

Victor Hugo Brito Fernandes

**Pulso Esférico Robótico para Aplicação em
Máquinas CNC de Corte de Chapas**

Vitória

2014

Victor Hugo Brito Fernandes

Pulso Esférico Robótico para Aplicação em Máquinas CNC de Corte de Chapas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecâ-
nica da Universidade Federal do Espírito Santo,
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

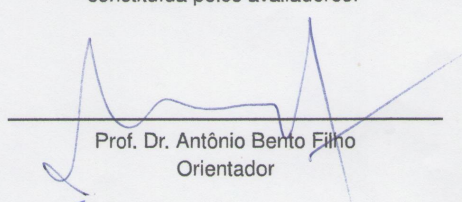
Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Antônio Bento Filho

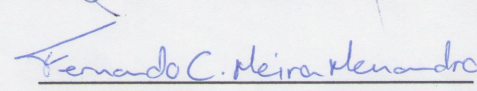
Vitória
2014

Folha de Aprovação

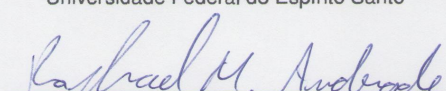
Trabalho de Conclusão de Curso sob o título "*Pulso Esférico Robótico para Aplicação em Máquinas CNC de Corte de Chapas*", defendido por Victor Hugo Brito Fernandes e aprovado em 16 de Dezembro de 2014, em Vitória, Estado do Espírito Santo, pela banca examinadora constituída pelos avaliadores:



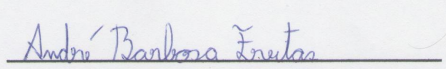
Prof. Dr. Antônio Bento Filho
Orientador



Prof. Dr. Fernando César Meira Menandro
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. M.Sc. Raphael Milanezi de Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo



B.Sc. André Barbosa Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo

"The noblest pleasure is the joy of understanding."

Leonardo Da Vinci

RESUMO

O presente trabalho apresenta o projeto de um pulso esférico para aplicação em máquinas CNC de corte de chapas e tubos. Pulsos esféricos (*spherical wrists*) são dispositivos robóticos que desacoplam os movimentos de posicionamento e orientação nos robôs manipuladores e são necessários para operações que exigem destreza do manipulador. Nas máquinas de corte CNC, estes possibilitam o corte inclinado em superfícies planas, curvas e tubos ou o alcance de novas posições para o corte. Inicialmente é feita uma pesquisa de publicações científicas e de fabricantes de dispositivos similares, das soluções mecatrônicas mais utilizadas e da aplicação do dispositivo no corte de chapas. Em seguida é apresentado o protótipo virtual da solução a ser implementada, são modeladas as cinemáticas direta e inversa, baseadas nesta solução e são apresentados resultados que confirmam a precisão da cinemática desenvolvida para o protótipo virtual. Por fim, é proposta uma forma de integrar o dispositivo à máquina de corte CNC disponível na empresa e é elaborado um programa de conversão de arquivos DXF para código G, adicionando novos graus de liberdade ao dispositivo.

Palavras Chave: wrist, pulso esférico, pulso robótico, bevel head, cabeçote chanfrador

ABSTRACT

This work presents the direct kinematics of a spherical wrist, to be applied in CNC plasma cutting machines. Spherical wrists are robotic devices that decouple the position and orientation in robot manipulators, and are used when operations need dexterity from the manipulator. In CNC cutting machines, they make possible bevel cutting in sheets and tubes and reaching new cutting positions. Initially, research is made on scientific publications and manufacturers of similar devices, from the most used mechatronic solutions and applications of these devices on metal sheet cutting. Next it is presented a virtual prototype of the solution to be implemented, and the direct and inverse kinematics based on this solution are presented, with results that confirm accuracy of the developed kinematic model. Then, it is proposed a way to integrate the device with the cutting machine available in the company and it is created a program to convert DXF files to G Code, adding the newly implemented degrees of freedom to the device.

Keywords: Spherical wrist, wrist, robotic wrist, bevel head, bevel cutting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – C3P0 e R2D2 de Star Wars	15
Figura 2 – Robô cirurgião Da Vinci	16
Figura 3 – Agile Eye de Gosselin	18
Figura 4 – ABB Fanta Can Challenge	19
Figura 5 – Manipulador tipo 3R	20
Figura 6 – Link (i) e sua junta inicial ($i-1$) e junta final (i)	22
Figura 7 – Soluções múltiplas da cinemática inversa	23
Figura 8 – Eixos coordenados XYZ e ABC	26
Figura 9 – <i>Skew Rotator Infinity</i> da Messer Cutting Systems	27
Figura 10 – VBA Global PRO da ESAB	28
Figura 11 – Sextante Náutico	29
Figura 12 – BAW Megacord	29
Figura 13 – MicroStep Plasma Rotator	30
Figura 14 – Cabeçote da AutoCorte 2013	31
Figura 15 – Renderização do modelo sextante.	33
Figura 16 – Renderização do segundo modelo.	35
Figura 17 – Modelo simplificado no plano yz mostrando a geometria e os graus de liberdade do dispositivo.	36
Figura 18 – Renderização do terceiro modelo	37
Figura 19 – Renderização do modelo final	38
Figura 20 – Renderização do modelo final - Redução de peso	38
Figura 21 – Slewing Bearing	39
Figura 22 – Modelo simplificado	39
Figura 23 – Modelo simplificado no plano yz mostrando a geometria e os graus de liberdade do dispositivo.	41
Figura 24 – Condição de funcionamento	47
Figura 25 – Sistema CN tradicional	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores para geometria genérica	43
Tabela 2 – Valores para geometria final do pulso	43
Tabela 3 – Validação dos dados de cinemática para valores teóricos	44
Tabela 4 – Validação dos dados de cinemática real	44
Tabela 5 – Algumas funções básicas de código G	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	11
1.2	História do Corte a Plasma	11
1.2.1	O que é o plasma	11
1.2.2	Desenvolvimento do Processo de Arco de Plasma	12
1.3	Robôs Industriais	14
1.3.1	Usos comuns da robótica	15
1.3.2	Estado da Arte em corte a plasma robotizado	16
1.3.3	Estado da Arte em Pulsos Esféricos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Robô	19
2.1.1	Manipulador	20
2.1.2	Pulso	20
2.2	Modelamento Matemático	20
2.2.1	Cinemática Direta	21
2.2.1.1	A Convenção de Denavit-Hartenberg	21
2.2.2	Cinemática Inversa	22
2.2.3	Cinemática de Velocidade	24
2.2.3.1	Cinemática direta de velocidade	24
2.2.3.2	Cinemática inversa de velocidade	25
3	DESENVOLVIMENTO INICIAL	26
3.1	O estado da técnica em pulsos esféricos aplicados a operação de corte a plasma	27
3.1.1	Messer Skew Rotator Infinity	27
3.1.2	Esab VBA Global PRO	28
3.1.3	BAW MegaCord	28
3.1.4	MicroStep Plasma Rotator	30
3.2	O pré-desenvolvimento do produto	30
3.2.1	Gerador de código G	31
4	PROTOTIPAGEM DIGITAL	33
4.1	Modelo conceitual inicial	33
4.2	Segundo modelo conceitual	34
4.3	Primeiro modelo de fabricação	34

4.4	Versão construtiva final	35
4.4.1	Versão construtiva simplificada	36
5	MODELAGEM DO PROTÓTIPO	40
5.1	Cinemática Direta	40
5.1.1	Validação do cálculo de cinemática direta	43
5.2	Cinemática Inversa	44
5.2.1	Validação do cálculo de cinemática inversa	45
6	INTEGRAÇÃO DO PROTÓTIPO AO MODELO EXISTENTE	46
6.1	Integração mecânica	46
6.2	Programação	46
6.2.1	SmoothStepper	49
6.2.2	Mach3 CNC	49
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	Referências	52

1 INTRODUÇÃO

O corte em chanfro exige conhecimento exato da máquina e dos processos de corte. Cantos, entradas e saídas de corte têm de ser cortados com uma sequência especial, para alcançar a qualidade exigida. O corte em chanfro também impõe grandes demandas na programação das peças cortadas. São necessárias funções especiais auxiliares para configurar as unidades para corte em chanfro.

(Messer Cutting Systems, 2014a)

Um cabeçote chanfrador é uma aplicação específica de um pulso esférico robótico; pulsos esféricos, por sua vez, são peças adicionadas ao final da cadeia de links de um robô de modo que ele possa ter controle sobre a orientação da ferramenta que segura, sendo que normalmente braços robóticos e similares têm apenas controle sobre a posição desta. A máquina CNC de corte a plasma é uma aplicação de um robô cartesiano, cuja ferramenta é uma tocha de plasma. Um robô cartesiano consegue atingir todos os pontos em seu espaço de trabalho, mas com orientação fixa e normalmente tem sua ponta direcionada para uma chapa que fica abaixo desta.

O mercado de corte a plasma CNC tem se expandido para aplicações de corte mais sofisticadas. Portanto, um cabeçote chanfrador é um opcional importante e com demanda crescente no mercado. O método não automatizado de chanfrar consiste em fazer os chanfros após o corte, utilizando uma ferramenta manual. Esta operação leva algumas horas a mais e arrisca deformar a peça já produzida, além de atrasar uma possível produção seriada.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo a criação de um pulso esférico robótico para aplicação na AutoCorte, máquina de corte fabricada pela Automática Tecnologia SA. O pulso entra como um novo produto para o portfólio da empresa, tornando-a mais competitiva num mercado de amplo crescimento.

1.2 História do Corte a Plasma

1.2.1 O que é o plasma

Uma descrição comum para o plasma é “o quarto estado da matéria”. Normalmente os estados conhecidos são o sólido, líquido e gasoso. Para a substância mais conhecida, que é a água, os estados são representados por gelo, água e vapor. Adicionando energia térmica, o gelo irá mudar sua forma de sólido para líquido. Se mais calor for adicionado, sua forma irá se alterar para vapor. Quando uma quantidade substancial de calor é adicionada a um gás, este muda de estado para o plasma, o quarto estado da matéria.

Ionização: Adicionando calor ao vapor de água, este se separa em dois gases, hidrogênio e oxigênio, em forma de vapor. Adicionando ainda mais energia a um gás, nota-se que as características sofrem modificações significativas em termos de temperatura e características elétricas. Este processo é chamado ionização, a criação de íons e elétrons livres entre os átomos gasosos.

Quando ocorre a ionização, o gás, que agora se tornou plasma, é condutor elétrico, pois existem elétrons livres disponíveis para transportar corrente. Muitos dos princípios que se aplicam para a condução de corrente elétrica num metal também se aplicam ao plasma. Por exemplo, se a seção transversal de condução for reduzida a resistência aumenta. Logo, uma tensão maior é necessária para transportar o mesmo número de elétrons por esta seção transversal ocorrendo uma maior dissipação de calor. O mesmo acontece para o plasma, quanto mais reduzida é a seção transversal, maior é a temperatura que atinge.

1.2.2 Desenvolvimento do Processo de Arco de Plasma

Em 1941 a indústria bélica americana estava buscando melhores método de ligar partes de metais leves, e mais especificamente, para a produção de aviões. Neste esforço surgiu um novo método de soldagem, onde um arco elétrico derretia o metal e um gás inerte o protegia da oxidação pelo ar, método conhecido como TIG, gás inerte de tungstênio, da sigla em inglês.

Em 1950 TIG já havia sido estabelecido como o método para soldas de alta qualidade e em materiais exóticos.

Enquanto trabalhavam no desenvolvimento do processo TIG, cientistas do laboratório de soldagem de Union Carbide descobriram que se reduzissem o nozzle que direcionava gás inerte do eletrodo para a peça, as propriedades do arco sofriam grandes alterações. O bocal reduzido comprimia e aumentava sua velocidade e energia térmica. A temperatura e tensão do arco subia drasticamente e o momentum do gás ionizado removia a poça de metal derretido graças à alta velocidade. Ao invés de soldar, o metal foi cortado pelo jato de plasma.

O método convencional de corte a plasma foi introduzido em 1957 e patenteado por Dr. Robert Gage, que garantiu por 17 anos o monopólio da tecnologia à Union Carbide. Utilizando esta técnica podia-se cortar desde as placas mais finas até placas de 10 polegadas. Esta técnica de corte prevaleceu de 1957 a 1970 e requeria frequentemente misturas caras de gases, como argônio e hidrogênio.

Em 1962 foi desenvolvida e patenteada pela Thermal Dynamics Corporation uma técnica conhecida por fluxo duplo, que consistia em introduzir um segundo gás protegendo o bocal de plasma. Este segundo gás era escolhido de acordo com o metal a ser cortado e, no interior da tocha, corria nitrogênio.

Em 1963 foi introduzido o corte a plasma utilizando o ar como gás. O oxigênio presente no ar, em reação exotérmica, fornecia energia adicional para o corte de aço carbono. Esta energia extra aumentava a velocidade do corte em até 25%.

O corte a plasma protegido por água foi introduzido em 1965. Suas propriedades eram semelhantes ao de fluxo duplo, mas utilizava água ao invés de gás como proteção. Este método conferia um corte de aparência melhor graças ao efeito refrigerante da água.

