

ENFOQUE SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ COM ARQUITETURA PARALELA 5R PARA MANUFATURA ADITIVA

Eliseo Cortés, elicortorres@gmail.com¹
Efraín Rodríguez, efrainrg2009@gmail.com²
Cristhian Riaño, cristhianivanrj@gmail.com²
Renan Bonnard, renan.bonnard@gmail.com²
César Peña, cesarapec@unipamplona.edu.co³

¹Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, 89219-710 Campus Universitário Prof. Avelino Marcante, Joinville - SC, Brasil

²Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 70855-530 Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - DF, Brasil

³Universidade de Pamplona, Faculdade de Engenharias e Arquitetura, Campus Pamplona, Pamplona, Colômbia

Resumo: Recentemente, máquinas com arquiteturas baseadas em robôs de cinemática paralela vêm sendo amplamente utilizadas em aplicações relacionadas com processos de manufatura aditiva, pelo fato que possuem vantagens como a precisão, baixa inércia, velocidade e aceleração que os tornam atrativos para estas aplicações. Neste contexto, o presente trabalho descreve o desenvolvimento de um robô com arquitetura paralela 5R para aplicações de Manufatura Aditiva. O projeto é abordado sob uma metodologia organizada para o desenvolvimento de produto através de três fases principais: Na primeira fase, de desenvolvimento conceitual, são levantadas as necessidades do cliente usando o método “Quality Function Deployment” para transformar ditas necessidades em um set de especificações metas do produto. Na segunda fase, projeto no nível de sistema, são definidos os princípios de solução para atingir as especificações meta e as melhores alternativas são selecionadas para definir a arquitetura global do sistema. Por último na fase de projeto detalhado, é apresentada a máquina construída com base nos critérios de solução definidos nas duas primeiras fases. Nesta fase também é apresentada uma análise cinemática do mecanismo 5R com intuito de instanciar as equações matemáticas que permitirão o posicionar o efetuador final em um determinado ponto dentro do espaço de trabalho. O resultado deste trabalho é uma máquina baseada em um robô paralelo com capacidade para fabricar peças protótipo ou funcionais utilizando a tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Além disso, a plataforma desenvolvida pretende-se utilizar em atividades de treinamento e aperfeiçoamento acadêmico na área de robótica.

Palavras-chave: manufatura aditiva, robô paralelo, mecanismo 5R, ferramentas de projeto, análise cinemática.

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de Manufatura Aditiva (AM-Additive Manufacturing) – Impressão 3D permitem a fabricação de produtos mecânicos diretamente desde um modelo virtual CAD (Computer Aided Design), usualmente por adição de camadas sucessivas de material. Inicialmente, a principal aplicação da AM era a criação de modelos protótipo de produtos para teste e validação de conceitos antes de serem lançados ao mercado. Com os recentes progressos em AM, por exemplo, o material, as tecnologias de fabricação e as máquinas, é agora possível manufaturar produtos finais com um alto valor agregado. FDM (Fused Deposition Modeling) é a tecnologia mais comum de AM., desenvolvida por Scott Crump (Crump 1992) nos anos 1980s, consiste basicamente em fundir um filamento de algum material, geralmente termoplástico, e depositá-lo em camadas superpostas sobre uma plataforma plana. Esta tecnologia tornou-se de longe atrativa tanto para micros e medias empresas como para investigadores, pela sua facilidade de uso, economia e flexibilidade.

A facilidade de acesso à tecnologia FDM tem propiciado o desenvolvimento de máquinas para AM baseadas principalmente em arquiteturas cartesianas. Recentemente, máquinas com arquiteturas baseadas em robôs de cinemática paralela vêm sendo amplamente utilizadas em processos aditivos, sendo que possuem vantagens como a precisão, capacidade de carga, velocidade e aceleração, que os tornam atrativos para este tipo de aplicações (Allen & Trask 2015; Song et al. 2015). Uma das arquiteturas paralelas mais populares é o robô 5R ou Scara Paralelo, proposto inicialmente por Willard L. V. Pollard (Pollard 1942) para automatizar processos de pintura com spray. Esse robô é baseado em um mecanismo com cadeia cinemática fechada de cinco elos unidos a través de cinco juntas rotacionais, onde duas dessas juntas são reservadas para entrada de torque e uma para o efetuador final sujeita a carregamento.

Numerosos trabalhos tem surgido estudando o mecanismo 5R. Gosselin et al. (2016) propõe o projeto conceitual de uma interessante configuração para um robô baseado no mecanismo 5R, com capacidade de produzir movimentos *Schönflies* sem necessidade de atuação redundante. Quer dizer, o efetuador final tem possibilidade de rotação continua ilimitada; uma *feature* que se torna útil principalmente para tarefas de *pick-and-place*. Em outro trabalho (Campos et al.

