



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
AUTOMAÇÃO

Egmidio Caratti Filho

Rótula Atuadora Com Passos Esféricos Controlados

Mossoró-RN

2014

Egmidio Caratti Filho

Rótula Atuadora Com Passos Esféricos Controlados

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Augusto C. Pavão

Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA

Co-orientador(a): Prof^a. Dra. Danielle Simone S. Casillo

Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA

Mossoró-RN

2014

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

C262r Caratti Filho, Egmidio

Rótula atuadora com passos esféricos controlados / Egmidio Caratti Filho -- Mossoró, 2014.
87f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Carlos Pavão
Co-Orientadora: Profª. Dra. Danielle Simone S. Casillo

Dissertação (Mestrado em Sistema de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Automação industrial. 2. Atuador 3D. 3. Motor de passos esféricos. 4. Robótica. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT/833-14

CDD: 629.895

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo de um mecanismo atuador controlado, com características particulares de movimento e de conceitos de controle. O modelo é baseado em somas de conceitos de mecanismos, máquinas elétricas, computação e micro-controladores, e tem o objetivo de fazer um controle computacional para ser usado de forma prática nesse novo equipamento. Para fazer o controle computacional, é necessário fazer uma modelagem matemática introdutória, baseada em coordenadas esféricas, para propor uma definição dos pontos de movimento de um sistema mecânico, caracterizados por passos esféricos. Esse sistema é atuado por zonas magnetizáveis ao longo de uma casca esférica rotulável e uma esfera fixa com apenas um ponto magnético. Essa rótula comunica duas hastes com posições angulares relativas entre si. Essas posições são definidas nesse trabalho por meio da elaboração de uma matriz que representa o estado de ligação de todas as zonas magnetizáveis por bobinas distribuídas na casca esférica, determinando se elas estão ligadas ou desligadas. Esse modelo matemático identifica os pontos na casca esférica, onde são cadastrados como registro de tabela em um banco de dados, que possuem a informação da relação de vizinhança entre pontos. Em seguida, um *software* gerencia a manutenção nesse banco de dados para fazer o controle usando algoritmo através de programação em linguagem JAVA. Os dados de entrada de informações para o algoritmo são os pontos de início e fim de movimento e a velocidade de acionamento das bobinas. O resultado desse algoritmo é um roteiro de sequência de movimento, onde, usando critério de melhor rota, o algoritmo escolhe a mais eficiente dentro de várias possibilidades. O resultado do programa é um arquivo que é enviado para um dispositivo eletrônico e que ao receber as informações, comanda o estado das ligações das bobinas da rótula atuadora de forma sequenciada que promove o movimento desejado. Por fim, esse mecanismo assim modelado, pretende viabilizar um equipamento que ofereça novas possibilidades de soluções tanto para controle, como para soluções em atuadores posicionadores que podem ser aplicáveis a robótica e para os mais variados ramos da automação.

Palavras-chave: Motor de Passos Esféricos, Atuador 3D, Robótica, Automação Industrial.

Abstract

This work presents a model of a controlled actuating mechanism, with particular motion characteristics and control concepts. The model is based on the sums of concepts of mechanisms, electrical machinery, computer science and microcontrollers theory and it aims to make a computational control to be used in this new equipment. To this computational control, it is necessary to make an introductory mathematical modeling based on spherical coordinates, to propose a definition of points of motion for a mechanical system, characterized by spherical steps. This system is actuated by magnetic points distributed along an articulated spherical shell and it slides in the fixed sphere with only one magnetic spot. The mechanical system communicates two stems with angular relative positions. These positions are presented through the development of a matrix that represents the power status of all the points distributed in the spherical shell, determining whether they are on or off. This mathematical model identifies points in the spherical shell, where they are registered as a table row in a database, which has information of the neighborhood relation between points. So a software is used to update in database and an algorithm is used for will do control by using the JAVA programming language. The input data for the algorithm are the start and the end motion points and the steps speed. The result of this algorithm is a script with sequence of movement, using best route criteria the algorithm selects the most efficient within several possibilities. The program's output is a file that is sent to an electronic device and it receives the information, controls the power state for the coils of the actuating rod, to promote a sequence of desired movement. So this modeled mechanism, plans to make possible a device that offers new possibilities for solutions for controls as actuators positioners that can be applied to robotics and for the most varied of automation problem.

Keywords: Spherical Steps Motor, 3D Actuator, Robotics, Industrial Automation.

Agradecimentos

Minha família e aos meus amigos, por todo auxílio, paciência e compreensão que me deram durante o decorrer do projeto.

Sumário

Lista de Figuras	7
Lista de abreviaturas e siglas	10
1 Introdução	12
1.1 Justificativa e Motivação do Trabalho	12
1.2 Objetivos	15
1.3 Organização do trabalho	16
2 Fundamentações	17
2.1 Conceito Físico da Rótula Atuadora	17
2.1.1 Mecanismo e Estudo de Cinemática	17
2.1.2 Aplicação de Mecanismos	21
2.1.3 Fundamentos de Motores de Passo	23
2.1.4 Atuadores Esféricos	26
2.1.5 Trabalhos Relacionados	28
2.1.6 Geometria e Arranjo de Pontos da Rótula	31
2.2 Fundamentação Relativa ao Controle	35
2.2.1 Controle Computacional	36
2.2.2 Controle Eletrônico	37
2.2.3 Trabalhos Relacionados	38
2.3 Considerações Finais	39
3 Materiais e Métodos	40
3.1 Mecanismos e Suas Aplicações	40

3.2	Construção do Modelo Experimental	43
3.2.1	Montagem Mecânica	44
3.2.2	Montagem Elétrica	45
3.3	Considerações de Controle	48
3.4	Software de Controle	50
3.5	Projeto de Circuito de Comando e Software de Simulação	56
3.6	Considerações Finais	58
4	Aplicações e Resultados	59
4.1	Aplicação computacional	60
4.1.1	Construção da Rótula de Simulação	60
4.1.2	Resultado computacional	65
4.2	Simulação Elétrica e Eletrônica	67
4.3	Protótipo da Rótula Atuadora	71
4.3.1	Construção do Protótipo	72
4.3.2	Considerações de Projeto Relativo ao Protótipo	76
4.4	Considerações Finais	78
5	Conclusão Geral e Trabalhos Futuros	80
	Referências Bibliográficas	82
I	Juntas Mecânicas	85
A	Planilha de Dimensionamento de Bobina	86

Lista de Figuras

2.1	Grau de liberdade de um corpo totalmente livre	19
2.2	Sistema proposto por Haijun S.	19
2.3	Sistemas rotulados em série	20
2.4	Mecanismo junta universal	22
2.5	Exemplo de aplicação de juntas universais	22
2.6	Potencial em aplicação da rótula atuadora	23
2.7	Motor de passo elementar	24
2.8	Atuador esférico impulsionado mecanicamente	27
2.9	Motor esférico ultrasônico com três estatores.	28
2.10	Motor esférico eletromagnético	29
2.11	Motores Esféricos	30
2.12	Plano de coordenadas esféricas	31
2.13	Distribuição de pontos em plano rebatido	33
2.14	Distância entre pontos e reta	34
2.15	Arquitetura de um Microcontrolador	38
3.1	Rótula Atuadora	41
3.2	Rótula atuadora em detalhe	42
3.3	Rótula atuadora - Protótipo	43
3.4	Base da rótula atuadora	44
3.5	Haste H1	45
3.6	Casca da rótula esférica	45
3.7	Esfera fixa da rótula atuadora	46

3.8	Bobina definitiva do Protótipo	46
3.9	Carretel das bobinas MPs	47
3.10	Controle	48
3.11	Esboço do Controle	50
3.12	Banco de dados Relacional	52
3.13	Cadastro de pontos	54
3.14	Cadastro de operação	54
3.15	Fluxograma e pseudocódigo do SIRA	55
3.16	Simulação em proteus	56
3.17	Fluxograma do Firmware	58
4.1	Construção da rótula atuadora de simulação	61
4.2	Rebatimento e representação da simulação	61
4.3	Orientação de pontos em Autocad	62
4.4	Cadastro de pontos no experimento	64
4.5	Cadastro operação e movimento no experimento	66
4.6	Arquivo de resultados	66
4.7	Configuração de comunicação serial COMPIM	68
4.8	Firmware em Proteus	69
4.9	Resultado do ensaio	70
4.10	Resultado do ensaio no Proteus	71
4.11	Prototipo final	73
4.12	Esfera fixa final	74
4.13	Bobina fixa	74
4.14	Casca esférica	75
4.15	Construção das Bobinas	76
4.16	Imperfeições no carretel	77

I.1	Grau de liberdade	85
-----	-----------------------------	----

Lista de abreviaturas e siglas

CC – (Corrente Contínua ou Corrente Direta)

CA – (Corrente Alternda)

ARM – (*Advanced RISC Machine*)

CPU – (*Central Processing Unit*)

RISC – (*Reduced Instruction Set Computer*)

INPI – (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual)

GDL – (Grau de Liberdade)

MEB – (Matriz de Estado de Ligação das Bobinas)

multi-DOF – (Múltiplos Graus de Liberdade)

PZT – (*Lead Zirconate Titanate*)

MP – (Ponto Magnéticos)

JVM – (*Java Virtual Machine*)

MySQL – (*Structured Query Language*)

SQL – (*Structured Query Language*)

IBM – (*International Business Machines Corporation*)

PIC – (*Programmable Interrupt Controller*))

RISC – (*Reporters Instructed in Saving Colleagues*)

USART – (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Trasmitter*)

TTL – *Transistor-Transistor Logic*)

CI – (Circuito Integrado)

IGBT – (Transistores Bipolar de Porta Isolada)

TJB – (Transistor Bipolar de Junção)

MOSFET – (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor)

PCI – (Placa de Circuito Impresso)

SIRA – (Sistema Rótula Atuadora)

VSPE – (*Virtual Serial Ports Emulator*)

CCS – (*Custom Computer Service*)

CAD – (*Computer-Aided Design*)

1 Introdução

Cada vez mais o controle de processos e máquinas automatizadas torna-se presente nas indústrias, residências e veículos, aumentando o uso de equipamentos automáticos à medida que cresce o conhecimento e o domínio de técnicas de controle e comando, para dispositivos atuadores.

Os atuadores são dispositivos com capacidade de produzir movimento de elemento de máquinas através de um comando e controle, e se dividem, na robótica e automação, em três tipos básicos, segundo Barrientos et al. (1997), os atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos. Os atuadores elétricos representam a maior variedade de mercado e, conseqüentemente, de aplicações. Entre os atuadores elétricos mais usuais, podem ser citados os motores CC, os motores CA, os servo-motores e os motores de passo, as eletroválvulas e os solenoides.

Este trabalho foca um tipo de atuador elétrico não convencional.

1.1 Justificativa e Motivação do Trabalho

Este trabalho consiste em apresentar um modelo de mecanismo atuador alternativo, controlado, e de caráter inovador, no sentido de aumentar o acervo de alternativas aos mecanismos atuadores existentes, utilizados na robótica e automação industrial.

A rótula atuadora com passos esféricos controlados é uma ideia concebida de uma associação de conceitos que parte de um sistema mecânico usual, que são as conhecidas juntas esféricas, somada com conceitos de atuadores elétricos, que são os motores de passo unipolares. Distribuído na casca esférica que compõe a junta, existe um grupo de bobinas devidamente localizadas em ponto, que assim como os motores de passo permitem se ter uma lógica de controle. A proposta do trabalho é obter um controle total desse movimento, tanto em velocidade como em posicionamento entre duas hastes ligadas por uma junta, partindo-se de um mecanismo usualmente passivo e dando a este, os elementos ativos com alguns recursos diferenciados dos tradicionais motores de passo, principalmente no fundamento da cinemática de grau de liberdade de movimento, pois

a rótula atuadora tem propriedade de movimento de rotação que motores de passo não possuem.

O caráter científico e tecnológico deste estudo, surge no sentido de prover soluções relacionadas a movimentos e posicionamentos relativos entre eixos, para os quais, são usados fundamentos de cinemática dos mecanismos e dinâmica das máquinas. O propósito dessa solução é definir esses movimentos de translação, determinando as características de posições, limites de movimentos, definição de grau de liberdade, fundamentos de coordenadas esféricas, sistema de controle e programação para efetuar passos controlados usando técnicas computacionais para no cálculo de rota. Esse cálculo é realizado mediante a uma geometria espacial do mecanismo definida em um modelo de equipamento.

A motivação está relacionada a uma necessidade de se diminuírem os esforços de controle de equipamentos envolvidos em um movimento, nos quais se vê a necessidade de rotação em dois eixos para um só equipamento. Nestes casos, maioria das soluções atualmente é desenvolvida com o uso de dois ou mais motores de passo, ou servo motores. A robótica, a automação industrial e residencial, bem como as soluções embarcadas, dispõe atualmente de um acervo de possibilidades, recursos, modelos e tipos de atuadores, que garantem ao desenvolvedor em automação, certos recursos relativos a movimentos controlados para definir suas soluções de projeto. Muitos são os dispositivos atuais que podem garantir um movimento controladamente preciso, como são os motores de passo, servo-motores, servo-atuadores, válvulas proporcionais, motores lineares, solenoides e eletroválvulas, entre outros. Estes podem ser, atualmente, encontrados em muitas automações e controles de várias naturezas. Os motores de passo, por exemplo, têm uma aplicação ampla em todos os campos de uso prático, seja em tecnologias industriais, como espaciais, comerciais, automotivas, ou residenciais. Eles podem ser encontrados em uma série de produtos como impressoras, válvulas, injeções automotivas, robôs, dosadores e atuador de posição, entre outros. A sua boa definição como um produto comercial e a sua simplicidade para compor equipamentos controláveis, faz deste atuador, um equipamento de constante uso dos projetistas que trabalham em novas soluções técnicas pontuais em diversos seguimentos já mencionados. Na expectativa de ampliar o acervo de possibilidades de soluções, a rótula atuadora nasce de uma ideia de somar um atuador magnético específico a um dispositivo já conhecido em mecanismos, que são as juntas esféricas também conhecidas chamadas muita vezes de pivô. É um equipamento então de simples compilação de conceitos e também de confecção acessível e com possibilidades de ser estruturalmente

robusto.

Para o sistema de controle deste equipamento, aqui é lançada uma proposta de se conceituar um tipo de recurso computacional e fazer deste uma solução em controle de alto nível de programação. A intenção de usar uma solução em alto nível é simplificar ao máximo o uso do equipamento para que projetistas de máquinas e soluções tenham aplicações prontas, sem a necessidade de usar soluções em baixo nível, para programar dispositivos microcontrolados. Normalmente, o tempo de desenvolvimento para desenvolvimento em baixo nível é exaustivo, e que requer estruturas dedicadas para testes e simulações. Então, a proposta apresentada é de se deixar uma solução pronta em programação, pela qual todos os pontos e todas as rotas de um movimento possam ser cadastradas em um ambiente, ou *software*, amigável e intuitivo. Evidentemente, deve-se respeitar alguns limites físicos da montagem de uma rótula, e o limite físico imposto por componentes eletrônicos. No entanto, neste trabalho, as soluções eletrônicas tendem a ser de natureza simples, e serão explicadas ao longo do texto. Para qualquer alteração física que possa existir na rótula atuadora, a intenção é que este trabalho dê subsídios conceituais para tais mudanças físicas.

A proposta de desenvolver um controle pronto para uso, é associar a este desenvolvimento, um microcontrolador de mercado que suporte esse nível de programação e que ofereça os recursos de interação entre o desenvolvedor e a máquina. Este microcontroladores são os Microcontroladores ARM (*Advanced RISC Machine*). Embora, neste trabalho, não se tenha usado o ARM como componente na confecção física da solução, ele é alvo da pesquisa, pelo fato de representar uma tendência na tecnologia que este trabalho propõe, no sentido de permitir embarcar soluções usando-se *software* de alto nível. Em síntese, a proposta consiste em se fazer um controle computacional, ou seja, um *software* de controle, usando recursos de banco de dados, que ao se comunicar com um circuito eletrônico microcontrolado, gere um movimento esférico e programado, com controle em malha aberta da sua posição e velocidade.

A tecnologia ARM proporciona, ao desenvolvedor, características ambíguas de aplicar conceitos de programações de computadores a um microcontrolador, que, de fato, representa o que ele é como componente eletrônico. Os ARM são microcontroladores de 32 bits que utilizam na sua CPU (*Central Processing Unit*) a arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). O ARM, como microcontrolador, suporta trabalhar em plataformas conhecidas, como por exemplo, o *Windows-CE R*, *Embedded Linux*, e *Android*,

entre outros. Isto faz dele um microcontrolador especial, que trabalha com muito poder de processamento se comparado a outros microcontroladores (SLOSS et al., 2004).

Para a rótula atuadora foi descrito um texto de patente, no intuito de proteger o modelo construtivo junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual). Fazer um trabalho com o foco de simplificar o uso do equipamento, visando sua aplicação direta, é uma condição primordial para o desenvolvimento deste trabalho, o que se entende como uma justificativa importante.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um controle usando linguagem de alto nível de programação, transparente, e que empregue tecnologia acessível, de baixo custo relativo, com conceito de *software*. Deve, além disto, utilizar recursos da computação, como ferramenta poderosa de desenvolvimento, para fazer com que esta solução tenha viabilidade prática para rótula atuadora.

Alguns objetivos específicos podem ser descritos como:

- Desenvolvimento de *software* em java, mediante a uma análise de sistema prévia e que será detalhado ao longo deste trabalho;
- Desenvolvimento e projeto de *firmware* em linguagem de programação C pra microcontroladores;
- Projeto de circuito eletrônico (*driver*) para acionar bobinas da rótula atuadora;
- Simulação de controle usando *softwares*, *hardware* e *firmware* desenvolvidos especificamente para algumas possíveis variedades de rótulas atuadoras;
- Projeto mecânico da rótula atuadora;
- Construção de um protótipo que representa a máquina elétrica com características particulares e específicas.

O conceito e a motivação da construção da rótula atuadora, só tem procedência se, e somente se, o controle existir e de forma clara para um desenvolvedor. Ser claro é de fato um objetivo final e direto deste trabalho.

1.3 Organização do trabalho

No capítulo 1 foi apresentado a justificativa, motivação e objetivos do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados alguns dos conceitos necessários à compreensão do equipamento eletromecânico e conceitos necessários à obtenção do controle computacional .

No capítulo 3 são apresentado os materiais e métodos para confecção do protótipo, para desenvolvimento do *software* e *firmware* de controle.

No capítulo 4 são apresentadas aplicações e resultados de algumas simulações e o comportamento do protótipo.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais relativas ao trabalho.

2 Fundamentações

Este capítulo apresenta a fundamentação necessária para a construção de um equipamento que tem características inovadoras, destacando também o respectivo comando eletrônico de acionamento e controle computacional. O equipamento é, de fato, um mecanismo e, como tal, pode ser representado usando-se os conceitos de cinemática e a dinâmica de mecanismos da engenharia mecânica. Neste caso, todo conceito de funcionamento, que gerou a ideia da rótula atuadora, tem como base teórica o princípio de funcionamento dos motores de passo, de onde a rótula atuadora herda características físicas e de controle, porém recursos mecânicos em liberdade de movimentos distintos. O desenho construtivo do equipamento baseia-se em uma geometria de distribuição de pontos em uma casca esférica, daí a necessidade de se abordar aqui, neste texto, os fundamentos em matemática que serão aplicados nos controles por algoritmo. Outro tópico deste capítulo mostra alguns trabalhos relacionados em que se observam modelos de atuadores esféricos com suas particularidades e suas diferenças conceituais, físicas e de controle.

2.1 Conceito Físico da Rótula Atuadora

Para se explicar e definir a rótula atuadora como mecanismo ativo, assuntos correlatos, que abordam a forma física e espacial de mecanismos, devem ser usados como base teórica para a elaboração de um modelo. Estes assuntos, abordados neste texto, representam o embasamento peculiar aos mecanismos, de forma geral.

2.1.1 Mecanismo e Estudo de Cinemática

A cinemática é a área da mecânica que se ocupa com as leis do movimento dos corpos, independentemente das causas que o provocam, levando em consideração aspectos puramente geométricos do movimento. Definir cinematicamente um mecanismo ou formular a lei do movimento de um corpo é estabelecer, para cada instante, a sua posição, velocidade e aceleração, em relação a um referencial previamente escolhido. Em dinâmica das máquinas ou mecanismos, a cinemática estuda o movimento dos corpos

submetidos à ação de forças. A cinemática se tornou, na primeira metade do século XIX, um ramo independente na mecânica, fazendo-se necessária devido às exigências da indústria, em particular à mecânica, em constante desenvolvimento. O estudo da cinemática se divide em análise cinemática (ou cinemática direta) e síntese cinemática (ou cinemática inversa). A análise cinemática representa a área que estuda a determinação das características cinemáticas de um mecanismo, enquanto a síntese cinemática consiste em se determinar a configuração que um mecanismo deve ter de modo a produzir um movimento com características previamente especificadas (NORTON, 2010).

Segundo Nicolato (2007), a cinemática inversa, é imprescindível em estudos de movimentos de robôs. Ele explica que, de modo geral, é aplicada para resolução de sistemas de equações altamente não lineares. Aplica-se aos casos em que se encontram mecanismos nos quais ao se aumentar o grau de liberdade de movimentos, aumenta também o que se chama de redundâncias cinemáticas. Estas significam que o robô tem mais possibilidades de movimentos estritamente necessários para a realização de tarefas estabelecidas. Neste caso, como o sistema é sobre-determinado, é necessário o emprego de algum tipo de técnica de otimização para se determinar uma solução “adequada” dentre as muitas possibilidades existentes.

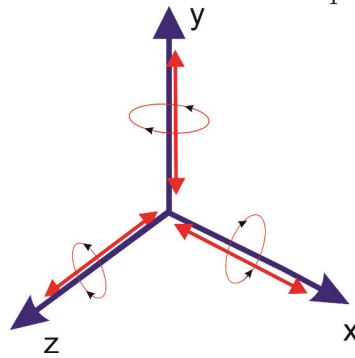
O estudo do mecanismo referente ao presente trabalho baseia-se em cinemática inversa, no seu conceito introdutório e no que tange à modelagem do posicionamento espacial das extremidades, conhecida, em cinemática, como elemento terminal. A cinemática, entretanto, contribui neste trabalho de formatação representativa dos movimentos da rótula que serão usados por um *software* controlador de movimento.

Um corpo no espaço tridimensional considerado totalmente livre tem a propriedade de exercer movimentos de rotação e translação, nos três eixos do sistema de coordenadas xyz representado na figura 2.1.

Um corpo livre no espaço possui 6(seis) Graus de Liberdade (GDL) (BARRIENTOS et al., 1997). A rótula atuadora aqui proposta, possui 3 GDL, no plano XZ, YZ e XY. No anexo I, podem ser vistas as principais articulações utilizadas em robôs.

