de projeto detalhado, é apresentada uma análise cinemática do mecanismo delta linear a fim de encontrar um modelo matemático que descreve a relação de posição entre o efetuator final e o deslocamento de cada atuador. A análise cinemática é imprescindível para controle de posicionamento do robô delta linear. Como resultado do desenvolvimento é construído um protótipo funcional do produto a fim de testar e validar os conceitos de solução gerados através da metodologia utilizada.

Palavras-chave: Robô Delta Linear, Manufatura Aditiva, Produto Mecatrônico, Cinemática Paralela, Impressão 3D.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Manufatura Aditiva (AM – Additive Manufacturing) tem-se definido como um conjunto de tecnologias inovadoras para a fabricação de partes mecânicas por adição de material. Essas tecnologias têm significado uma aceleração no processo de desenvolvimento de novos produtos, sendo que permite a fabricação tanto de modelos protótipo de produtos como de partes mecânicas funcionais diretamente desde um modelo digital, eliminando algumas das fases dos processos convencionais de manufatura subtrativa. Atualmente, são conhecidas várias técnicas de AM (Boparai et al. 2016) e dentre estas, a técnica de Fabricação por Filamento Fundido (FFF-Fused Filament Fabrication) destaca-se pela sua facilidade de uso, flexibilidade e economia, tornando-se mais acessível não só para o setor industrial, senão também para investigadores e aficionados. Consequentemente, o interesse pelo projeto e desenvolvimento de máquinas para AM tem aumentado.

Recentemente, máquinas com arquiteturas baseadas em robôs de cinemática paralela vêm sendo amplamente utilizadas em AM, pelo fato que possuem vantagens como a precisão, capacidade de carga, velocidade e aceleração, que os tornam atrativos para este tipo de aplicações. Ao longo dos anos diferentes robôs paralelos surgiram e muitas dessas arquiteturas são verdadeiramente inovadoras. No entanto, o Robô Delta Linear tornou-se de longe o mais bem-sucedido para muitas aplicações incluindo a fabricação por aditivos - AM. Raymond Clavel propôs o primeiro robô com configuração delta em 1985 (Clavel 1989). Basicamente, o robô delta de três graus de liberdade é formado por duas plataformas conectadas através de três mecanismos com juntas esféricas, onde cada mecanismo é constituído por dois elos agindo em paralelo. Uma das principais vantagens desta configuração é a baixa inércia, já que o número de atuadores por junta é mínimo e a reduzida massa-móvel do mecanismo permite-lhe alcançar altas velocidades e acelerações.

O estudo do robô delta tem-se tornado interesse de muitos investigadores nos últimos anos propondo uma grande variedade de projetos (Bouri & Clavel 2010). Muitos trabalhos relacionados com este tipo de arquiteturas são encontrados na literatura abordando principalmente temas como análise cinemática e dinâmica (Szep et al. 2011) e estudos de síntese e otimização dimensional (Zhao 2013). Alguns trabalhos implementando o robô delta para em aplicações de AM também são encontrados (Fiore et al. 2015; Wu et al. 2016). Um dos projetos mais importantes é o bem conhecido “RepRap Rostock” projetado por Johann C. Rocholl (Graves et al. 2012), uma máquina baseada em uma arquitetura delta linear concebida na visão de máquinas autorreplicáveis do projeto RepRap, ou seja, construído com peças impressas e materiais de baixo custo.

Neste contexto, o presente trabalho destaca-se por apresentar o projeto mecatrônico de uma máquina para AM baseada em um robô com arquitetura paralela delta linear, empregando uma metodologia estruturada para o desenvolvimento de produto. A metodologia permite contemplar a maior parte dos aspectos envolvidos no ciclo de vida

do produto dentro da etapa de projeto. Mesmo assim, é possível considerar a voz do usuário na definição dos atributos do produto final.

Este trabalho é organizado assim: na seção 2, é definida a metodologia de desenvolvimento baseada em um modelo de referência para o desenvolvimento de produto. Na seção 3, é apresentada a fase de projeto informacional. Na seção 4, é descrita a fase de projeto conceitual. Na seção 5, é apresentada a fase de projeto detalhado abordando uma análise da cinemática inversa do robô delta linear. Finalmente, na seção 6 são expostas as principais conclusões do trabalho.

2. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

O processo de desenvolvimento de produtos possui uma natureza complexa e multidisciplinar. O mesmo, consiste basicamente em transformar um conjunto de entradas (matéria prima, conhecimento, energia) em saídas desejáveis (produtos) que visam satisfazer as necessidades de um cliente, empregando uma série de operações, recursos, organizações e informações. A complexidade do processo de desenvolvimento diverge do tipo de produto. Um produto mecatrônico é caracterizado por um alto grau de complexidade tecnológica, sendo que no seu projeto a geração de soluções demanda conhecimento de tecnologias mecânicas, eletroeletrônicas e computacionais. Conforme exposto, o desenvolvimento de um produto mecatrônico exige uma sistematização que pode ser auxiliada através do uso de modelos de referência para o desenvolvimento de produtos. Um modelo de referência voltado para o projeto e desenvolvimento de qualquer produto, inclusive produtos mecatrônicos, é proposto por Rozenfeld et al. (2006). Este modelo é constituído pelas macrofases de Pré Desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós Desenvolvimento. A sua vez, a macrofase de Desenvolvimento é subdividida nas fases de Planejamento do Projeto, Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Detalhado e Preparação para Produção e Lançamento. Neste trabalho, o desenvolvimento do robô delta linear para AM ocorre através das fases de Projeto Informacional, Projeto Conceitual e Projeto Detalhado de acordo com o modelo de Rozenfeld et al. (2006). A seguir são descritas cada uma das fases do desenvolvimento.