2010), é apresentado um estudo para maximizar o espaço de trabalho de um robô 5R, optando por um mecanismo com elos de igual longitude, com a possibilidade de mudar de configuração dependendo do ponto de localização do efetuator final. Esta proposta foi implementada no protótipo de robô industrial “DexTAR”. Entre tanto, a integração de um robô 5R dentro de uma célula de montagem é apresentada por Siltala et al. (2010), utilizando uma metodologia baseada no projeto modular com o intuito de facilitar e acelerar a integração de um sistema de microprodução. Alguns outros trabalhos relacionados são encontrados na literatura (Guang & Zhen 2010; Wang et al. 2011). Quanto a AM, o popular “Morgan” projetado por Quentin Harley é uma máquina baseada neste tipo de robôs, com a particularidade de ter só quatro elos, pois as duas juntas com entrada de torque através dos atuadores estão situadas sobre um mesmo eixo de rotação, rejeitando a necessidade de um quinto elo (Harley 2012). O robô é concebido na visão de máquinas autorreplicáveis do projeto RepRap (RepRap 2016), o que permite que seja construído com peças impressas e materiais de baixo custo.

Neste contexto, o presente trabalho destaca-se por apresentar o desenvolvimento de um robô paralelo 5R para AM, através de uma metodologia organizada para o desenvolvimento de produto. A metodologia empregada 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 (robô 5R para AM).

O *outline* deste documento é: na seção 2, é definida a metodologia de desenvolvimento baseada em um modelo para o desenvolvimento de produto. Na seção 3, é apresentada a fase de desenvolvimento conceitual. Na seção 4, é detalhada a fase de projeto no nível de sistema. Na fase 5, é apresentada a fase de projeto detalhado abordando uma análise da cinemática inversa do mecanismo 5R. Por último, na seção 6 são expostas as principais conclusões do trabalho.

2. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Uma máquina para AM, independentemente da arquitetura, é considerada um produto mecatrônico 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 Ulrich & Eppinger (2012). Este modelo consiste em uma série de passos ou fases através das quais é possível conceber, projetar, manufaturar, testar e lançar um produto ao mercado, considerando ainda a sua possível descontinuidade.

Neste trabalho, o desenvolvimento do robô 5R para AM ocorre através das fases de Desenvolvimento Conceitual, Projeto no Nível de Sistema e Projeto Detalhado, com base no modelo de referência anteriormente referido. A seguir são descritas cada uma das fases do desenvolvimento.

3. DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL

Esta fase do desenvolvimento constitui um procedimento para definir as especificações técnicas e atributos do produto final. O procedimento consiste em levantar as necessidades do cliente e transforma-las em parâmetros de engenharia medíveis e testáveis, que no final possam ser traduzidos como especificações técnicas do produto. Com o intuito de facilitar esta tarefa tem sido usada a metodologia QFD (*Quality Function Deployment*), a qual permite transformar sistematicamente as necessidades do cliente em parâmetros de engenharia (Akao 1990).

Desta forma, inicia-se com o levantamento das necessidades do cliente através de uma enquete realizada a um grupo de pessoas com algum grau de conhecimento nas áreas de AM, máquinas CNC ou robótica. Após isto, as necessidades definidas na voz do cliente, são mapeadas e desdobradas em requerimentos de usuário sob uma linguagem voltada mais para engenharia, tendo como base as pesquisas bibliográficas e a experiência da equipe de desenvolvimento na área. Em total foram estabelecidos 16 requerimentos de usuário atribuídos ao robô 5R para AM, os quais têm sido agrupados em quatro categorias principais: projeto, manufatura, uso e manutenção. Estes requerimentos são listados sobre a parte esquerda da matriz QFD mostrada na Fig. (1). Na linguagem do QFD os requerimentos de usuário também podem ser chamados “QEs”.

Os requerimentos de usuário são comparados aos pares empregando um diagrama 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 dentro do projeto do robô 5R para AM são: 3.3-Boa qualidade de impressão, 1.2-Ampla espaço de trabalho, 2.2-Baixo custo de manufatura e montagem e 3.2-Máquina rápida. Mesmo assim os requerimentos com menor importância são: 1.3-Baixo peso e 1.4-Aparência atrativa. O próximo passo foi transformar os requerimentos de usuário em parâmetros de engenharia que representem conceitos mais físicos do produto e possam ser melhor compreendidos pela equipe projetista. Sendo assim foram selecionados 16

parâmetros de engenharia que são listados em categorias sobre a parte superior central da matriz QFD (Fig. (1)). Na linguagem do QFD os parâmetros de engenharia são também chamados “COMOs”.