Os principais mecanismos estudados em teoria cinemática de mecanismos, em que a rótula atuadora pode ter aplicação, são os mecanismos de 2 barras, mecanismos pistão manivela, mecanismos de 3 barras, e mecanismos de 4 barras. Todos eles contemplam elos simples, ou seja, juntas do tipo plana, que possui 2 GDL. No entanto, o

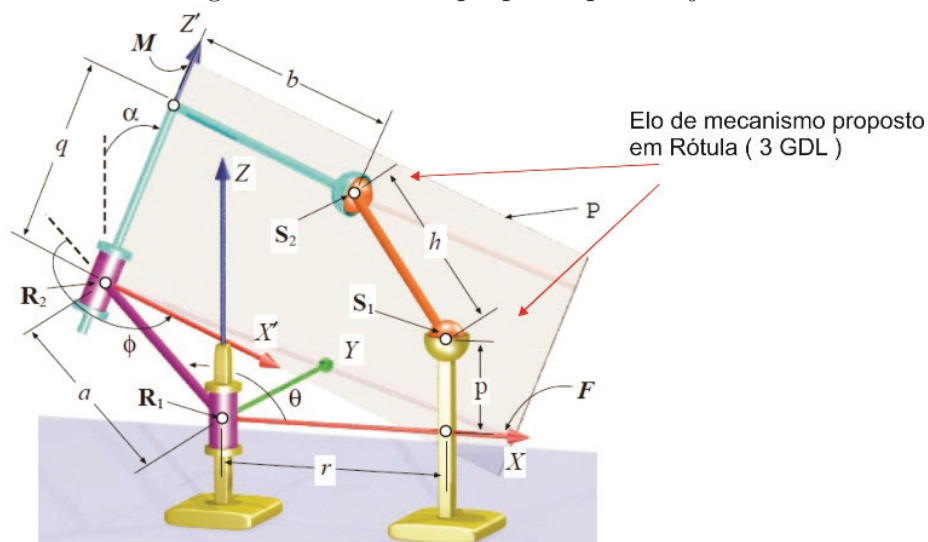
Figura 2.1: Grau de liberdade de um corpo totalmente livre



Fonte: Autoria própria.

trabalho de Su et al. (2002), sugere um mecanismo complexo onde pode ser observado em 2 elos, juntas do tipo esférica como mostra a figura 2.2. Fazer uma correlação de mecanismos que envolvem certo número de barras é determinar uma transformação de coordenada, considerando-se que cada elo pode ser a origem xyz, de um sistema S de coordenada. Após isto, todas as relações entre momentos e forças podem ser utilizadas com estas transformações.

Figura 2.2: Sistema proposto por Haijun S.



Fonte: Adaptado de Su et al. (2002).

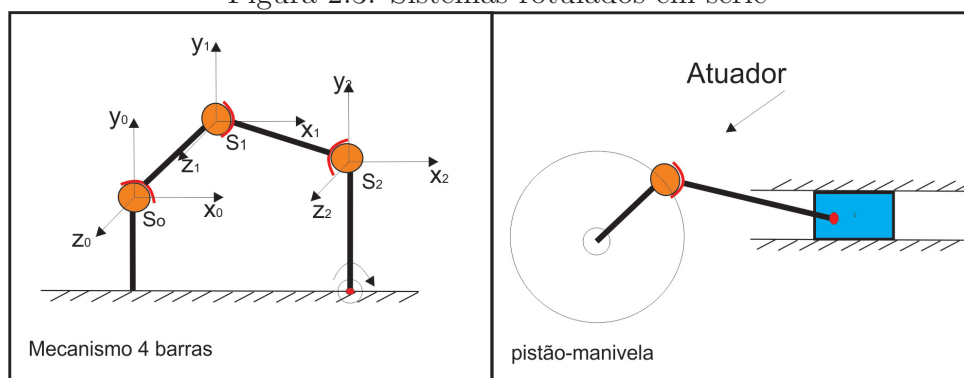
Fazer uma correlação geométrica de partes de um determinado mecanismo que envolve certo número de barras, é determinar uma transformação de coordenadas de modo que para cada elo ou junta, tem-se um sistema de coordenadas S independente, S1, S2,..., Sn, para um número n de juntas existentes. Então, no estudo de cinemática inversa,

faz-se o tratamento dos elementos terminais de determinado mecanismo que ocupa um espaço geométrico definido, dando-se suporte matemático correlacionando-se todas estas coordenadas entre si.

Ao se estudar a distribuição de sistemas de coordenadas em um mecanismo com varias barras, pode-se determinar técnicas com transformações que correlacionam estas coordenadas. São exemplo limites de movimento para que o sistema não trave, e equações de correlação de esforços, como forças e momentos fletores. No entanto, quando se trata de movimentos, e, sendo-se mais específicos, de posicionamento, aparecem, então, problemas relacionados a sistemas sobre-determinados, que são sistemas em que se têm mais incógnitas do que equações, o que, em mecanismos, quer dizer que há varias forma de se gerar um movimento de um ponto a outro.

No mecanismo proposto neste trabalho, a princípio não são feitas mudanças de coordenadas, e todos os esforços pertencentes à barra móvel partem da origem da esfera. Entretanto, a rótula atuadora, assim como os elos de um dado mecanismo, podem ter associações, como qualquer outro mecanismo clássico, que pode ser verificadas. Um exemplo, mostrado na figura 2.3, mecanismo de 4 barras e mecanismo pistão-manivela. Nesses casos qualquer relação entre forças, torques, ângulos, assim como em qualquer estudo de cinemática dos mecanismos, podem utilizar dos conceitos e tratamentos matemáticos tão estudados em dinâmica das máquinas.

Figura 2.3: Sistemas rotulados em série



Fonte: Autoria própria.

2.1.2 Aplicação de Mecanismos

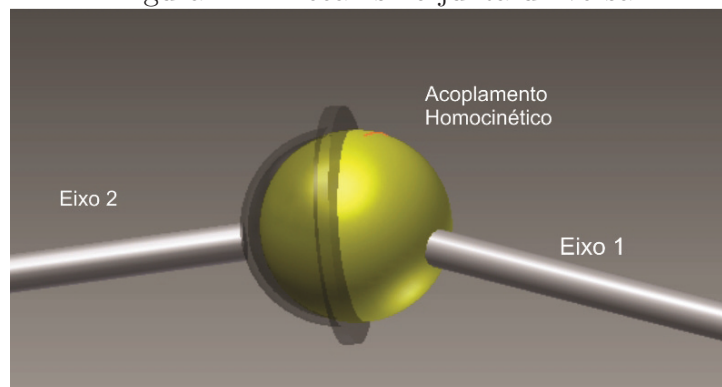
As juntas mecânicas de articulações são muito empregadas em soluções de mecanismos para gerar um determinado movimento. Na figura 2.4, pode ser visto um exemplo com um desenho esquemático de uma junta esférica, que é, de fato, um mecanismo muito importante e muito presente na indústria e popularmente empregado em automóveis, nas barras de direção, em articulação de suspensões, reboques. É encontrado também na natureza, onde pode ser observado em rótulas de joelhos e ombros. Este mecanismo pode ser empregado em qualquer situação na qual se queira fazer uma transmissão de movimento. Conceitualmente composto de um mecanismo de duas barras onde a articulação é uma rótula esférica, em que o eixo 1(barra 1) de entrada, possui um determinado grau de liberdade. É importante perceber que esse mecanismo tem o propósito de possibilitar fisicamente transmissão de movimentos de translação retilíneo e circular simultaneamente, sem que haja travamento do sistema mecânico. Entre estas barras, então, qualquer esforço axial ou radial que se aplique em uma delas, terá uma consequência, em termos de movimentos, na outra barra.

Usando o exemplo de uma barra de direção, seria impossível transmitir o movimento com um único eixo sem esta propriedade de articulação. Este mecanismo é usado em soluções abrangentes na indústria mecânica de transformação, assim como em máquinas e equipamento leves ou pesados. A junta esférica é um sistema de construção mecânica simples, de baixo custo, e possui especificações técnicas quanto ao tipo de aplicação, características de folga e ajuste, condições de lubrificação, proteção ou não por blindagem, condições de esforços, amplitude de movimento, dimensões, e material usado, entre outras especificações.

Todos os aspectos de torque, esforços axiais, comprimento das barras, relações de ângulos em função do tempo de execução de movimento, e a própria geometria espacial dos mecanismos são relevantes para execução de uma transmissão de movimento entre barras. Na figura 2.5, é apresentado um exemplo onde uma peça que representa um terminal de barra de direção de um automóvel, que usa, de fato, uma junta esférica e possibilita ligar uma barra de direção que sai de uma caixa, chamada de caixa de direção, a uma outra barra que se localiza na roda do veículo.

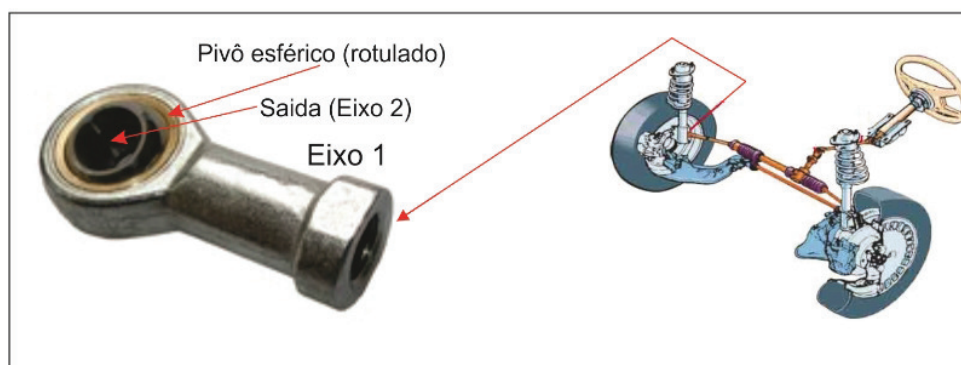
O presente trabalho incorpora o elemento ativo, que são as bobinas, ao conceito deste tipo particular de mecanismo que são as juntas universais. Como equipamento

Figura 2.4: Mecanismo junta universal



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.5: Exemplo de aplicação de juntas universais



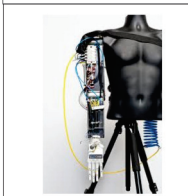
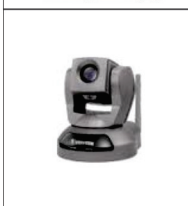
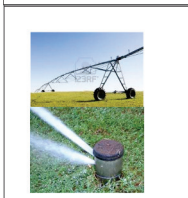
Fonte: Autoria própria.

funcional, a rótula atuadora poderia, então, participar de soluções de uso imediato. Aqui se propõem algumas aplicações, em caráter apenas sugestivo, que têm o intuito de despertar a imaginação de quem trabalha com projetos em controle de movimento. Estas são soluções de aplicação de novos equipamentos, e de inovações na esfera industrial, de robótica, na medicina, em residências, em automóveis, e na agricultura, entre outras.

A figura 2.6 mostra uma tabela ilustrativa com algumas possíveis aplicações nas quais a rótula atuadora poderia substituir, com boa eficiência, partes dos equipamentos empregados, oferecendo recursos extras, e contrapondo aos sistemas mecânicos com soluções convencionais, visando a aplicação imediata de movimento e o número dos graus de liberdade destes.

Mesmo sabendo que qualquer projeto não contempla apenas as formas construtivas, mas contempla também durabilidade, capacidade, esforços, dimensões, limites

Figura 2.6: Potencial em aplicação da rótula atuadora

	A rótula atuadora pode ser usada em sistemas mecânicos alternativos que compõe os conhecidos braços mecânicos industriais, posicionadores, máquinas inserção de chips, máquinas de corte, furadeiras com comando CNC, com várias vantagens a serem considerada, principalmente no fato de ter mais grau de liberdade relativo a cinemática do mecanismo diminuindo significativamente a complexidade dos equipamentos e ofertando recursos extras de
	A rótula atuadora tem como o principal semelhança construtiva, o ombro humano, se olhar o grau de liberdade dos movimentos e no aspecto de atuação, ou seja, posicionamento provocado por comando. Logo uma grande possível aplicação seria o uso em próteses e nas aplicações gerais bioengenharia. As aplicações podem se estender todas as articulações que são os dedos, pulsos, braço, joelhos e tornozelos, para um robô de características humanoides.
	Uma aplicação bem usual seria o controle de <i>pan/tilt</i>, de câmeras. Esses mecanismos atuam também por controle dando os mesmos recursos de movimentos horizontais e verticais, onde atualmente é realizado por dois motores de passo ou servo ou servomotores. Neste caso o sistema se movimentaria com mais semelhança a um olho humano.
	Sistema de irrigação com controle total, com melhor aproveitamento de água, já que a varredura da área irrigada por esguicho d'água pode ser determinado por um controle de ângulos e pressões nas saídas, simulando operador de mangueiras irrigando uma área de plantio, aproveitando o mesmo conceito pode ser feito um mecanismo auxiliar a combate ao incêndio. Para dimensões maiores podem ser usados em substituição aos complexos sistemas de pivô-central.

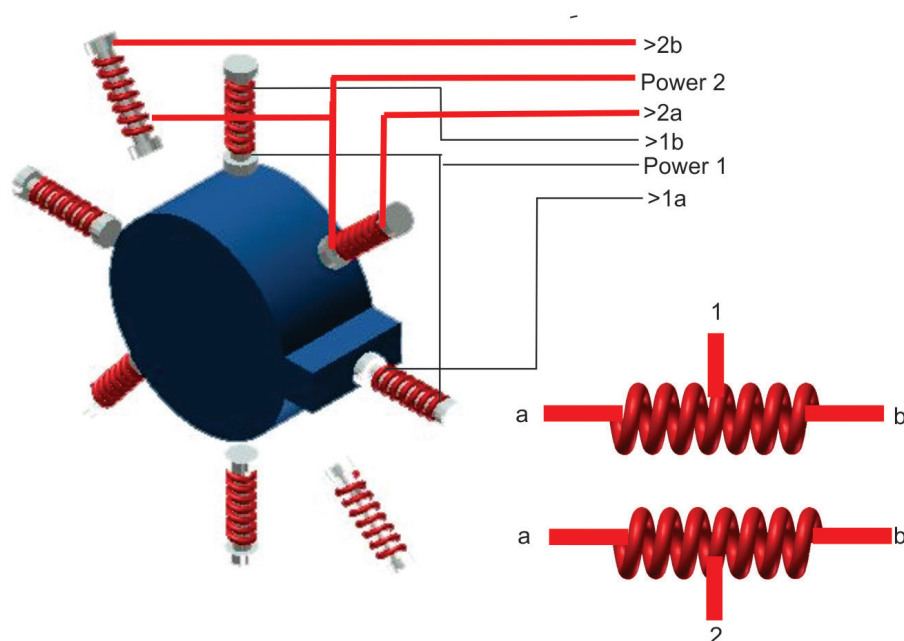
Fonte: Autoria própria.

de várias naturezas e potências, então o trabalho se restringe elaborar modelos de solução para controle desse sistema, e torna-las factíveis em soluções práticas focando no controle de um equipamento fisicamente viável.

2.1.3 Fundamentos de Motores de Passo

Os motores de passo são muito utilizados no campo da robótica e automação. Estes motores contribuem para ofertar um movimento preciso, e sua utilização vem crescendo à medida que se expande o conhecimento nestas áreas. Neste trabalho serão tratados, o motor de passo que está representado na 2.7, o qual se refere a um tipo chamado de unipolar, muito usual e que pode descrever bem o movimento rotativo em um plano xy. Neste caso em particular, é adotado um motor elementar de passo com 8 posições angulares, ou seja, passos com 45 graus. Segundo Neto (2008), motor de passo é definido como sendo um transdutor de energia elétrica em energia mecânica, em que o controle é executado por meio de pulsos de tensão aplicada em suas bobinas. Uma sequência de pulsos pode garantir um deslocamento angular de forma controlada e sequenciada.

Figura 2.7: Motor de passo elementar



Fonte: Autoria própria.

Na figura 2.7, foram representados apenas as 4 pares de bobinas responsáveis pelo movimento de um rotor central, com um ressalto em forma de dente de engrenagem que é, exatamente, o elemento atuador. Esse sistema ilustrativo de motor de passos tem uma representação simbólica, já que a 5ª bobina é ligada em paralelo com a 1ª, a 6ª com a 2ª e assim sucessivamente, pois da forma que está apresentado, exibe melhor um motor de passo real unipolar, onde no mercado, possui de fato muito mais elementos atuadores e posições que este representado. O deslocamento angular de um rotor de motor de passo só é possível mediante um controle de chaveamento das bobinas realizado por um controle programado, ou eletrônico, que pode ser efetuado usando-se componentes de eletrônica digital. Pode também ser feito por algoritmo, que determina o sentido de rotação, paradas, atrasos entre passos e todas as condições de movimento do rotor. A matriz de estado de ligação das bobinas (MEB), define a sequência de ligação para representar o movimento sequenciado e pode ser dado por:

$$\begin{bmatrix} passo1 \\ passo2 \\ passo3 \\ passo4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1a & 0 & 0 & 0 & 1a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2a & 0 & 0 & 0 & 2a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1b & 0 & 0 & 0 & 1b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2b & 0 & 0 & 0 & 2b \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Uma observação importante é que esta matriz representa apenas o motor proposto na figura 2.7. Esta abordagem sobre motores de passo difere, um pouco, das outras porque, geralmente, se usa como motor elementar de passo apenas quatro bobinas e passos de 90°.

Esta matriz tem como linha as posições para um motor que foi concebido por oito posições, que representam a ordem de ligação das bobinas. Se for feita a sequência, variando a posição, aumentando a coluna da matriz, pode ser observado, então, que o 5ª passo representa na verdade a mesma ligação do passo 1 deslocado de 4 passos anteriores e a posição do eixo rotor do motor já deslocou 180°, essa lógica segue para todo o movimento do motor e principalmente, para quantos passos esse motor venha a ter, para que complete um giro completo.

Desta forma, e para qualquer que seja o número de passos, já que as bobinas têm associações em paralelo por volta de um motor, a matriz pode escrita com:

$$\begin{bmatrix} passo1 \\ passo2 \\ passo3 \\ passo4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2b \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Onde a posição é, agora, o controle variando de 4 em 4 passos. Como as ligações são combinadas em grupos de quatro bobinas ligadas em paralelo, o controle torna-se bem simples.

Os motores de passo possuem uma interdependência entre sua posição e a sequência de chaveamento dos grupos de bobinas, ou seja, para garantir qualquer posição do rotor, é preciso um controle programado, que monte uma sequência de passos de modo a garantir esta lógica, e que armazene, em memória, a sua posição. Observando-se as

matrizes de exemplo, só é possível sair da posição 1 para a posição 7, se todas as outras posições forem ocupadas em uma sequência lógica, e desligando-se a bobina no ponto em que se encontra e ligando-se a bobina no ponto subsequente. Esse simples conceito faz desse tipo de motor um atuador especial de fácil controle e conseqüentemente de muita aplicabilidade.

2.1.4 Atuadores Esféricos

Nas últimas décadas, os atuadores esféricos têm sido um tema de pesquisa cada vez mais popular em todo o mundo. Devido as vantagens de possuírem tamanhos compactos, serem de alta precisão de movimento e de resposta rápida, por serem de simples conceito mecânico e de alta eficiência, têm grandes aplicações nas áreas de robótica, fabricação de automóveis e aplicações médicas. Os conceitos e princípios fundamentais dos diversos atuadores esféricos são apresentados, abordando-se estudo sobre a modelagem, desenho de projeto, investigação experimental e orientação de sensoriamento quando usadas tecnologias de ímã permanente para atuadores esféricos (YAN, 2011).

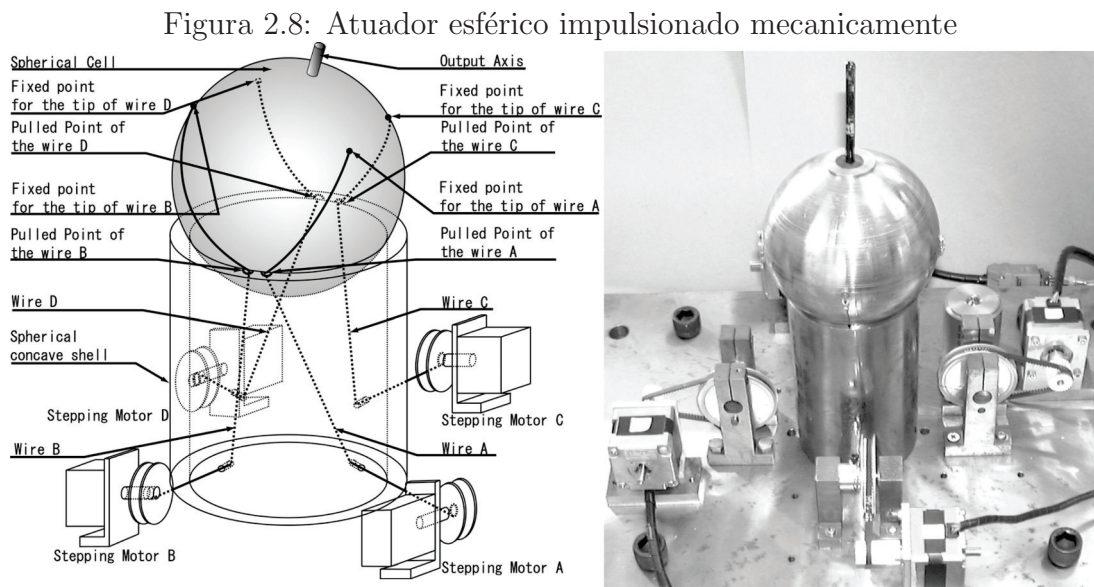
A alta precisão de movimentos esféricos em um sistema convencional mecânico, consiste de vários motores com seu eixo único e um grande número de conexão de mecanismos tais como articulações e engrenagens que aumentam a relação do sistema mecânico. Como resultado, a precisão de movimento como efeito final é, significativamente, reduzida. Para atuadores esféricos, no entanto, existe apenas um estator e um rotor, e não existem peças de ligação complexas, sendo, portanto, sua precisão de movimento muito maior do que a dos mecanismos de movimento convencionais. O tamanho compacto do atuador esférico supera a desvantagem da estrutura volumosa no movimento de mecanismos convencionais. Ele tem um tamanho compacto, bem como alta densidade de energia, e, com isto, ajuda os projetistas (*designers*) a minimizarem o tamanho de manipuladores ou robôs, para alcançar movimentos em pequeno espaço de trabalhos ágeis. Devido à estrutura compacta do atuador esférico, o momento de inércia do rotor é muito baixo, e não há nenhum momento de inércia adicional produzido por outros elementos de ligações de mecanismos quando em movimento. Portanto, os atuadores esféricos podem conseguir uma resposta rápida com alta eficiência de trabalho. Não há pontos de singularidade no espaço de trabalho dos atuadores esféricos, ou seja, para qualquer orientação de rotor no espaço de trabalho, pode encontrar pelo menos um conjunto de livres caminhos para

mover o rotor para qualquer que seja a orientação (YAN, 2011).

Também segundo Yan (2011), os atuadores esféricos têm uma possível aplicação, na indústria automobilística, como rodas. Hoje em dia, a engrenagem diferencial é utilizada em automóveis para transmitir o movimento do motor para as rodas. Isto é feito com um sistema de acionamento muito grande, pesado e complexo, e aumenta a perda de energia durante a transmissão. As rodas do automóvel poderiam usar um sistema esférico e gerar movimentos rotacionais em três graus de liberdade, o que garantiria um grande poder de manobra do veículo.

Atualmente, existem três diferentes tipos de técnicas propostas para o sinal de atuadores esféricos com multi-DOF (multi-DOF, do inglês *Multiple degree-of-freedom*) : os meios mecânicos, a piezoelectricidade e as forças eletromagnéticas.

Um atuador esférico impulsionado mecanicamente por fios é apresentado, por Nagasawa et al. (2000), tal como ilustrado na figura 2.8, em que o rotor (célula esférica) é colocado dentro da concha côncava e pode mover-se como um rolamento de deslizamento esférico. Quatro fios são ligados entre os motores de um único eixo de rotor, e quatro de modo que a orientação do rotor possa ser movida para uma posição desejada por meio de tração ou alívio dos fios.