Richard W. Couch Jr. da Hypertherm, Inc. em 1968 desenvolveu e patenteou um método de corte com injeção de água radial pela tocha de corte. Neste método, a água garantia um grau de constrição do arco que não podia ser alcançado apenas com o bocal de cobre. Temperaturas de corte neste método eram estimadas em aproximadamente 50.000 K, cerca de 9 vezes a temperatura da superfície do sol.

Como o corte a plasma utiliza uma fonte de energia muito concentrada existem alguns efeitos negativos, como alto ruído causado pela corrente elétrica, fumaça e gases tóxicos na região de trabalho e a emissão de radiação ultravioleta, que podia causar queimaduras na pele e nos olhos. Graças a isso, em 1972 a Hypertherm patenteou o Water Muffler e a Water Table, que controlavam os efeitos colaterais do corte a plasma.

Na Europa, continuavam as tentativas de reduzir o ruído e evitar a produção de fumaça, que resultaram num método conhecido como corte submerso, em 1977. Este método se popularizou de tal modo que até hoje muitas máquinas de corte de alta potência ainda fazem o corte embaixo d'água.

Graças à popularidade do corte submerso, a Hypertherm novamente em 1986 desenvolveu e patenteou uma versão subaquática do Water Muffler, que injetava ar ao redor da tocha, criando uma bolha onde o corte podia ocorrer. Esta técnica é usada frequentemente com oxigênio como gás de corte.

Em 1980 fabricantes ocidentais de equipamento de corte a plasma apresentaram equipamentos utilizando ar como gás de plasma, particularmente para sistemas de baixa corrente. Isto criou uma nova era para o corte a plasma, aumentando o mercado mundial em até 50 vezes e criando novos fabricantes. Corte a plasma foi finalmente aceito como o novo método de corte de metais e considerado uma ferramenta valiosa em todos os segmentos da indústria metalúrgica.

Dado que originalmente o método de corte de metais era o oxicorte, engenheiros e cientistas tentaram desde o princípio do plasma utilizar oxigênio como o gás de plasma. A alta temperatura e a presença de oxigênio puro causavam a rápida deterioração dos materiais da tocha, fazendo com que oxigênio tivesse sido abandonado como gás de plasma nos primeiros anos de pesquisa. No começo dos anos 70 foi descoberto que háfnio e zircônio podiam resistir a esta rápida deterioração, tornando oxigênio e ar gases de interesse, novamente.

Em 1983 a Hypertherm conseguiu produzir uma tocha que utilizava oxigênio como gás de plasma, que aumentava a velocidade de corte em até 30%, operando a correntes mais baixas. O corte utilizando oxigênio produzia resultados soberbos, com bordas suaves e livre de escória, além de poder cortar qualquer tipo de aço. A vida útil do eletrodo de háfnio ainda era limitada, mas muitos fabricantes consideravam uma boa relação custo x benefício.

Outra técnica desenvolvida na época é o corte com injeção de oxigênio, que contornava o problema de desgaste do eletrodo utilizando um método semelhante ao corte por fluxo duplo,

utilizando nitrogênio como gás de corte e oxigênio injetado no seu exterior. Esta técnica por sua vez cortava apenas aço carbono, não fornecia o corte preciso da anterior, ainda tinha alto desgaste dos consumíveis e aumentava em pouco a velocidade de corte, não se popularizando.

O corte a laser se tornou um grande competidor na indústria metalmecânica, dada sua precisão e cortes de alta qualidade. No começo dos anos 90 foi apresentada a primeira instalação de corte a plasma de 40 a 90 amperes, produzindo um corte reto e com maior velocidade. A Hypertherm apresentou sua linha HyDefinition para competir neste mercado.

A expectativa para o futuro é que o corte a plasma vai ter a mesma qualidade do corte a laser. Como o equipamento de plasma tem um custo muito inferior, espera-se que este seja o maior competidor no que é o mercado de corte a laser atual. Depois que oxigênio e ar foram popularizados como gases de plasma, o maior problema enfrentado ainda é a vida útil reduzida dos consumíveis. Os maiores fabricantes de tecnologias de corte a plasma estão trabalhando na solução deste problema. A expectativa é que no futuro próximo a vida útil dos consumíveis seja substancialmente estendida, barateando o processo e ampliando ainda mais a gama de aplicações de corte a plasma em aços. (Hypertherm, Inc., 2001)

1.3 Robôs Industriais

Lei Um: Um Robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal.

Lei Dois: Um Robô deve obedecer as ordens que lhe sejam dadas por seres humanos exceto nos casos em que tais ordens entrem em conflito com a Primeira Lei.

Lei Três: Um Robô deve proteger sua própria existência desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Leis.

(ASIMOV, 1942)

A palavra “Robótica” foi introduzida por Isaac Asimov em seu conto *Liar!* de 1941, publicado posteriormente no livro *Eu, Robô* (ASIMOV, 1968), juntamente com o conto *Runaround*, que apresenta as três leis da robótica. A palavra “robot” foi utilizada pela primeira vez pelo escritor checo Karel Čapek em 1921 em sua peça de teatro chamada **R.U.R.**, iniciais de “Rossum’s Universal Robots”. Em sua língua e outras línguas eslavas, robot pode significar trabalho escravo ou compulsório.

Robôs e autômatos compõem grande parte da ficção científica atual. Além dos diversos contos de Asimov, existem os icônicos C3P0 e R2D2 (Figura 1), presentes em todos os filmes de *Star Wars*, os robôs de *Matrix*, o T800 representado por Arnold Schwarzenegger em *Exterminador do Futuro*, o autômato Ultron, da *Marvel Comics*, os *transformers* entre outros. O grande fascínio da humanidade por ciborgues e autômatos rendeu brilhantes obras, não só na ciência como no setor artístico.

De acordo com a RIA - Robotic Industries Association - “Um robô é um manipulador reprogramável, multifuncional, desenvolvido para mover material, partes, ferramentas ou dispositivos

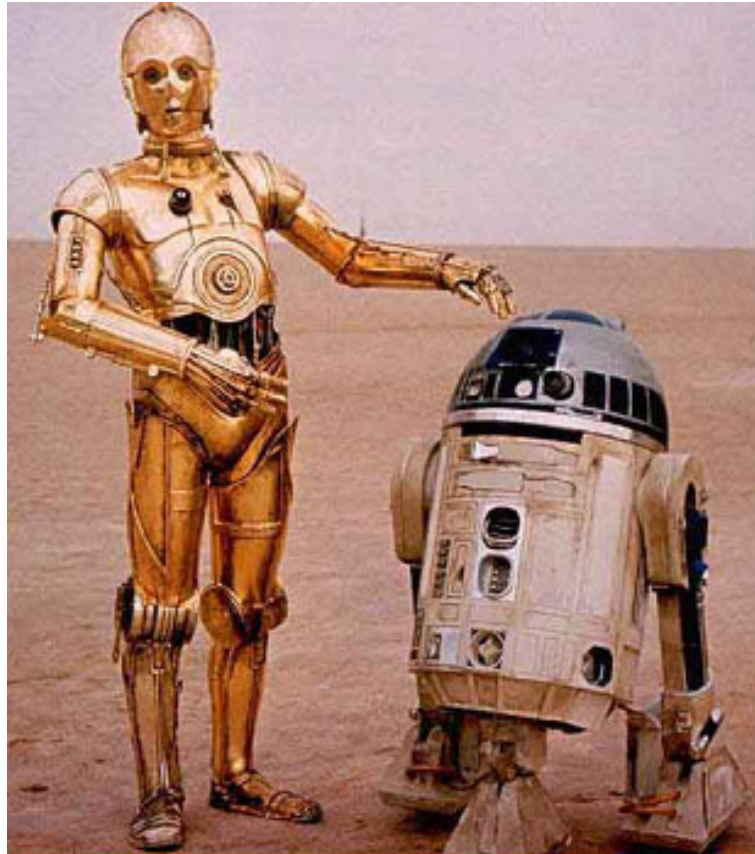


Figura 1 – C3P0 e R2D2 de Star Wars.

Fonte: <http://starwars.wikia.com/>

especializados através de variados movimentos programados para performar uma variedade de tarefas”.

A JIRA - Japanese Industrial Robotics Association - Tem uma definição diferente; para eles “Um robô é um sistema mecânico com movimentos flexíveis, análogos aos movimentos de organismos vivos, ou combina tais movimentos com funções inteligentes e age em resposta à vontade humana. Neste contexto função inteligente significa a habilidade de fazer pelo menos uma das seguintes: Julgamento, Reconhecimento, Adaptação ou Aprendizado”.

1.3.1 Usos comuns da robótica

Algumas aplicações comuns de robótica no campo industrial e médico.

Soldagem: Dada a grande massa de máquinas de solda e a exigência de precisão das linhas de montagem, forma-se um nicho ideal para a aplicação de robótica. Partes podem ser soldadas pelo movimento relativo entre o robô e a peça, sendo que o método mais utilizado envolve o robô estacionário e a peça se movendo numa esteira. O sistema de controle deve sincronizar o robô com a velocidade da linha de montagem e com os outros robôs trabalhando na linha.

Operações *Pick-and-Place*: Existem robôs industriais preparados para fazer operações de agarrar e soltar, seu uso mais comum é no carregamento de pallets. Isto envolve uma

programação complexa, já que o robô deve reconhecer o quão cheio está o pallet e ajustar o posicionamento de acordo. Em fundição de metais, os robôs que desempenham estas funções são vitais, tendo promovido o aumento de produtividade de até 200% com o mesmo equipamento. (GUPTA; ARORA, 2011)

Montagem: Montagem é uma das operações que mais demanda robôs industriais. Um número de condições é exigido para que a montagem robótica seja viável, entre elas: que o sistema de coordenação seja altamente estruturado e que os produtos sejam projetados já planejados para a montagem robotizada. A sofisticação que o sistema de controle requer implica num grande custo de implantação, o que requer uma alta produção anual para se tornar lucrativo. Montagem robotizada tem sido utilizada em uma ampla gama de bens, como placas de circuito, componentes eletrônicos, aplicações caseiras e submontagens automotivas.

Cirurgias: Dada a demanda requerida por redução na variabilidade dos resultados de cirurgias, a robótica invadiu o campo operatório com máquinas como o Da Vinci, exibido na Figura 2. Um completo cirurgião robótico, que foi introduzido em 2000 e já trabalhou em diversos procedimentos cirúrgicos desde então.



Figura 2 – Robô cirurgião Da Vinci. **Fonte:** <http://www.davincisurgery.com/>

1.3.2 Estado da Arte em corte a plasma robotizado

Robôs de corte a plasma tem sido utilizados para uma crescente gama de operações pesadas, principalmente em aço. Alguns exemplos incluem cortes de partes para vasos de pressão, corte e preparação de tubulações de navios e submarinos nucleares, e cortes de peças para compressores de alta pressão.

Os robôs vem substituindo as operações de corte manual, que frequentemente são desgastantes aos trabalhadores e conduzidas com oxicorte.

Um caso estudado foi o de fabricação de tubulações para navios nucleares em Newport News Shipbuilding, inc. No processo, vários estágios de oxicorte manual eram envolvidos, o que o tornava lento e lhe conferia um alto índice de rejeição mesmo nas mais simples juntas.

O processo foi então substituído por robôs de corte a plasma de cinco eixos, reduzindo drasticamente o tempo de corte e preparação para soldagem, além de melhorar a qualidade. Foi estimada uma economia de \$30 milhões por ano por robô. (BOGUE, 2008)

1.3.3 Estado da Arte em Pulsos Esféricos

O desenvolvimento de novos pulsos tem basicamente dois seguimentos: um baseado em motores esféricos e outro em mecanismos. Motores esféricos são motores elétricos com dois ou três graus de liberdade rotacionais e apresentam um torque e espaço de trabalho pequeno, mas trabalham a alta velocidade. São especialmente úteis em corte a laser.

Pulsos esféricos comerciais utilizam-se de engrenamentos cônicos e quando são instalados em manipuladores, estes apresentam obstáculos que diminuem a performance cinemática e dinâmica do manipulador. Além disto, os engrenamentos apresentam rolagem e deslizamento indesejáveis, trazendo ruído e vibrações ao sistema.

Pulsos esféricos baseados em mecanismos possuem um espaço de trabalho e torque relativamente grandes. Os maiores exemplos destes são os manipuladores paralelos, também conhecidos como plataformas de Stewart. Uma plataforma de Stewart é um manipulador que incorpora 6 atuadores prismáticos. O uso mais notório destas plataformas é na tecnologia LIDS (*Low Impact Docking System*) da NASA, onde o manipulador é utilizado no acoplamento de ônibus espaciais à Estação Espacial Internacional.

Outro dos mecanismos mais utilizados é o manipulador esférico paralelo. Une as vantagens de um manipulador paralelo de alta rigidez e alta precisão de movimento, características desejáveis a um pulso esférico de alta performance.

Um mecanismo de pulso baseado em manipulador esférico paralelo digno de nota, projetado por Gosseling e Hammel (1994) é o Agile Eye, exibido na Figura 3, um mecanismo orientador de câmeras. O Agile Eye é capaz de orientar uma ferramenta em um cone de 140 graus de abertura mais ou menos 30 graus de rolling.