3. PROJETO INFORMACIONAL

Nesta fase do desenvolvimento visa-se definir um conjunto de especificações técnicas e atributos do produto. Quer dizer, as funcionalidades, características de forma e nível de tecnologia que estarão presentes no produto final. Para isso, é necessário conhecer o mínimo que o cliente espera e deseja encontrar no produto. Sendo assim, o procedimento consiste em levantar as necessidades do cliente e transforma-las em parâmetros de projeto medíveis e testáveis, que no final possam ser traduzidos como especificações técnicas do produto. Com intuito de facilitar esta tarefa tem sido usado o método do QFD (*Quality Function Deployment*), o qual permite transformar sistematicamente as necessidades do cliente em requisitos de projeto. Uma descrição mais detalhada sobre o método do QFD pode ser encontrada em (Akao 1990).

O levantamento das necessidades do cliente deu-se com base em pesquisas bibliográficas e a experiência da equipe de desenvolvimento nas áreas de manufatura aditiva e robótica. Após isso, as necessidades definidas na voz do cliente foram mapeadas e desdobradas em requerimentos de usuário sob uma linguagem voltada mais para engenharia. Neste projeto foram estabelecidos um total de 23 requerimentos de usuário, os quais têm sido agrupados em cinco categorias principais (capacidade, operação, projeto, economia e confiabilidade) visando facilitar a sua análise e avaliação. Tendo isso, foi possível preencher a primeira parte da matriz QFD com a lista dos requerimentos de usuário em uma coluna sobre a parte esquerda, bem como é mostrado na Fig. (1). Na linguagem do QFD os requerimentos de usuário também podem ser chamados “QUEs”.

Além disso, estes requerimentos de usuário são comparados aos pares empregando um digrama de *Mudge*, a fim de conhecer a importância e peso relativo de cada um. No diagrama de *Mudge* a importância relativa é calculada como a somatória da pontuação de comparação de um requerimento com os pares. Mesmo assim, o peso relativo de cada requerimento calcula-se dividindo a sua importância relativa sobre a somatória total de todas as importâncias relativas dos requerimentos. Estas informações permitem priorizar no projeto sobre os requerimentos mais importantes. A importância e peso relativos de cada requerimento de usuário também são listados na parte esquerda da matriz QFD da Fig. (1). Segundo esta avaliação, os requerimentos de usuário mais importantes para o projeto da máquina (robô delta linear) de AM são: 1.1-Qualidade de impressão, 1.4-Amplo espaço de trabalho, 1.2-Máquina Rápida, 1.3-Longo Tempo de Operação, 1.6-Impressão com Vários Tipos Materiais e 4.1-Baixo Custo de Fabricação e Montagem. Mesmo assim, os requerimentos com menor importância para o projeto são: 3.3-Baixo peso e 3.6-Boa Aparência.

O próximo passo foi desdobrar os requerimentos de usuário em requisitos de projeto que representem conceitos mais físicos do produto que podem ser melhor compreendidos pela equipe projetista. Sendo assim, foram gerados 32 requisitos de projeto que foram categorizados de forma semelhante aos requerimentos de usuário. Os 32 requisitos de projetos são listados sobre a parte superior central da matriz QFD da Fig. (1). Na linguagem do QFD os requisitos de projeto podem ser chamados de “COMOs”.

Uma vez definidos os “QUEs” e os “COMOs” continua-se com estabelecer o seu grau de relacionamento sobre parte central da matriz empregados símbolos representativos de um valor numérico. Desta forma, um ponto preto (9)

implica um forte relacionamento, um ponto vazio (3) é um relacionamento médio, uma triângulo invertido (1) é um relacionamento fraco e o espaço branco (0) quer dizer que não possui nenhum relacionamento.