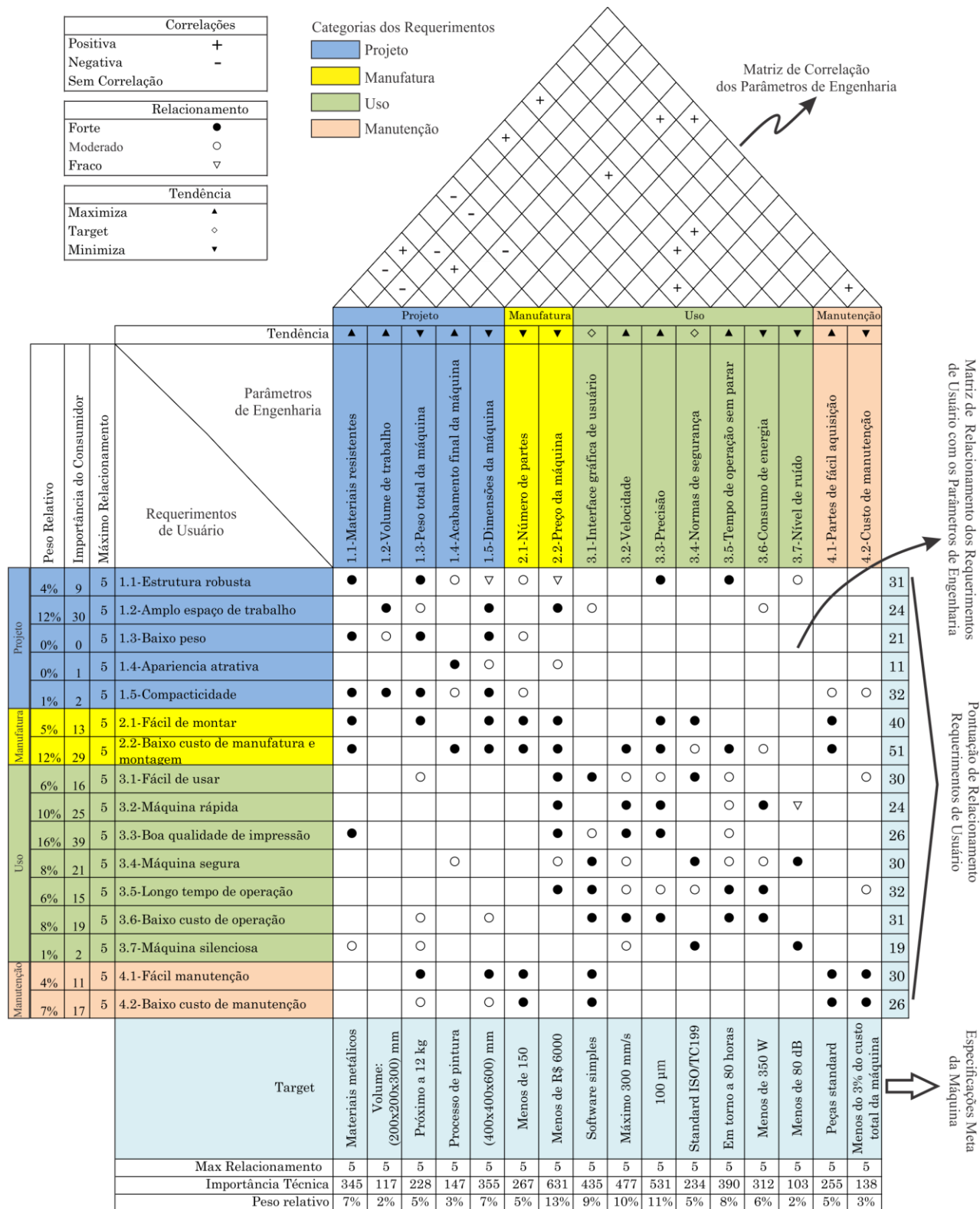


Figura 1. Matriz QFD do relacionamento entre os requerimentos de usuário e parâmetros de engenharia.

Na parte central da matriz são estabelecidos os relacionamentos entre os “Ques” e os “COMOs”, onde um valor de 5 implica um forte relacionamento, 3 é médio, 1 é fraco e 0 é sem relacionamento. Como resultado deste relacionamento tem-se na parte direita da matriz as pontuações para os requerimentos de usuário de acordo à quantidade

e tipo de relacionamentos com os parâmetros de engenharia. Observa-se que o requerimento “Baixo custo de manufatura e montagem” é influenciado em grande medida pela maioria dos parâmetros de engenharia selecionados, além disso, na parte inferior da matriz são disponibilizadas outras informações resultantes do relacionamento, referentes à importância e peso relativo dos parâmetros de engenharia, tendo que o custo total da máquina, a precisão e a velocidade são os parâmetros de engenharia mais importantes.

No telado da matriz, uma correlação dos parâmetros de engenharia com os pares é apresentada, 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 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 parâmetros de engenharia gera uma especificação meta passiva de medição e teste, com uma direção de tendência que pode ser crescente, decrescente ou referenciada. Em relação aos parâmetros de engenharia mais importantes no projeto do robô 5R para AM, sinalados anteriormente, as principais especificações meta para a máquina são: deverá ter um custo total menor a R\$ 6000, uma precisão de impressão de até 100 µm e poderá alcançar uma velocidade máxima de 300 mm/s. Além disso, terá software de manejo simples, um volume de trabalho de (200x200x300) mm, dimensões máximas de (400x400x600) mm, um consumo de energia de menos de 350 W, com estrutura metálica, capacidade de trabalho de até 80 horas sem parar, nível de ruído de operação menor a 80 dB, entre outras especificações.