Foi proposto por Bai e Hansen (2007) um pulso esférico de três graus de liberdade capaz de rolling ilimitado, consistindo de três links curvos girando ao redor de uma guia circular. Isto permite que o pulso tenha roll ilimitado, somado a movimentos limitados de pitch e yaw.

Uma patente proposta por Gosseling e Caron (1999) provê uma invenção de um pulso esférico de 2 graus de liberdade para cargas pontuais, como câmeras, lasers e similares. Este possui a grande vantagem de um espaço de trabalho que se aproxima do hemisfério, além da capacidade de funcionar a altas velocidades, sendo esta requerida para trabalhar com câmeras.

Outra patente de pulso esférico, proposta por Duta e Stanisic (1989), descreve um pulso esférico com redundância, de modo a eliminar a possível singularidade.

Singularidade é o nome dado ao fenômeno de quando ocorre um alinhamento de dois ou mais eixos do robô, resultando em velocidade e movimento imprevisíveis. (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005)

O mercado de robôs de corte a plasma tende a um caminho onde terá a mesma qualidade do laser, podendo atingir a clientela que exige uma maior precisão por uma fração do preço atual (Hypertherm, Inc., 2001). O desenvolvimento de novos pulsos esféricos paralelos e livres de composições de engrenagens deve acompanhar a alta precisão das tochas lançadas na última década.



Figura 3 – Agile Eye de Gosselin. (GOSSELING; CARON, 1999)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Do ponto de vista da engenharia, robôs são mecanismos complexos, versáteis que contêm uma estrutura mecânica, sistema sensorial e um sistema de controle automático. Fundamentos teóricos da robótica são baseados em resultados da pesquisa em mecanismos, controle automático, eletrônica e ciências da computação.

Na Figura 4 é exibido o *ABB Fanta Can Challenge*, no qual os manipuladores trabalham em conjunto de modo a se movimentarem sem tocar as latas, demonstrando o potencial de um sistema robótico com um controle bem definido.



Figura 4 – ABB Fanta Can Challenge
Fonte: www.youtube.com/watch?v=SOESSCXGhFo

2.1 Robô

Um manipulador robótico consiste de um conjunto de links conectados de forma a gerar uma cadeia cinemática. Entretanto um robô completo é composto de um manipulador, um pulso esférico, atuadores, sensores, controladores, processadores e software.

Link: Corpo rígido individual que pode ter movimento relativo a outros links, um par de links é ligado com uma junta.

Junta: Conexão entre dois links, fornece o grau de liberdade. Juntas podem ser do tipo revolutas ou prismáticas. A variável que representa a junta é chamada de *coordenada de junta*.

Um robô normalmente é composto de 6 juntas, sendo que 3 fazem parte do manipulador e 3 do pulso esférico. Um robô com mais de 6 juntas é normalmente chamado de robô redundante.

A redundância não é uma desvantagem, existem robôs redundantes de modo a poderem alcançar objetos atrás de anteparos ou utilizando o grau de liberdade extra para evitar que o sistema se torne singular em alguma posição.

2.1.1 Manipulador

O corpo principal do robô, que consiste de links, juntas e outros elementos estruturais, é chamado de manipulador. Um manipulador se torna um robô quando um pulso e um efetuator final são acoplados, e o sistema de controle é implementado. Entretanto, há literaturas que utilizam robô e manipulador como equivalentes.

Na Figura 5 é exibida a representação de um manipulador do tipo 3R, ou seja, um manipulador com 3 juntas revolutas. Este modelo também é conhecido por *Elbow Manipulator*, dada sua semelhança com o braço humano.

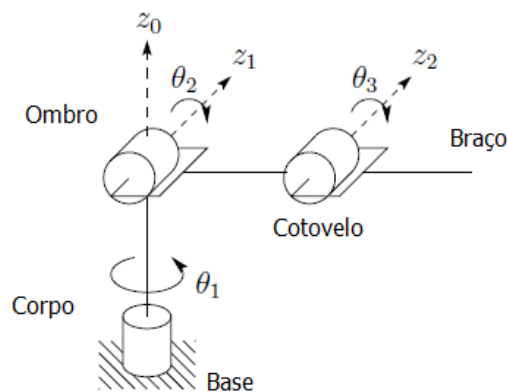


Figura 5 – Manipulador do tipo 3R

Fonte: (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005)

A diferença básica de um manipulador para um robô propriamente dito é o fato de que o robô tem controle total do seu efetuator final, controlando posição e orientação. Um manipulador garante apenas a posição. (JAZAR, 2010)

2.1.2 Pulso

Pulso é o nome dado ao equipamento que garante o controle de orientação da ferramenta do robô, além dos 3 graus de liberdade garantidos já pelo manipulador.

Um pulso esférico simplifica muito a análise cinemática de um robô, permitindo ao projetista desacoplar completamente o controle de posição e orientação, podendo resolver cada um separadamente. Apesar de normalmente um manipulador ter 3 graus de liberdade de posição, o número de graus de liberdade de orientação depende efetivamente do tipo de pulso, sendo o mais comum o pulso esférico, que garante 3 graus de orientação.

2.2 Modelamento Matemático

Já tendo sido definido como um conjunto de links e juntas, um robô pode ser então modelado matematicamente em função destes links e das variáveis de junta. O modelamento do robô

pode ser dividido em modelamento cinemático, que consiste em Cinemática Direta, Inversa e de Velocidade e em modelamento dinâmico, que envolve a Cinemática de Aceleração e a Dinâmica de Movimento. Neste trabalho, serão abordadas apenas os aspectos cinemáticos.

Cinemática: é a ciência da geometria em movimento, restrita à pura descrição geométrica do movimento por meio de posição, orientação e suas derivadas temporais. Em robótica, a descrição cinemática dos manipuladores e suas tarefas são utilizadas para preparar as equações fundamentais para dinâmica e controle.

2.2.1 Cinemática Direta

A partir das variáveis de junta de um robô pode-se determinar a posição e orientação de cada link deste, para um dado conjunto de características geométricas do robô. Este tipo de análise é chamado *cinemática direta*. Encontrar a posição do efetuador final em função das variáveis de junta é o maior trabalho da cinemática direta.

A informação cinemática inclui posição, velocidade, aceleração e *jerk*. Entretanto, a cinemática direta geralmente refere-se apenas à análise da posição.

A cinemática direta é apresentada em forma de matrizes de transformação. É comum utilizar a matriz que referencia as coordenadas cartesianas e orientação do efetuador final em relação aos ângulos de junta, mas o encontro das matrizes de transformação entre cada junta não é raro. A transformação segue a receita de uma transformação linear comum.

O método mais prático de encontrar a cinemática direta é a Convenção de Denavit-Hartenberg, que é dividido normalmente em 9 passos que serão descritos a seguir. Outro método é o cálculo direto, onde o projetista encontra a matriz de transformação homogênea de cada junta e opera com estas para achar a transformação final.

2.2.1.1 A Convenção de Denavit-Hartenberg

Um robô com n juntas possui $n+1$ links. Enumerando os links, começando de (0) para o link base (imóvel) e acrescentando sequencialmente até (n) para o efetuador final. Enumerando as juntas, começando de 1 para a junta que conecta o primeiro link móvel para o link base e acrescentando sequencialmente até n . Então o link (i) é conectado ao link inferior ($i-1$) em sua *extremidade proximal* pela junta i e é conectado ao link superior $i+1$ em sua *extremidade distal* pela junta $i+1$, como exibido na Figura 6

A aplicação da convenção de Denavit-Hartenberg é padronizada e segue uma receita em 7 passos.

1. Localizar e marcar os eixos $z_0 \dots z_{n-1}$ na direção dos eixos das juntas $1 \dots n$
2. Estabelecer o sistema de referência da base 0. Colocar a origem o_0 em qualquer ponto do eixo z_0 . Estabelecer os eixos x_0 e y_0 tais que o sistema seja dextrógiro. Para $i = 1 \dots n - 1$, repetir os passos III a V a seguir:

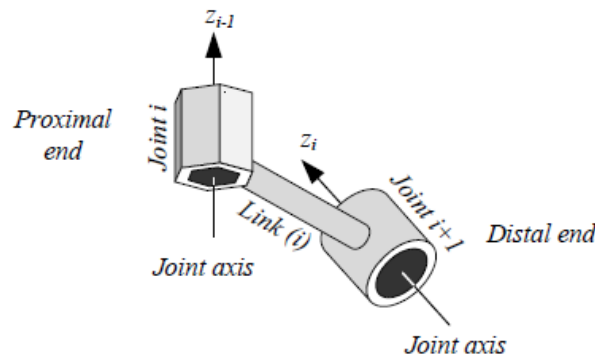


Figura 6 – Link (i) e sua junta inicial (i) e junta final ($i+1$)

Fonte: (JAZAR, 2010)

3. Localizar a origem o_i onde a normal comum a z_i e z_{i-1} intercepta z_i . Se z_i intercepta z_{i-1} , localizar o_i na interseção. Se z_i e z_{i-1} são paralelos, localizar o_i na junta i
4. Localizar x_i ao longo da normal comum entre z_i e z_{i-1} através de o_i , ou na direção normal ao plano z_{n-1} ou se z_i e z_{i-1} se interceptam
5. Localizar y_i para que o sistema seja dextrógiro
6. Localizar o sistema do elemento final $o_n x_n y_n z_n$: z_n se localiza na direção de z_{n-1} ; x_n deve ser normal a z_{n-1} e z_n ; y_n deve ser tal que o sistema seja dextrógiro
7. Criar uma tabela com os parâmetros de Denavit-Hartenberg
 - a_i = distância desde a interseção de x_i e z_{i-1} até o_i , ao longo de x_i
 - d_i = distância desde o_{i-1} até a interseção de x_i e z_{i-1} , ao longo de z_{i-1}
 - α_i = ângulo entre z_{i-1} e z_i , medido em torno de x_i
 - q_i = ângulo entre x_{i-1} e x_i , medido em torno de z_{i-1}

(BENTO FILHO, 2012)

2.2.2 Cinemática Inversa

A seção anterior abordava a cinemática direta, para qual, dadas as variáveis de junta encontra-se a configuração do robô. A cinemática inversa por sua vez, dada a configuração do robô pede as variáveis de junta. O problema se torna mais complexo, pois normalmente para dada configuração existe mais de um conjunto de variáveis de junta que possa atendê-la, como demonstrado na Figura 7.

A determinação das variáveis de junta se reduz à solução de um conjunto de equações algébricas não-lineares. Apesar de não existir um método padronizado e geral para o cálculo da cinemática inversa, existem alguns métodos numéricos e analíticos para resolver o problema.

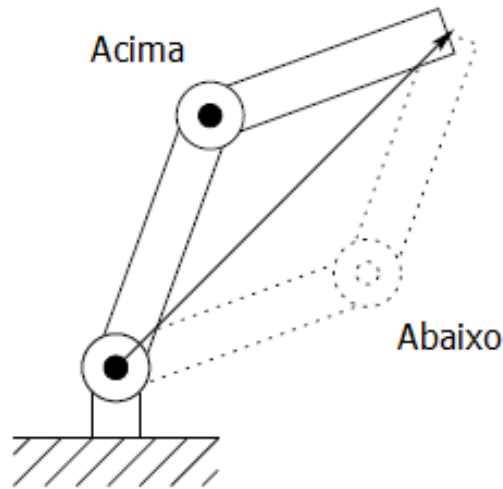


Figura 7 – Soluções múltiplas da cinemática inversa para um manipulador plano 2R

Fonte: (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005)

O método escolhido para executar este trabalho foi a transformada inversa de Paul (1981). Neste método o autor sugere que é possível solucionar o problema das coordenadas de junta ao equacionar as expressões de transformação. Para cada equação de transformação são obtidas 12 equações não-triviais e estas trarão a solução requerida. A solução é obtida de uma maneira sequencial, isolando cada variável pela pré-multiplicação das transformadas anteriores. Além disto, foi utilizado o princípio de desacoplamento para separar o problema em dois subproblemas, o da posição inversa e o da orientação inversa. A consequência prática disso é que desacoplar permite separar o problema em dois independentes, cada um com apenas três parâmetros desconhecidos. Partindo deste princípio, a matriz de transformação geral de um robô pode ser decomposta em translação e rotação, conforme exibido nas equações 2.1 e 2.2.

Num robô com 6 graus de liberdade a matriz de translação 0D_6 indica a posição do efetuador final em relação ao sistema de referência com base em B_0 e envolve apenas três variáveis de junta do manipulador. O sistema 0d_6 pode ser resolvido para variáveis que controlam a posição do pulso. A matriz de rotação 0R_6 indica a orientação do efetuador final em B_0 e envolve apenas três variáveis de junta do pulso. O sistema 0R_6 pode ser resolvido para variáveis que controlam a orientação do pulso.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0d_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0D_6 {}^0R_6 = \begin{bmatrix} I & {}^0d_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} {}^0R_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Outros métodos de como abordar o problema da cinemática inversa foram descritos por Jazar (2010), mas não serão abordados neste trabalho.