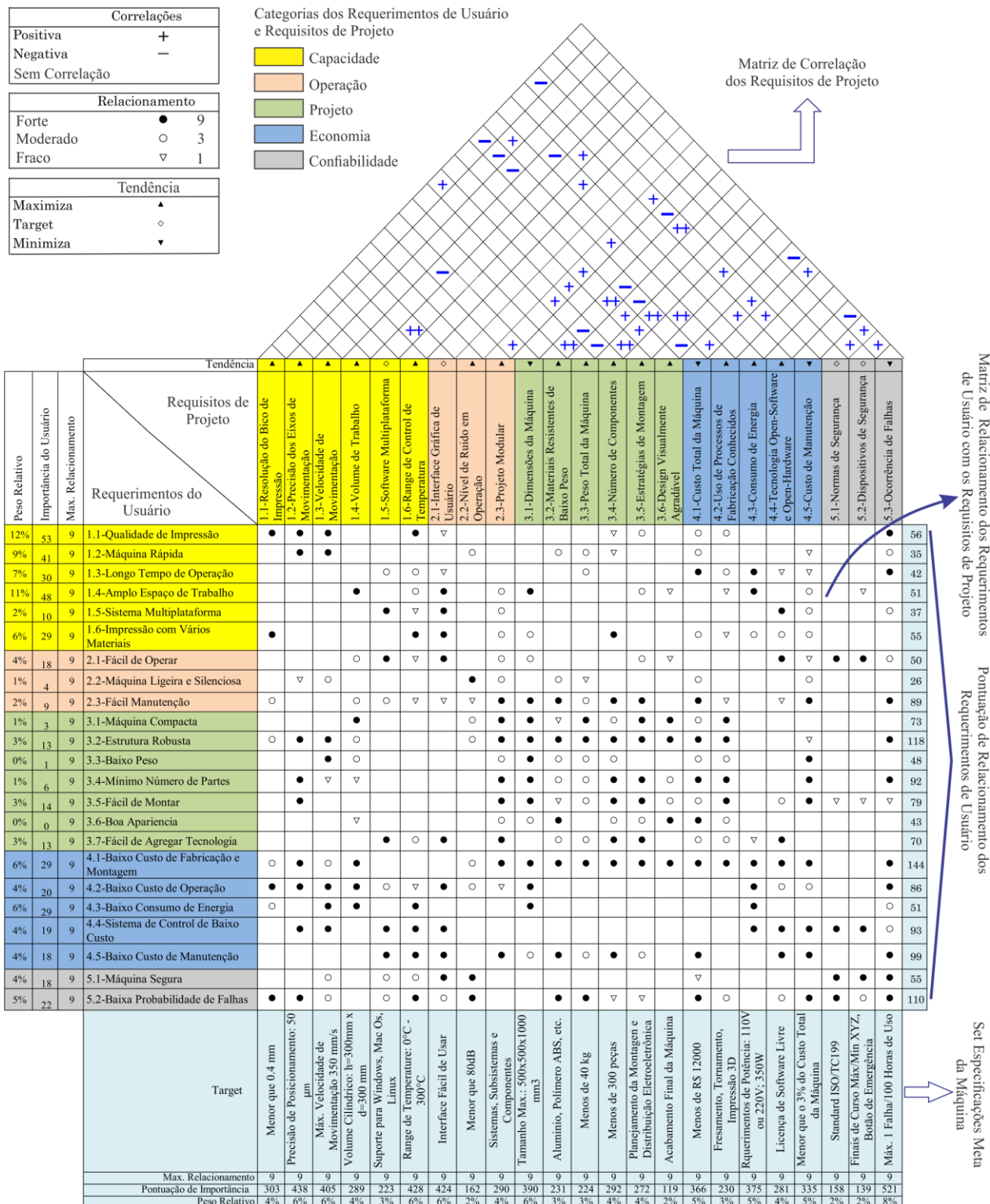


Figura 1. Matriz QFD do relacionamento entre os requerimentos de usuário e os requisitos de projeto.

Como resultado deste relacionamento tem-se na parte direita da matriz as pontuações para os requerimentos de usuário de acordo à quantidade e grau de relacionamentos com os requisitos de projeto. Observa-se que o requerimento “Baixo custo de fabricação e montagem” é influenciado em grande medida pela maioria dos requisitos de projeto selecionados. Além disso, na parte inferior da matriz são disponibilizadas outras informações resultantes do relacionamento, referentes à importância e peso relativo dos requisitos de projeto. Segundo isso, alguns dos requisitos

de projeto mais importantes são a precisão de movimentação dos eixos da máquina, a velocidade e o custo de total da máquina. No telhado da matriz é mostrada a correlação dos requisitos de projeto com os pares, onde uma correlação positiva implica que o aumento de um resulta no aumento do outro. Pelo contrário, se a correlação é negativa prioriza-se o parâmetro mais relevante visando um equilíbrio satisfatório para o projeto.

Como resultado desta fase são obtidas as especificações meta do produto que atingirão as necessidades planteadas pelo cliente. Ditas especificações meta, ou *target* do produto, são apresentadas na parte inferior da matriz QFD (Fig. (1)). Cada um dos requisitos de projeto tem relacionada uma especificação meta passiva de medição e teste, com uma direção de tendência que pode ser crescente, decrescente ou referenciada. De acordo com isso, as principais especificações meta para a máquina são: deverá ter uma precisão de impressão de até 50 μm , poderá alcançar uma velocidade máxima de 350 mm/s, um custo total menor a R\$ 12000, um rango de controle de temperatura entre 0 °C e 300 °C, terá interface de controle fácil de usar, um volume de trabalho cilíndrico de 300x300 mm², dimensões máximas de 500x500x1000 mm³, um consumo de energia menor a 350 W, bico de extrusão com diâmetro menor a 0.4 mm, com estrutura de alumínio, nível de ruído de operação menor a 80 dB, sistema computacional multi-plataforma, entre outras especificações.