4. PROJETO NO NÍVEL DE SISTEMA

Nesta fase, ocorre a formulação e seleção de conceitos de solução que possam atingir as especificações meta que foram definidas na fase imediatamente anterior. Isso pode ser visto como uma transição do abstrato para o concreto. No final, o resultado desta fase é definir uma arquitetura para o produto descrita através de sistemas, subsistema e componentes SSCs, tendo assim uma visão preliminar de *design*.

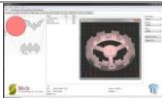
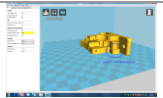
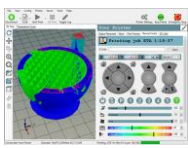
Na geração dos princípios de solução são utilizados diferentes métodos de concepção baseados na criatividade do projetista, os quais podem ser classificados como intuitivos ou sistemáticos. Neste caso, utilizou-se o método intuitivo do *brainstorming* para sugerir ideias que possam tornar-se em conceitos 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.

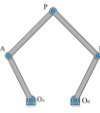
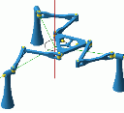
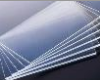
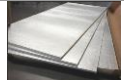
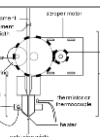
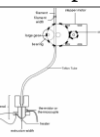
O procedimento iniciou-se decompondo funcionalmente o sistema como um todo, sendo a sua função global imprimir peças em 3D. Dita função global é desdobrada em uma série de funções parciais de primeira ordem, as quais foram colocadas na primeira coluna da matriz morfológica (ver Tab. (1)). Bem assim, as funções de primeira ordem foram subdivididas em funções menores de segunda ordem a fim de obter um nível de detalhamento mais aprofundado para a 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)).

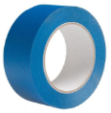
Em total foram definidas 18 funções de segunda ordem. Para cada função foram formuladas não mais de três alternativas de princípios solução baseadas em soluções mecânicas, eletroeletrônicas e de software concebidas com base em pesquisas bibliográficas e um processo de *brainstorming* pela equipe de desenvolvimento.

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.

Funções de 1º ordem	Funções de 2º ordem	Princípios de solução		
		A	B	C
Processar Arquivo do Modelo Digital da Peça	Fatiar o Modelo 3D e Gerar o Código G	 Slic3r	 Cura Engine	 Repetier Host
	Enviar Comandos de Controle à Máquina	 Pronterface	 Interface Própria	
	Ligar Fonte de Alimentação	 Interruptor Normal	 Disjuntor	

Energizar Sistema	Converter AC-DC	 Fonte Discreta	 Fonte ATX	 Fonte Comutada
Controlar sistema	Processar Informação de Controle	 Arduino	 Raspberry	 Sanguinololu
	Controlar Posição de Atuadores	 A4988	 Módulo L298D	
Função Estrutura do Sistema	Mecanismo para Posicionamento em XY	 Delta Linear	 5R	 3R Planar
	Tipo Material para o Mecanismo e a Estrutura	 Madera - MDF	 Plástico - Acrílico	 Metal - Alumínio
Posicionar eixos da máquina	Gerar Movimento	 Motor de Passos	 Motor DC - Encoder	 Brushless DC Motor
	Transmitir Movimento XY	 Polia - Correia	 Sem Fim - Coroa	 Cassete - Corrente
	Transmitir Movimento Z	 Barra Roscada – Porca Normal	 Fuso Trapezoidal	 Fuso de Esferas Recirculantes
	Manter Linearidade no Eixo Z	 Eixo liso - Rolamento Linear	 Trilho - Patim	 Solução Perfil – Rolamento
	Fazer Homing	 Fim de Curso Mecânico	 Fim de Curso Óptico	 Fim de Curso Magnético
Extrudar Material	Aquecer Material	 Hotend E3D	 Hotend -Isolante de Teflon	
	Controlar Temperatura	 Termistor	 Termopar	 Termostato
	Empurrar Material	 Extrusor Direto	 Extrusor Tipo Bowden	

Controlar Aderência da Peça na Base de Impressão	Aderir Peça			
		Fita Aderente	Spray	Mesa Aquecida

A partir das alternativas geradas para os princípios de solução, a equipe de desenvolvimento iniciou 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 AM.

Cabe salientar a escolha do mecanismo 5R como princípio de solução à função de posicionamento no plano XY da máquina, visando aproveitar as vantagens deste mecanismo que já foram destacadas anteriormente. É preciso além, salientar a utilização de uma interface gráfica de controle por *software* propriamente desenvolvida para o projeto, que servirá para enviar comandos de controle (comandos Gcode) desde o ordenador até o controlador da máquina.

Tabela 2. Princípios de solução selecionados para cada uma das funções especificadas.