2.2.3 Cinemática de Velocidade

A análise de velocidade de um robô é dividida em cinemática direta e inversa de velocidade. A determinação da velocidade cartesiana através das derivadas temporais das variáveis de junta é chamado cinemática direta de velocidade. A determinação das derivadas temporais das variáveis de junta baseada na velocidade do efetuador final é denominada cinemática inversa de velocidade.

2.2.3.1 Cinemática direta de velocidade

A cinemática direta de velocidade resolve o problema de relacionar a velocidade das juntas $\dot{q}$ à do efetuador final $\dot{X}$. O vetor de velocidade de junta $\dot{q}$ de um robô com n graus de liberdade é descrito em 2.3 e a velocidade do efetuador final $\dot{X}$ é, no caso mais geral, um vetor 6×1 descrito em 2.4.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \dot{q}_3 & \dots & \dot{q}_n \end{bmatrix}^T \quad (2.3)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{X}_n & \dot{Y}_n & \dot{Z}_n & \omega_{Xn} & \omega_{Yn} & \omega_{Zn} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} {}^0\dot{d}_n \\ {}^0\omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0v_n \\ {}^0\omega_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Os elementos do vetor velocidade do efetuador final $\dot{X}$ são linearmente proporcionais aos elementos do vetor velocidade das juntas $\dot{q}$ como descrito na equação 2.5, onde a matriz $6 \times n$ de proporcionalidade $J(q)$ é chamada *Jacobiano* do robô. É importante ressaltar que esta afirmação é verdadeira para um controle discretizado, visto que o Jacobiano se altera com a configuração do robô.

$$\dot{X} = J\dot{q} \quad (2.5)$$

A matriz $3 \times n$ de proporcionalidade $J_D(q)$ é chamada *matriz jacobiana de deslocamento* do manipulador, descrita em 2.6. A expressão global da velocidade 0v_n da origem de B_n é proporcional às velocidades das juntas $\dot{q}_D$. A matriz de proporcionalidade $J_R(q)$ é chamada *matriz jacobiana rotacional* do robô e é descrita na equação 2.7. As equações 2.7 e 2.6 podem ser combinadas para encontrar a cinemática direta de velocidades do robô, da equação 2.5.

$$J_D = \frac{\partial d_n(\dot{q}_D)}{\partial \dot{q}_D} = \frac{\partial T(q)}{\partial q} \quad (2.6)$$

$$J_R = \frac{\partial {}^0\omega_n}{\partial q} \quad (2.7)$$

2.2.3.2 Cinemática inversa de velocidade

O problema da cinemática inversa de velocidade é descrito como buscar as velocidades de junta $\dot{q}$ correspondentes à velocidade do efetuador final $\dot{X}$. Seis graus de liberdade são necessários para poder mover o efetuador final em uma direção arbitrária com uma velocidade angular arbitrária. O vetor de velocidades do efetuador final $\dot{X}$ é relacionado ao vetor velocidade das juntas $\dot{q}$ pela matriz Jacobiano J conforme descrito em 2.8.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} {}^0v_n \\ {}^0\omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_D \\ J_R \end{bmatrix} = J\dot{q} \quad (2.8)$$

Em consequência disso, para a cinemática inversa são requeridas as variações diferenciais das coordenadas de junta em termos da translação cartesiana e velocidades angulares do efetuador final. Se a matriz Jacobiano for não-singular no momento do cálculo, o Jacobiano inverso J^{-1} existe e pode-se encontrar as velocidades das juntas como descrito na equação 2.9

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{X} \quad (2.9)$$

A configuração singular ocorre quando o determinante da matriz Jacobiano é zero, e então o seu inverso é indeterminado. Como a cinemática inversa de velocidade é consequência da velocidade direta e necessita de inversão de matrizes, o problema é equivalente à solução de um conjunto de equações algébricas lineares. Para encontrar J^{-1} , qualquer método de inversão de matrizes pode ser aplicado.

3 DESENVOLVIMENTO INICIAL

Este capítulo trata do desenvolvimento do pulso esférico como um produto industrial. A pesquisa aqui feita tem o objetivo de tornar o objeto de estudo em uma máquina comercialmente relevante.

O primeiro passo para o desenvolvimento de um produto para máquinas de corte por comando numérico é entender o sistema CNC. O sistema CNC utiliza coordenadas cartesianas para numericamente atribuir direção e plano de movimento. Um sistema de coordenadas cartesianas é composto de linhas de referência, chamadas eixos coordenados. Estes eixos são todos medidos em uma mesma unidade de comprimento, que normalmente no sistema CNC é milímetros ou polegadas.

Este sistema de coordenadas permite que máquinas CNC sejam controladas através de cada plano de movimentos. É basicamente o coração do sistema de coordenadas. Na Figura 8 são exibidos os eixos coordenados básicos e avançados de uma máquina CNC. O sistema XYZ garante à máquina CNC a capacidade de cortar perfis bidimensionais a alturas diferentes. Este movimento é adequado para a maioria das aplicações CNC, como torno, fresa, laser, plasma e impressão 3D.

Quando o usuário requer funções mais avançadas do que as apresentadas pelo sistema XYZ, deve-se recorrer aos eixos ABC, onde A é a rotação ao redor de X, B ao redor de Y e C ao redor de Z. Estes novos eixos dão ao usuário não só o poder de mover-se no espaço tridimensional mas também a de rotacionar ao redor de qualquer eixo. Isto fornece a habilidade de trabalhar em qualquer lugar no espaço 3D, limitando a operação somente a fatores como tamanho e design da máquina CNC.

Máquinas com eixos rotacionais geralmente são referidas como máquinas de 4, 5 ou 6 eixos. Pode também ser encontrada terminologia como *máquina de 5 eixos BC*, que indica que a máquina tem rotação nos eixos B e C.

Estes eixos adicionais são normalmente vistos em máquinas de muito mais alta qualidade e

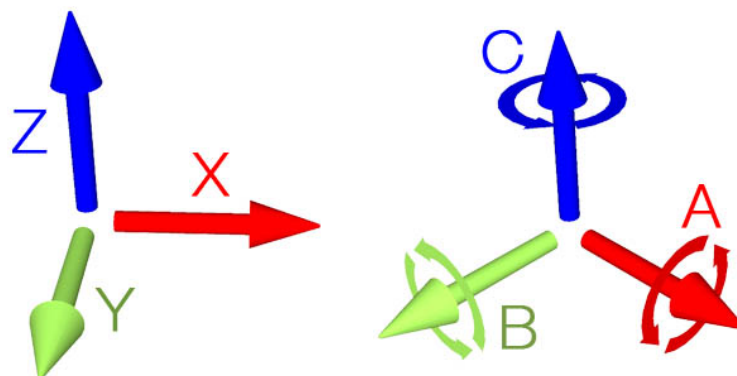


Figura 8 – Eixos coordenados XYZ e ABC Fonte: <http://www.cnc4everyone.com/>

caras. A adição de eixos rotacionais aumenta imensamente a dificuldade da programação em Código G e normalmente requer software CAM especializado. (HENDERSON, 2014)

3.1 O estado da técnica em pulsos esféricos aplicados a operação de corte a plasma

Após extensa pesquisa das maiores fabricantes de máquinas de corte do mercado internacional e nacional, foram identificados alguns tipos de cabeçotes chanfradores e sua tecnologia de funcionamento, listados a seguir.

3.1.1 Messer Skew Rotator Infinity

(Messer Cutting Systems, 2014b)

O *Skew Rotator Infinity* da Messer Cutting Systems, exibido na Figura 9 é capaz de cortar perfis precisos em praticamente qualquer contorno.

O sistema é usado para fazer chanfros para preparar uma peça para solda ou para fazer laminas funcionais em implementos rodoviários, de mineração e agrícolas.

O *Skew Rotator Infinity* tem a capacidade de chanfros de -45° a $+45^\circ$



Figura 9 – *Skew Rotator Infinity* da Messer Cutting Systems **Fonte:** (Messer Cutting Systems, 2014b)

Um exame cuidadoso da imagem apresenta uma boa ideia do seu funcionamento, enquanto um motor vertical trás a rotação em C, outro motor inclina a tocha de plasma, mantendo centralizada sua ponta. A centralização da ponta da tocha para qualquer grau de rotação traz uma facilidade imensa ao programador de código G, pois faz com que o programa não tenha que compensar o deslocamento da ferramenta para uma dada inclinação.

3.1.2 Esab VBA Global PRO

(ESAB, 2013)

O VBA Global PRO da ESAB, exibido na Figura 10 é utilizado para cortar com precisão placas sendo totalmente programável tanto para chanfros quanto para cortes retos. Utiliza um sistema de detecção de desgaste no eletrodo que aumenta sua vida útil, além de um sistema de auto-calibração e um sistema próprio de CNC.

O VBA Global PRO tem a capacidade de chanfros de -45° a $+45^\circ$

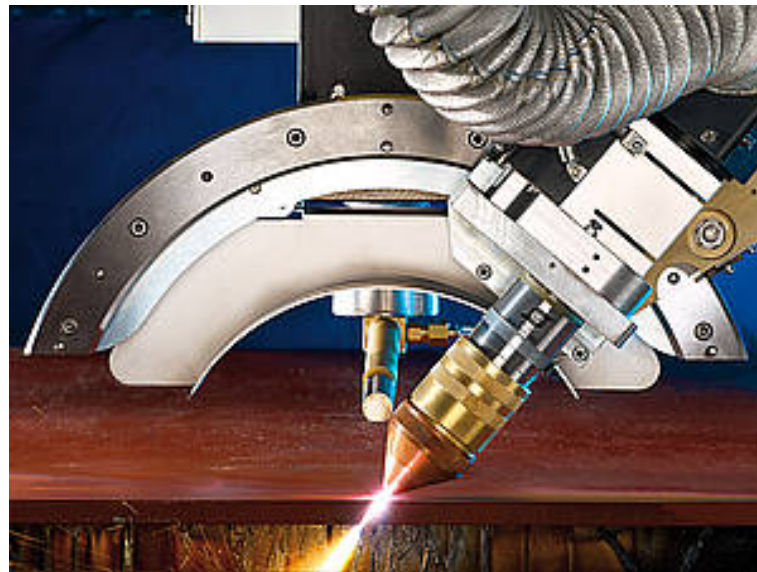


Figura 10 – VBA Global PRO da ESAB **Fonte:** (ESAB, 2013)

Examinando a imagem notamos uma ideia interessante aplicada pela ESAB. Existe uma guia em forma de arco que é utilizada para inclinar a tocha. Enquanto na versão da Messer o motor era inclinado, para a ESAB o motor que trás a rotação em A é preso diretamente nesta guia. O formato se assemelha aos antigos instrumentos de navegação conhecidos como Sextante (visto na Figura 11) e Quadrante.

A grande vantagem da utilização deste método de inclinar a tocha é a garantia de que esta vai se manter sempre centralizada num ponto. O que impede sua utilização comum é a precisão requerida na usinagem e o tratamento do material, visto que, exposto às altas temperaturas geradas pelo plasma, é comum o material apresentar alterações em suas propriedades e até mesmo alterações dimensionais críticas.

3.1.3 BAW MegaCord

(BAW Brasil LTDA, 2014)

Mesa de corte projetada para o mercado de corte pesado, conta como opcional com um cabeçote chanfrador. O BAW MegaCord tem a capacidade de chanfros de -45° a $+45^\circ$



Figura 11 – Sextante Náutico **Fonte:** Galaxy Instruments

A grande importância da MegaCord é o fato de ser a consolidação da tecnologia nacional. Seu sistema CNC Edge Pro da Hypertherm com monitor touchscreen e joystick tornam a utilização prática e intuitiva. A máquina completa é exibida na Figura 12. O cabeçote chanfrador segue um padrão mais simples que o exibido nas versões da Messer e ESAB, onde o programa deve corrigir o posicionamento quando há inclinação da tocha. Este detalhe não chega a ser um problema para o sistema, mas é certamente uma desvantagem.

Apesar de aparentar ser uma desvantagem das empresas grandes como Messer e ESAB, a construção mecânica mais complexa que possibilita a estas garantir uma mesma posição do ponto final da tocha para qualquer inclinação torna os cálculos cinemáticos muito mais simples, efetivamente tornando-se uma vantagem.



Figura 12 – BAW Megacord **Fonte:** <http://www.baw.com.br/>

3.1.4 MicroStep Plasma Rotator

(MICROSTEP, 2014)

A máquina de 5 eixos da *MicroStep* apresenta rotação infinita e permite o corte chanfrado de placas, tubos e perfis. Seu maior diferencial é a propriedade de inclinação da tocha de -50° a $+50^\circ$. O controle de altura (*THC - Torch Height Control*) é feito pela tensão do arco de plasma.



Figura 13 – MicroStep Plasma Rotator **Fonte:** <http://www.microstep.eu/>

O cabeçote chanfrador da MicroStep visivelmente se assemelha bastante ao da BAW, apresentando a mesma desvantagem de alterar a posição da tocha ao incliná-la.

3.2 O pré-desenvolvimento do produto

O início do projeto se deu com um estudo sobre o cabeçote da máquina de corte CNC que pode ser visto na Figura 14.