4. PROJETO CONCEITUAL

Nesta fase, ocorre a formulação e seleção de conceitos de solução para atingir as especificações meta que foram definidas na fase imediatamente anterior, o qual pode ser visto como uma transição do abstrato para o concreto. O resultado final desta fase é a definição da arquitetura global do produto descrita através de sistemas, subsistemas e componentes (SSCs), tendo assim uma visão preliminar de *design*.

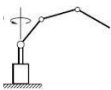
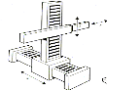
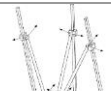
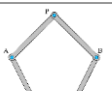
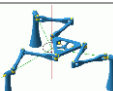
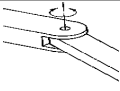
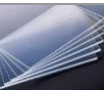
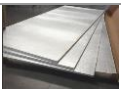
Na geração dos princípios de solução são utilizados diferentes métodos de concepção baseados na criatividade do projetista, os quais podem ser classificados como intuitivos ou sistemáticos. Neste caso, utilizou-se o método intuitivo do *brainstorming* para sugerir ideias que possam tornar-se em conceitos de solução, e o método sistemático da matriz morfológica para encontrar a melhor solução a um determinado problema com base em uma pesquisa sistemática dentro de uma combinação de possíveis alternativas de solução.

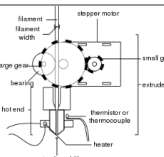
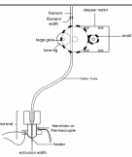
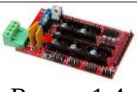
O procedimento iniciou-se decompondo funcionalmente o sistema como um todo, sendo a sua função global imprimir peças em 3D. Dita função global foi dividida em três funções de primeira ordem referentes aos sistemas mecânico, eletroeletrônico e computacional da máquina, as quais foram colocadas na primeira coluna da matriz morfológica (ver Tab. (1)). Bem assim, as funções de primeira ordem foram subdivididas em funções menores de segunda ordem a fim de obter um nível de detalhamento mais aprofundado na formulação dos dispositivos, mecanismos e/ou elementos que podem ser usados como solução. Estas funções de segunda ordem são listadas na segunda coluna da matriz morfológica (Tab. (1)).

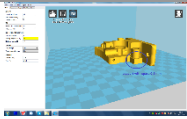
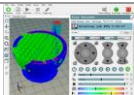
Em total foram definidas 19 funções de segunda ordem: 8 para a função de estrutura mecânica da máquina, 9 para a função do sistema eletroeletrônico e 2 para a função do sistema computacional. Para uma dessas funções de segunda ordem foram formuladas máximo de três alternativas de princípios solução concebidas com base em pesquisas bibliográficas e um processo de *brainstorming* pela equipe de desenvolvimento.

A matriz morfológica completa é apresentada na Tab. (1), com as funções sobre a parte esquerda e os princípios de solução formulados em três colunas (A, B, C) sobre a parte direita.

Tabela 1. Matriz morfológica com os princípios de solução para atingir as especificações meta da máquina.

Funções de 1º ordem	Funções de 2º ordem	Princípios de solução		
		A	B	C
	Função Tipo de Arquitetura	 Serial	 Paralela	 Cartesiana
	Função Tipo de Mecanismo Paralelo	 Delta Linear	 5R	 3R Planar
	Função Tipo de Junta do Mecanismo	 Terminal Rotular	 Junta Rotativa	
	Função Material da Estrutura Principal da Máquina	 Madera - MDF	 Plástico - Acrílico	 Metal - Alumínio

Função de Estrutura Mecânica da Máquina	Função Sistema de Transmissão de Movimento	 Polia - Correia	 Fuso de Esferas Recirculantes	 Cassete - Corrente
	Função Guias Lineares	 Trilho - Patim	 Eixo liso - Rolamento Linear	 Solução Perfil - Rolamento
	Função de Tipo de Extrusor	 Extrusor Direto	 Extrusor Tipo Bowden	
	Função Base de Impressão	 Mesa Aquecida	 Mesa Fria com Fita	
Função do Sistema Eletroeletrônico	Função Interruptor Geral da Máquina	 Interruptor Normal	 Disjuntor	 Botão de Emergência
	Função Fonte de Alimentação	 Fonte Discreta	 Fonte ATX	 Fonte Comutada
	Função Placa Controlador da Máquina	 Arduino	 Raspberry	 TI - Texas Instruments
	Função Drivers de Potência para Atuadores	 Módulo L298D	 Módulo ULM2003	 A4988
	Função Shield de Extensão Tecnológica	 Ramps 1.4	 SainSmart	 Sanguinololu
	Função Atuadores para Geração Movimento	 Motor de Passos	 Motor DC - Encoder	 Brushless DC
	Função Sensores de Fim de Curso Homing	 Fim de Curso Mecânico	 Fim de Curso Óptico	 Fim de Curso Magnético
	Função Hotend para Fundir o Filamento Termoplástico	 Modelo E3D Comercial	 Modelo Geeetech Comercial	 Modelo de DIY com Isolante de Teflon

	Função de Sensor de Temperatura			
		Termistor	Termopar	Termostato
Função do Sistema Computacional	Função Processamento do Arquivo do Modelo 3D – Fatiamento, Geração do Gcode			
	Função Controle e Envio de Comandos à Máquina			
		Pronterface	Repetier Host	

Uma vez foram geradas alternativas para os princípios de solução, iniciou-se o processo de combinação desses princípios a fim de selecionar aqueles que tenham melhor afinidade técnica. Para isso, foram levados em conta aspectos importantes como a disponibilidade e viabilidade tecnológica e econômica, avaliando a possibilidade de produção com os processos de manufatura disponíveis. Desta forma, na Tab. (2) têm sido listados os princípios de solução selecionados para o projeto da máquina de RP.