Funções de 1º ordem	Funções de 2º ordem	Princípios de solução selecionado
Processar Arquivo do Modelo Digital da Peça	Fatiar o Modelo 3D e Gerar o Código G	A
	Enviar Comandos de Controle à Máquina	B
Energizar Sistema	Ligar Fonte de Alimentação	A
	Converter AC-DC	B
Controlar sistema	Processar Informação de Controle	A
	Controlar Posição de Atuadores	A
Função da Estrutura do Sistema	Mecanismo para Posicionamento em XY	B
	Tipo Material para o Mecanismo e a Estrutura	C
Posicionar eixos da máquina	Gerar Movimento	A
	Transmitir Movimento XY	A
	Transmitir Movimento Z	A
	Manter Linearidade no Eixo Z	A
	Fazer <i>Homing</i>	B
Extrudar Material	Aquecer Material	A
	Controlar Temperatura	A
	Empurrar Material	A
Controlar Aderência da Peça na Base de Impressão	Aderir Peça	C

Quanto aos sistemas de transmissão foram selecionadas soluções econômicas baseadas em sistemas correia-polia para o mecanismo 5R e fuso-porca para movimentar a plataforma de impressão (eixo Z). As guias lineares para manter a retinidade do movimento são baseadas em sistemas de eixo liso-rolamento linear, sendo que fornecem uma boa prestação em termos de funcionalidade 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 dos 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. Os subsistemas mais salientados segundo a Fig. (2), são o subsistema do extrusor (1), o subsistema do eixo Z (2) e o subsistema do mecanismo 5R.

O extrusor, é conformado principalmente pelo corpo do mecanismo extrusor acionado por um motor de passo NEMA17 e o *hotend* que possui a resistência que aquece e funde o filamento do material termoplástico, o qual sai pelo bico com resolução de 0.4 mm.

O subsistema do eixo Z, é constituído por uma estrutura de duas placas de acrílico fixadas através de barras roscadas e porcas. Entre essas placas encontram-se os eixos lisos com rolamentos lineares que mantêm a linearidade do movimento e o fuso com a porca que servem como sistema de transmissão de movimento acionado por um motor de passo NEMA23 fixado na placa de acrílico superior da estrutura, além disso, é possível observar (Fig. (2)) que os

rolamentos lineares estão fixados à porca do fuso através de uma peça de acrílico parafusada. Mesmo assim, mais duas peças de acrílico fixadas aos rolamentos lineares dão suporte à mesa aquecida de impressão.

O mecanismo 5R é fabricado em placa de alumínio-2024 de 6 mm de espessura, onde cada elo do mecanismo é constituído por duas peças fixadas paralelamente entre elas com parafusos. As juntas de união entre os elos são conformadas por eixos de aço de 8 mm de diâmetro que giram sobre rolamentos de esferas – 608RS encaixados nas peças de alumínio. Nas duas juntas principais do mecanismo, chamadas “ombros” do mecanismo, são colocados os dois motores NEMA23 que fornecem o torque para gerar o movimento através de um sistema de correia-polia com redução 2,12 : 1. No extremo final do mecanismo é colocado o efetuator final do robô, neste caso o subsistema do extrusor.

Todos os subsistemas descritos anteriormente são montados sobre uma estrutura principal fabricada em perfil angular de ferro de ¾ de polegada. De igual forma, as fontes de alimentação ATX de 12V, a eletrônica (Arduino Mega 2560-Ramps 1.4-drivers A4988) e o carretel do filamento são também montados sobre a estrutura principal.