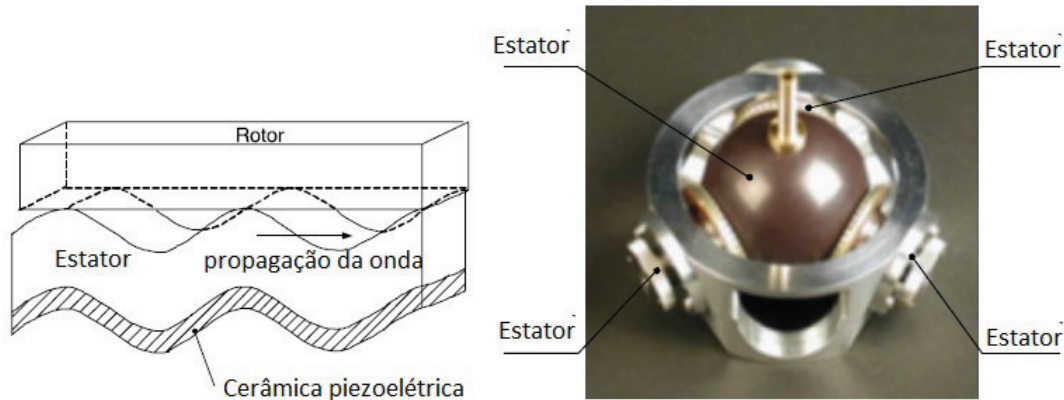


Fonte:(NAGASAWA et al., 2000).

O princípio de funcionamento dos motores de ultra-sons é baseado no efeito piezoelétrico, ou seja, se uma tensão elétrica é aplicada em a um material cerâmico à

base de óxido de chumbo, zinco e titânio, o (PZT) (*Lead Zirconate Titanate*), as suas dimensões são alteradas. Um exemplo típico é ilustrado na figura 2.9, que mostra uma camada de PZT e o elemento está ligado à parte de trás do estator. Este elemento pode produzir expansão ou contração no material que, por sua vez, produz movimento na esfera (AOYAGI et al., 2002).

Figura 2.9: Motor esférico ultrasônico com três estatores.



Fonte:(AOYAGI et al., 2002).

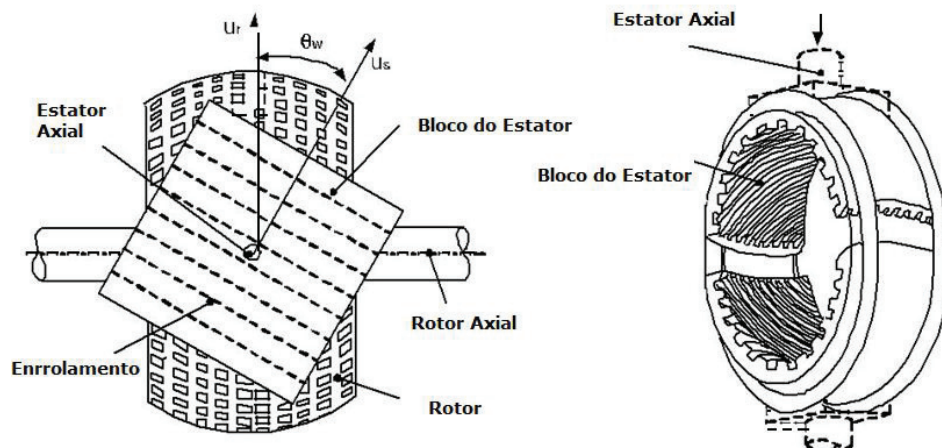
O terceiro tipo de atuadores esféricos é o dos que utilizam os princípios eletromagnéticos, que também são o princípio usado pela proposta deste trabalho. Em Williams et al. (1959) foi criado o primeiro motor de indução esférico. Como mostrado na figura 2.10, o rotor é feito de material ferromagnético com uma superfície esférica em forma de barril. Uma malha de cobre está embutida na superfície do rotor, para permitir que a indução de corrente viaje nas direções longitudinal e latitudinal.

2.1.5 Trabalhos Relacionados

O atuador proposto neste trabalho é um atuador esférico eletromagnético. Há, atualmente, alguns atuadores esféricos que mostram certa semelhança com o aqui proposto, no entanto diferem, substancialmente, em aplicações, propriedades construtivas e controle. Os principais modelos estão esboçados na figura 2.11.

O motor (a) de Wu et al. (2008), refere-se ao trabalho que apresenta um modelo com 24 bobinas em duas camadas, e um ímã permanente na esfera rotulada. Todas as bobinas são ligadas individualmente. Neste modelo, as bobinas atuam diretamente em uma esfera com ímãs permanentes em pontos da esfera móvel, que no caso é o rotor.

Figura 2.10: Motor esférico eletromagnético



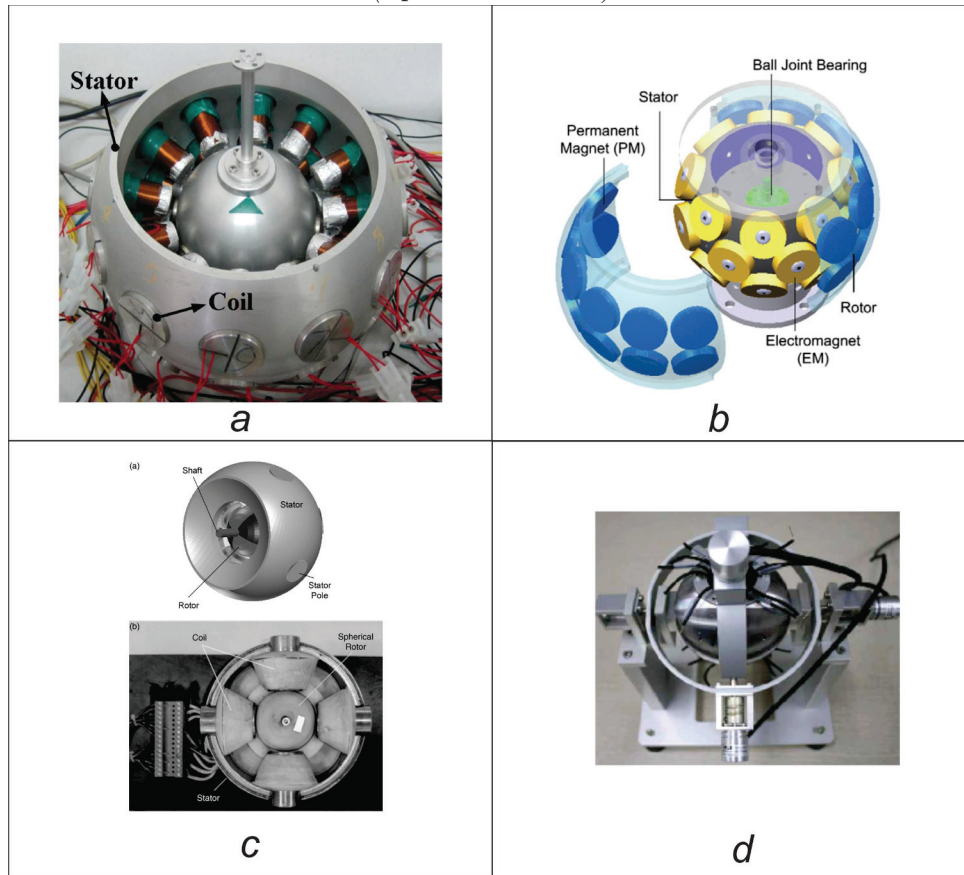
Fonte: (WILLIAMS et al., 1959).

O motor (b) de Bai et al. (2012) é um motor teórico para modelagem em simulação de movimentos em tempo real, como os motores já conhecidos, baseado em articulação esférica. Sua atuação se assemelha à atuação dos motores de passo, com relação ao fato de possuir um grupo de quatro bobinas e ao fato de ter as mesmas condições de chaveamento. O trabalho também realiza um controle de torque bem definido em modelos computacionais para tratamento de campo magnético relacionado ao torque. Estes dois tipos, (a) e (b), são os atuadores mais populares entre os trabalhos científicos encontrados.

O modelo (c) visto em Öner (2007), refere-se a um motor de quatro polos com quatro segmentos de esferas no rotor, e 3 graus de liberdade, que tem limites de movimento útil bem como a precisão de posicionamento. É verificado um modelo complexo no que se refere a aspectos construtivos e, principalmente, a controle, pois o rotor esférico é uma montagem de quatro segmentos de esferas com polos N e S intercalados. Com esta configuração, o movimento controlado é feito por uma modulação precisa da energização das bobinas, resultando em uma força eletromagnética.

O modelo (d) apresentado Park et al. (2012), tem concepções diferenciadas nas possibilidades de aplicação, sendo todo o movimento totalmente controlado, e usando controle de movimento independente. O autor trabalha com a modelagem em 3 GDL, exigindo o comando uma complexidade no conceito do posicionamento em passos. Ele utiliza 2 motores de passo para atender em posições a região dos dois diedros de possibilidades de pontos.

Figura 2.11: Motores Esféricos
(*Spherical Motor*).



Fonte: Autoria própria.

Como alternativa a todos estes sistemas, a rótula atuadora retrata neste trabalho uma concepção diferente no tratamento, tanto no aspecto construtivo do motor esférico como na proposta de controle. No aspecto construtivo, a rótula atuadora visa ofertar uma aplicação imediata, com uma abordagem de equipamento como um dispositivo atuador de controle computacional próprio. O elemento da rótula atuadora, que se representa como um motor esférico, tem como principal diferença do modelo (a) o posicionamento das bobinas, cujo arranjo se faz na parte externa. Com isto ganha-se, para uma mesma dimensão de rótula, uma maior precisão, aumentando-se, significativamente, o numero de polos e, principalmente, uma maior simplicidade de confecção. Ressalte-se que a robustez mecânica não está relacionada ao arranjo das bobinas, isto é, as bobinas estão distanciadas pela casca esférica. Tal arranjo oferece mais segurança e resistência, pois os esforços mecânicos são apenas os da ação direta do material de preenchimento da junta esférica. Esta robustez já está dimensionada na mecânica e faz parte da sua

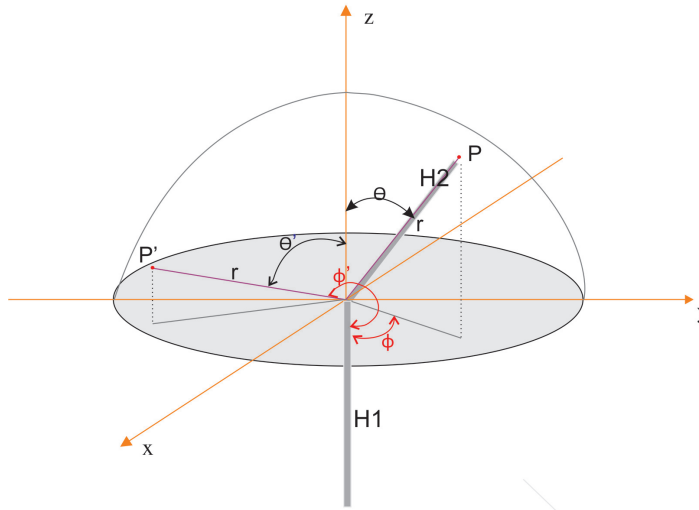
especificação técnica como mecanismo passivo.

Os detalhes construtivos serão vistos nos capítulos seguintes.

2.1.6 Geometria e Arranjo de Pontos da Rótula

Em coordenadas esféricas, pode-se definir bem o endereço da posição de todos os pontos magnéticos (MP) na casca esférica do equipamento, que por sua vez representa a direção da barra comandada H2. Isto reduz bem a complexidade matemática, mesmo porque, como o raio de curvatura da semiesfera da rótula é de comprimento fixo por ser uma constante do mecanismo, sua grande missão é, então, deixar as coordenadas de pontos possíveis do sistema em função de dois ângulos como representado na figura 2.12. No plano cartesiano, representamos o sistema de coordenadas esféricas, da seguinte forma:

Figura 2.12: Plano de coordenadas esféricas



Fonte: Autoria própria.

A relação de transformada de coordenadas cartesianas em coordenadas esférica é dada por:

$$x = r \sin \phi \cos \theta \quad (2.3)$$

$$y = r \sin \phi \sin \theta \quad (2.4)$$

$$z = r \cos \phi \quad (2.5)$$

E temos a posição inicial do controle como sendo:

$$MP(i) = (\phi i, \theta i) \quad (2.6)$$

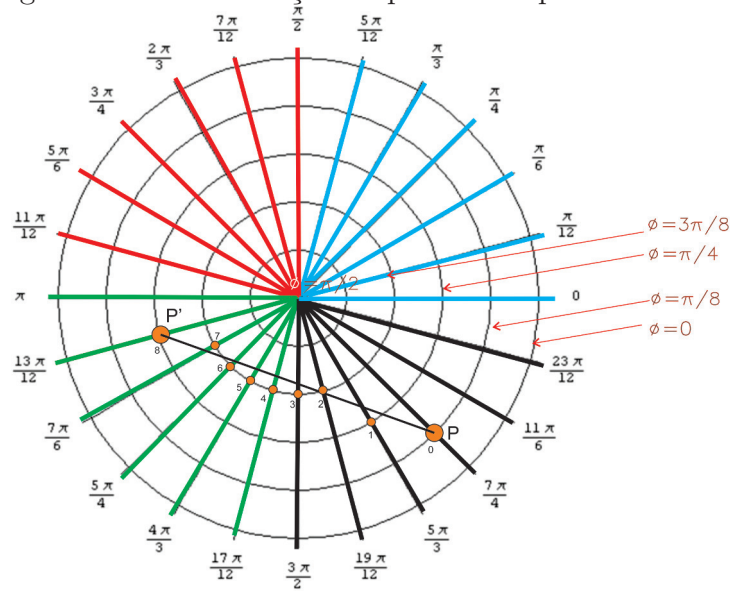
A rigor existe uma transformação de coordenadas esféricas em pontos com definições específicas para o controle. O controle proposto será puramente computacional, tendo como principal objetivo um algoritmo capaz de comparar valores para otimizar rotas. As coordenadas esféricas, além de identificarem os pontos, servirão para o cálculo de melhor rota. De início, não serão discutidas, neste trabalho, as técnicas computacionais, mas o intuito das coordenadas esféricas é fornecer equações para tratamento em *software*, para cálculo de distâncias entre pontos da casca esférica já que existe um grande número de possibilidade para posicionamento de H2 (eixo 2) em relação a H1 (eixo 1), a primeira coisa a ser feita é o cálculo matemático da menor distância entre o seguimento na curva da casca esférica. Para que isso aconteça é necessário determinar as posições de cada ponto magnetizável da casca esférica. Observando a figura 2.12 o ponto fixo que fica na esfera de H1 é a origem do sistema de coordenadas, deixando as condições de H2 para uma posição inicial em coordenadas esféricas (0,0).

Uma técnica para representar pontos em um plano vem do estudo de geometria descritiva em que se faz a representação de pontos situados em diedros rebatendo-se em planos (JUNIOR, 1983). No caso deste trabalho os pontos que nos interessam são apenas os rebatimentos no plano XY que, no exemplo, é a vista superior dos pontos da casca esférica.

Na figura 2.13, usando-se uma vista superior da casca esférica, a qual pode ser vista como um plano, em que se visualizam todos os pontos da sua curva, pode-se definir bem um conjunto limitado de pontos, e escreve-lo em forma de matriz de estado de ligação, assim como foi feito para os motores de passo. Esta matriz poderia ser usada também para descrever a relação de vizinhança, de modo que o esforço computacional dispensaria todo o tratamento em geometria analítica para cálculo de distância. Não faz parte deste trabalho fazer uma comparação entre os métodos analíticos e computacionais, porém ele se propõe a modelar e deixar claro como pesquisar. Para isto, será feito, um modelo de casca esférica com um número razoável de pontos para a construção de uma matriz de pontos.

Construindo-se uma matriz de pontos, para fazer ligações independentes, tem-se uma $MP(n \times m) = \text{Matriz } (11 \times 23)$. Por simplificação de controle, e assim como os

Figura 2.13: Distribuição de pontos em plano rebatido



Fonte: Autoria própria.

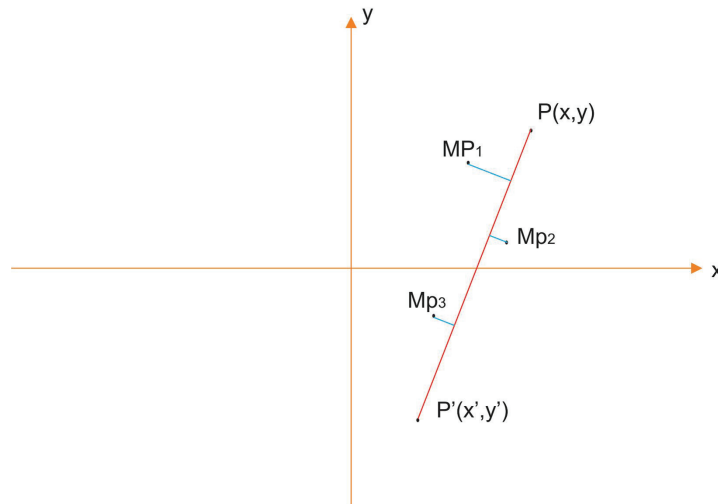
motores de passo, este sistema trabalhará com chaveamento de conjuntos de bobinas, para simplificar a quantidade de canais de um controlador. Isto é permitido já que os pontos magnetizáveis importantes para uma sequência de movimentos para um ponto estarão sempre próximos da sua posição. No caso da semiesfera, representada no plano na figura 2.13, ela tem como os círculos concêntricos, os ângulos da coordenada representados por θ totalizando 5 ângulos determinado a linha da matriz de controle para essa distribuição de pontos. Os ângulos são: $\theta = 0$, $\theta = \frac{\pi}{8}$, $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\theta = \frac{3\pi}{8}$ e $\theta = \frac{\pi}{2}$. Cada linha representa para um controle uma chave de comando. As outras coordenadas representadas por ϕ totalizam para o controle 12 pontos e também representam uma chave de controle. A condição de estado de ligação de uma bobina ou grupo de bobinas é representada pelas condições de lógica do tipo AND, em que o estado de ligado da bobina se dá em condições onde se tem o chaveamento nos dois polos das bobinas. Nesse ponto o estado de ligação é diferente dos motores de passo.

As condições de vizinhança entre pontos terão um peso quantitativo, ou seja, valores numéricos darão uma identidade de posição de um ponto com relação a outro. Estes valores deverão ser, simplesmente, a distância entre pontos que são gerados a partir de armazenamento de memória em um processamento prévio o qual pode ser entendido como um mapeamento dos pontos em um algoritmo.

Outra forma de simplificar a prática desse controle é tratar apenas as regiões

que pertence ao plano de coordenadas xy , e voltando a ter um sistema de coordenadas cartesianas para os pontos, o algoritmo de controle terá que achar a menor distância partir dos pontos P e P' , que seriam respectivamente origem e destino de uma trajetória. Considerando então o plano representado na figura 2.14.

Figura 2.14: Distância entre pontos e reta



Fonte: Autoria própria.

Tomados dois pontos aleatórios no plano, pretende-se traçar uma reta entre eles, e assim, conseguir montar a equação a partir dos pontos tomados, desenvolvendo a equação (2.7), conhecida como Equação da Reta:

$$y = ax + b \quad (2.7)$$

Onde:

a representa o coeficiente angular - (É o ângulo de inclinação que a reta faz com o eixo X . Também é conhecido por m).

b representa o coeficiente linear.

Calculando a , tem-se:

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.8)$$

ou

$$a = \frac{y - y'}{x - x'} \quad (2.9)$$

De posse da equação da reta, o objetivo do programa é calcular a distâncias entre os pontos $MP(xp, yp)$ a essa reta :

$$d = \frac{|axp + byp + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2.10)$$

Para o controle computacional, esse valor d será comparado para a tomada de decisão em algoritmo, escolhendo a melhor rota que liga o ponto P de origem ao ponto P' de destino, passando por todos os pontos MP que sejam necessários.

Visando o algoritmo de controle e analisando o custo benefício entre se construir um programa capaz de realizar decisões de escolha então outra solução que ainda pode ser testada que é simplesmente realizar o cálculo de distâncias entre os pontos vizinhos do ponto origem e o ponto destino, fazer uma comparação e escolher aquele ponto que represente a menor distância, isto faria desse ponto vizinho um novo ponto de origem o que torna simples modelar um algoritmo.

O cálculo de distância entre pontos é dado por:

$$d = \sqrt{(xp' - xp)^2 + (yp' - yp)^2} \quad (2.11)$$

Definir uma matriz de movimento com todos os pontos, será então o ponto de partida para o controle computacional. Cada ponto terá uma identidade em um cadastro e um conjunto de características de vizinhança e característica de coordenadas. O desafio está no desenvolvimento de um *software* que terá que contemplar essas questões e terá que fazer de forma transparente ao usuário.

2.2 Fundamentação Relativa ao Controle

O controle de sequenciamento para gerar um movimento ordenado para a rótula atuadora é o principal objetivo deste trabalho, e será feito através de um algoritmo, que terá de montar a melhor rota de comutação de pontos magnetizáveis, para executar a tarefa que é sair de um ponto e ir para outro.

No trabalho de Chirikjian e Stein (1999), no qual também apresenta um outro motor de passos esféricos, o autor faz uma observação para um modelo computacional

que permite verificar a comutação do motor para diferentes montagens do rotor e estator e os eixos de rotação.

O algoritmo descrito neste trabalho é computacional, mas foi necessário formatar um modelo. No modelo sugerido nesse trabalho, a intenção de movimento é no mesmo sentido de que não se faz uma solução para uma configuração apenas de arranjo de pontos MP, mas sim considerando qualquer que seja a configuração de distribuição de pontos na casca esférica. O algoritmo de controle poderá atender e gerar os movimentos, desde que sejam informadas todas as coordenadas de todos os pontos existentes.

2.2.1 Controle Computacional

O controle proposto nesse trabalho é puramente computacional, então aqui serão mostradas as soluções computacionais para controle de movimento.

Visando a aplicação em *software* embarcado para o futuro, este trabalho focou a construção de uma solução em linguagem JAVA. A linguagem de programação JAVA foi criada, em 1995, por uma equipe de pesquisadores da Sun Microsystems. Java (Jawa) é a segunda maior e a principal ilha da Indonésia. Java é considerada uma linguagem moderna de muitos recursos e 100 % orientada a objeto. O objetivo da Sun era criar uma linguagem usual para várias plataformas e que tivesse boa parte dos recursos da linguagem C e não oferecesse os inconvenientes das linguagens de programação usuais. A característica de multiplataforma da linguagem Java indica que um programa desenvolvido nela pode ser executado em plataformas de hardware e sistemas operacionais diferentes (Linux ou Windows), e que para isso são criados o que se chama conceito de máquina virtual, também conhecida como (JVM) - *Java Virtual Machine* (JAVA, 2006). A máquina virtual pode ser entendida como uma camada que se localiza entre o sistema operacional e o programa, responsável por traduzir o que o programa deseja fazer para a linguagem do sistema operacional no qual ela está executando no momento. A internet ajudou a tornar o Java a se tornar uma linguagem de programação conhecida, que por sua vez, teve um efeito profundo sobre a própria internet. Além de simplificar a programação web em geral, o Java inovou um novo tipo de programa de rede chamado *applet* que mudou a forma do mundo on-line pensar sobre o conteúdo, por ser um aplicativo que atua em ambiente *web browse*. Java também abordou alguns dos temas mais específicos associados à Internet que são a portabilidade e segurança. (SCHILDT; COWARD, 2011).