É preciso salientar a seleção de uma estrutura com cinemática paralela como princípio de solução à definição do tipo de arquitetura para a máquina. A escolha deu-se com o objetivo de estudar as vantagens que podem ter arquiteturas paralela implementadas em máquinas de AM, conhecendo algumas de suas características cinemáticas e dinâmicas como a rapidez e baixa inércia. Especificamente, selecionou-se a configuração delta linear sendo que é uma das mais populares e amplamente empregadas em tarefas relacionadas aos processos de manufatura.

O mecanismo delta linear consiste basicamente de três elos compostos (elos duplos) conectados a uma plataforma móvel usualmente através de juntas rotulares. Porém, neste trabalho optou-se por utilizar uma variante do mecanismo delta linear com elos simples e juntas rotativas. O uso de juntas rotativas dá-se com a tentativa de explorar a possibilidade de aumentar o ângulo de ação em comparação com as juntas rotulares comerciais.

Quanto ao sistema de transmissão foi selecionado uma solução baseada em sistema de fuso-porca com esferas recirculantes, visando atingir a precisão de 50 µm no posicionamento do mecanismo delta. Esta solução pese a ser relativamente custosa em comparação com sistemas de polia-correia, brinda altas prestações no momento de requerer precisão e qualidade. As guias lineares para manter a retinidade do movimento são baseadas em sistemas de trilho-patim, sendo uma das melhores alternativas do mercado em termos de qualidade e economia.

Uma placa de tecnologia Arduino foi selecionada como controlador da máquina, considerando-a como a melhor opção neste caso pela sua facilidade de uso, economia, versatilidade e por ter compatibilidade com a maioria de *shields* de extensão tecnológica que permitem a conexão rápida com dispositivos como drivers de motores de passo, finais de curso, *heaters*, sensores, etc.

Enfim, tendo definido as soluções mecânicas, eletroeletrônicas e computacionais do sistema global que foram expostas na Tab. (2), é possível gerar um modelo preliminar de *design* com detalhamento SSCs. Na Fig. (2) é apresentado um leiaute da máquina sinalando os SSCs junto com uma breve descrição dos mesmos.

São considerados como sistemas principais da plataforma as componentes mecânica, eletroeletrônica e computacional. O subsistema da estrutura principal da máquina é constituído por duas placas de alumínio de 20mm de espessura (base e superior) fixadas e suportadas entre elas por três colunas de perfil de alumínio. Sobre a parte central da estrutura, são fixadas nos perfis três placas de alumínio menores para suporte dos motores e o sistema de transmissão. Além disso, possui uma subestrutura de perfil de alumínio sobre a parte inferior para suportar a mesa aquecida de impressão.

O extrusor, é conformado principalmente pelo corpo do mecanismo extrusor acionado por um motor de passo NEMA17, além de um tubo de teflon para guiar o filamento até o *hotend*.

O mecanismo delta consiste em três conjuntos principais cada um constituído por três peças (cardão, elo e peça plataforma móvel) unidas através de juntas rotativas. Cada conjunto representa uma cadeia do mecanismo. Nas juntas são encaixados rolamentos de esferas fixados entre peça e peça por parafusos. Cabe salientar que neste caso o mecanismo possui uma plataforma móvel composta por três peças móveis entre elas, divergindo dos sistemas convencionais dos mecanismos delta com plataforma de peça fixa. Nessa plataforma móvel é fixado o efetuator final que neste caso é o *hotend* que fundi o material termoplástico para a deposição.

O sistema de transmissão é constituído em grande parte pelos conjuntos fuso-porca recirculante e o trilho-patim. Um motor NEMA 17 para a geração do torque é acoplado no fuso através de um acoplamento elástico. O motor é fixo em uma peça impressa que a sua vez é fixada nas placas de suporte da estrutura principal da máquina. A linearidade da movimentação é mantida pelo patim fixado na porca de esferas recirculantes através de uma peça impressa denominada

“carriage” que suporta e induz o movimento no mecanismo delta. O trilho é parafusado ao longo dos perfis de alumínio da estrutura principal.

Tabela 2. Princípios de solução selecionados para cada função especificada.