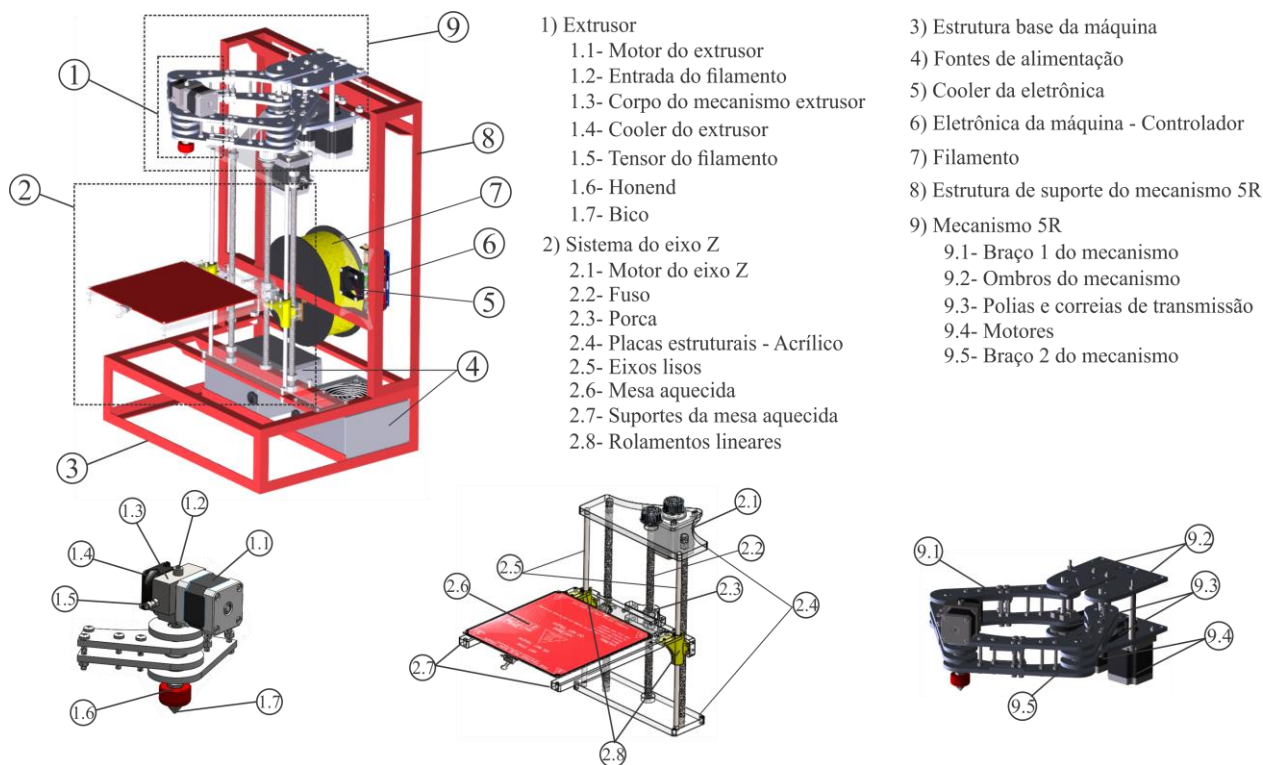


Figura 2. Leiaute global do robô 5R para AM e descrição dos principais SSCs.

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.

Neste trabalho, sendo que já foram detalhados alguns materiais e componentes na fase anterior, a fase de projeto detalhado é utilizada para descrever a resolução do problema cinemático inverso do mecanismo 5R, a fim de instanciar as equações que permitirão posicionar o efetuator final do robô (extrusor) em um determinado ponto do plano XY.

5.1.1. Análise cinemática inversa do mecanismo 5R.

É sabido que a cinemática inversa permite obter as coordenadas articulares de um robô conhecendo a posição e orientação do efetuator final. Neste caso particular não são requeridas coordenadas de orientação, só posição-plano XY.

A resolução do problema cinemático inverso do mecanismo 5R dá-se com base no método geométrico partindo da representação gráfica do mecanismo apresentada na Fig. (3) que contém os parâmetros cinemáticos do mecanismo. Segundo esta representação, o mecanismo é conformado pelos cinco elos L , L_1 , L_2 , L_3 y L_4 unidos através das juntas A , B , C , D e P , onde P é a junta do efetuator final, A y C são as juntas de entrada de torque através dos atuadores, e B y D são as juntas que representam os cotovelos do mecanismo. O objetivo é determinar os ângulos θ_1 e θ_2 partindo de conhecer as coordenadas (x,y) do ponto P .

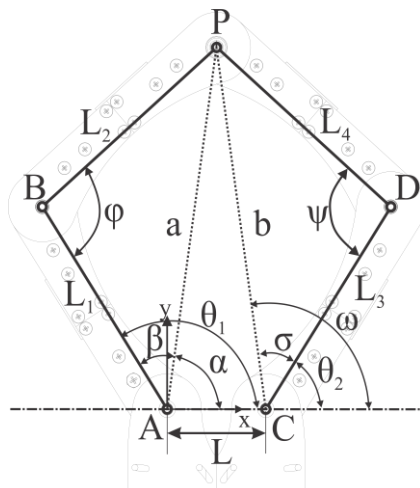


Figura 3. Representação simplificada do mecanismo 5R com os parâmetros da cinemática inversa.

O procedimento inicia com o cálculo das longitudes a e b , as quais são linhas imaginárias utilizadas a fim de facilitar os cálculos. Estas longitudes podem ser calculadas pelo princípio do Pitágoras através das expressões matemáticas Eq. (1) e Eq. (2). Mesmo assim, utilizando a propriedade trigonométrica da tangente inversa obtém-se as equações Eq. (3) e Eq. (4) que permitem calcular os ângulos α e ω associados às linhas a e b .

$$a = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

$$b = \sqrt{(L-x)^2 + y^2} \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(y, x) \quad (3)$$

$$\omega = \pi - \tan^{-1}(y, L - x) \quad (4)$$

No tento de continuar com análise matemática, é preciso considerar as possíveis configurações que o mecanismo 5R pode adotar quanto à disposição dos elos. De acordo com a Fig. (4) o mecanismo pode adotar quatro possíveis configurações dependendo da posição das juntas dos cotovelos do mecanismo. As variáveis *elbow1* e *elbow2* estão associadas à posição dos cotovelos do mecanismo, sendo que se qualquer uma dessas variáveis adota um valor de 1 implica que o cotovelo vai para fora. Pelo contrário, se o valor é -1 que dizer que o cotovelo é para dentro (ver Fig. (4)).