A ideia principal do cabeçote chanfrador é ser um produto modular, que possa ser vendido como opcional para a máquina e portanto deve ser tão pouco invasiva quanto possível no projeto já existente. Isto trás diversas vantagens para a empresa, que pode incluir no portfólio duas máquinas e oferecer aos clientes novos e antigos versões separadas de cada um. Um cliente que utilizava a máquina de corte sem chanfro agora passa a ter o poder de comprar o adicional e com isso aumentar sua produção.

Ainda tratando da modularidade, é de suma importância que o cabeçote seja adaptável para os diversos tipos de tocha existentes no mercado. Enquanto para o início do projeto foi escolhida uma única, na mecânica deve existir a capacidade de adaptação, assim como na fase final de programação do sistema.

O cabeçote da máquina exibido na Figura 14 pode ser modelado como um bloco dotado de uma cremalheira por onde pode ser ajustada a altura da tocha. Apesar do plano do projeto ser

minimamente invasivo, este bloco necessariamente será substituído por não dar espaço para os motores adicionais que serão incluídos no projeto. A cremalheira, entretanto, permanecerá, dada a necessidade do cabeçote chanfrador em variar sua posição vertical.

A tocha estudada foi uma *HPR 260 XD* (Hypertherm, Inc., 2009) com a capacidade de corte de 32 mm em aço carbono com alta precisão, e até 64 mm com baixa precisão. O estudo da tocha e sua capacidade de corte é importante por dois motivos: o primeiro é a posição de saída exata do plasma, que vai marcar a chapa, o outro é o fato de que a precisão garantida nos 32 mm de corte ocorre na direção da tocha. Uma vez inclinada pelo cabeçote chanfrador, não se pode esperar um corte preciso numa chapa de 32 mm, sendo necessária uma relação trigonométrica para o cálculo da nova espessura de chapa.

No estudo da tocha também concluiu-se que esta é a limitação para o corte chanfrado, com capacidade de chanfro de até 45 graus. Esta limitação se repete em diversas outras tochas. Apesar da MicroStep oferecer um cabeçote com variação angular maior, existem outros métodos de se conseguir ângulos de chanfro maiores sem necessariamente apelar para tochas incomuns no mercado.



Figura 14 – Cabeçote da AutoCorte 2013

3.2.1 Gerador de código G

Na fase de pesquisa também foi estudado o código G, que é o sistema de comando numérico que rege as máquinas industriais de fabricação conhecidas como CNC. O programa utilizado na empresa é chamado DXF2G, produzido na própria empresa e trabalha como um software CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e pós-processador.

A utilização do programa é bastante simples, o usuário entra com um desenho no formato DXF ASCII, escolhe o tipo de material e a tocha que deseja utilizar e o software converte em um arquivo de código G, que pode ser utilizado no programa que controla a máquina, hoje o *Mach 3*

CNC. Apesar de sua simples utilização, o programa apresenta algumas restrições que complicam sua utilização, como o fato de que todas as entidades do desenho deverem ser previamente convertidas para *polylines*.

Além disso, o apresentado programa não possui a capacidade de trabalhar com máquinas de 5 eixos, efetivamente não tratando dos eixos A e C que serão utilizados no sistema em desenvolvimento. As limitações apresentadas requerem que o sistema seja remodelado para comportar a máquina nova.

Seguindo os mesmos preceitos da parte mecânica e dada a inviabilidade de se manter dois sistemas funcionando para uma mesma máquina, o novo DXF2G deve incorporar todas as funções do antigo de modo a ser utilizado tanto em máquinas de três quanto de cinco eixos.

Algumas das outras funções que podem ser acrescentadas ao programa enquanto é desenvolvida sua nova versão são, por exemplo, o suporte a outras entidades de desenho, como linhas e círculos e a capacidade de alterar o alinhamento do desenho para ser compatível com o da chapa que foi posta na máquina. Esta última hoje se apresenta como um grande problema, dado que o operador, para economizar o máximo de material, deve posicionar a chapa com certa precisão na mesa. Isto se torna inviável e até perigoso quando o corte deve ser feito em uma chapa pesada.

4 PROTOTIPAGEM DIGITAL

O pulso esférico foi prototipado em um software de CAD 3D. Durante a criação do modelo diversas versões foram criadas de modo a aprimorar o atendimento a necessidades específicas. O histórico da criação e os motivos de alteração serão dispostos neste capítulo.

4.1 Modelo conceitual inicial

Este modelo foi o primeiro criado após o estudo, não tinha o objetivo de fabricação, apenas de auxiliar na compreensão das particularidades do sistema. Apresentado na Figura 15, ele foi apelidado de *sextante* por seguir o mesmo princípio do aparelho de navegação.

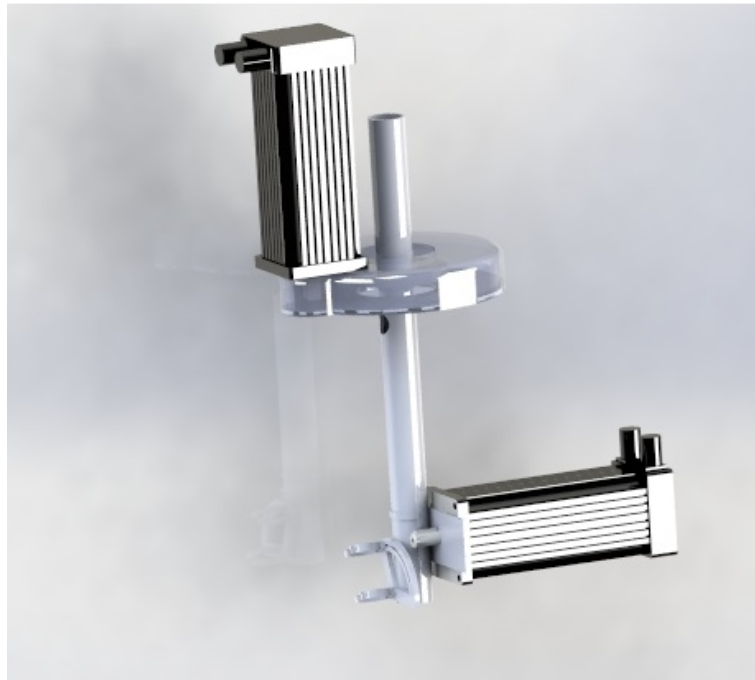


Figura 15 – Renderização do modelo sextante.

A principal ideia até então era verificar a possibilidade de construção com motores e tochas de tamanho real. No funcionamento do modelo era previsto o cabeamento da tocha e dos motores ser passado pelo interior do tubo. Posteriormente verificou-se que isto seria impossível, pois existe um raio mínimo de abertura do cabo (Hypertherm, Inc., 2009).

Este modelo foi o único que utilizou o princípio do sextante de manter centralizada a ponta da tocha; Apesar de tornar a cinemática mais simples (a matriz de transformação tem apenas uma translação em Z), a construção mecânica é muito mais complexa e requer alta precisão de fabricação, algo que encareceria demais o produto.

4.2 Segundo modelo conceitual

O segundo modelo foi usado na primeira apresentação do projeto à empresa, na reunião onde foi decidido o seu início. Apresenta uma grande maturidade de projeto, com uma forma já próxima da final. O modelo já abordava formas de montagem e motorização adequadas.

O modelo foi alterado por apresentar certa fragilidade na ligação entre a tocha e a parte superior, além disso os motores eram puramente conceituais, apesar de já estarem posicionados numa região semelhante à final.

O modelo, neste estágio, incorporava a ideia correta da passagem do cabo pelo interior da abertura central e o posicionamento da tocha de forma centralizada, embora com o abandono da guia externa que serviria para manter o ponto central fixo para qualquer ângulo de chanfro.

O modelo também foi o primeiro a ter a cinemática direta e inversa calculadas. Seu modelo 2D simplificado exibido na Figura 17 abordava todas as possíveis alterações que a versão futura viria a sofrer. Para este modelo e os subsequentes, existia uma condição geométrica imposta para que a motorização do eixo A se mantivesse na posição correta, que é dada na equação 4.1.

O modelo simplificado para definição das variáveis de geometria e de junta é exibido na Figura 17, sendo: d_5 a medida que representa o comprimento livre da tocha; $d_1, d_2, d_3, d_4, \alpha_1, \alpha_2$ e α_3 comprimentos e ângulos que definem a geometria do dispositivo; e os graus de liberdade de junta θ_1, θ_2 e θ_3 .

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 270^\circ \quad (4.1)$$

4.3 Primeiro modelo de fabricação

Este modelo, muito baseado no segundo conceitual mas com as dimensões corretas de fabricação, já incorpora também a utilização de rolamentos e redutores padronizados, além de um sistema de transmissão adequado, é exibido na Figura 18.

Neste modelo foi grande o aprendizado sobre a utilização de materiais e ferramentas disponíveis na fábrica. A responsabilidade da transmissão também foi ponto chave, sendo que foi inserido um sistema de mola e trilho para forçar o pinhão contra coroa, de modo a torná-la uma transmissão de folga zero. Os servomotores utilizados também são modelos padronizados de 0,4kW, com redutores padronizados de folga reduzida - a folga de cada redutor era especificada pelo fabricante como menor que dois minutos de grau. Um dos redutores apresenta um ângulo de inclinação de 90° , de modo a reduzir a área ocupada pelo sistema quando em uso.

Este foi o primeiro modelo que apresentou alteração da tocha e do acessório de fixação, sendo a tocha um modelo da *Hypertherm* voltado agora para sistemas mecanizados e o acessório de fixação desta um modelo de fabricação própria da empresa, utilizado no sistema anticollisão e adequado para uma ampla gama de tochas de plasma. Nesta versão, também foi inserida uma

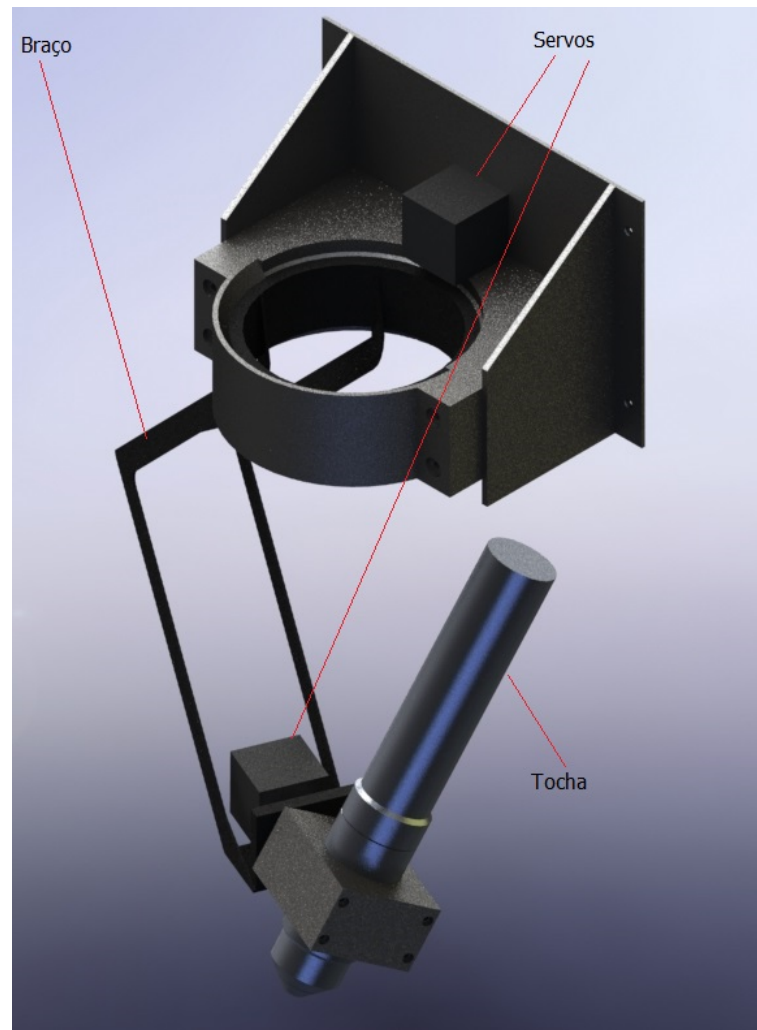


Figura 16 – Renderização do segundo modelo.

carénagem que protege o engrenamento na parte inferior, visto que o ambiente fabril pode ser muito hostil e o lançamento de pó metálico advindo do corte pode intervir no funcionamento adequado da engrenagem.

Este modelo sofreu mais uma alteração antes do modelo final por causa de dificuldade de fabricação, o tubo retangular que ligaria a parte superior e a inferior requeria uma angulação precisa em sua fabricação, tornando-se um risco para o desempenho do projeto. Nesta versão o material escolhido para a fabricação foi o alumínio, dada a necessidade de leveza do protótipo. O modelo final (sem motorização, tocha e redutores) pesava menos de 7kg.

4.4 Versão construtiva final

Nesta versão o pulso estava completamente pronto para produção, o problema do braço de tubo retangular foi solucionado substituindo-o por uma seção reta, que não requer a complexa dobra da versão anterior. O modelo é exibido na Figura 19.