Uma vantagem de se usar uma linguagem deste porte, para fazer controle de máquinas, é a de que todas as soluções se encontram, de certa forma, prontas para serem usadas. Este é o caso do acesso e manutenção de banco de dados que, para este trabalho, será usado como estratégia de solução algorítmica, ou seja, os recursos de banco de dados serão ferramentas de uso para elaboração do roteiro de chaveamento sequenciado da rótula atuadora. Tal recurso dá um tom de praticidade ao sistema proposto para movimento de equipamento.

Usar banco de dados MySQL (*Structured Query Language*) representa uma vantagem por se tratar de uma solução gratuita com boa documentação e acessível a qualquer desenvolvedor. MySQL é uma versão derivada da estrutura SQL desenvolvida nos laboratórios da IBM (*International Business Machines*) Corporation nos anos 70, muito difundida e quer dizer *Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada. Hoje se transformou em um padrão de linguagem de banco de dados (DATE, 2004).

Banco de dados é uma ferramenta computacional que armazena dados de forma relacional, além é claro de não volátil e com isso o processamento é feito uma vez e armazenado o resultado, evitando novos processamentos desnecessários.

A seguir são listadas algumas vantagens do MySQL (NIEDERAUER, 2005):

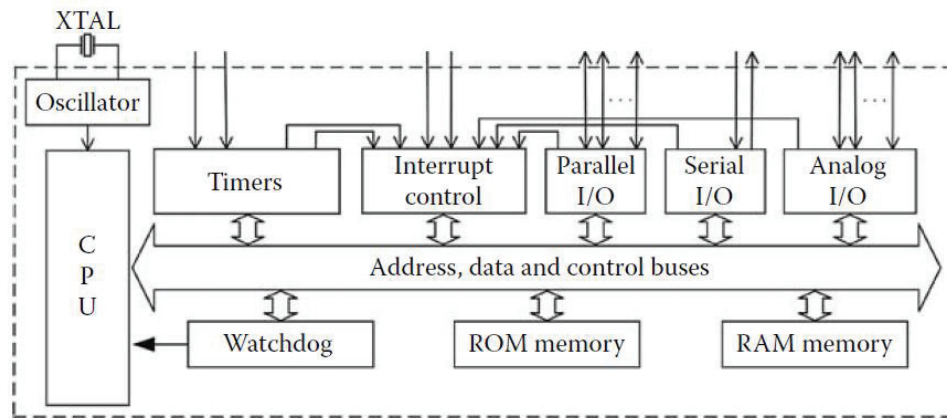
- Número ilimitado de utilização por usuários simultâneos;
- Capacidade de manipulação de tabelas com mais de 50.000.000 registros;
- Alta velocidade de execução de comandos;
- Fácil e eficiente controle de privilégios de usuários.

2.2.2 Controle Eletrônico

Neste trabalho, foi projetado um circuito interpretador de comando produzido pelo resultado do processamento. O coração deste circuito são os microcontroladores PIC (*Programmable Interrupt Controller*). A arquitetura desse microcontrolador é a RISC (*Reporters Instructed in Saving Colleagues*) que tem como característica um número relativamente reduzido de instruções: entre 33 e 77. Todas as instruções de um PIC família têm o mesmo tamanho: 12, 14 ou 16 bits (VALDES-PEREZ; PALLAS-ARENY, 2009).

A figura 2.15 mostra o diagrama de blocos de um microcontrolador PIC, que é, de fato, o componente eletrônico principal do circuito de comando.

Figura 2.15: Arquitetura de um Microcontrolador



Fonte: (VALDES-PEREZ; PALLAS-ARENY, 2009).

Na figura 2.15 a porta serial é por onde se faz uma comunicação do tipo chamado USART , (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), é um tipo de periférico que pode operar de dois modos distintos de funcionamento: o síncrono e o assíncrono. No modo assíncrono, o mais usual, a principal característica é que a comunicação é feita com duas vias de dados, sem que para isto exista um clock de sincronismo. Estas duas vias são utilizadas para transmissão (TX) e recepção (RX), possibilitando que os dados sejam enviados e recebidos ao mesmo tempo (FÁBIO, 2003). Um exemplo deste modo é a porta serial dos computadores, para implementar a interface padrão RS-232.

2.2.3 Trabalhos Relacionados

No trabalho de Barros et al. (2002), o objetivo do projeto é a programação de um robô para fazer a vigilância eletrônica em um mapa definido por um banco de dados. O robô deve seguir uma rota quase-ótima (em termos de distância percorrida), fazendo um ciclo pelo mapa e passando por diversos pontos de interesse. Este projeto trata da escolha de uma solução para o seguinte problema: se temos os pontos do mapa selecionados pelo operador, qual é a menor rota possível que este robô precisa percorrer, de forma que passe por todos os pontos e volte ao ponto de origem.

Na literatura o problema conhecido como, “problema do caixeiro viajante” não se restringe apenas à robótica, mas ocorre para qualquer atividade que envolva a escolha de

uma ordem de pontos para alcançar, em um determinado período de tempo, um objetivo. O algoritmo desenvolvido neste trabalho deverá retornar a um caminho de custo mínimo e tempo viável de processamento. Além disso, é função do algoritmo obter seus dados de uma fonte de armazenamento não volátil, sendo neste caso escolhido um banco de dados contido em um servidor MySQL.

2.3 Considerações Finais

Objetivando um controle computacional e eletrônico para o atuador proposto, e partindo de um projeto com definição da cinemática do mecanismo, foram apresentados, neste capítulo, alguns trabalhos e alguns conceitos necessários para compor o *software* de controle, bem como um circuito eletrônico que atuará como comando de movimento do mecanismo.

Foram também apresentadas aqui todas as técnicas, conhecimentos, exemplos e trabalhos que, no decorrer do texto, serão úteis na compilação da ideia de controle da rótula atuadora.

3 Materiais e Métodos

Serão apresentadas nesse capítulo características do controle computacional e características da rótula atuadora como projeto de máquina elétrica e como protótipo. Serão apresentados também as técnicas de programação, a análise de sistemas contemplando o projeto de banco de dados MySQL, o programa em JAVA, o programa *firmware* em C para trabalho do microcontrolador PIC16F877A, os ambientes de programação de manutenção de bancos de dados e as técnicas de simulação usadas para o experimento.

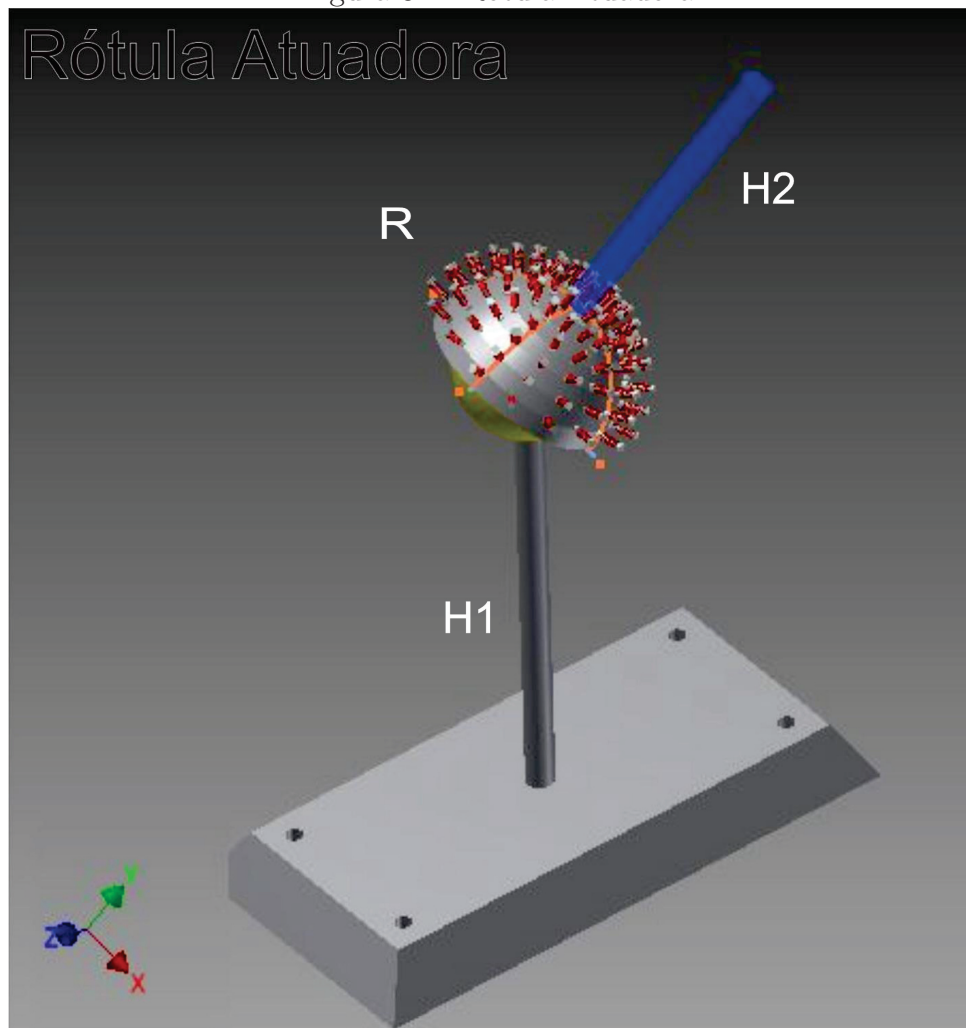
3.1 Mecanismos e Suas Aplicações

A rótula atuadora com passos esféricos controlados nasceu de uma proposta de mecanismo atuador puramente teórico, mas usando uma ferramenta computacional denominada Inventor Autodesk, foi desenvolvido em nível de projeto um modelo de atuador como equipamento. O Inventor Autodesk que é um *software* não só de desenho mas de projeto mecânico e oferece recursos significativos e melhorias de produtividade que beneficia usuários que precisam criar, otimizar e validar projetos. Com muita diversificação de ferramentas para desenho 3D que contempla mecanismos, peças de um objeto sólido, peças de chapa metálica, peças moldadas complexas, esse *software* oferece grandes conjuntos de ambientes direcionado a montagem, simulação de movimentos e a simulação de esforços (INVENTOR; TOOLING, 2009). Essa ferramenta possibilitou a construção de um modelo mecânico para elaborar resultado para fins práticos e que é apresentado na figura 3.1.

Na construção desse bloco pode ser visto o conjunto de duas hastes ou barras com orientações angulares reativas entre si e uma rótula com uma distribuição de bobinas que compõe o elemento ativo do atuador.

A construção desse equipamento pode ser dividida em 4(quatro) etapas: a etapa da construção da base com a haste(H1) a etapa da construção da casca esférica com a montagem da haste(H2) e a soma dessas etapas formando a rótula R. A última etapa é a distribuição de pontos magnetizáveis, ao longo da casca esférica, com eletroímãs

Figura 3.1: Rótula Atuadora



Fonte: Autoria própria.

posicionados com alta precisão mecânica.

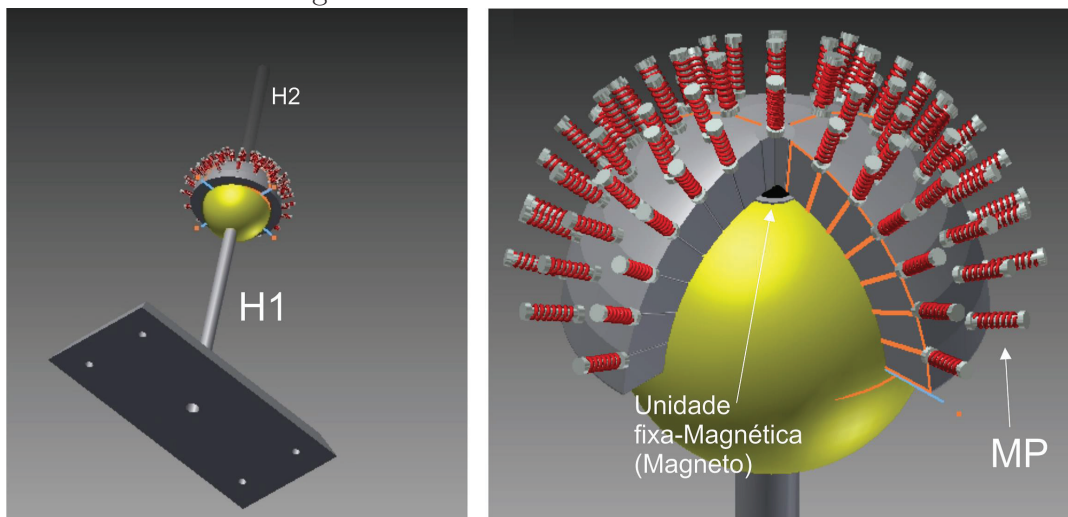
Uma importante consideração referente a esse mecanismo é o número limitado de pontos que representam o número de bobina na montagem. As hastes, que em mecanismos são mais conhecidas como barras, são de fato eixos que tem seu tamanho definido, invariante para qualquer posição e tempo, que se encontre. Outra relevante consideração é o fato de que não fará parte do estudo a associação de mecanismos, como por exemplo, associações em série de rótula atuadora, mas que fica evidente a sua importância e a instigação para futuras pesquisas. A funcionalidade desse mecanismo controlado pode gerar boa expectativa para a aplicabilidade imediata principalmente para construção de próteses de membros mecânicos, além da própria robótica, posicionamento de câmeras, globo direcionador de antenas, aplicações industriais, entre outras. Outrossim, é que a aplicabilidade se estende por se tratar de um sistema magnetizável, e ter a propriedade

de atuar como um sensor de posição como os *joysticks* industriais, o que os torna mais versátil por ele poder ter as duas funções, atuador e sensor em um só equipamento.

Na construção detalhada do modelo físico teórico, todo o desenvolvimento do equipamento deve contemplar o controle, que deve ser feito de forma tenha que uma lógica semelhante usada em um motor de passo convencional, porém agora, o sistema tem um leque de possibilidades de movimento muito maior se comparado ao motor de passos, pois este atua em três dimensões .

A partir da construção física de um modelo, foi projetado inicialmente com base nos recursos do *software* de desenho e que podem ser verificadas na figura 3.2, uma determinação de pontos magnéticos que foi chamado de MP. Esses MPs possuem individualmente, coordenadas esféricas e essa definição de pontos deve estar relacionada a uma vizinhança, que são importantes para o controle, onde as coordenadas esféricas determinarão assim as condições de menor distância entre pontos. Isso tudo deve ser criado para que um controle programável possa usar de subterfúgios para construir uma melhor rota de um ponto a outro. Outra aplicação em que usaremos as coordenadas esféricas é a determinação do ponto localizado no final da haste (H2).

Figura 3.2: Rótula atuadora em detalhe



Fonte: Autoria própria.

O detalhamento de projeto no que se refere a materiais, distâncias, intensidade de campos será abordado após um projeto mecânico, assim como o dimensionamento das bobinas que dependerão de uma geometria totalmente definida e distribuição espacial dos pontos na casca esférica.

Partindo da posição inicial como mostra a figura 3.2, onde H2 se encontra como uma extensão da H1, um conjunto de sequencias de chaveamento dessas bobinas, assim como os motores de passo convencionais, deve ser sequenciado com uma lógica programada, e podem garantir o posicionamento em ângulo da haste H2, em relação a haste H1. O grau de liberdade nas três dimensões garante no espaço 3D, mais possibilidades de se chegar a esse ponto partindo de uma origem específica.

3.2 Construção do Modelo Experimental

O protótipo físico foi construído com as seguintes partes: Base, haste (H1), bobina da haste, esfera Interna, cascas esféricas, núcleo das bobinas das cascas e por fim as bobinas (MP).

Na figura 3.3, pode-se ver o sistema montado com todas as partes descritas no próprio desenho.

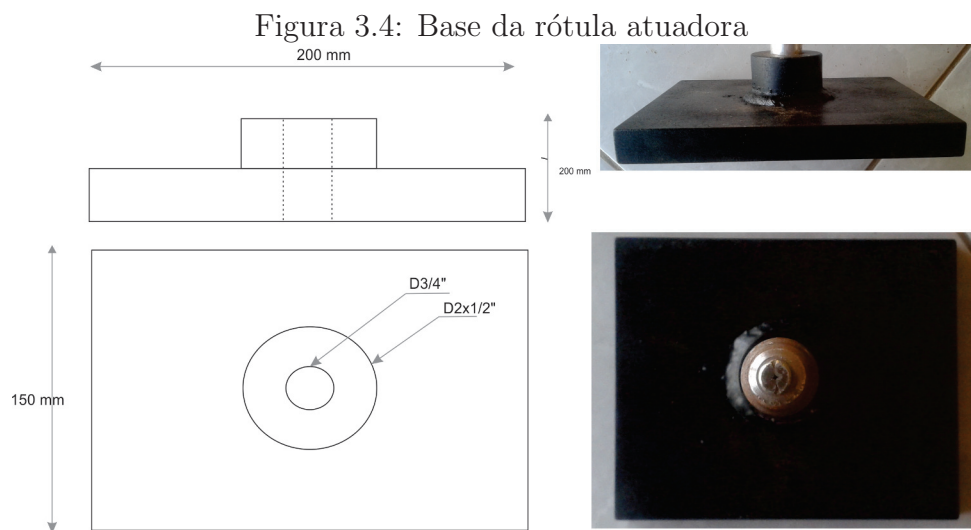
Figura 3.3: Rótula atuadora - Protótipo



Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Montagem Mecânica

A base é feita em aço AISI 1020 com chapa de 1 polegada no formato retangular de dimensões de 200 x 150 mm e um eixo de 2x1/2 polegadas, soldada com solda eletrodo no centro e furo de 3/4 polegadas para encaixar a haste. Os detalhes construtivos podem ser vistos na figura 3.4.



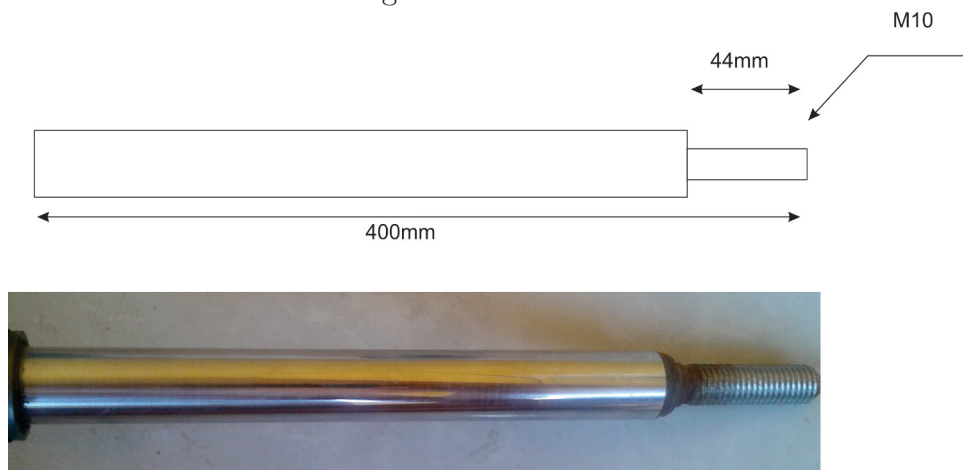
Fonte: Autoria própria.

Na figura 3.5 a haste H1 é apresentada. Construída em aço SAE 1045, com superfície cromada usada em haste de amortecedores automotivos, com o comprimento de 400 mm e diâmetro de 3/4 polegadas. Na extremidade da haste foi feita uma rosca M10 para receber a esfera.

A casca esférica foi concebida a partir de uma esfera de plástico de 100 mm de diâmetro com 2 mm de espessura de casca, que serviu de base para fixação e distribuição de pontos onde são fixados os núcleos. Estes, por sua vez são núcleos, feitos de barra roscada e galvanizadas, que atravessa a casca a distância 27mm é fixado com porcas na parte externa e interna do material plástico. Logo depois foi preenchido de massa plástica epóxi já com a esfera fixa no lugar. Para construção da casca, que é uma peça construída em moldes, se fez necessário o uso de um desmoldante especial usado em resinas EPÓXI. Então o ajuste entre juntas mecânicas garantiu um funcionamento satisfatório, já que o molde da casca esférica foi a própria esfera fixa na haste. A figura 3.6, mostra a representação de construção da casca esférica.

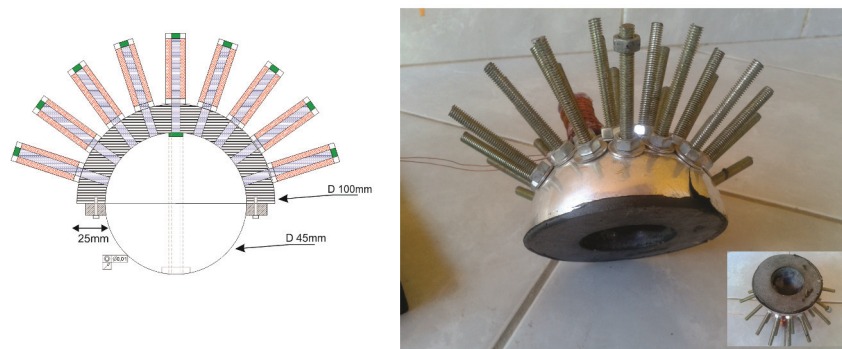
Para a construção da esfera fixa foi desenvolvida uma ferramenta de usinagem

Figura 3.5: Haste H1



Fonte:Autoria própria.

Figura 3.6: Casca da rótula esférica



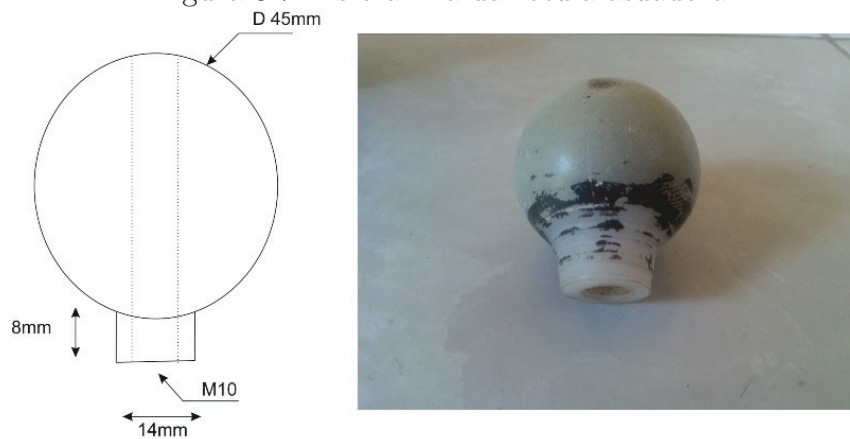
Fonte:Autoria própria.

para torno convencional, que produz diâmetros entre 30 e 50 mm. A esfera tem 43 mm de diâmetro é feita em material nylon technyl 6.6, e foi usinada um furo M10 interno com comprimento de rosca 44 mm por onde é fixado a haste H1 com rosca. Os detalhes podem ser verificado na figura 3.7.

3.2.2 Montagem Elétrica

Uma bobina padrão de mercado foi escolhida para evitar o máximo possível montagens de natureza artesanal. A bobina comum no mercado são os solenoides de arranque, usados em conjunto de motores de partida de automóveis. Segundo Santos e Alves (2009), essas bobinas de arranque de motor tem uma potência suficiente para garantir duas ações no momento do arranque no motor de um veículo, que além de fazer

Figura 3.7: Esfera fixa da rótula atuadora



Fonte:Autoria própria.

o avanço da engrenagem que vai acoplar o motor de partida no volante, ainda tem que garantir um contato elétrico já que também é um atuador de um relé de potência, que fornece corrente para o motor elétrico de arranque gire e provoque a ignição do motor a explosão do veículo.