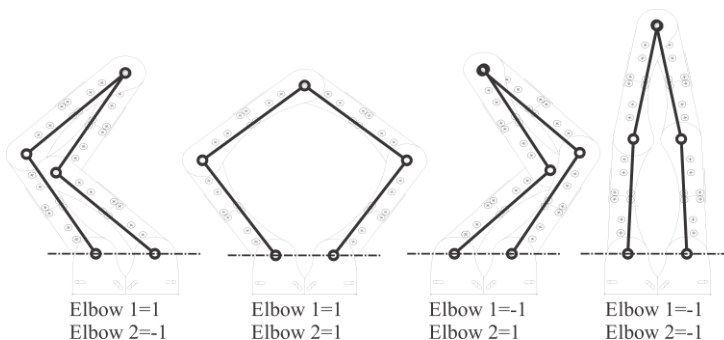


Figura 4. Representação das quatro possíveis configurações do mecanismo 5R.

Com base na Fig. (3), é possível antecipar que os valores angulares θ_1 e θ_2 são calculados em termos de β e σ . Portanto, é necessário definir expressões para estes parâmetros, as quais podem ser instanciadas de forma mais fácil conhecendo os ângulos φ e ψ associados aos cotovelos do mecanismo. Desta forma, aproveitando as propriedades do cosseno é possível definir as expressões a seguir:

$$\cos(\varphi) = \frac{L_1^2 + L_2^2 - a^2}{2L_1L_2} \quad (5)$$

$$\cos(\psi) = \frac{L_3^2 + L_4^2 - b^2}{2L_3L_4} \quad (6)$$

Em seguida, faz-se uso das propriedades do seno e cosseno para definir as equações a seguir:

$$\sin(\varphi) = \text{elbow1} \sqrt{1 - \cos(\varphi)^2} \quad (7)$$

$$\sin(\psi) = \text{elbow2} \sqrt{1 - \cos(\psi)^2} \quad (8)$$

Tendo isso já é possível calcular os valores angulares φ e ψ fazendo uso da tangente inversa através das equações Eq. (9) e Eq. (10).

$$\varphi = \tan^{-1}(\sin(\varphi), \cos(\varphi)) \quad (9)$$

$$\psi = \tan^{-1}(\sin(\psi), \cos(\psi)) \quad (10)$$

Uma vez conhecidos os valores angulares φ e ψ podem ser estabelecidas expressões matemáticas em termos desses ângulos que permitam calcular β e σ tendo como referência a representação da Fig. (3). Conforme exposto, tem-se:

$$\beta = \tan^{-1}(L_2 \sin(\pi - \varphi), L_1 + L_2 \cos(\pi - \varphi)) \quad (11)$$

$$\sigma = \tan^{-1}(L_4 \sin(\pi - \psi), L_3 + L_4 \cos(\pi - \psi)) \quad (12)$$

Finalmente, as expressões matemáticas que permitem relacionar a posição do efetuador final com as coordenadas articulares dos atuadores do mecanismo θ_1 e θ_2 , são formuladas em termos dos valores angulares α , ω , β e σ através das equações Eq. (13) e a Eq. (14).

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad (13)$$

$$\theta_2 = \omega - \sigma \quad (14)$$

Essas equações da cinemática inversa do robô são incorporadas no algoritmo embarcado no controlador da máquina. Então, o controlador recebe desde uma interface de usuário comandos de código G com as informações de posição do efetuador final (*hottend*) para deposição do material fundido e determina, a través da cinemática inversa, as coordenadas das juntas atuadas do robô.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho evidenciou a importância do apoio de uma metodologia estruturada de projeto na tomada de decisões ao longo do processo de desenvolvimento de um produto mecatrônico. O projeto do robô 5R para AM foi abordado através de uma metodologia organizada para o desenvolvimento de produto, a qual permitiu obter uma máquina para impressão 3D totalmente funcional apresentada na Fig. (5a). Os primeiros testes de funcionamento da máquina são apresentados na Fig. (5b). Um vídeo da máquina em funcionamento é disposto no link: <https://www.youtube.com/watch?v=lHPAIW9SO0o>.

As ferramentas de projeto constituíram diretrizes na geração de critérios de engenharia e conceitos de solução durante o processo de desenvolvimento da máquina. Foram alcançadas as principais especificações meta da máquina: custo total menor a R\$ 6000, precisão de impressão de até 100 μm , uma velocidade máxima de 300 mm/s, software de controle simples, um volume de trabalho de (200x200x300) mm, dimensões máximas de (400x400x600) mm, um consumo de energia menor que 350 W e uma estrutura metálica. Também, demonstrou-se o potencial das arquiteturas paralelas para aplicações de AM, sendo que contribuem com a produtividade desses processos pela sua precisão, velocidade e aceleração.