A maior alteração, além do braço, foi a utilização dos rolamentos. Enquanto o anterior utilizava

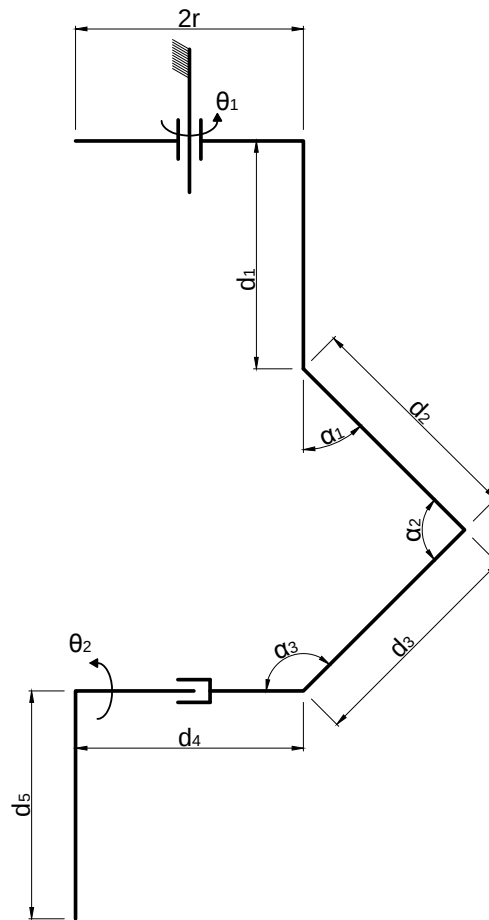


Figura 17 – Modelo simplificado no plano yz mostrando a geometria e os graus de liberdade do dispositivo.

um rolamento de esferas de contato angular parafusado no eixo e um axial de agulhas, a versão atual conta com dois rolamentos de esferas de contato angular. A alteração ocorreu pois foi verificado que poderia ocorrer um desalinhamento do rolamento de agulhas, trazendo vibrações indesejadas ao sistema.

Foi também utilizada uma redução de peso na chapa que se estende como braço e nas engrenagens, conforme visível na Figura 20, visto que esta não está submetida a cargas excessivas que podem vir a causar um rompimento por tração. A redução do peso é importante para manter a intercambialidade de peças, podendo fazer com que o pulso seja utilizável até mesmo em modelos antigos de máquinas de corte, com motorização inferior.

4.4.1 Versão construtiva simplificada

Com as especificações em mãos, a compra de material para a construção seria o próximo passo, porém, o valor orçado para certas peças se tornou um tanto proibitivo para um simples

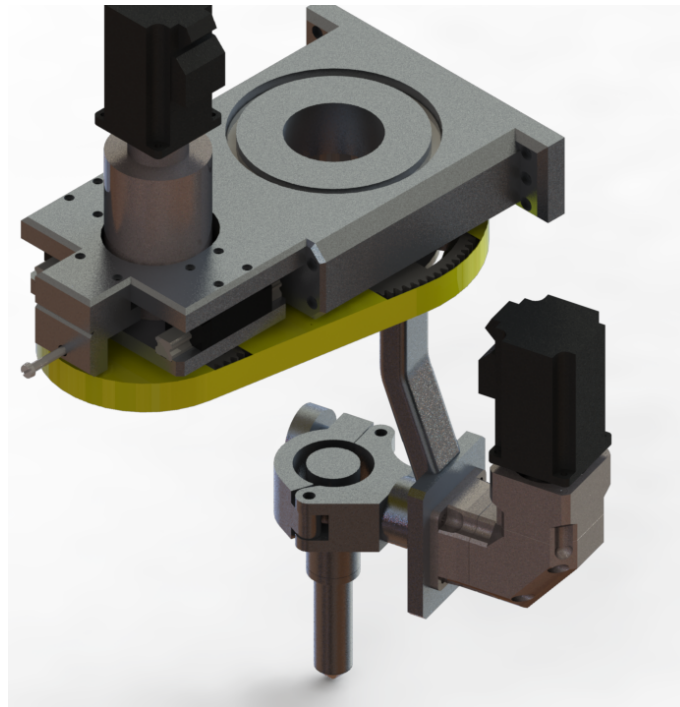


Figura 18 – Renderização do terceiro modelo

primeiro protótipo. Apesar do modelo ser robusto e solucionar bem o problema, para entender melhor o funcionamento foi requerido um modelo simplificado.

A criação deste modelo simplificado passou por duas etapas, a primeira envolveu o uso de um *slewing bearing*, que é um rolamento que suporta cargas tanto axiais quanto radiais, de forma semelhante aos rolamentos cônicos, porém em ambas as direções. O modelo requerido é fabricado pela SKF Itália, porém, o preço se tornou ainda mais proibitivo que o dos rolamentos de contato angular cotados anteriormente, com prazo de 4 meses de entrega. Um modelo de *slewing bearing* de rolos é exibido na Figura 21.

A solução então foi a criação de um mecanismo que simulasse o funcionamento deste rolamento. Foi criado então um mecanismo simplificado utilizando-se de teflon, que é um material autolubrificante e resistente.

Outra simplificação que ajudou a reduzir o preço foi a utilização de dois redutores lineares. Como o modelo feito é um protótipo de testes, apesar do redutor angular auxiliar na economia de espaço este pode ser eliminado. A última simplificação foi a retirada das engrenagens e sua substituição por correias sincronizadoras.

Apesar das correias sincronizadoras não serem recomendadas para trabalhar na região próxima da alta temperatura do plasma, a utilização de um escudo metálico deve fornecer a proteção adequada para a correia na fase de testes.

O modelo simplificado é exibido na Figura 22. Apesar de não tão robusto quanto o modelo que virá a ser realmente o final, este pode dar uma boa ideia de como o sistema vai se comportar em funcionamento.

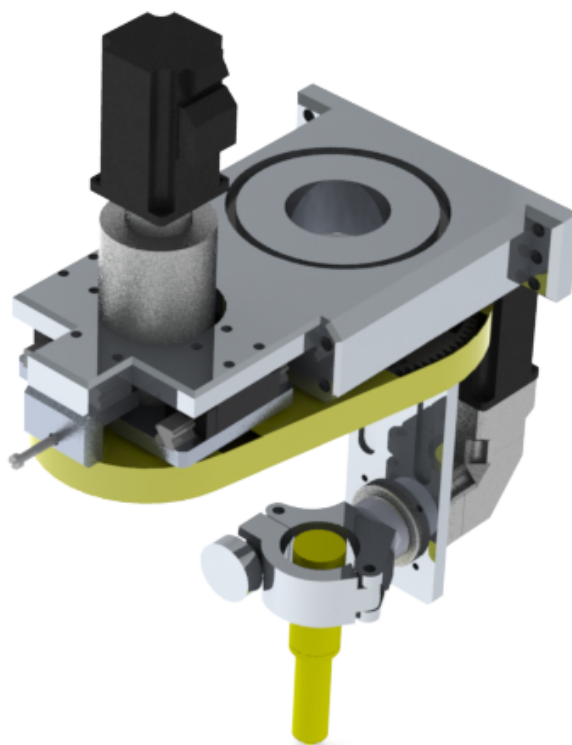


Figura 19 – Renderização do modelo final

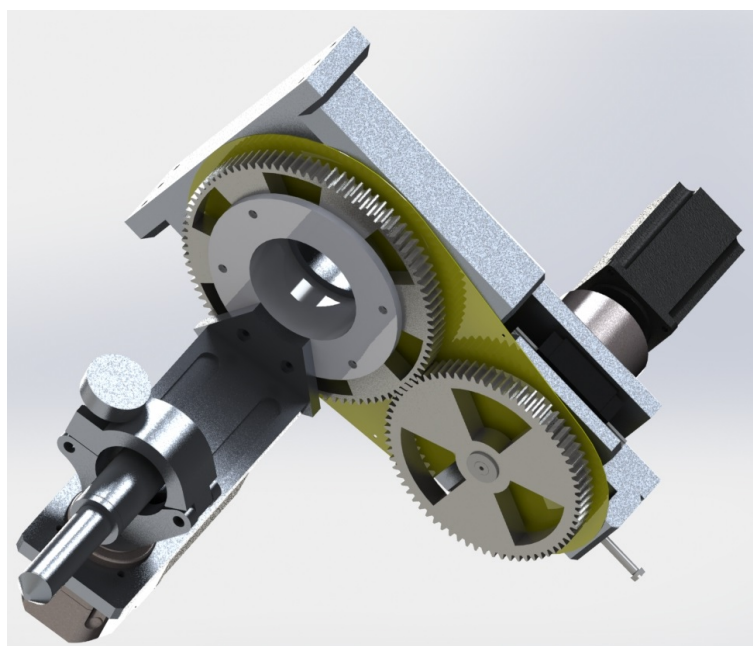


Figura 20 – Renderização do modelo final - Redução de peso



Figura 21 – Slewing Bearing **Fonte:** <http://www.cnslewingbearing.com/>



Figura 22 – Modelo simplificado

5 MODELAGEM DO PROTÓTIPO

Neste capítulo é apresentada a modelagem da cinemática direta e inversa do robô em seu estágio final de construção.

5.1 Cinemática Direta

A convenção de Denavit-Hartenberg (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005) tem dois pré-requisitos para sua aplicação, um deles determina que o eixo x_1 de um sistema de coordenadas seja perpendicular ao eixo z_0 do outro sistema, o outro pré-requisito impõe que o eixo x_1 intercepte o eixo z_0 . No desenvolvimento da cinemática direta deste pulso não foi utilizada a convenção, apesar destes requisitos serem satisfeitos, dependendo da geometria escolhida.

A solução foi obtida utilizando as matrizes de transformação homogênea entre os sistemas, partindo do sistema de referência da origem até o sistema de referência da tocha.

A cinemática direta do pulso esférico foi desenvolvida utilizando um programa de matemática simbólica. Na equação 5.1 é exibida a coordenada z do vetor posição da ferramenta em relação à origem, que está no cabeçote da máquina de corte CNC.

Estão disponíveis também a matriz de orientação do referencial da tocha R_3^0 , equações 5.4 a 5.12, e as componentes x e y , do vetor posição p_3^0 da origem do referencial da tocha em relação à origem, equações 5.2 e 5.3, respectivamente.

As equações são baseadas no modelo simplificado exibido na Figura 23, o modelo é genérico, podendo servir para o pulso mesmo na sua versão recente, adaptando-se os ângulos e distâncias.

Os termos utilizados nas equações da matriz de rotação foram simplificados de forma a torná-las menos extensas. Como referência, onde se lê s , o termo é seno, para c é um cosseno, os subscritos $t1$ e $t2$ indicam θ_1 e θ_2 , assim como os subscritos $a1$, $a2$ e $a3$ indicam os ângulos α_1 , α_2 e α_3 respectivamente. Assim, onde é indicado s_{t1} o correto é $\sin(\theta_1)$.

$$z_3^0 = 1/2 d_5 \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \theta_2) + 1/2 d_5 \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \theta_2) - \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) d_4 + \cos(\alpha_1 + \alpha_2) d_3 - \cos(\alpha_1) d_2 - d_1 \quad (5.1)$$

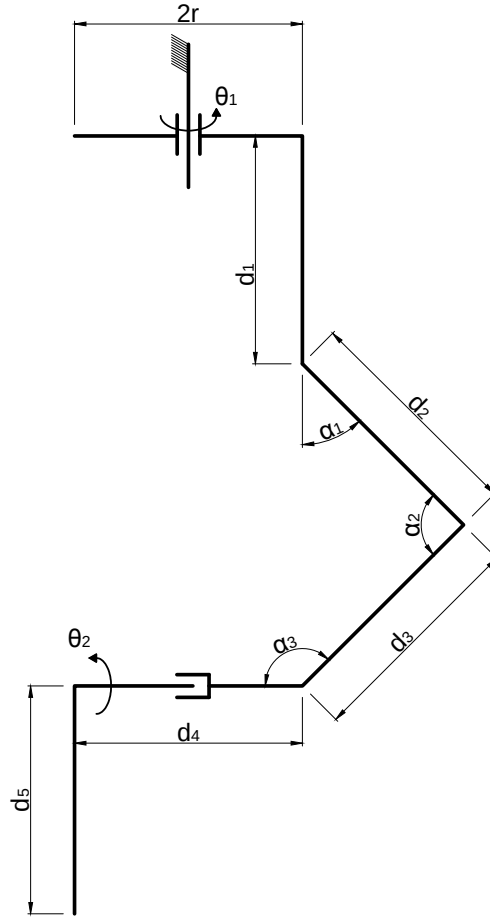


Figura 23 – Modelo simplificado no plano yz mostrando a geometria e os graus de liberdade do dispositivo.