Pode ser vista na figura 3.8. Essa bobina escolhida é uma bobina solenoide encontrada em motores de arranque do tipo MWM e que antes de ser utilizada foram realizados testes para saber a atuação do campo observando se teria força suficiente para sustentar a casca esférica. Ao satisfazer aos quesitos essa bobina foi montada definitivamente no núcleo haste H1..

Figura 3.8: Bobina definitiva do Protótipo



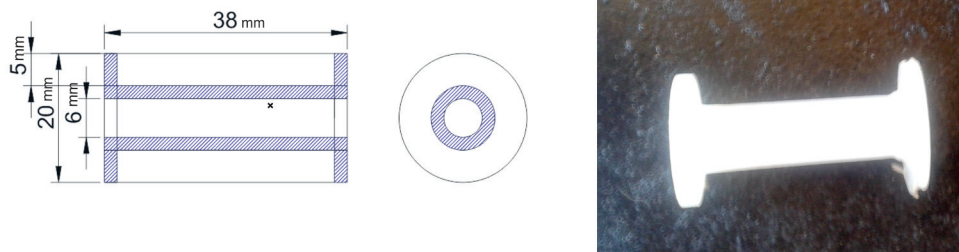
Fonte:Autoria própria.

Foi necessário reabrir o furo interno do solenoide para 3/4 de polegada para montar na haste H1. Esse solenoide trabalha normalmente com uma tensão de 12 V, o

que facilita o uso de uma bateria automotiva para realizar o experimento, dispensando o uso de fontes de tensão ajustáveis.

Para as bobina móveis dos pontos MPs e os seus respectivos núcleos, e por uma questão de melhorar o aproveitamento de espaço a distribuição foi feita considerando uma barra roscada M6 galvanizada, como núcleo do eletroímã, para um carretel da bobina de 10 mm de diâmetro das abas. Ao todo foram confeccionadas 34 bobinas e o cálculo de numero de espiras resultou em achar um número aproveitando o limite de espaço disponível para confecção. Usando o fio 25 AWG o melhor campo produzido seria a partir da maior contagem de espiras distribuídas no espaço já determinado pelo limite de espaço reservado para enrolamento. Então as medidas da podem ser vistas na figura 3.9.

Figura 3.9: Carretel das bobinas MPs



Fonte: Autoria própria.

Para a área reservada ao bobinamento de 5x38 mm podem ser montadas na área reservada para as espiras, pela própria tabela, AWG fio 25, um total de 850 espiras. No apêndice A é apresentada uma planilha que auxiliou a fazer esses cálculo e encontrar a melhor configuração dessa construção.

Para analisar qual a tensão pode ser aplicada nessas bobinas, a tabela AWG apresenta a resistências que é de 0,000333 ohms/cm, logo pode-se calcular a o resultado através da equação (3.1). O comprimento total da bobina é então, $R_{medio} = 15 \text{ mm} = 0,15\text{cm}$, resistência total da bobina é igual a 0,01873 ohms.

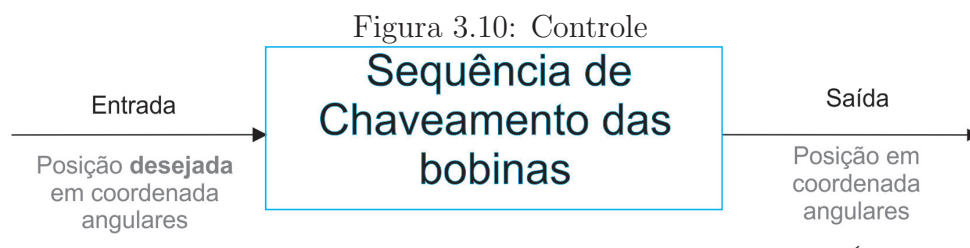
$$V = RI \quad (3.1)$$

O carretel foi confeccionado em material plástico isolante do tipo Tecnyl, com

propriedades de suporta calor até 120° C .

3.3 Considerações de Controle

O controle será apresentado em camadas distintas detalhada nesta seção. A tecnologia usada deverá ser de tal forma, que seja qual for a plataforma computacional usada, *Linux*, *Windows* ou *android*, funcione com o mesmo desempenho e deverá usar o mesmo dispositivo elétrico eletrônico que execute todo o comando de atuação das bobinas. O controle trata-se de um sistema em malha aberta onde o objetivo do controle é posicionar a barra móvel do mecanismo atuador para um destino definido em *software*, partindo de uma posição inicial qualquer. Na figura 3.10 representa o sistema de malha aberta.



Fonte: Autoria própria.

Para o usuário da rótula atuadora, um *firmware* instalado em um microcontrolador PIC, estará pronto para receber um conjunto de mnemônicos como parte de um protocolo, usando um meio físico RS232 de comunicação serial, e que receberá as instruções de um controlador. Os motores de passo convencionais atuam com comandos, mas o acionamento é realizado por intermédio de um *driver* no qual transforma os sinais de saída (TTL) de 5 Volt, como dado de comando e aciona dispositivos que suprem de corrente elétrica, as bobinas dos motores de passo. Esses dispositivos muitas vezes podem ser vistos como simples transistor usado para chaveamento, com isolamento ótico ou dependendo dos motores de passo pode ser usado CIs (chips) específicos para tal função, e é o caso ULQ2804, para correntes inferiores a 500mA e tensões até 50V por bobina, e o CI L298 para correntes de bobinas até 4A e tensões de alimentação até 46V. Tanto para o ULQ2804 quanto para L298, possuem pinos de controle e pinos de acionamento de forma que um sinal lógico TTL em um pino de entrada deste CI altera o estado dos pinos de saída. Esses circuitos integrados são construídos para trabalhar com cargas indutivas no

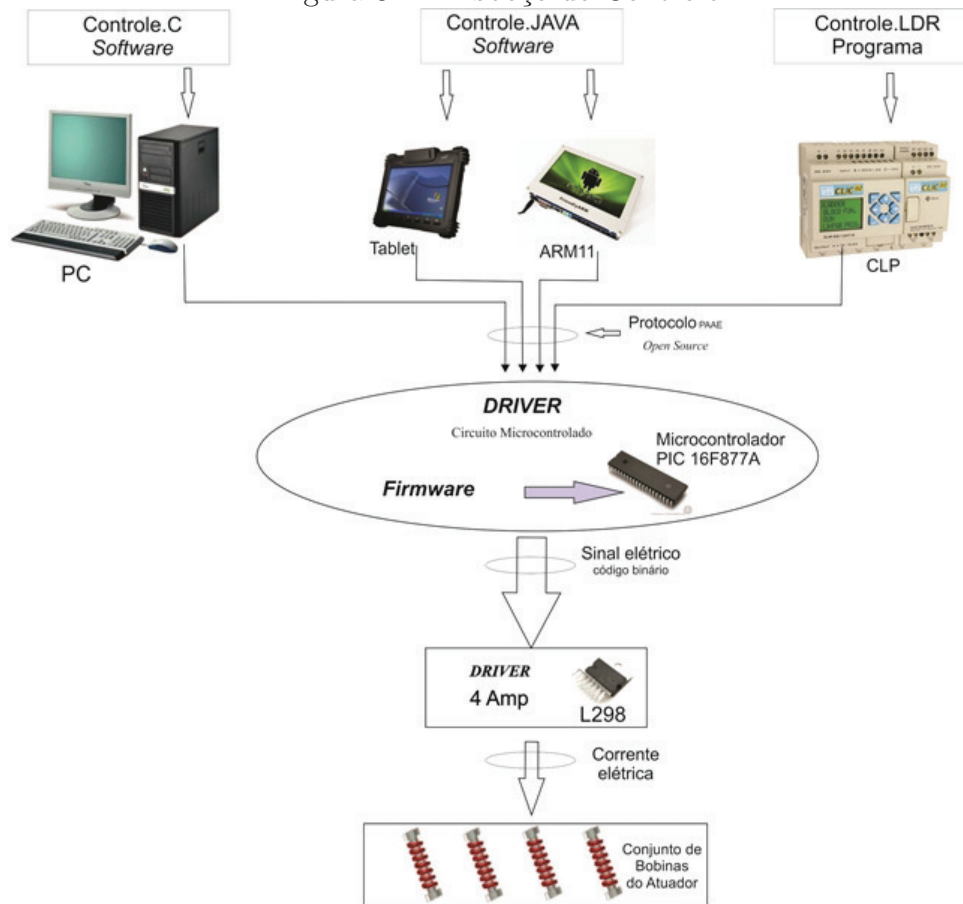
qual já possuem proteção contra os efeitos de sobretensão de retorno relacionado as forças contra-eletromotriz muito peculiares dos circuitos indutivo. Os materiais eletrônicos usados para construção do circuito atuador são especificados dependendo da corrente elétricas de consumo das bobinas. É usual em máquinas de controle como os Inversores, o uso dos (IGBTs) (transistores bipolar de porta isolada) que mescla as características de baixa queda de tensão de saturação com controle simples de tensão para chaveamento. Outro componente que pode está presente nos equipamentos eletrônicos que controlam potência é o (TJB) , Transistor bipolar de junção e por fim o componente que possui excelentes características de chaveamento e simplicidade dos circuitos de controle da porta que são os (MOSFET) ,Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (SILVA, 2000).

A figura 3.11 representa um esboço esquemático do controle que se inicia na elaboração de um *software* em computadores ou em dispositivos programáveis, onde neles podem ser instalados aplicativo em alto nível de programação, em que o usuário do sistema mecânico, possa definir as condições de velocidade e de início e fim do movimento. Na programação, que no exemplo foi desenvolvido em C, é feito então uma rotina para traduzir em um protocolo que é de fato um conjunto de *string* que define os pontos em que serão atuados em sequencia preestabelecida por um algoritmo. Um primeiro driver, que é um drive lógico é associado a outro drive físico-elétrico, que para ilustrar o fluxo de informações, está esquematicamente distinto, mas que pode fisicamente ser montado em uma só placa (PCI) , placa de circuito impresso.

Esse sistema foi propositadamente modulado, mas não necessariamente precisa ser para ser aplicado . Tudo isso poderia ser construído apenas usando o ARM como solução de controle e driver, sem o uso do PIC. Porém esse trabalho não determina a solução em *hardware* para uma aplicação, pois isso depende de outras variáveis como custo, disponibilidade e conhecimento do desenvolvedor. O desenvolvedor de soluções em ARM pode se basear nessa estrutura para desenvolver seu próprio hardware.

Um objetivo é construir um driver lógico com um protocolo microprocessado, de domínio público *open source*, constituído por um microcontrolador de baixo custo e um conjunto de componentes que faça a leitura de comandos, processe os dados, oferte os sinais de comando alimentação das bobinas. Esse protocolo é uma sugestão a pesquisas futuras, deve ser passivo a mudanças e atender a configuração de diversos modelos físicos, independentemente do número de bobinas, especificação das bobinas, comprimento das barras e toque que são características intrínsecas do mecanismo atuador.

Figura 3.11: Esboço do Controle



Fonte:Autoria própria.

Na primeira etapa do desenvolvimento do controle, foi elaborado o *firmware*, que é o programa que é instalado no microcontrolador PIC16F877A do driver lógico e terá duas funções básicas. A primeira é receber informações protocoladas referentes aos parâmetros de configuração do mecanismo, que são: números de pontos na casca da rótula, relação de vizinhança, ângulos possíveis, estes serão gravados em memória EEPROM interna do microcontrolador. A segunda função do *firmware* é fazer as bobinas atuarem. Outra opção que pode ser implantada é operação em comunicação direta com um computador, e retornar a posição relativa para o supervisor instalado neste, nesse caso a rótula teria que funcionar como sensor.

3.4 Software de Controle

O *software* de controle foi desenvolvido em Java. Foi escolhida essa linguagem porque ela representa uma linguagem aberta e gratuita diferente de linguagens como

Delphi, *Visual Basic* entre outras e também a escolha se deve ao fato de existir um acesso fácil não só nos ambientes de programação e compiladores mas principalmente a documentação. Muitas bibliotecas gratuitas podem ser adquiridas sem qualquer custo ao desenvolvedor. Quanto à natureza e filosofia da linguagem, ela foi escolhida por se tratar de uma tendência, já que é uma linguagem orientada a objeto e isso representa avanço tecnológico, então fazer soluções aplicando a tendência de evolução na área da computação, foi uma escolha baseada nesses fundamentos.

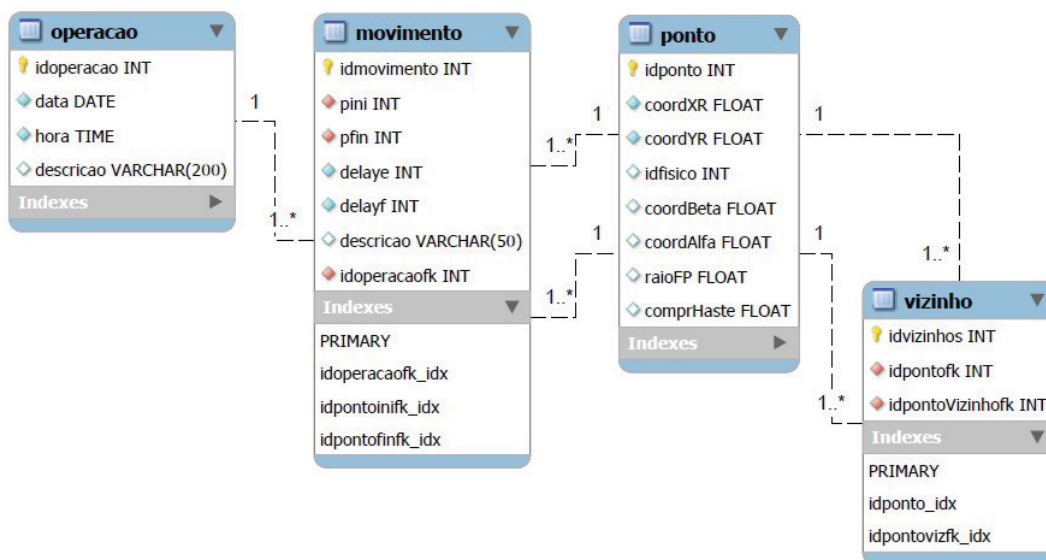
Antes de qualquer programação, foi necessário fazer uma análise de sistema de informações para determinar o que se pretende com o *software*, ou seja, a sua funcionalidade desde a entrada de informações até o resultado. Como diretivas, o programa terá que possuir as seguintes características:

- Incluir em um banco de dados, todos os pontos MPs com as coordenadas esféricas e ter poder de manutenção em banco de dados. Logo se observou a necessidade de se trabalhar com um banco de dados.
- Fazer o relacionamento dos pontos cadastrados com seus pontos vizinhos, isso será detalhado nas seções seguintes.
- Cadastrar e armazenar, operações de movimentos com nomenclaturas estabelecidas pelo o usuário. Isso quer dizer que o usuário terá que ter autonomia de criar o movimento, nomeá-los, alterar, ajustar, excluir conforme sua necessidade. Outrossim, o cadastro de operações que compõe de fato um conjunto de movimentos estará relacionado a uma tabela filha chamada de movimentos, onde para cada operação cadastrada, são cadastrados vários movimentos, é o que em relacionamento de banco de dados se chama um para vários.
- No cadastro de movimento terá que ser informado o ponto de origem, previamente cadastrado, e o ponto de destino. Lembrando que esses pontos representam fisicamente qualquer ponto MP da rótula.
- Cadastrar os tempos de chaveamento das bobinas, chamados aqui delay, que representa o tempo entre o desligamento de um ponto e a energização de outro ponto MP. Além disso, no arquivo de movimentos, deve-se ter um tempo final de espera, já que a operação pode precisar dessa informação que ao finalizar um movimento, ou seja, pode necessitar de um tempo para iniciar o próximo movimento.

- Apresentar como resultado final, um arquivo chamado de resultados, em formato de arquivo binário(protocolo próprio), que será apresentado aqui nas seções seguintes, que representa uma formatação de envio de informações e será aproveitado pelo circuito de comando.
- Terá que funcionar para qualquer distribuição geométrica de pontos na casca esférica.

O projeto de *software*, se iniciou pela criação do banco de dados, que é formado por quatro tabelas relacionais e um arquivo binário de resultados. A figura 3.12 mostra os arquivos e seus relacionamentos.

Figura 3.12: Banco de dados Relacional



Fonte: Autoria própria.

Para a criação desse banco de dados foi usada uma ferramenta de criação e manipulação de banco de dados chamada MySQL Workbench versão 6.0.7.11215. Esse banco de dados foi escolhido por ele ser gratuito, seguro, e de muita documentação.

O cadastro de pontos com suas coordenadas é feito alimentando a tabela de pontos. Essa tabela possui uma chave primária chamada **IDponto** e por meio deste campo, é ligado a essa tabela de pontos vizinho que funciona como uma tabela filha e que pode armazenar informações de vários pontos os vizinhos. O que define um ponto A vizinho de um ponto B é a capacidade física de permitir o movimento entre o ponto da tabela mãe e o ponto da tabela filha. Ao se cadastrar um ponto, automaticamente abre

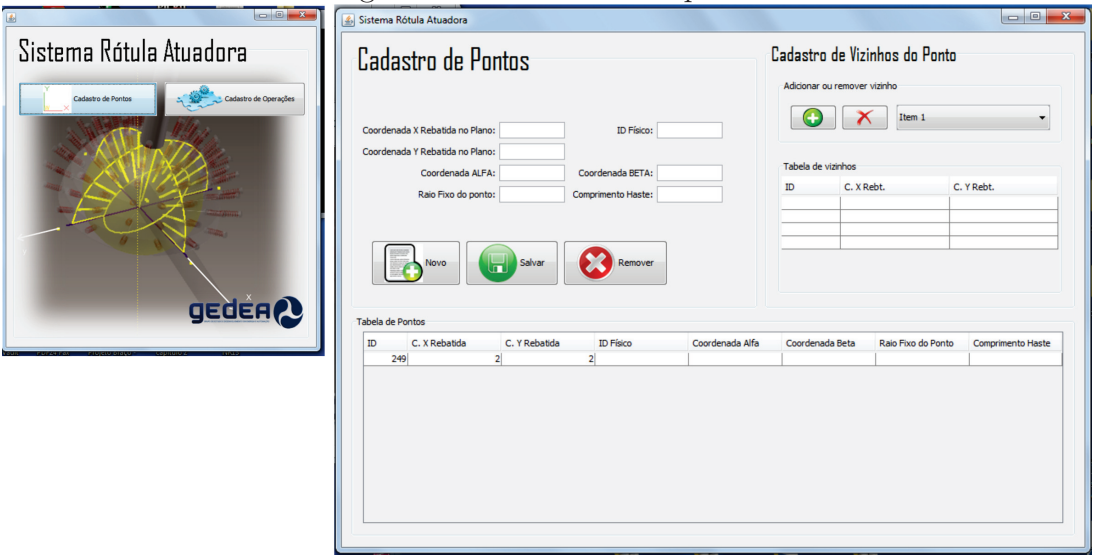
outro cadastro relacionado aos pontos vizinhos. O usuário deve incluir todos os pontos vizinhos baseado na rótula física, dessa forma o *software* contempla todo e qualquer arranjo de pontos da rótula e todos os seus respectivos vizinhos.

O cadastro de operação é o cadastro em que descreve um conjunto de movimentos por exemplo: seja um sistema hipotético em que se faz o avanço de um eletrodo para aplicar um ponto de solda em um metal, então no cadastro de operação o usuário terá na descrição o nome, escolhido nesse exemplo de “operação Soldar”. A “operação soldar”, se constitui de várias movimentações, com uma ou mais origens e destinos. Para uma operação soldar o usuário poderá cadastrar vários movimentos, no banco de dados, possui o campo **IDopercao** que é chave primária da tabela operação ligada a tabela indexada de movimentos. O arquivo de movimento é responsável por armazenar informações relativo aos pontos origem e destino de movimentos. Para o arquivo de movimento, no exemplo da operação de solda, o usuário vai denominar “avanço de eletrodo”, isso representa um registro na tabela de movimento, em seguida o usuário cadastra o “retorno de eletrodo”, será então outro registro e assim sucessivamente para quantos registros se queira cadastrar. Nota-se então que a quantidade de movimentos que uma operação comporta será definida pelo o usuário e esse número representa a quantidade de registro que poderá ser armazenada em um banco de dados MySQL.

O *software* escrito em JAVA, chamado de (SIRA) -Sistema Rótula Atuadora, além de fazer uma rotina de manutenção de cadastro, faz um processamento que é o grande objetivo deste *software*.