Funções de 1º ordem	Funções de 2º ordem	Princípios de solução selecionado
Função de Estrutura Mecânica da Máquina	Função Tipo de Arquitetura	B
	Função Tipo de Mecanismo Paralelo	A
	Função Tipo de Junta do Mecanismo Delta	B
	Função Material da Estrutura Principal da Máquina	C
	Função Sistema de Transmissão de Movimento	B
	Função Guias Lineares	A
	Função de Tipo de Extrusor	B
	Função Base de Impressão	A
Função do Sistema Eletroeletrônico	Função Interruptor Geral da Máquina	A
	Função Fonte de Alimentação	C
	Função Placa Controlador da Máquina	A
	Função Drivers de Potência para Atuadores	C
	Função <i>Shield</i> de Extensão Tecnológica	A
	Função Atuadores para Geração Movimento	A
	Função Sensores de Fim de Curso Homing	B
	Função <i>Hotend</i> para Fundir o Filamento Termoplástico	C
	Função de Sensor de Temperatura	A
Função do Sistema Computacional	Função Processamento do Arquivo do Modelo 3D – Fatiamento, Geração do Gcode	A
	Função Controle e Envio de Comandos à Máquina	B

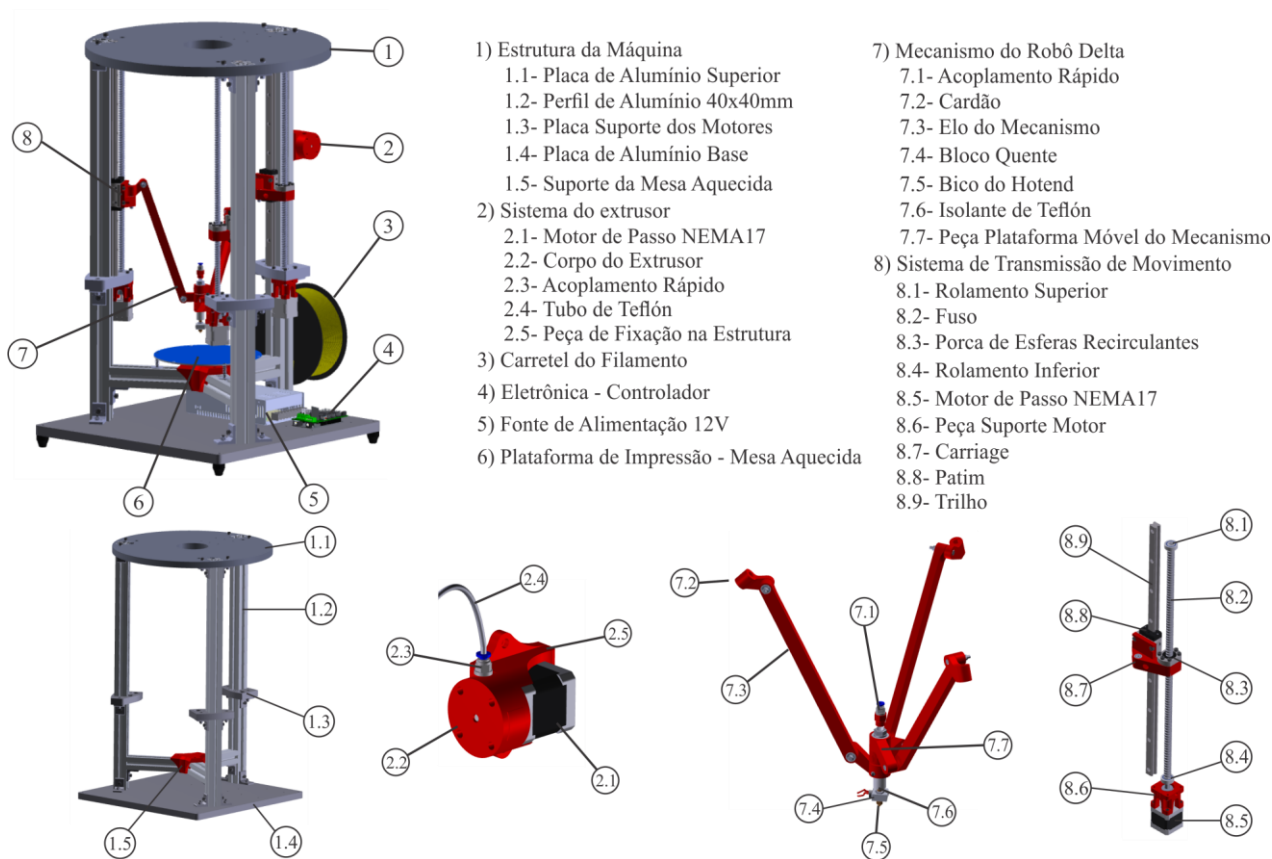


Figura 2. Leiaute global da máquina e descrição dos principais SSCs.

5. PROJETO DETALHADO

A fase de projeto detalhado visa definir uma completa especificação dos materiais, geometrias, tolerâncias, processos de fabricação, partes fabricadas e comerciais, cálculos matemáticos, análise de engenharia, etc. que fazem parte do plano de desenvolvimento do produto. A criação de um primeiro protótipo como uma aproximação do produto final também pode ser realizada nesta fase, visando testar e validar os princípios de solução que foram selecionados para atingir as especificações meta. Um protótipo funcional da máquina para AM baseada em um robô com arquitetura paralela delta linear é apresentado na Fig. (3) a fim de validar os conceitos de engenharia formulados ao longo do projeto.