$$\begin{aligned}
 x_3^0 = & -1/4 d_5 \sin(\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) - 1/4 d_5 \sin(-\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) \\
 & + 1/4 d_5 \sin(\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) + 1/4 d_5 \sin(-\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) \\
 & + 1/2 d_5 \sin(\theta_1 + \theta_2) - 1/2 d_5 \sin(\theta_1 - \theta_2) + 1/2 d_4 \cos(\alpha_3 + \alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) \\
 & - 1/2 d_4 \cos(\alpha_3 + \alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) - 1/2 d_3 \cos(\alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) \\
 & + 1/2 d_3 \cos(\alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) + 1/2 d_2 \cos(-\theta_1 + \alpha_1) - 1/2 d_2 \cos(\theta_1 + \alpha_1) + \sin(\theta_1) r \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_3^0 = & 1/4 d_5 \cos(-\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) + 1/4 d_5 \cos(\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) \\
& + 1/4 d_5 \cos(-\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) + 1/4 d_5 \cos(\theta_2 + \alpha_3 + \alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) \\
& - 1/2 d_5 \cos(\theta_1 - \theta_2) + 1/2 d_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) + 1/2 d_4 \sin(\alpha_3 + \alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) \\
& + 1/2 d_4 \sin(\alpha_3 + \alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) - 1/2 d_3 \sin(\alpha_2 + \theta_1 + \alpha_1) \\
& - 1/2 d_3 \sin(\alpha_2 - \theta_1 + \alpha_1) + 1/2 d_2 \sin(\theta_1 + \alpha_1) + 1/2 d_2 \sin(-\theta_1 + \alpha_1) + \cos(\theta_1) r \quad (5.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_3^0(1, 1) = & ((-(s_{t1}s_{a1}s_{a2} - s_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (s_{t1}s_{a1}c_{a2} + s_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})c_{t2} + c_{t1}s_{t2})c_{t3} \\
& + ((-(s_{t1}s_{a1}s_{a2} - s_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (s_{t1}s_{a1}c_{a2} + s_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})s_{t2} + c_{t1}c_{t2})s_{t3} \quad (5.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_3^0(1, 2) = & -((-(s_{t1}s_{a1}s_{a2} - s_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (s_{t1}s_{a1}c_{a2} + s_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})c_{t2} + c_{t1}s_{t2})s_{t3} \\
& + ((-(s_{t1}s_{a1}s_{a2} - s_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (s_{t1}s_{a1}c_{a2} + s_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})s_{t2} + c_{t1}c_{t2})c_{t3} \quad (5.5)
\end{aligned}$$

$$R_3^0(1, 3) = - (s_{t1}s_{a1}s_{a2} - s_{t1}c_{a1}c_{a2})s_{a3} + (s_{t1}s_{a1}c_{a2} + s_{t1}c_{a1}s_{a2})c_{a3} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
R_3^0(2, 1) = & ((-(c_{t1}s_{a1}s_{a2} - c_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (c_{t1}s_{a1}c_{a2} + c_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})c_{t2} - s_{t1}s_{t2})c_{t3} \\
& + ((-(c_{t1}s_{a1}s_{a2} - c_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (c_{t1}s_{a1}c_{a2} + c_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})s_{t2} - s_{t1}c_{t2})s_{t3} \quad (5.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_3^0(2, 2) = & -((-(c_{t1}s_{a1}s_{a2} - c_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (c_{t1}s_{a1}c_{a2} + c_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})c_{t2} - s_{t1}s_{t2})s_{t3} \\
& + ((-(c_{t1}s_{a1}s_{a2} - c_{t1}c_{a1}c_{a2})c_{a3} - (c_{t1}s_{a1}c_{a2} + c_{t1}c_{a1}s_{a2})s_{a3})s_{t2} - s_{t1}c_{t2})c_{t3} \quad (5.8)
\end{aligned}$$

$$R_3^0(2, 3) = -(c_{t1}s_{a1}s_{a2} - c_{t1}c_{a1}c_{a2})s_{a3} + (c_{t1}s_{a1}c_{a2} + c_{t1}c_{a1}s_{a2})c_{a3} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned}
R_3^0(3, 1) = & (-(-c_{a1}s_{a2} - s_{a1}c_{a2})c_{a3} - (-c_{a1}c_{a2} + s_{a1}s_{a2})s_{a3})c_{t2}c_{t3} \\
& - (-(-c_{a1}s_{a2} - s_{a1}c_{a2})c_{a3} - (-c_{a1}c_{a2} + s_{a1}s_{a2})s_{a3})s_{t2}s_{t3} \quad (5.10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_3^0(3, 2) = & -(-(-c_{a1}s_{a2} - s_{a1}c_{a2})c_{a3} - (-c_{a1}c_{a2} + s_{a1}s_{a2})s_{a3})c_{t2}s_{t3} \\
& - (-(-c_{a1}s_{a2} - s_{a1}c_{a2})c_{a3} - (-c_{a1}c_{a2} + s_{a1}s_{a2})s_{a3})s_{t2}c_{t3} \quad (5.11)
\end{aligned}$$

$$R_3^0(3, 3) = -(-c_{a1}s_{a2} - s_{a1}c_{a2})s_{a3} + (-c_{a1}c_{a2} + s_{a1}s_{a2})c_{a3} \quad (5.12)$$

5.1.1 Validação do cálculo de cinemática direta

Utilizando o software de matemática simbólica em conjunto com o de CAD 3D, foi testada a matriz de transformação utilizando valores retirados do desenho 3D. Na tabela 1 são exibidos os valores determinados em desenhos para ângulos de junta e comprimentos, e na tabela 3 são exibidos os dados retirados do desenho e os valores calculados com base na cinemática direta.

Tabela 1 – Valores para geometria genérica

Nome	Valor
θ_1	0 rad
θ_2	$\pi/3$ rad
θ_3	0 rad
α_1	$\pi/4$ rad
α_2	$\pi/2$ rad
α_3	$3 * \pi/4$ rad
r	149 mm
d_1	100 mm
d_2	100 mm
d_3	100 mm
d_4	100 mm
d_5	108 mm

Também foi feita uma validação para a geometria final, utilizando os parâmetros corretos de fabricação. Os parâmetros para esta são exibidos na tabela 2.

Tabela 2 – Valores para geometria final do pulso

Nome	Valor
θ_1	0 rad
θ_2	$\pi/3$ rad
θ_3	0 rad
α_1	$\pi/2$ rad
α_2	$\pi/2$ rad
α_3	$\pi/2$ rad
r	100 mm
d_1	96 mm
d_2	71,2 mm
d_3	185 mm
d_4	71,81 mm
d_5	148,97 mm

Vale ressaltar que os valores escolhidos na tabela 1 são apenas ilustrativos do funcionamento do método matemático aplicado, sendo que as medidas reais foram calculadas com base em especificações da máquina, exibidas na tabela 2.

Na tabela 3 são exibidos os erros para a geometria genérica. Os valores de erro em todas as coordenadas se mostram bastante satisfatórios.

Tabela 3 – Validação dos dados de cinemática para valores teóricos

Coordenada	Calculado	Verificado	Erro(%)
x_3^0	93,517	93,530	-0,013
y_3^0	49,000	49,000	0,0
z_3^0	-295,4475	-295,000	0,151

Tabela 4 – Validação dos dados de cinemática real

Coordenada	Calculado	Verificado	Erro(%)
x_3^0	129,012	128,740	0,211
y_3^0	99,390	100,740	-1,358
z_3^0	-355,485	-356,96	-0,415

O erro nulo na coordenada y_3^0 deve-se ao fato de a mesma ser modificada apenas para valores não nulos de θ_1 e θ_2 .

Os valores na coluna “verificado” foram obtidos em software CAD, o que valida a precisão da cinemática direta calculada.

Na tabela 4 são exibidos os valores de posição para a tocha inclinada em 60° no modelo real. É notável o quão pequeno é o erro, sendo o maior da ordem de 1%. Isto prova que o modelo de cinemática direta está correto.

5.2 Cinemática Inversa

A cinemática inversa foi calculada utilizando o método de Paul (1981), utilizando um software de matemática simbólica. As equações 5.14 a 5.16 se referem aos graus de liberdade do pulso, inferindo que a matriz 3T_6 da equação 5.13 é a matriz resultante de transformação entre a base e a extremidade da tocha.

$${}^3T_6 = \begin{bmatrix} n_{13x} & s_{13x} & a_{13x} & p_{13x} \\ n_{13y} & s_{13y} & a_{13y} & p_{13y} \\ n_{13z} & s_{13z} & a_{13z} & p_{13z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{-p_{13x} + d_5 n_{13x}}{-p_{13y} + d_5 n_{13y}} \right) \quad (5.14)$$

$$\theta_2 = \arctan \left(\sqrt{\frac{-1 + 2n_{13z}^2 + \cos(2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3)}{-1 + \cos(2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3)}} \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) * (n_{13z})^{-1} \right) \quad (5.15)$$

A equação 5.16 faz referência a um eixo que não efetivamente existe no projeto, mas seria útil caso, por exemplo, este apresentasse uma garra ou outro tipo qualquer de mecanismo que

poderia girar. No caso atual, a variação da posição da tocha em torno do seu próprio eixo é irrelevante.

$$\theta_3 = \arctan \left(\frac{-a_{13x}p_{13y} + a_{13x}d_5n_{13y} + a_{13y}p_{13x} - a_{13y}n_{13x}d_5}{-s_{13x}d_5n_{13y} - s_{13y}p_{13x} + s_{13x}p_{13y} + s_{13y}n_{13x}d_5} \right) \quad (5.16)$$

5.2.1 Validação do cálculo de cinemática inversa

Como um teste de validação da cinemática inversa, foi extraída a matriz de cinemática direta do modelo real, exibida na equação 5.17 e os dados são calculáveis para θ_2 .

$${}^3T_6 = \begin{bmatrix} 0,866 & 0,500 & 0,000 & 129,012 \\ 0,000 & 0,000 & -1,000 & 99,390 \\ -0,500 & 0,866 & 0,000 & -355,485 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Substituindo então os valores para θ_2 , esperamos encontrar o ângulo de inclinação original da tocha, de 60° , na equação 5.18.

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{\sqrt{\frac{-1+2(-0,5)^2+\cos(2\pi/2+2\pi/2+2\pi/2)}{-1+\cos(2\pi/2+2\pi/2+2\pi/2)}} \sin(\pi/2 + \pi/2 + \pi/2)}{-0,5} \right) \quad (5.18)$$

Resolvendo temos que $\theta_2 = 60^\circ$, o que valida o modelo de cinemática inversa e direta como um conjunto, utilizando dados reais da máquina.

6 INTEGRAÇÃO DO PROTÓTIPO AO MODELO EXISTENTE

Neste capítulo é tratada a maneira de integrar o sistema proposto com a máquina de corte CNC da empresa.

6.1 Integração mecânica

O protótipo foi desenvolvido com o objetivo de ser utilizado em qualquer sistema de corte automatizado a plasma, logo, a integração mecânica pode ser tratada apenas sob aspecto construtivo.

A máquina de corte CNC utiliza-se em sua construção de vigas caixão e é motorizada por servomotores de 400W. Os servomotores atendem bem à máquina em suas necessidades de velocidade e torque, porém, o pulso esférico possui uma massa. Logo, sua adição pode influenciar a capacidade de torque do acionamento. A solução para este problema foi criar o pulso com a menor massa possível, de modo a não necessitar de alterar os motores individuais e manter a premissa de não ser invasivo no sistema original.

Com a utilização de alumínio na sua construção, o sistema se manteve leve o suficiente. As maiores adições de massa se dão pelos servomotores e redutores.

6.2 Programação

O maior desafio de integração foi a criação de um novo programa que converta arquivos DXF para código G.

Este programa é de extrema importância, visto que os softwares comerciais de CAM para máquinas de 5 eixos custam caro e onerariam a máquina, tornando-a pouco competitiva.

Para a criação do sistema foi estudado o software *MasterCAM*, como uma referência em CAM mundial. O software é comercial e realiza trabalhos com diversos tipos de máquinas, primariamente fresadoras de 3 e 5 eixos e tornos.

O estudo primário do sistema CAM permitiu o entendimento das necessidades para criação do programa. Um dos preceitos criados é que comercialmente é improvável que um fabricante utilize mais de um ângulo de chanfro ao longo de um mesmo corte. Impondo esta limitação, o programa passaria a ler um desenho 2D em DXF e então criar o código G baseado em um único ângulo inserido, fora do desenho.

Utilizando apenas um ângulo de chanfro, o cabeçote pode seguir sua trajetória para fazer o corte desde que a tocha esteja sempre apontada numa direção específica. Para o modelo de pulso esférico a direção específica é dada pela equação 6.1. A condição basicamente diz que a

direção do movimento dada pelo ângulo do eixo C no sistema sempre será tangente à curva de corte, como exibido na Figura 24.

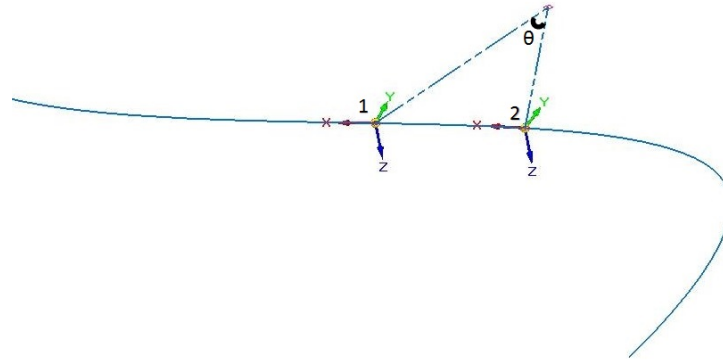


Figura 24 – Condição de funcionamento

$$C = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{X}_1 \cdot \vec{X}_2}{\|\vec{X}_1\| * \|\vec{X}_2\|} \right) \quad (6.1)$$

É importante ressaltar que a limitação não impede o sistema de fazer ângulos de chanfro diferentes em uma mesma peça, mas vai requerer mais de um desenho para tal.