Cabe salientar o fato que o trabalho contribui com as pesquisas nas áreas de robótica e AM, e mais especificamente com o projeto de robôs com arquitetura paralela baseada no mecanismo 5R. Além disso, a plataforma desenvolvida pretende-se utilizar em atividades de treinamento e aperfeiçoamento acadêmico na área de robótica.

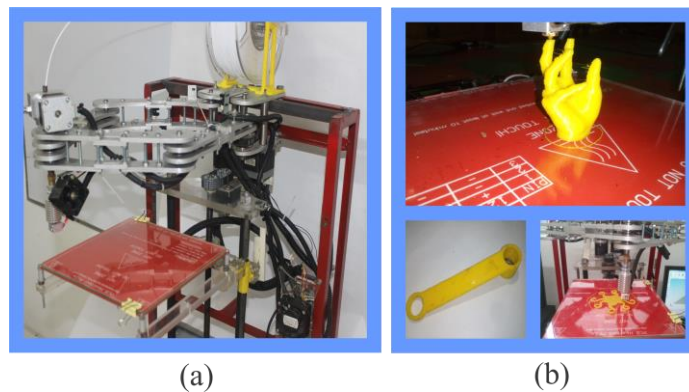


Figura 5. Resultados do desenvolvimento: (a) robô 5R para AM; (b) primeiras peças impressas.

7. REFERÊNCIAS

- Akao, Y., 1990. *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*, Allen, R.J.A. & Trask, R.S., 2015. An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot. *Additive Manufacturing*.
- Campos, L. et al., 2010. Development of a Five-Bar Parallel Robot With Large Workspace. *Proceedings of Annual Mechanisms and Robotics Conference*, pp.917–922.
- Crump, S.S., 1992. Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects. *US Patent 5,121,329*.
- Gosselin, C. et al., 2016. Workspace and Sensitivity Analysis of a Novel Nonredundant Parallel SCARA Robot Featuring Infinite Tool Rotation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(2), pp.776–783.
- Guang, H.E. & Zhen, L.U., 2010. Optimization of Planar Five bar Parallel Mechanism via Self reconfiguration Method. *Chinese Journal of Aeronautics*, 18(2), pp.185–192.
- Harley, Q., 2012. <http://www.morgan3dp.com/>.
- Pollard, W.L.V., 1942. "Position controlling apparatus," US Patent No.2,286,571 4.
- RepRap, 2016. Main Page - RepRap Wiki. Available at: <http://reprap.org/>.
- Siltala, N. et al., 2010. A H-Scara Mini Robot - a Dual Parallel Kinematics Mini Manipulator. *Proceedings of the joint conference of the 41st International Symposium on Robotics, ISR 2010, and 6th German Conference on Robotics, ROBOTIK 2010*, pp.1218–1224.
- Song, X., Pan, Y. & Chen, Y., 2015. Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.
- Ulrich, K.T. & Eppinger, S.D., 2011. *Product Design and Development* 5th Editio., New York: McGraw-Hill Education.
- Wang, H., Yang, J. & Li, Z., 2011. Application of convex optimization in integrated design of five-bar mechanism. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, (1), pp.1119–1124.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

APPROACH ON DEVELOPMENT OF THE 5R PARALLEL ROBOT FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Eliseo Cortés, elicortorres@gmail.com¹
Efraín Rodríguez, efrainrg2009@gmail.com²
Cristhian Riaño, cristhianivanrj@gmail.com²
Renan Bonnard, renan.bonnard@gmail.com²
César Peña, cesarapec@unipamplona.edu.co³

¹University of Santa Catarina State, Center of Technological Sciences, 89219-710 Campus Universitário Prof. Avelino Marcante, Joinville - SC, Brazil

²University of Brasilia-Technology Faculty, 70855-530 Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasilia - DF, Brazil

³University of Pamplona, Engineering and Architecture Faculty, Campus Pamplona, Pamplona, Colombia

Abstract: In recent years, parallel kinematic robots are widely used in applications related to additive manufacturing processes, due to they have advantages such as precision, low inertia, high speed and lightness, which makes them attractive for these applications. In this context, the present work describes the development of a robot with parallel architecture 5R for applications of Additive Manufacturing. The design is approached under an organized methodology for product development through three main phases: in the conceptual development phase, customer's needs are defined and Quality Function Deployment is used to transform these needs into a set of product target specifications. in the system-level design phase, principles of solution are defined and the best alternatives are selected to define the overall system architecture. Finally, in the detailed design phase the machine is built based on the solution criteria defined in the first two phases. In this phase, a kinematic analysis of the 5R mechanism is also presented in order to instantiate the mathematical equations that will allow the positioning of the final effector at a given point within the workspace. The result of this work is a machine based on a parallel robot with the capacity to fabricate prototype or functional parts using the technology of Fused Deposition Modeling. In addition, the platform developed is intended to be used in training and academic improvement activities in the area of robotics.

Keywords: additive manufacturing, parallel robot, 5R mechanism, design tools, kinematic analysis.