Na operação do SIRA, antes de cadastrar todos os pontos, a tela de cadastro pode ser vista na figura 3.13, deve ser feito, uma coleta de dados de coordenadas do equipamento físico. O cadastro de vizinho está na mesma janela de cadastro de pontos e pode ser visto na mesma figura canto superior direito. Esse cadastro de vizinho é feito em ato contínuo, após o cadastro de todos os pontos onde são salvo no banco de dados. Nota-se também que os campos usados na tabela de pontos, possuem todas as identificações de posição por coordenadas, rebatimentos nos eixos xy, raio fixo e comprimento da haste e para este controle o dado imprescindível são as coordenadas rebatidas no plano, que identifica o ponto e que dele serão feitos os cálculos de menor distância entre pontos. Além disso, existe a coordenada esférica e comprimento da haste fixa que pode ser usada em outros controles mais complexos contemplando obstáculos. São dados de mecanismos que podem fazer parte de uma análise de cinemática inversa e determinar qual o espaço

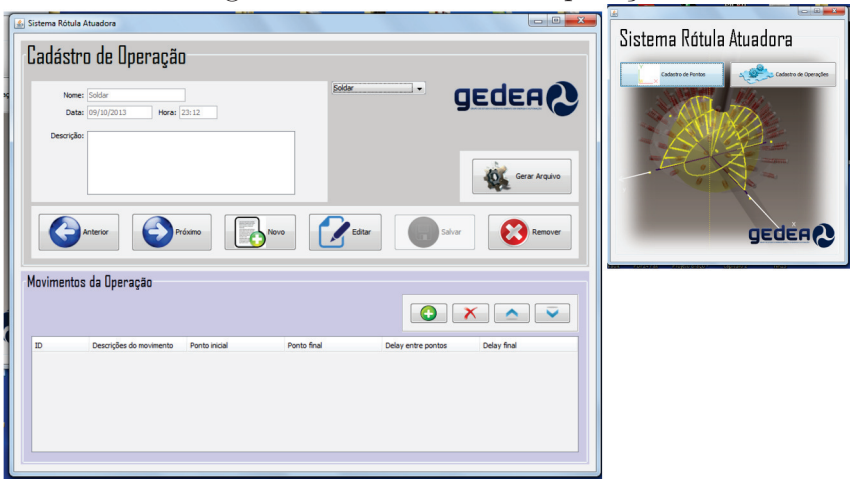
Figura 3.13: Cadastro de pontos



Fonte:Autoria própria.

que ocupa o movimento. Nesses cadastros, o usuário antes de inserir esses pontos, deve ter a rótula construída com toda a distribuição e suas coordenadas e isso torna essa fase a mais trabalhosa e que demanda atenção no cadastro. O passo seguinte é entrar na janela de operação e cadastrá-las com o seus respectivos movimentos. A janela de

Figura 3.14: Cadastro de operação

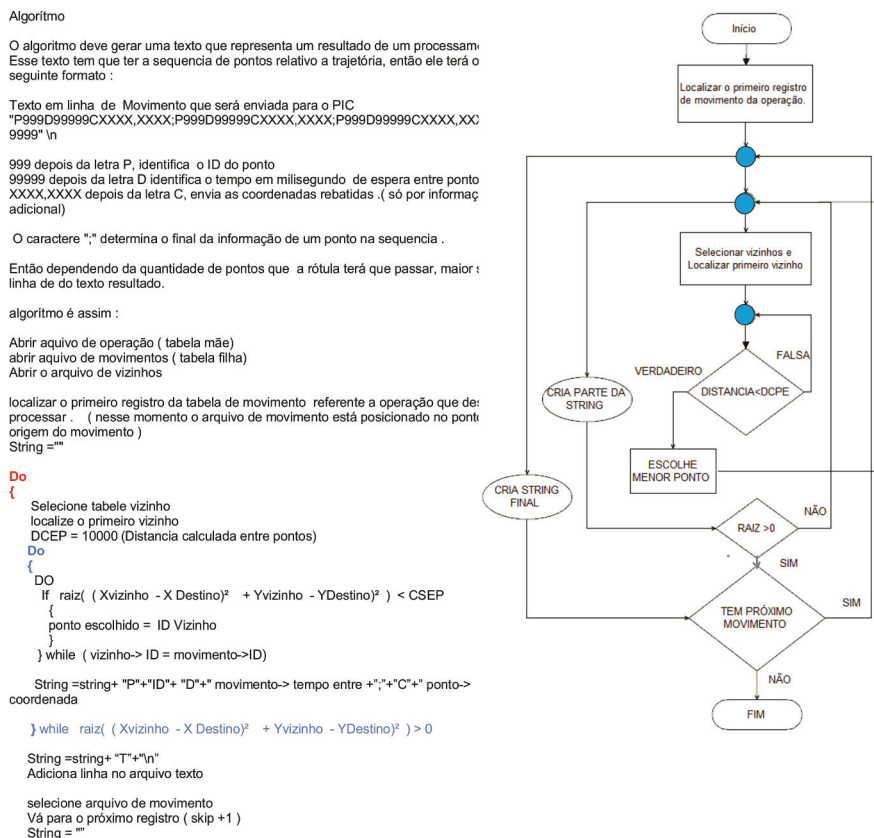


Fonte:Autoria própria.

operações pode ser vista na figura 3.14 e seus respectivos movimentos. Essa etapa é bem prática e intuitiva. Nesses cadastros, o usuário tem autonomia para criar operações quantas forem necessárias, uma vez cadastradas, podem ser alterada quando assim for conveniente, no cadastro de movimento, situado na parte inferior da janela, o usuário

ao definir os movimentos deve ficar atento para que um movimento subsequente tenha como ponto inicial, o ponto final do movimento anterior. Nesse formato de cadastro, o usuário de movimentos de rótulas tem uma *interface* amigável e com fácil acesso. Será apresentado agora o algoritmo gerador de resultados. O resultado é armazenado em um arquivo binário, e o seu pseudocódigo é mostrado na figura 3.15 juntamente com o fluxograma do programa. O pseudocódigo ajuda a compreender o funcionamento do

Figura 3.15: Fluxograma e pseudocódigo do SIRA



Fonte: Autoria própria.

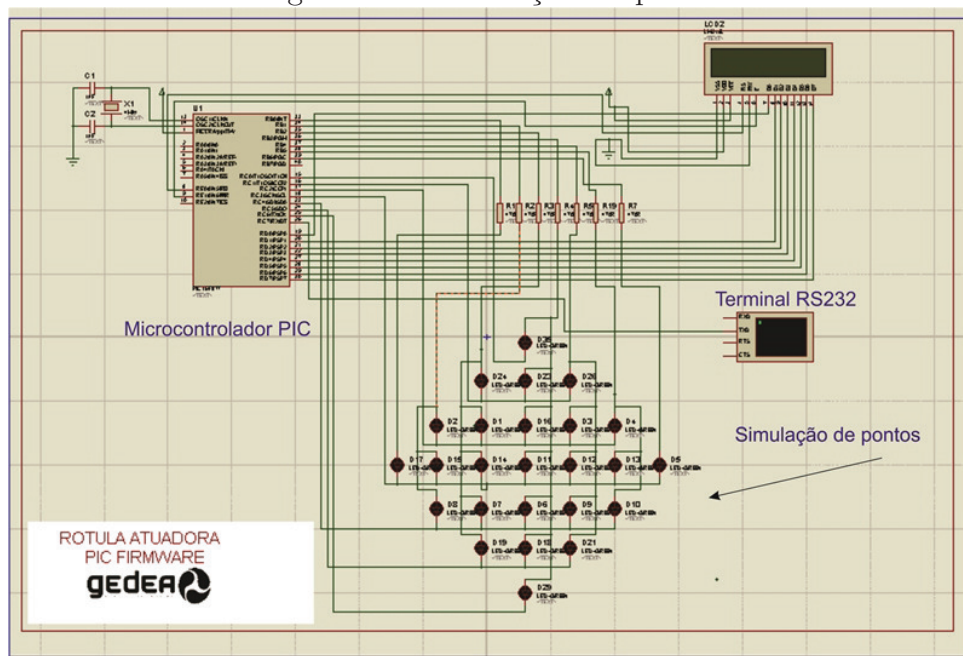
software antes de ter sido concebido em linguagem JAVA e com isso pode-se verificar a rotina de comparação que testa a menor distância entre pontos. O arquivo binário é enviado como string usando a comunicação USART do PIC, que recebe os dados da porta RS232 do microcomputador, a uma taxa de velocidade padrão 9600 bps. Não faz parte desse trabalho estudo de tempo real.

A programação foi escrita usando a ferramenta de ambiente de programação JAVA conhecida por NetBeans IDE 7.4, que trata-se de uma ferramenta gratuita com recursos de simulação de *software* em ambiente interpretado, o que facilita bastante o desenvolvimento.

3.5 Projeto de Circuito de Comando e Software de Simulação

O circuito eletrônico será apresentado no simulador de projeto *Proteus*. Esse *software* é de uso profissional de desenvolvimento de circuitos eletrônicos, tem recursos avançados e o fato de aceitar componentes programáveis como microcontroladores, memórias entre outros, para realizar simulações de circuitos elétricos e eletrônicos, fazem dessa ferramenta um aliado no ganho em tempo de desenvolvimento de projeto (LABCENTER, 2013). O circuito a ser simulado é apresentado na figura 3.16. Para a simulação foi

Figura 3.16: Simulação em proteus



Fonte: Autoria própria.

construído um circuito com um PIC16F877, ligado a um conjunto, de pontos representado com Leds, ou seja, cada led representa o MP que é o sinal de comando que representa o sistema de chaveamento das bobinas. Os LEDs são ligados ou desligado com uma combinação matricial de saídas I/O do microcontrolador, ou seja, para ligar o LED, deverá ter então que fazer uma combinação de ligações entre pinos do PIC do port B e port C em nível alto e baixo respectivamente e que corresponda ao ponto MP.

O componente interno do *proteus* para simulação do terminal RS232 é o COM-PIM. Esse componente interno liga o simulador proteus a uma porta RS232 física real e possibilita o envio de informações dos dados em formato de *string* contidos nos arquivo de

resultados para o PIC. Foi proposto no circuito um display para informar o recebimento das informações de pontos pelo circuito.

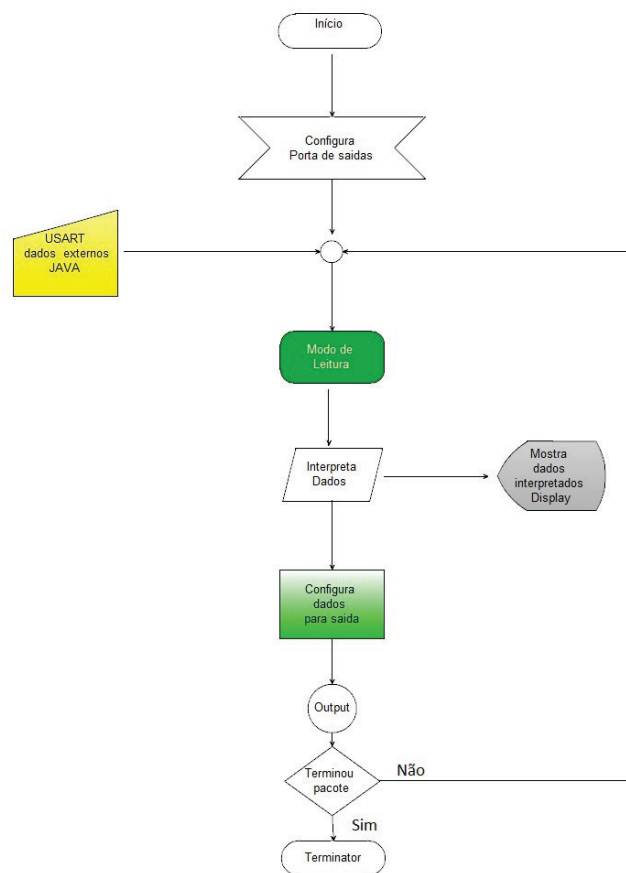
Conjugado a esses componentes do *proteus* em especial o COMPIM, se faz necessário definir no sistema operacional a porta física serial do computador que enviará os dados do arquivo binário para o simulador *proteus*. Para que isso seja possível, se fez necessário instalar um emulador de porta serial chamado (VSPE) , *virtual serial ports emulator*, e pode ser baixado da internet e instalado gratuitamente (VSPE, 2013).

O *firmware* instalado no Microcontrolador, é um *software* escrito em C. O ambiente de programação e o compilador C para o microcontrolador PIC foi usado da empresa(CCS) *Custom Computer Service* (CCS, 2013). O código comentado do *firmware* terá que possuir as seguintes características:

- Habilitar as porta I/O como saída;
- Receber os dados pela porta USART, que são os dados que provem do programa em JAVA;
- Interpreta o protocolo;
- Mostra no display o que interpretou;
- Identificar erros de pacote de dados e mostrar no display e retornar ao computador um pacote de erros. Neste caso um programa no computador, terá que identificar o pacote de erros e mostrar ao usuário;
- Liga e desliga pontos MP;
- Possuir memória suficiente para receber e armazenar pacotes. A importância da memória no circuito eletrônico está relacionada ao desempenho do sistema de acionamento e ao volume de pacotes que pode ser enviado pelo computador;
- Ter respostas rápidas para acionamento.

O Fluxo de informações para o processamento do microcontrolador é mostrado na figura 3.17.

Figura 3.17: Fluxograma do Firmware



Fonte: Autoria própria.

3.6 Considerações Finais

Dois desenvolvimentos de algoritmo foram necessários e expostos aqui, com o intuito de conceber um equipamento único para elaboração de experimentos. Também foi exposta a construção da rótula atuadora como um protótipo, descrevendo os materiais e métodos de projeto. O conjunto de ferramentas e *softwares* apresentados aqui neste capítulo, servirão para mostrar a aplicação no capítulo seguinte, bem como os resultados.

4 Aplicações e Resultados

Nesse capítulo, serão apresentados os testes e resultados, inicialmente foi preciso criar uma metodologia de referência de ensaio, partindo da definição da rótula atuadora que será usada na prática do experimento. Como o trabalho é de simulação, logo definir uma configuração física para a criação do cadastros é o ponto de partida. Definir fisicamente uma rótula atuadora hipotética é formatar um conjunto de pontos distribuídos em uma casca esféricas e com a quantidade de pontos suficiente para fazer a simulação.

Esse capítulo, além do experimento de simulação, dedica uma seção a considerações ao protótipo físico, expondo acertos, defeitos e apontando melhorias.

A metodologia referida para o ensaio é de criar passos a serem seguidos em uma implementação computacional que terá a seguinte ordem de tarefas:

- Definição da rótula atuadora como equipamento constituído de um número de pontos magnetizáveis.
- Definir as coordenadas esféricas e rebatidas desses pontos.
- Fazer as considerações de atuação de ponto para as coordenadas que se deseja alcançar, ou seja, identificar os pontos que devem ser energizados para gerar o movimentos com as coordenadas que se deseja alcançar. Lembrando que os pontos magnetizáveis não representam os mesmos pontos com coordenadas definida na casca esférica que se deseja posicionar.
- Cadastrar no SIRA todos os pontos com as respectivas coordenadas, indispensavelmente as coordenadas rebatidas.
- Cadastrar operações no SIRA. Nesse momento a criação de situações prováveis para o movimento da rótula, para que melhore a compreensão.
- Cadastrar os movimentos que representam as operações. Para cada operação existe um ou mais números de movimentos, logo se faz um apelo a abstração para os detalhes de posicionamento e para a forma de cadastra, mostrando o conceito de velocidade e paradas no final do percurso de cada movimento.

- Gerar o resultado computacional.
- Aplicar o resultado computacional no *software* de simulação de circuito eletrônico chamado *Proteus Isis 7.6*. Como a matriz de um ensaio já está preparada e podendo ser usada como um “template”, este pode ser usado com referência inclusive para ajudar na nomenclatura dos pontos (ID) no momento do cadastro, e pode sugerir um número de pontos para a casca esférica da rótula, facilitar o trabalho e melhorar a análise do ensaio.
- Apresentar o resultado do teste com uma análise crítica e comentários.

4.1 Aplicação computacional

Nesta seção serão vistas as aplicações computacionais em funcionamento.

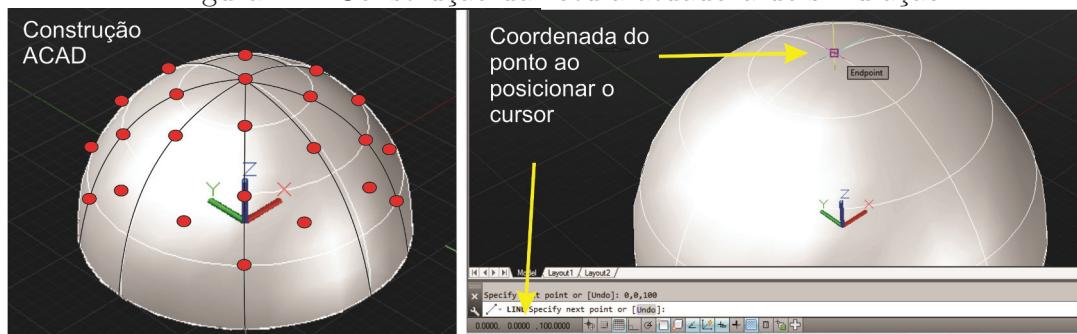
4.1.1 Construção da Rótula de Simulação

Como mencionado anteriormente a rótula de simulação será baseada em um *template* previamente construído na estrutura de *firmware* para que facilite a simulação. Esse conjunto de pontos será executado com ajuda de um programa de (CAD) (Autodesk Autocad). A opção por esse método é motivada pelo fato que supostamente qualquer que seja uma rótula real, deva ter um projeto em desenho realacionada a ela, e este projeto trás consigo intrinsicamente as coordenadas dos pontos, e não só as coordenadas esféricas mas também as cartesianas já que o *software* de desenho fazem esse tratamento, portanto para uma implementação o trabalho será bem reduzido e será feita consulta via *software* CAD dos pontos para posteriormente usar no *software* de controle . Nas opções de trabalhar com sólidos foi construída em desenho uma casca esférica com diâmetro de 100 mm.

Pode ser observado na figura 4.1, que a determinação de ponto são ser feita com as linhas de construção do Autocad e nesse caso foi usado o padrão *default* , do Autocad que já garante a distribuição para 25 pontos, as intercessões de segmentos de curvas já trazem pontos que foram utilizados, em resumo, essa rótula foi criada por um recurso do Autocad de se construir cascas esféricas.

Nas opções de trabalhar com sólidos foi construída em desenho uma casca esférica com diâmetro de 100 mm.

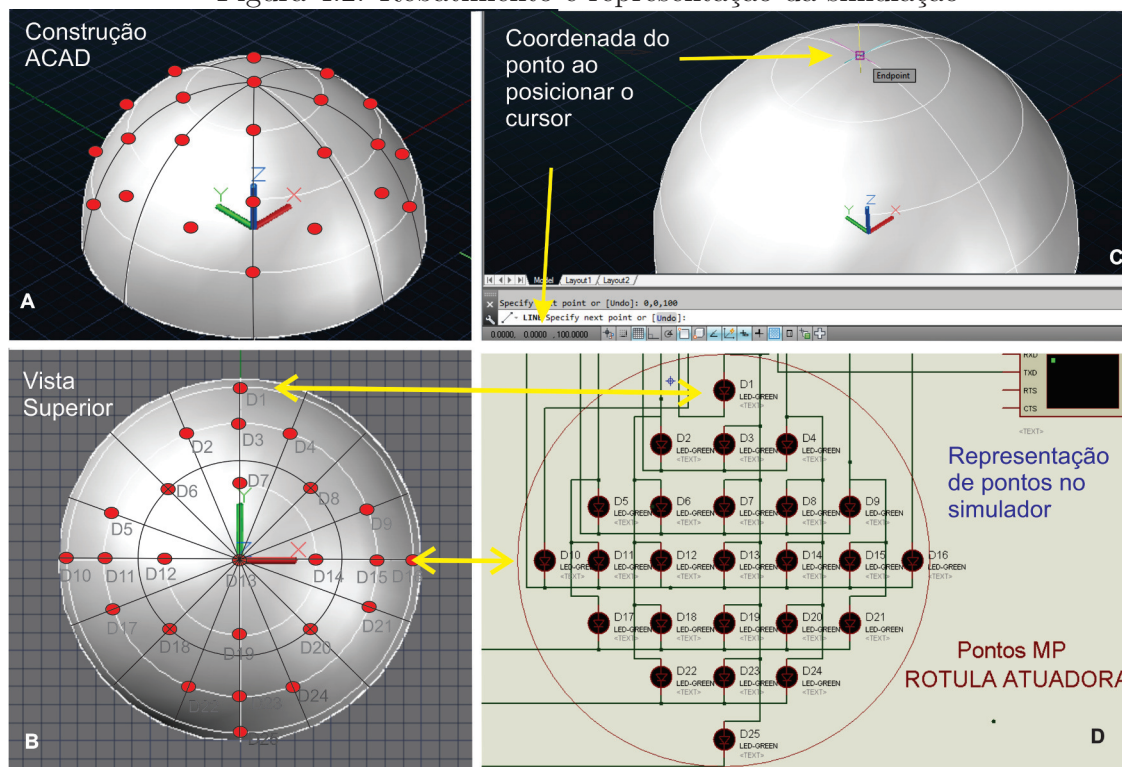
Figura 4.1: Construção da rótula atuadora de simulação



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que para cada ponto do desenho, que está em vermelho, tem uma distribuição simétricas com relação aos planos cartesianos e com o recurso do próprio Autocad, pode-se obter as coordenadas dos pontos operando com o cursor e posicionando nos pontos, como é indicado na figura 4.1.

Figura 4.2: Rebatimento e representação da simulação



Fonte: Autoria própria.

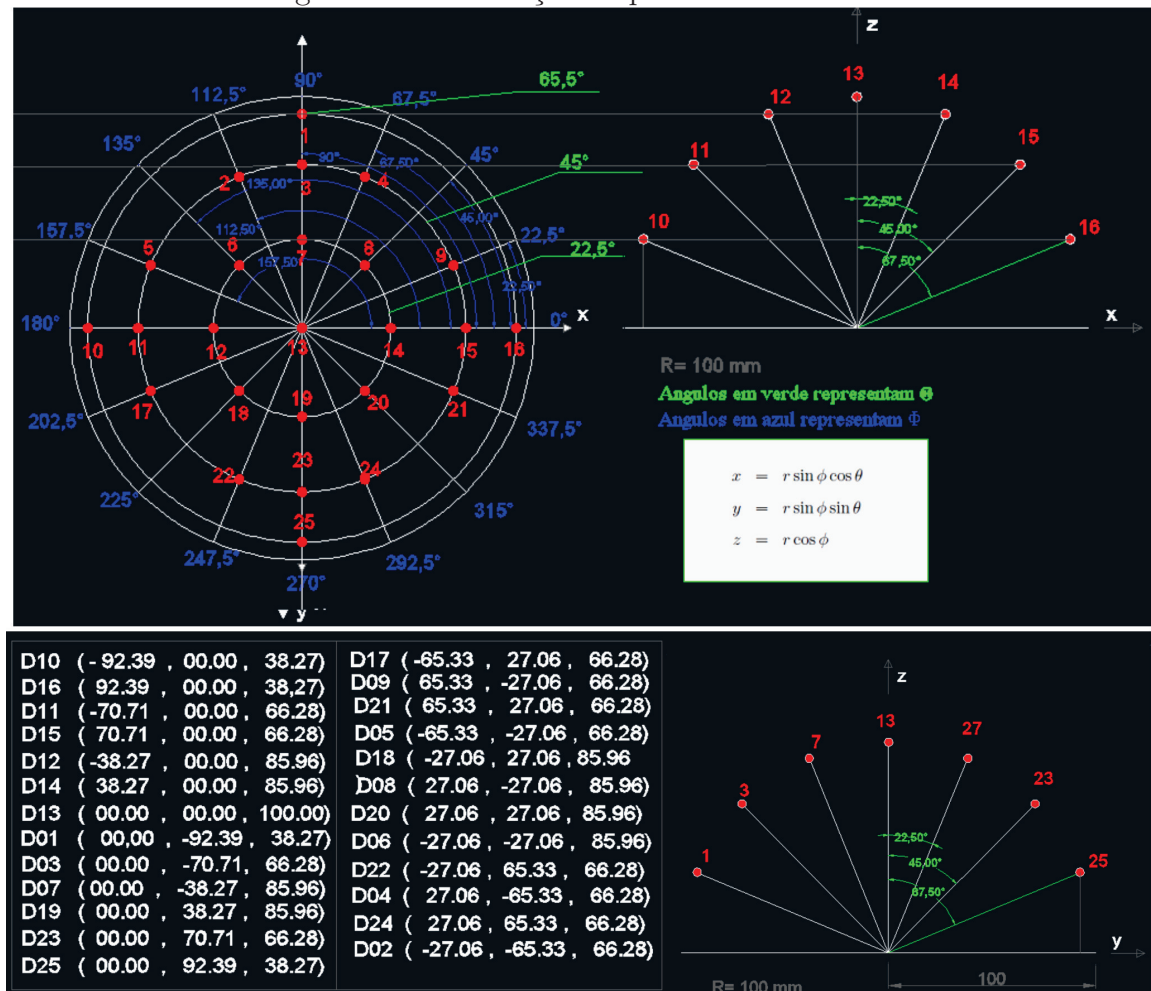
Na figura 4.2, no quadro B é mostrado a rótula atuadora e seus pontos com uma vista superior. Ao lado, no quadro D fazendo referências a todos os pontos da rótula, identifica-se o *template proteus* também todos pontos representativos que são de fato um

senal elétrico que identifica ligado ou desligado. Observa-se também as nomenclaturas dos pontos, D1, D2 até D25, que serve como uma orientação para o experimento. Também existe uma motivação em fazer uma representação semelhante ao modelo físico, já que ajuda na abstração do experimento.

Na figura 4.3 é elaborado um projeto em Autocad para orientação em coordenadas esféricas dos pontos. Para ler este projeto, a distribuição de pontos a esquerda representa a vista superior da casca e expõe os ângulos phi, a direita representa, corte no meio da casca para mostrar a distribuição de ângulos theta em coordenadas esféricas.

Neste trabalho é construído um modelo de rótula atuadora de simulação com uma quantidade definida de pontos, com tamanhos e distâncias e relação de vizinhança.

Figura 4.3: Orientação de pontos em Autocad



Fonte: Autoria própria.