Outro aspecto importante desta condição de funcionamento é a sua relação com o ângulo de cinemática inversa θ_1 , da equação 5.14. A equação, assim como a condição, determina que o ângulo necessariamente é dependente da normal à trajetória em X e em Y.

Alguns dos comandos mais comuns que serão utilizados no código G para posicionamento e movimentação são listados na tabela 5, com seus respectivos significados.

Tabela 5 – Algumas funções básicas de código G

Função	Propriedade
G00	Locomoção a velocidade máxima
G01	Locomoção à velocidade controlada (velocidade de corte)
G02 e G03	Interpolação circular, horária e anti-horária
G90	Programação absoluta, define o zero da peça.
X Y Z e A B C	Eixos programáveis da máquina, utilizados em conjunto com as funções anteriores
I J K	Utilizados para definir centros de circunferências nos comandos G2 e G3

Abaixo é exibido um código G para o corte reto de um quadrado de lado 100, o código será explicado nas linhas a seguir.

```
(quad.tap)
(Desktop)
(17-Nov-2014 19:35:10)
(HySpeed HT2000 Aço Carbono 06,4mm 200A Hyspeed 200A O2/Ar)
N6 G90
N7 M9999
N8 M9010 P2,3
N9 M9011 P0,3 Q0
N10 M9013 P1,5
N11 M9018
N12 F5800 S10.0
N13 G0 X0 Y0 A0 C0
N14 M9016
N15 G1 X0 Y100 A0 C0
N16 G1 X100 Y100 A0 C90
N17 G1 X100 Y0 A0 C180
N18 G1 X0 Y0 A0 C270
N19 M5
N20 M9017
N21 G0 X0 Y0 A0 C0
N22 M30
```

As informações entre parênteses são comentários, na ordem, eles informam o nome do arquivo de saída, “.tap” é a extensão utilizada pelo software controlador, Mach3. As informações seguintes se referem ao endereço do arquivo, data e hora da conversão, e a última é o tipo de tocha e material, no caso foi uma HyperTherm HySpeed HT200 cortando uma chapa de aço carbono de 0,6mm com a corrente de 200A.

Iniciando na linha N6 temos G90, que indica que o ponto onde foi marcado o zero da peça, na prática isso quer dizer que o operador pode escolher qualquer ponto na chapa para iniciar o corte. Os códigos M são específicos de cada máquina, resumindo sua utilização, estes definem a altura de corte, altura de disparo e iniciam algumas funções como o sistema anticolisão.

Na linha N12 o código indica a velocidade de movimento que vai ser utilizada em G1. As linhas subsequentes já tratam da movimentação do equipamento. Na linha N13 o sistema retorna a posição zero (definida na primeira linha, em M90). A linha 14 faz o disparo da tocha de plasma. Na linha N15 temos um comando que move em velocidade constante G1 a tocha da posição anterior, que foi definida na linha 13 para a posição X=0, Y=100. A e C são os eixos 4 e 5 do sistema, no caso o corte não é chanfrado, logo o ângulo A é nulo, mas o sistema altera a direção da tocha girando o eixo C de qualquer maneira, dado que não existe real problema e a programação se tornava mais fácil. Como definido anteriormente, o ângulo C é sempre

perpendicular à direção de movimento.

As linhas N16, 17 e 18 funcionam de forma semelhante à anterior, a linha N20 apaga a tocha de plasma e o corte. A linha N21 retorna a máquina para sua posição inicial e a linha N22 encerra o programa.

6.2.1 SmoothStepper

A máquina atualmente é controlada por meio de um computador utilizando uma placa chamada *SmoothStepper*. Esta placa faz a interface da eletrônica do sistema a partir da porta LAN do computador.

A placa *SmoothStepper* é um controlador de movimentos de até 6 eixos que se conecta através de USB ou LAN. Aceita comandos de um planejador de trajetória como o Mach3 CNC ou o LinuxCNC e produz um trem de pulsos para servomotores e motores de passo. (Warp9 Tech Design, Inc, 2012)

O *SmoothStepper* substitui uma interface antiga que era utilizada em conjunto com o Mach3 CNC, que se baseava nas portas LPT, utilizadas em impressoras antigas. Com o avanço da tecnologia e da conectividade USB, as placas mãe não acompanham mais uma porta LPT, sendo necessário o upgrade para continuar utilizando computadores disponíveis no mercado.

A grande vantagem é que o *SmoothStepper* já vem preparado para funcionar com até 6 eixos, não requerendo alterações para a integração.

6.2.2 Mach3 CNC

Na Figura 25 é exibida a operação de fabricação de uma peça utilizando comando numérico.

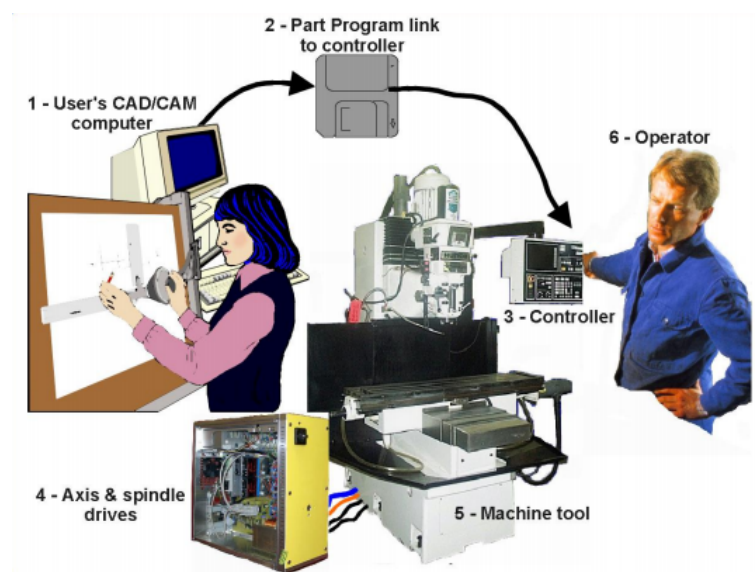


Figura 25 – Sistema CN tradicional **Fonte:** Manual Mach3

O projetista geralmente utiliza um sistema de CAD/CAM no computador (1). A saída deste programa é o código G, que é transferido de alguma forma (2) para o controlador da máquina (3). O controlador da máquina é responsável por interpretar o código G da peça e controlar os movimentos da máquina através dos eixos, motores e drives (4), movimentando a ferramenta (5).

Apesar da ilustração tratar da operação de fresamento, a máquina (5) pode ser uma furadeira, ou cortadores de plasma ou laser.

Frequentemente o controlador da máquina (3) pode controlar a partida ou parada dos motores (ou mesmo sua velocidade), ligar ou desligar fluido refrigerante e garantir que o operador de máquina (6) não mova nenhum dos eixos para além dos seus limites.

O controlador da máquina também tem controles como botões, teclados, potenciômetros e *joysticks*, além de um display, que mostra ao operador a operação.

Como os comandos de um programa em código G podem requerer movimentos coordenados complicados dos eixos, o controlador da máquina deve ser capaz de fazer um grande número de cálculos em tempo real.

Mach3 é um pacote de software que funciona num PC e se torna uma versão econômica do controlador da máquina (3), exibido na Figura 25. (NewFangled Solutions, 2003)

O programa é altamente personalizável, requerendo que alguém projete a sua interface de contato com o usuário. A interface antiga foi alterada, incluindo os dois novos eixos na interface, apesar do usuário não ter controle direto deles com um *joystick*, como existe com os eixos XYZ.

Algumas das maiores vantagens do Mach3 CNC são o seu preço competitivo, que torna a sua utilização como um sistema controlador muito conveniente, dado que a construção de um sistema próprio e embarcado como é feito em algumas máquinas é um grande vilão para máquinas que não são feitas de forma seriada. A programação de macros em VBscript é um grande atrativo, visto que é uma linguagem amplamente utilizada para programadores Windows.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi feito um estudo dos players no mercado de fabricação de máquinas de corte CNC, este estudo garantiu o conhecimento para dar início ao projeto.

Foi proposto um modelo de pulso esférico capaz de adicionar a função de chanfros a uma máquina de corte a plasma CNC. Para este utilizou-se um método de modelagem da cinemática direta baseado nas transformações homogêneas sem a utilização do algoritmo de Denavit-Hartenberg.

O método de cálculo de cinemática direta utilizado se mostrou suficientemente preciso para a cinemática de posição, conforme mostram os resultados exibidos na Tabela 3. O modelo da cinemática direta com matrizes de transformação homogênea também fornece a orientação, através da matriz $R_{(3 \times 3)}$, mostrada no capítulo 5.

Em seguida ao desenvolvimento da cinemática direta, foi desenvolvida a cinemática inversa com o uso da transformada inversa de Paul (1981), para a criação de um sistema de controle.

Com a modelagem de cinemática direta e inversa, foi criado um sistema de controle que integra a máquina de corte com o programa. O código G foi de grande ajuda, visto que o sistema é de fácil implementação e de ampla utilização em máquinas de comando numérico.

Foi criado um programa CAM/Pós-Processamento de desenhos em formato DXF, que transforma os dados de posição e forma em código G já preparado para a utilização na máquina. O programa foi criado em ambiente MatLab e possui interface gráfica prática para a sua utilização por um operador com pouca necessidade de treinamento.

O pulso proposto apresenta potencial de aplicação em qualquer máquina de corte CNC da empresa, dada sua simplicidade de construção. Como sugestão para trabalhos futuros fica a construção de um novo sistema anticolisão, considerando que a tocha terá seu alinhamento variando ao longo do processo de corte.

REFERÊNCIAS

ASIMOV, I. *Runaround*. 1942. 14

ASIMOV, I. *I, Robot (Coleção de contos publicados entre 1940 e 1950)*. Londres: Grafton Books, 1968. ISBN 9780246121004. 14

BAI, S.; HANSEN, M. R. Modelling of a spherical robotic wrist with euler parameters. In: MERLET, J.-P.; DAHAN, M. (Ed.). [S.l.]: 12th IFToMM World Congress, 2007. 17

BAW Brasil LTDA. *MegaCord*. 2014. Disponível em: <<http://www.baw.com.br/>>. 28

BENTO FILHO, A. *Robótica Industrial - Algoritmo Denavit-Hartenberg, Notas de Aula*. 2012. 22

BOGUE, R. Cutting robots: a review of technologies and applications. *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 35, n. 5, p. 390–396, 2008. 16

Oprea Duta e Michael M. Stanisic. *Dextrous Spherical Robot Wrist*. 1989. US 4878393. 17

ESAB. *ESAB Plasma VBA Global PRO*. 2013. Disponível em: <<http://www.esab-cutting.com/>>. 28

Clément M. Gosseling e François Caron. *Two Degree of Freedom Spherical Orienting Device*. 1999. US 5966991. 17, 18

GOSSELING, C. M.; HAMMEL, J.-F. The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. In: . [S.l.]: IEEE, 1994. vol. 1, p. 781–786. 17

GUPTA, A.; ARORA, S. *Industrial Automation and Robotics*. [S.l.]: Mercury Learning & Information, 2014, 2011. ISBN 1938549309. 16

HENDERSON, J. *Coordinate Axis Systems*. 2014. Disponível em: <<http://www.cnc4everyone.com/>>. 27

Hypertherm, Inc. The history of plasma cutting. 2001. Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1061>>. 14, 17

Hypertherm, Inc. *HyPerformance Plasma HPR260XD Gás Manual*. [S.l.], 2009. 31, 33

JAZAR, R. N. *Theory of Applied Robotics (2nd Edition)*. RMIT University - Melbourne, Australia: Springer, 2010. ISBN 9781441917492. 20, 22, 24

Messer Cutting Systems. *Corte a plasma em chanfro adequado para suas aplicações*. 2014. Disponível em: <<http://www.messer-cs.com/>>. 11

Messer Cutting Systems. *Skew Rotator Infinity*. 2014. Disponível em: <<http://www.messer-cs.com/>>. 27

MICROSTEP. *Plasma Rotator*. 2014. Disponível em: <<http://www.microstep.eu/>>. 30

NewFangled Solutions. *A Usage Guide for Mach3Mill/Plasma release 1.84+*. [S.l.], 2003. 50

PAUL, R. P. *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control : the Computer Control of Robot Manipulators*. [S.l.]: MIT Press, 1981. (MIT Press series in artificial intelligence). ISBN 9780262160827. 23, 44, 51

SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. University of Illinois: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 9780471649908. 17, 20, 23, 40

Warp9 Tech Design, Inc. *USB SmoothStepper User's Manual*. [S.l.], 2012. 49