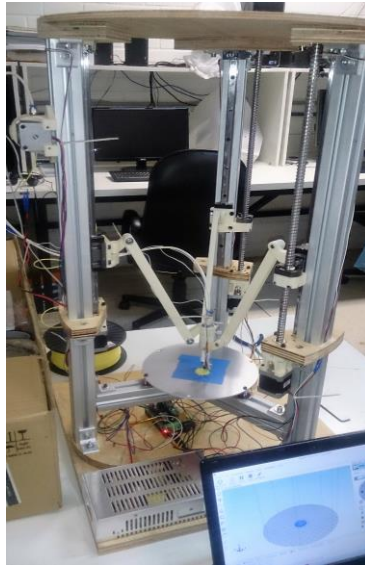


Figura 3. Protótipo funcional da máquina para teste e validação dos conceitos de solução selecionados.

Com o protótipo visava-se principalmente conferir a funcionalidade do mecanismo delta com a variante de elo simples e juntas rotativas. As partes do mecanismo foram fabricadas com impressão 3D. Além disso, foi necessário testar alguns dos ajustes e tolerâncias selecionados para as geometrias críticas das placas usinadas da estrutura principal da máquina. Conforme isso, utilizou-se madeira para fabricar as placas de teste a fim de comprovar os ajustes selecionados antes de fabricar as placas finais em alumínio. A distribuição eletroeletrônica foi montada provisoriamente para teste no protótipo.

5.1. Análise cinemática inversa do mecanismo delta linear.

É sabido que a cinemática inversa permite obter as coordenadas articulares de um robô conhecendo a localização do efetuador final, o que é essencial no controle de posição de robôs paralelos. Na Fig. (4), é apresentado o modelo cinemático do robô delta linear com elos simples para AM e seus respectivos parâmetros cinemáticos. O robô está constituído por três cadeias cinemáticas simétricas $S_0A_iq_iP$ ($i = 1,2,3$) que unem o conjunto móvel do efetuador final com a estrutura base fixa. A sua vez cada cadeia contém três elos (d, L, e) unidos por juntas rotativas como é mostrado na Fig. (4). O posicionamento do efetuador final no espaço tridimensional referenciado pelo sistema S_0 , ocorre graças ao deslocamento q_i gerado pela atuação combinada dos atuadores lineares do robô. O cálculo de dito deslocamento q_i a partir de uma posição conhecida $P(x, y, z)$ do efetuador final, é denominado problema cinemático inverso do robô delta linear.

Os pontos A_1, A_2 e A_3 contêm as coordenadas (x, y) dos atuadores lineares do robô em relação ao sistema de referência S_0 onde ocorre a entrada de movimento a través do sistema fuso-motor (vista superior do robô Fig. (4)). As coordenadas (x, y) desses pontos podem ser obtidas usando as expressões Eq. (1) e Eq. (2), para $i = 1, 2, 3$.

$$A_{i_x} = r * \cos(\theta_i) \quad (1)$$

$$A_{i_y} = r * \sin(\theta_i) \quad (2)$$

Onde:

$$\theta_i = \frac{2i-2}{3} \pi, \quad i=1,2,3, \quad (3)$$

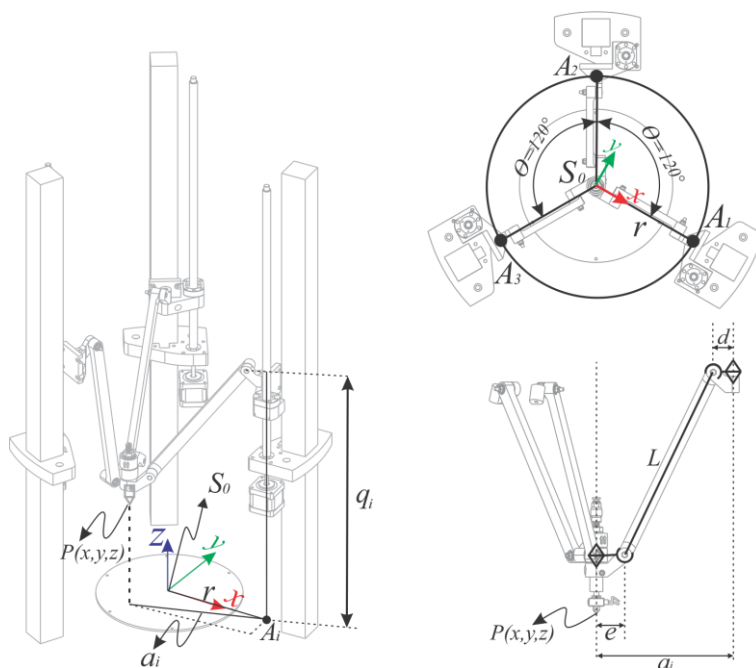


Figura 4. Representação simplificada do mecanismo delta linear com os parâmetros da cinemática inversa.