É importante informar que o ponto-bobina que se localiza em uma coordenada qualquer, não posiciona o mecanismo nessa mesma coordenada. O ponto que vai posici-

onar a esfera na coordenada que se deseja, representa um ponto esfericamente simétrico, defasado em 2 quadrantes no plano rebatido. Para facilitar a abstração foi criada essa condição de simetria nos pontos, mas o sistema de controle contempla qualquer configuração física de pontos, ou seja, qualquer projeto. O experimento de simulação está levando em conta o ponto das bobinas, como o ponto alvo de controle, a fim de melhor acompanhar quando o resultado for lido pelo circuito em PIC.

As coordenadas dos 25 pontos e estão apresentados na tabela 4.1 :

Tabela 4.1 Tabela de pontos da Rotula de simulação

Ponto D	Raio	Theta	Phi	x	y	z
1	100	90	65,5	0,00	-92,39	38,27
2	100	112,5	65,5	-27,06	-65,33	66,28
3	100	90	45	0,00	-70,71	66,28
4	100	65,5	65,5	27,06	-65,33	38,27
5	100	157,5	65,5	-65,33	-27,06	66,28
6	100	135	45	-27,06	-27,06	85,96
7	100	90	22	0,00	-38,27	85,96
8	100	45	45	27,06	-27,06	85,96
9	100	22,5	65,5	65,33	-27,06	66,28
10	100	0	65,5	-92,39	0,00	38,27
11	100	0	45	-70,71	0,00	66,28
12	100	0	22,5	-38,27	0,00	85,96
13	100	0	0	0,00	0,00	100,00
14	100	0	22,5	27,06	0,00	85,96
15	100	0	45	70,71	0,00	66,28
16	100	0	65	92,39	0,00	38,27
17	100	205,5	65,5	-65,33	27,06	66,28
18	100	225	45	-27,06	27,06	85,96
19	100	270	65,5	0,00	38,27	85,96
20	100	315	45	27,06	27,06	85,96
21	100	337,5	65,5	65,33	27,06	66,28
22	100	247,5	65,5	-27,06	65,33	66,28

23	100	270	45	0,00	70,71	66,28
24	100	292,5	65,5	27,06	65,33	66,28
25	100	270	65,5	0,00	92,39	85,96

Todos os pontos foram copiados do Autocad bem como a coordenadas esféricas.

O cadastro dos pontos no SIRA, pode ser visto na figura 4.4 que mostra a tela de manutenção de cadastro de pontos, o *software* por ser bem intuitivo para o usuário, tem interface amigável para incluir, excluir, alterar os registros que representam pontos. A parte inferior da janela de cadastro mostra uma caixa de visualização e posicionamento de registro e nela pode ser observada a inclusão de todos os pontos resultados do trabalho anterior que foi a tabela de pontos. No canto superior direito dessa janela pode-se observar o cadastro de vizinho.

Figura 4.4: Cadastro de pontos no experimento

The screenshot displays the 'Sistema Rótula Atuadora' software interface. The main window is titled 'Cadastro de Pontos' and contains several input fields for point registration: 'Coordenada X Rebatida no Plano' (0,000), 'ID Físico' (13), 'Coordenada Y Rebatida no Plano' (0,000), 'Coordenada ALFA' (0,000), 'Coordenada BETA' (0,000), 'Raio Fixo do ponto' (100,000), and 'Comprimento Haste' (38,000). Below these fields are three buttons: 'Novo' (green with a plus icon), 'Salvar' (green with a floppy disk icon), and 'Remover' (red with a minus icon). To the right, there is a 'Cadastro de Vizinhos do Ponto' section with a dropdown menu for 'Adicionar ou remover vizinho' showing '(-92.39 , 0.0)'. Below this is a 'Tabela de vizinhos' table with columns 'ID', 'C. X Rebt.', and 'C. Y Rebt.'. The table lists several points with their respective coordinates. At the bottom of the main window is a 'Tabela de Pontos' table with columns: 'ID', 'C. X Rebatida', 'C. Y Rebatida', 'ID Físico', 'Coordenada Alfa', 'Coordenada Beta', 'Raio Fixo do Ponto', and 'Comprimento Haste'. This table contains a list of points with their full registration data.

ID	C. X Rebatida	C. Y Rebatida	ID Físico	Coordenada Alfa	Coordenada Beta	Raio Fixo do Ponto	Comprimento Haste
267	-27,06	27,06	18	225	45	100	38
270	-27,06	65,33	22	247,5	65,5	100	38
274	0	-92,39	1	90	65,5	100	38
252	0	-70,71	3	90	45	100	38
256	0	-38,27	7	90	22,5	100	38
262	0	0	13	0	0	100	38
268	0	38,27	19	270	65,5	100	38
271	0	70,71	23	270	45	100	38
273	0	92,39	25	270	65,5	100	38
253	27,06	-65,33	4	67,5	65,5	100	38
257	27,06	-27,06	8	45	45	100	38
263	27,06	0	14	0	22,5	100	38
269	27,06	27,06	20	315	45	100	38

Fonte: Autoria própria.

No cadastro de vizinho está intrinsecamente relacionado com a capacidade dos campos magnéticos da rótula física, pois o conceito de vizinho é a capacidade da casca esférica se movimentar de um ponto para outro, e isso não obrigatoriamente é o ponto vizinho imediatamente próximo. Por questões de melhor aproveitamento da simulação,

os vizinhos, nesse caso, serão os pontos imediatamente próximos. Para um caso real é natural que seja assim também, pois aí completa a ideia de que a rótula seria construída a partir de um projeto de construção de máquina elétrica. Esses campos magnéticos seriam dimensionados de uma forma eficiente, mas independente de qual seja o projeto, a intenção da análise do sistema SIRA foi para atender essa diversidade de situações.

Uma vez que o cadastro de pontos está concluído e testado, supõe-se então que, para esta rótula atuadora, não será mais necessário usar esse cadastro novamente a não ser para alterar em manutenção de cadastro de operação. Esse cadastro parte da necessidade de usar o equipamento para gerar um movimento ou um grupo de movimentos sequenciados.

A figura 4.5 apresenta a janela de cadastro de operações e movimentos. Esta simulação proposta o nome de “Teste de Simulação”. O intuito dessa operação é gerar três movimentos como pode ser visto. O primeiro movimento parte do ponto 13 e termina no ponto 10, o intervalo de estado alto de cada ponto é de 200 milissegundos cadastrados como *delay* entre pontos e quando chegar no ponto 10 ele aguardará 2000 milissegundo cadastrado como *delay* final, isso até ir para o movimento seguinte. Fisicamente sair do ponto 13 e chegar ao ponto 10, significa dizer que a casca terá um movimento esférico onde passou por vários pontos saindo do ponto 13 e o ponto 10 e levou um determinado tempo. Esses vários pontos são um resultado de um processamento que é feito a partir do acionamento de uma rotina “gerar arquivo” que é um botão no canto superior direito da janela. O cadastro para esse experimento demandou de tempo aproximadamente 3 minutos.

4.1.2 Resultado computacional

O resultado do experimento é a descrição de vários pontos que traçam o roteiro de movimento da esfera ponto a ponto. Esse roteiro é escrito em forma de protocolo em um arquivo binário gerado pelo SIRA, que será enviado posteriormente a um circuito eletrônico. O arquivo é nomeado pelo o usuário e com isso ele pode salvar informações em arquivos textos remetendo a ideia de que um resultado seria um pacote de operações e sequencias de movimentos que atenderam a um propósito, e quando o usuário precisar novamente dessas operações, não seria necessário mais o uso do SIRA e sim de um programa simples para enviar o conjunto de strings que se encontra dentro do arquivo

e envia pela porta serial do computador. No caso para o experimento de simulação foi desenvolvido um programa que enviará para o circuito, linha a linha, ou seja, *string* por *string* montando as linhas que representam cada movimento cadastrado.

O arquivo de resultado para esse experimento foi gerado com o nome “ResultadoGedea.txt”. que pode ser visto na figura 4.6.

Figura 4.5: Cadastro operação e movimento no experimento

ID	Descrições do movimento	Ponto inicial	Ponto final	Delay entre pontos	Delay final
1	Movimentação 13-10	(0.0 , 0.0)	(-92.39 , 0.0)	200	2000
2	Movimentação 10-25	(-92.39 , 0.0)	(92.39 , 0.0)	500	0
3	Movimentação 25-03	(0.0 , 92.39)	(-27.06 , -65.33)	100	500

Fonte:Autoria própria.

Figura 4.6: Arquivo de resultados

```

P12D100C-38.27,0.0;P11D100C-70.71,0.0;P10D100C-92.39,0.0;T2000
P19D500C0.0,38.27;P23D500C0.0,70.71;P25D500C0.0,92.39;T0
P23D200C0.0,70.71;P19D200C0.0,38.27;P13D200C0.0,0.0;P7D200C0.0,-38.27;P3D200C0.0,-70.71;P2D200C-27.06,-65.33;T0
  
```

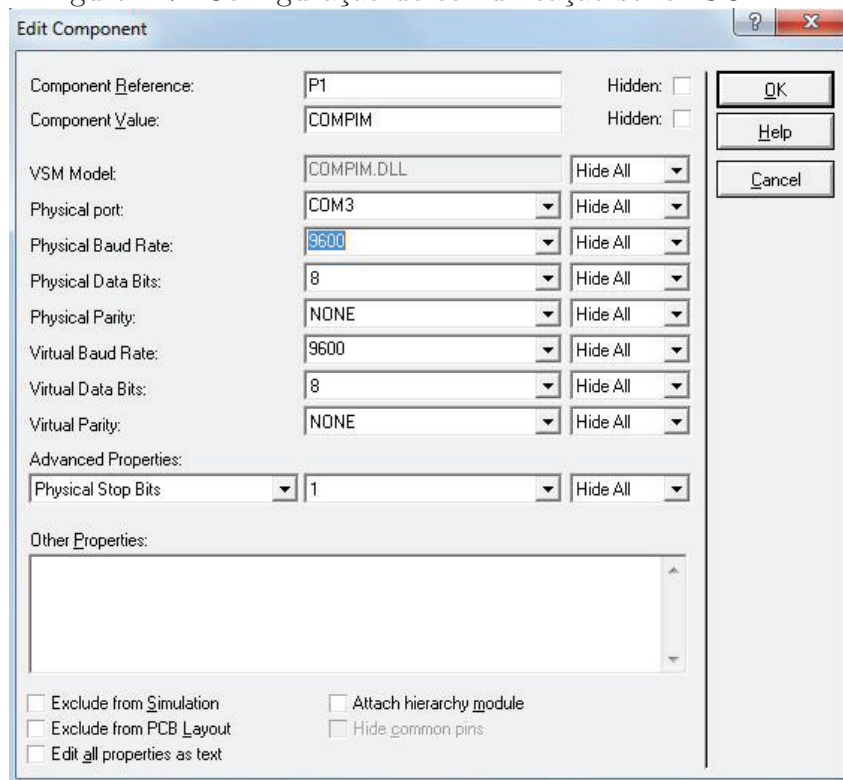
Fonte:Autoria própria.

4.2 Simulação Elétrica e Eletrônica

A simulação eletrônica foi feita em *Proteus ISIS*, simulador em elétrica e eletrônica no qual tem um circuito eletrônico elaborado para receber os dados pela porta serial, interpretar e enviar informações de saídas pelas portas digitais do microcontrolador PIC16F877A. Nessa simulação se fez necessário usar o componente COMPIM que é um componente que o objetivo de plugar na porta serial gerenciada pelo sistema operacional, a porta serial COM3. No entanto essa porta não representa uma porta física do computador, mas sim uma porta emulada por um *software* mencionado anteriormente, que é o VSPE. Para configurar uma porta serial algumas considerações foram impostas ao experimento, a primeira é que foi determinado que a porta serial usada seria a COM3, a taxa de transmissão de um canal em bits por segundo é 9600, dados em 8 bits, nenhuma paridade. Esses dados são comuns ao COMPIM, ao Terminal Serial que é um outro componente do *Proteus ISIS*, e serve de painel de comunicação serial, e com essa ferramenta se analisa o pacote de entrada RX e o de saída TX que passa pela porta USART(serial) do microcontrolador. Por se tratar de um sistema de malha aberta a comunicação entre o programa de envio de dados e o equipamento tem apenas uma via TX para o computador e RX para o equipamento. A configuração pode ser vista na figura 4.7, que é janela de edição de configuração de componente do *Proteus*.

Após a configuração de porta, a simulação prossegue simplesmente em executar dentro do SIRA, o envio de pacotes, e análise da sequência de chaveamento dos LEDs dentro do *Proteus*. O estado inicial é também a posição “zero” do equipamento em que o ponto 13 (topo da semi-esfera) está na posição de acionamento. O programa do *firmware* é escrito em C e compilado no CCS onde então um arquivo ‘Rotula.cof’ que é inserido no componente PIC16F877A. Esse arquivo com extensão “*.cof” é um arquivo gerado pelo compilador CCS e sua função é ser usado em programas de simulação. Arquivo “Rotula.cof” é de fato um arquivo objeto que tem informações em linguagem de máquina e algumas informações relativas a código fonte, para que dentro do simulador *Proteus*, permita usar uma técnica de apoio ao programado, essa técnica é chamada em computação de “debug” que quer dizer depuração e é o mecanismo de encontrar defeitos num aplicativo de *software*, *firmware* ou *hardware*. A figura 4.8 esboça todo o *hardware* em *Proteus* e nele estão todos os componentes necessários ao experimento. O circuito oscilador é indispensável para fazer o microcontrolador funcionar, o *display* é um

Figura 4.7: Configuração de comunicação serial COMPIM

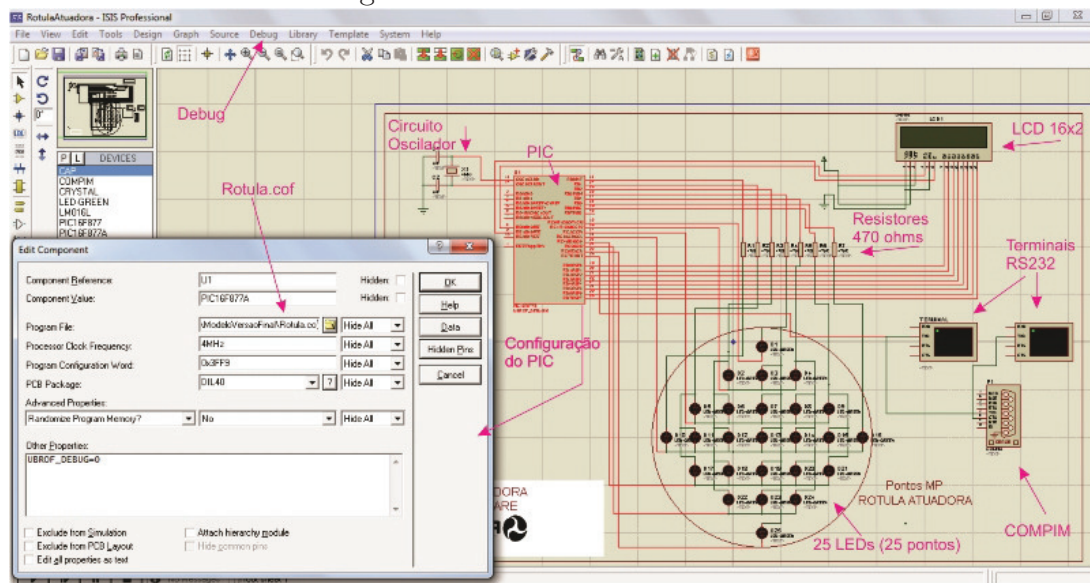


Fonte: Autoria própria.

acessório para informar os estágios da simulação, os terminais RS232 foram introduzidos para informar o conteúdo que chega pela porta serial ao microcontrolador que por sua vez é mostrado como um componente em propriedades de edição onde pode-se notar uma janela de configuração, que tem a informação de origem do arquivo “Rotula.cof”.

Com todos os componentes do projeto em Proteus devidamente parametrizados se inicia a simulação elétrica e o experimento propriamente dito. Ao ligar a simulação no *Proteus*, o *firmware* fica aguardando o pacote de dados protocolado pela porta serial que chega ao PIC por via do pino CRX do PortC do microcontrolador. Em série, esses pacotes são enviados linha por linha, e cada envio de linha(string) é de controle do ensaio. Para a simulação foi necessário enviar os pacotes de forma cadenciada, ou seja, envia uma linha e aguarda o movimento no simulador, e assim sucessivamente até completar todos o pacote. Em condições de equipamento real ou protótipo todos os dados seriam enviados de uma só vez, e na programação do *firmware* contemplaria essa remessa comum algoritmo para receber todos os movimentos. O passo seguinte da interpretação do pacote o programa do PIC processa as informações configura as portas de saídas de acordo com os pontos que se deseja ligar ou desligar. Da forma que o circuito foi montado, repre-

Figura 4.8: Firmware em Proteus



Fonte: Autoria própria.

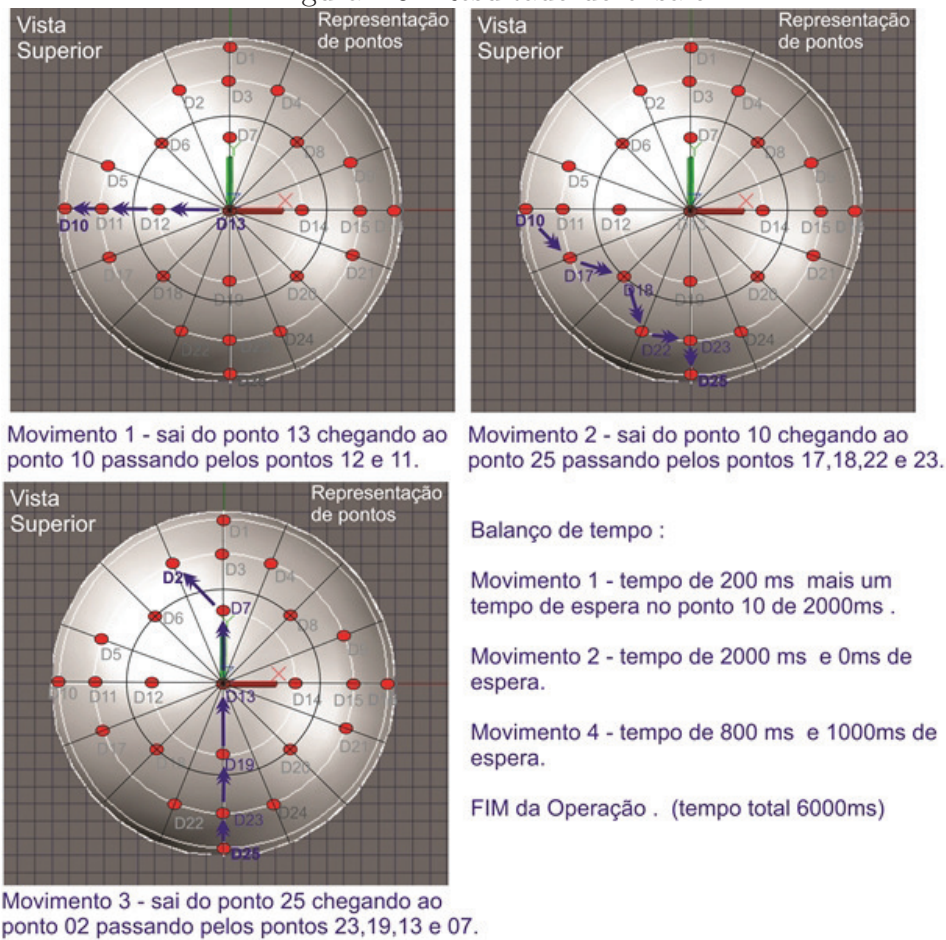
senta a combinação de estado de ligação de dois pinos de saída, são sete pinos do PortC combinados com sete pinos do Port B do PIC. Esse controle de liga e desliga bobina é acompanhada por um controle de tempo de estado de ligação, informação essa que vem no pacote de dados em milissegundo.

No ensaio a figura 4.9 mostra o esperado no sentido de chaveamento dos pontos MP, com um caminho ótimo.

O resultado da simulação eletrônica, representando por três movimentos é mostrado na figura 4.10 e foi organizado da esquerda para a direita, os passos gerados pelo SIRA referente aos movimentos cadastrados e os LEDs verdes mostram os estado de ligação das bobinas. Contando a partir da origem que está no ponto 13. Conta-se então os 13 passos esféricos do início ao fim da operação como foi previsto anteriormente.

A transcrição dos pontos lidos nos programas CADs de projeto para o arquivo de dados pode ser melhorado com um desenvolvimento de um *software* gráfico que pode importar para o banco de dados os pontos da rótula atuadora. Essa transcrição por meio de digitação é um ponto fraco e gerador de erros que podem ser melhorados por meio dessa implementação. O tempo para cadastrar esses pontos do experimento foi de 1h45min. Apesar de que o cadastro de pontos deve ser feito apenas uma vez para cada equipamento, da forma que está requer muita abstração do usuário levando-o a dispor de muito tempo, nesse ponto pode ser melhorado.

Figura 4.9: Resultado do ensaio

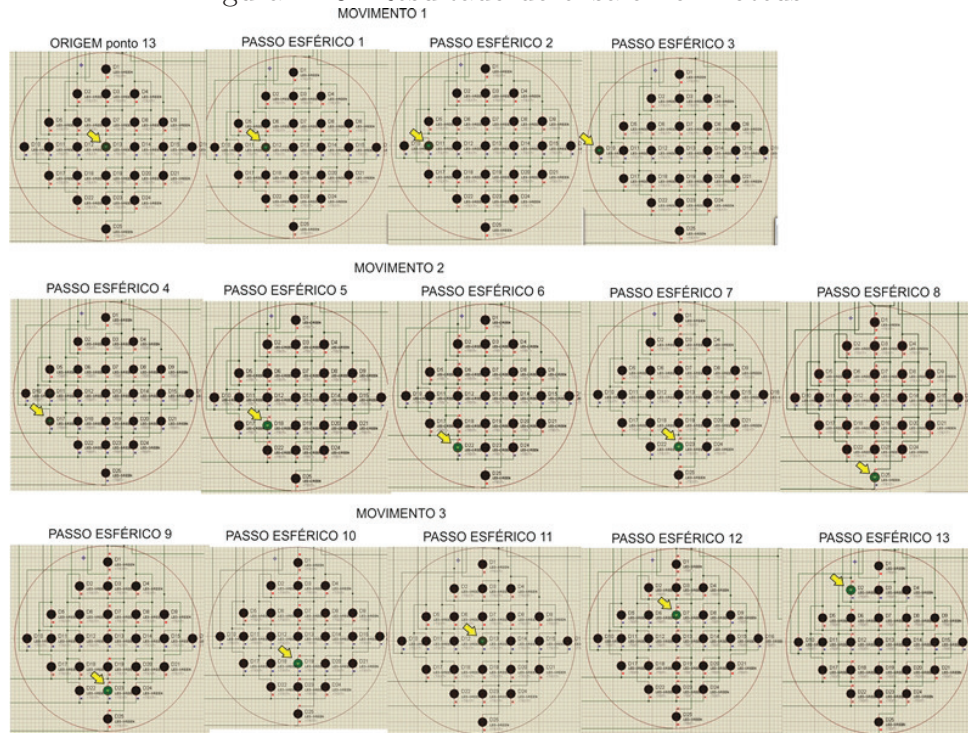


Fonte: Autoria própria.

Outra implementação seria fazer toda a simulação no SIRA, inclusive com recursos gráficos e movimentos em 3D, pois muitas bibliotecas gráficas estão disponibilizada de forma gratuita para o JAVA, com vasta documentação a disposição .