A projeção a_i de cada cadeia do robô sobre o plano XY do sistema de referência S_0 representa a magnitude da distância entre a posição (x, y) do efetuador final e o ponto A_i sobre o plano XY que pode ser calculada através da Eq. (4) para $i=1,2,3$.

$$a_i = \sqrt{(A_{i-x} - P_x)^2 + (A_{i-y} - P_y)^2} \quad (4)$$

Finalmente, o deslocamento q_i que cada atuador tem que gerar sobre cada patim do robô para localizar o efetuador final em uma posição determinada (coordenadas de deposição de material – código G), pode ser calculado a través da Eq. (5), com $i=1, 2, 3$.

$$q_i = \sqrt{L^2 - (a_i - d - e)^2} + P_z \quad (5)$$

6. CONCLUSÕES

O projeto e a fabricação são atividades imprescindíveis do processo de desenvolvimento de qualquer produto. Neste trabalho, o uso de uma metodologia baseada em um modelo de referência para o desenvolvimento de produto tornou-se fundamental na tentativa de sistematizar gradualmente a tomada de decisões no projeto mecatrônico de uma máquina de Manufatura Aditiva com arquitetura paralela delta linear. Um protótipo funcional é apresentado na Fig. (3) como uma aproximação do produto final. Assim, cabe salientar a importância das ferramentas de projeto empregadas na geração de critérios e conceitos de engenharia ao longo do processo de desenvolvimento da máquina. Os princípios de solução selecionados permitiram atingir as especificações meta da máquina, as quais foram validadas a través do protótipo construído.

A variante do mecanismo delta com elos simples e juntas rotativas apresentada neste trabalho, conservou as características cinemáticas e dinâmicas tradicionais dos robôs paralelos. Porém, ofereceu vantagens relacionadas com o aumento do ângulo de ação das juntas de cada elo (Máx. 110°) em comparação com as juntas de rótula comerciais (Máx. 45°). Além disso, contribuiu com a diminuição do custo de fabricação e montagem do robô.

As equações da cinemática inversa que descrevem a relação entre a posição do efetuador final e o deslocamento das juntas do robô, foram implementadas no controlador da máquina para posicionar o bico de extrusão do termoplástico nos pontos determinados pelos comandos de código G.

A URL <https://www.youtube.com/watch?v=1iXCDo7Wa9s> apresenta um vídeo do protótipo da máquina delta linear em operação. A documentação do desenvolvimento é disponibilizada na URL <https://1drv.ms/f/s!AopCbH3tQo7iXfp5PaTn-ig-M0G>. Após a validação do protótipo pretende-se construir a máquina na sua versão final com estrutura em alumínio e com um controlador baseado no padrão STEP-NC. Estão previstos ensaios de qualificação da máquina a fim de caracterizar seus erros dimensionais e geométricos através de ensaios com peça modelo, tendo determinadas características geométricas que permitam a análise de erros dimensional e geométricos da máquina através da medição da peça com tecnologia de medição por coordenadas.

7. AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos à CAPES pelo e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos-PPMEC pelo apoio financeiro tanto para o desenvolvimento do projeto como para a participação no evento-COBEF2017.

8. REFERÊNCIAS

- Akao, Y., 1990. *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*, Boparai, K.S., Singh, R. & Singh, H., 2016. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), pp.281–299.
- Bouri, M. & Clavel, R., 2010. The linear delta: developments and applications. *Proceedings of International Symposium on Robotics and German Conference on Robotics*, pp.1198–1205.
- Clavel, R., 1989. Device for the movement and positioning of an element in space. *US Patent No. 4,976,582*.
- Fiore, E., Sbaglia, L. & Milano, P., 2015. Dimensional Synthesis of a 5-DOF Parallel kinematic Manipulator for a 3d printer.
- Graves, S. et al., 2012. Johann C. Rocholl (Rostock) Style Delta Robot Kinematics.
- Rozenfeld, H. et al., 2006. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma Referência para Melhoria do Processo*, São Paulo-Brasil.
- Szep, C., Stan, S.D. & Csibi, V., 2011. Design, workspace analysis and inverse kinematics problem of delta parallel robot. *Mechanika*, 17(3), pp.296–299.
- Wu, C. et al., 2016. Delta DLP 3D Printing with Large Size. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.2155–2160.
- Zhao, Y., 2013. Dimensional synthesis of a three translational degrees of freedom parallel robot while considering kinematic anisotropic property. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), pp.169–179.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MECHATRONIC DESIGN OF THE LINEAR DELTA PARALLEL ROBOT FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Efraín Rodríguez, efrainrg2009@gmail.com¹
Cristhian Iván Riaño Jaimes, cristhianivanrj@aluno.unb.br¹
Alberto Álvares, alvares@alvarestech.com¹

¹University of Brasilia, 70855-530 Brasilia – DF - Brazil

Abstract: Additive Manufacturing (AM) machines are increasingly important in the development process of new products in the modern industry. The present work deals with the mechatronic design of the linear delta robot for Additive Manufacturing applications. The project takes place under a structured methodology for product development based on a reference model, through three main phases: In the informational design phase, the user requirements are raised and later transformed into design requirements through the QFD method, which allowed to define the targets specifications of the machine. In the conceptual design phase, a morphological matrix is used to generate and systematically select solution principles that allow defining a global machine architecture - linear delta robot. Finally, in the detailed design phase, a kinematic analysis of the linear delta mechanism is presented in order to find a mathematical model that describes the relation of position between the final effector and the displacement of each actuator. The kinematic analysis is essential for controlling the positioning of the machine within the process of deposition of the funded material. As a result of the development, a functional prototype was presented, which allowed to evaluate and test the solution concepts generated through the methodology used.

Keywords: linear delta robot, additive manufacturing, mechatronics product, parallel kinematics, 3D printing.