A vantagem de se usar *Proteus* em uma simulação é que para materializar o circuito real de uma aplicação, esse *software* tem recursos destinado a confecção de placas, para isso exporta do modulo *Isis Proteus* para o módulo *Ares Proteus*, em que o usuário define alguns parâmetros como, por exemplo, as dimensões da placa de circuito impresso e com precisão o *software* cria todas as trilhas e ilhas que compões a placa. A sugestão é que para qualquer circuito que se queira criar, sejam utilizados *softwares* profissionais de simulação e prototipagem, *Proteus* é um deles.

Figura 4.10: Resultado do ensaio no Proteus



Fonte: Autoria própria.

4.3 Protótipo da Rótula Atuadora

A execução do serviço de montagem de protótipo passou por vários estágios de construção e reconstrução de componentes. Esse trabalho mostrará acerto, defeitos, adaptações de componentes, melhorias referente a todo o processo construtivo além de sugestões para futura elaboração de protótipos dessa natureza que tenham características elétricas e mecânicas. O experimento físico em uma rótula atuadora é de grande importância para realizar teste e observar respostas relativas a tempo, temperatura, força que não é objetivo exatamente desse trabalho, mas é de vital importância para que faça parte de um projeto construtivo efetivo. Nesse capítulo algumas informações úteis baseada no trabalho de construção de um modelo físico, pode ajudar outros trabalhos de forma substancial.

Quanto ao protótipo será exposto a seguir um equipamento construído baseado no projeto mencionado no capítulo de materiais e métodos, e com isso fazer um balanço do projeto comparando o que foi previsto com o realizado. Em projetos de engenharia, a disponibilidade de construção e de materiais encontrada em uma confecção de máquina faz por onde o projetista adaptar-se as condições e fazer ajustes convenientes aos custos e

a viabilidade de construção, então é comum criar nova documentação de projeto chamado de *As Built*, que é o projeto como construído. Além do protótipo como construído, nessa seção serão abordadas algumas melhorias de concepção da rótula no intuito de conceber um protótipo mais eficiente com observações para o desenvolvedor de protótipos levar em conta antes mesmo de começar um novo trabalho.

4.3.1 Construção do Protótipo

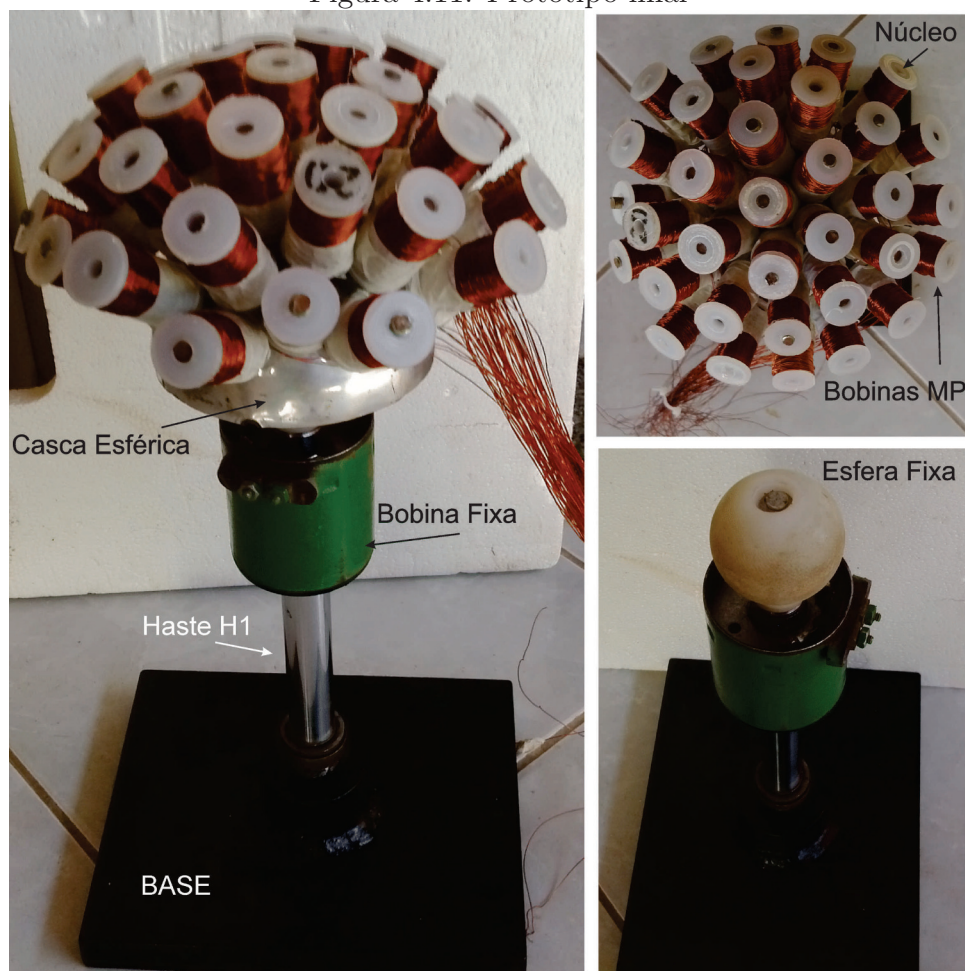
A rótula, assim como construída apresentou no seu desenho poucas mudanças construtivas dos elementos de projeto e o protótipo foi feito de acordo com o previsto e mencionado no capítulo 3. No entanto serão apresentadas mudanças necessárias com justificativas devido a eficiência dos resultados.

O resultado final da construção pode ser visto na figura 4.11, e por uma questão de orientação a rótula foi dividida nos elementos: base, haste H1, esfera fixa, casca, bobina fixa, núcleo de bobinas e bobinas.

O primeiro a ser confeccionado foi a Haste H1, pois seria usada como eixo também para confeccionar a esfera. Não houve qualquer alteração significativa, apenas na fixação da base foi cortada 60 mm apenas para descer o centro de massa da estrutura.

O segundo elemento a ser confeccionado foi a esfera. Depois de esgotadas as tentativas de adquirir uma esfera de mercado com o material tecnil, não magnético, foi criada então, uma ferramenta de torno convencional, para se usinar uma esfera a partir de um cilindro. O ponto metálico, que fica dentro dessa esfera confeccionada representa tão somente o prolongamento da haste H1, e este ponto não ficaria exposto como mostra na figura, então o furo não seria passante na esfera e teria um furo com 0,5 mm de distância para atingir a da superfície, ou seja, apenas uma película separaria a o campo fixo dos pontos MPs. De início foi determinado um diâmetro de 45mm para a esfera porém a ferramenta de usinagem trabalhava bem até o diâmetro máximo de 43 mm, e o fato de diminuir 2mm no diâmetro, não alteraria o resultado final, logo essa foi a primeira mudança de projeto. Ainda na esfera, o serviço de usinagem para o furo não foi fiel aos 0,5 mm de distância da superfície, e o erro foi considerável já que a distância obtida foi mais de 10mm, foi difícil perceber essa diferença já que na primeira parte da confecção da esfera, será colocar o material cilíndrico a ser usinado, fixado permanentemente na haste H1. Quando a esfera foi confeccionada e quando foi ligada pela a primeira vez a bobina,

Figura 4.11: Protótipo final



Fonte: Autoria própria.

não se observou resultado de eficiência e praticamente um isolamento completo de campo magnético. Para a esfera foi feita então o furo passante como pode ser observado na figura 4.12.

A bobina fixa foi confeccionada conforme projeto e pelo o fato de não ter tido resultado satisfatório no quesito intensidade de campo magnético, ela foi descartada e foi substituída por uma bobina solenoide de mercado que é a usada por motores de arranques de motores MWM. Esses solenoides tem dupla função como foi mencionado no capítulo 3, a função de contato de relé foi tirada da solenoide e foi removido também o embolo, ficando apenas a bobina 12V.

O furo interno do centro da bobina, foi reaberto para um diâmetro de $\frac{3}{4}$ de polegada que é o suficiente para encaixar a haste H1. Os contatos da bobina tiveram que ser adaptados já que os contatos originais de fábrica foram removidos juntamente com o

Figura 4.12: Esfera fixa final



Fonte:Autoria própria.

sistema de relé. Isso pode ser observado na figura 4.13.

Figura 4.13: Bobina fixa



Fonte:Autoria própria.

A construção da casca esférica da rótula atuadora partiu de uma esfera plástica de polipropileno, que serviu de molde para ser modelado em massa plástica toda a casca esférica da rótula. Primeiro foi cortada ao meio e foram feitas as distribuições de pontos. Essa distribuição foi feita tendo como base o arranjo de arruelas de 20 mm na superfície da casca. A distribuição das arruelas deu forma a configuração dos pontos de forma que a construção foi feita núcleo por núcleo das bobinas MP começando pelo topo da casca esférica que está representado na figura 4.14. O núcleo que é construído de barras rosca- das M6 são inseridas nos furos da capa de polipropileno até uma atingir a esfera fixa, essa

espessura da casca ficou em 28,5 mm, diferente do projeto que foi previsto 25mm. Internamente e externamente essa barra roscada foi fixada por porca M6 regulada na posição correta, já que esse tipo de montagem propiciou o sistema ter um ajuste de posição.

Figura 4.14: Casca esférica



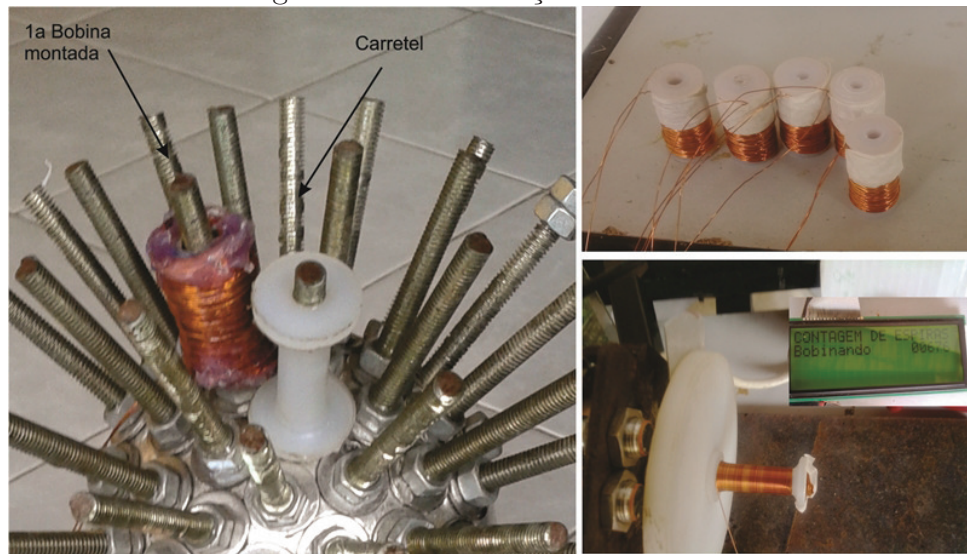
Fonte: Autoria própria.

Seguindo a montagem foi então preenchido de massa plástica epox automotiva o espaço interno da casca esférica. Isso foi realizado com a esfera fixa na posição dela usando um álcool desmoldante de uso comum em resinas epox. Essa estrutura semiesférica com os núcleos montados tem a massa de 414g representando 18,6% da massa total que é de 2.218g, quando montadas as bobinas.

Os últimos elementos construtivos são as bobinas que representam o maior volume de trabalho e são ao todo 34 bobinas para os pontos MPs. O primeiro tipo de bobina a ser feita, foi uma confeccionada a partir de um projeto de construção onde se usou um molde de bobina apropriado para a bobinadeira de pequeno porte e que no final de todo enrolamento, a bobina recebeu uma camada de resina para ficar com sustentação após tirar do molde. O objetivo foi fazer com que a bobina não tivesse um carretel e com isso se teria um melhor aproveitamento do espaço na casca, podendo até ter uma forma cônica para as bobinas. No entanto a forma artesanal fez com que as bobinas tivessem muita irregularidade entre si. Essa imperfeição foi uma razão determinante para confeccionar os carretéis. Os carretéis foram feitos por um torno CNC para que isso garantisse uma boa qualidade e padrão nas bobinas. Na figura 4.15, pode ser visto a primeira bobina, o carretel e as bobinas confeccionadas definitivas.

A quantidade de espiras para essa bobina calculado para fio AWG 26 é $N=879$, para o carretel de 20 x 38 mm e furo de 6mm, resultando 10 camadas de espiras, traba-

Figura 4.15: Construção das Bobinas



Fonte: Autoria própria.

lhando com uma tensão de 5V e uma corrente de 2A. Para fechar todas as 10 camadas o numero de espiras é maior que o calculado ficando $n = 930$ e resistência total da bobina em 2,5 ohms, com massa total montado de 41g .

4.3.2 Considerações de Projeto Relativo ao Protótipo

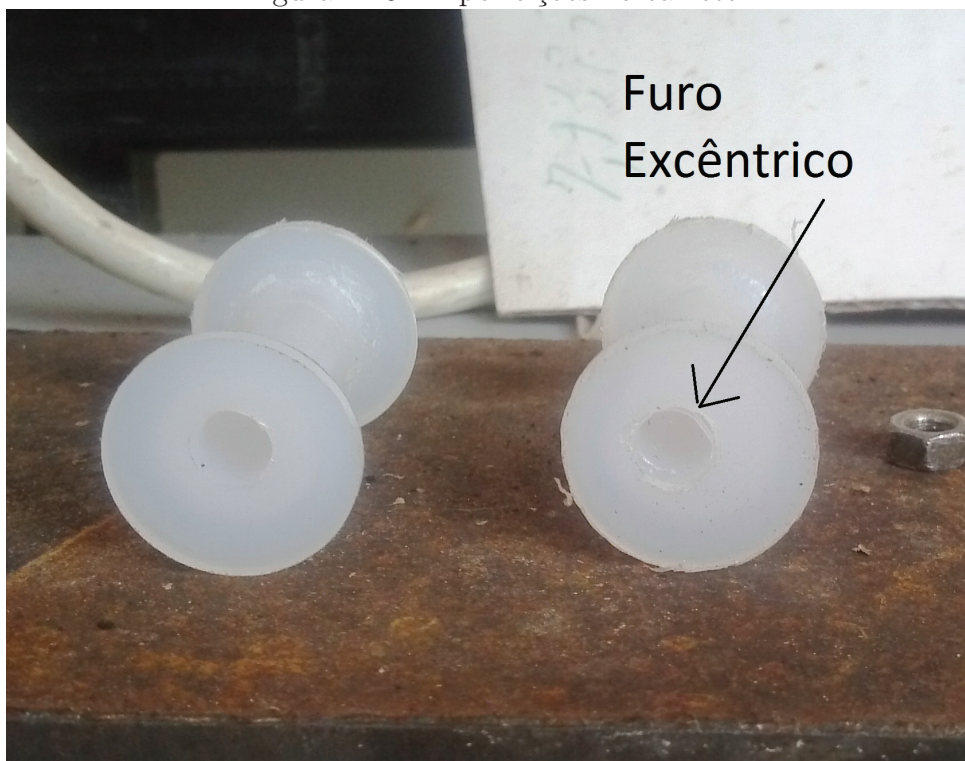
O protótipo não chegou a funcionar com o comando como se esperava, a construção do protótipo teria que passar por uma mudança de projeto para atender as necessidades de comando. Na sua versão final apresentou força de atrações magnéticas satisfatórias mas o seu peso excessivo inviabilizou a sua conclusão no sentido de ser comandado por um sistema de controle. Um grande problema encontrado foi a falta de recursos no sentido construtivo, e aqui serão apontados os principais problemas encontrados:

- As pequenas dimensões dificultaram bastante a confecção, então se conclui que seria mais viável construir uma rótula atuadora com o projeto de bobinas, usando bobinadeiras padrões que se encontram em oficinas prestadoras de serviços dessa natureza.
- Outra dificuldade é o fato de que os carretéis que propositadamente foram construídos em uma máquina de comando CNC, por algum motivo não relevante, não teve padrão construtivo e principalmente o furo do carretel ficou fora de centro. E

a figura 4.16 mostra esse problema. Por isso a montagem na casca esférica ficou muito trabalhosa e sem padrão.

- Um grande erro também foi colocar massa epox para preencher os espaços vazios no interior da casca e contribuiu bastante para o aumento de peso do equipamento.
- Problema estratégico. Se a rótula tivesse menos pontos, faria a mesma função como protótipo que esse com 34 pontos.
- A confecção da esfera é um serviço completamente atípico em usinagem convencional, não foi possível fazer um programa para o torno CNC, então esse foi um problema de início, que poderia ser resolvido como parâmetro inicial de projeto, usar esferas de mercado, são raras para materiais não magnéticos, mas existem.

Figura 4.16: Imperfeições no carretel



Fonte: Autoria própria.

Uma sugestão importante é procurar confeccionar um protótipo bem maior que o proposto nesse trabalho, isso se faz necessário porque será mais fácil encontrar prestadores de serviços.

Como melhoria muita coisa pode ser feita, a primeira seria a mudança em projeto mecânico. Apesar disso ter sido um problema superado nesse trabalho, a esfera

fixa pode ser substituídas por poucos apoios no interior da casca, isso poderia ser feito em forma piramidal triangular ou cônica onde a sua base fosse voltada para a casca esféricas, nos vértices da pirâmide poderia ser montada esferas transferidoras muito comum em robótica e maquinas de comando numérico, com isso garantir o apoio com apenas 3 pontos, isso não só simplifica a confecção. Ainda na esfera fixa o diâmetro do furo pode ser maior para o caso desse protótipo foi visto que poderia ser até mesmo do diâmetro da haste cilíndrica H1.

A confecção da bobina fixa foi mostrada aqui e é totalmente dispensável já que o mercado tem muitos modelos.

As bobinas MPs podem ser bem menores se menor for o peso. Fazer um estudo detalhado de esforços e força eletromotriz e considerar todo o peso é importante porque assim, pode-se determinar com mais precisão o tamanho das bobinas.

Não usar carretéis é importante e inclusive modelar uma bobina de forma cônica, ou seja, criar um molde para enrolamento, depois encapsular com resina ou verniz e desmoldar. Com isso diminui o peso e aproveita mais os espaços.

Usar materiais com melhor permissividade magnética como aço silício para construção dos núcleos das bobinas fixa e móveis. O problema em usar aço silício é o acesso a esse material, pois as empresas que vendem aço-silício só realizam vendas para grandes quantidades.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi visto a simulação em forma de um exemplo elaborado, para esclarecer de forma prática a proposta deste trabalho, que é de criar um controle em alto nível computacional. Mostrou-se o esforço operacional para se conceituar um equipamento eletromecânico e transcreve-lo para uma análise em *software*. Nesse aspecto e em tempo de desenvolvimento foi apresentadas as dificuldades, pois qualquer erro que se tenha no cadastro pode acarretar em resultados não esperados. As sugestões de melhorias aparecem imediatamente ao uso do experimento. Foi citado neste capítulo o cadastro como elemento importante do controle e que requer muita abstração por parte do usuário, mas que futuramente poderá ser melhorado de forma satisfatória. A obtenção do resultado foi observada com sucesso na simulação eletrônica em *Proteus*, e essa simulação pode gerar

um projeto de um driver físico para um suposto equipamento real.

5 Conclusão Geral e Trabalhos Futuros

O resultado deste trabalho foi realizar a demonstração conceitual de um sistema eletromecânico capaz de posicionar e ter domínio de movimentos por controle de uma casca esférica articulada em uma esfera. Chamada aqui de rótula atuadora, trata-se de uma pesquisa de elaboração de produto que se encontra em fase de criação, construção e melhorias. No ponto relacionado a controle o trabalho focou em uma solução criada a partir de recursos computacionais comuns, sendo alguns programas livres.

O motor esférico é, propositadamente, chamado de rótula atuadora, e assim assume a sua característica como um dispositivo ativo de controle de posição, não contemplando estudo de um motor esférico no sentido de características elétricas, mecânicas, campos, transmissão de calor, materiais, rendimentos e etc, mas sim de um controle prático para qualquer motor esférico ou atuador que tiver dentro de reivindicações da patente. No texto da patente, onde se fala dos aspectos construtivos, ele não fecha em um modelo, mas sim em um conjunto de possíveis modelos baseados em pontos magnetizáveis, móveis e fixos, similares à rótula atuadora.

A manufatura de um protótipo serviu para efetivar uma comprovação ao conceito eletromecânico para materializar uma ideia inovadora. Em relação à construção do protótipo, foi satisfatório o aspecto construtivo, mas se observou que para uso como tal, muitas mudanças terão que acontecer, e aqui foram somente sugeridas melhorias e ajustes.

De fato, o trabalho teve o compromisso de deixar, de forma clara, condições de controle real e prático. Esta postura é uma diretriz de primeira relevância da linha de pesquisa, a qual este trabalho procurou assumir desde o início. Para que este trabalho assumisse um controle prático, foi desenvolvido um *software* em alto nível, que alimenta um banco de dados. Este, como resultado, gera um protocolo de comunicação com um circuito microcontrolado, com um PIC16F877A em programação C que, por sua vez, interpreta e atua na casca esférica mediante uma informação pré-cadastrada. Neste aspecto, o trabalho teve resultados, que foram apresentados aqui, mostrando tanto as suas vantagens como as suas desvantagens. Seu intuito foi o de desbravar soluções práticas e conceitualmente legíveis, para que qualquer entusiasta, que siga esta linha de pesquisa,

possa extrair dele resultados importantes para suas pesquisas.

Neste trabalho foram apresentadas estruturas em *software open source*, direcionado a controle computacional. A análise de sistema que existe por trás deste trabalho é aberta, de forma que pode gerar avanços e melhorias por parte de quem queira prosseguir. Aqui foi mostrada a construção de um protocolo aberto, de fácil modelagem, para comunicação serial, bem como foi apresentado um projeto de *firmware* também aberto, para se fazer qualquer circuito de chaveamento de bobinas, seja qual for a configuração de pontos na casca esférica, ou até para qualquer acionamento, de qualquer natureza. O trabalho foi realizado não somente em nível de *software* principalmente, em nível de conceito. Em síntese, este trabalho oferece alguns caminhos seja na construção de protótipos desta natureza, seja na construção de solução computacional em alto nível para controle de máquinas elétricas.

Para futuros trabalhos, este trabalho pode sugerir:

- Estudo de associação de rótulas atuadoras visando estudos em mecanismos e cinemática.
- Estudo de controle em malha fechada para uso da rótula em alguma aplicação de controle com realimentação.
- Estudos de refinamento de controle, com modulação de campos magnéticos, para determinar posições precisas em uma geometria esférica.
- Estudo de um sistema embarcado em ARM, que contempla todos os recursos de computação e microcontrolador em um só dispositivo, tornando a solução para ser embarcada em um equipamento.
- Estudo de controle computacional com teoria de grafos para contemplar obstáculos em um movimento.

Referências Bibliográficas

AOYAGI, M.; BEEBY, S. P.; WHITE, N. M. A novel multi-degree-of-freedom thick-film ultrasonic motor. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 49, n. 2, p. 151–158, 2002.

BAI, K.; JI, J.; LEE, K.-M.; ZHANG, S. A two-mode six-dof motion system based on a ball-joint-like spherical motor for haptic applications. *Computers & Mathematics with Applications*, Elsevier, v. 64, n. 5, p. 978–987, 2012.

BARRIENTOS, A.; PEÑIN, L. F.; BALAGUER, C.; ARACIL, R. *Fundamentos de robótica*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1997.

BARROS, R. A.; GOMES, P. M. E.; WAGNER, E. R.; RIBEIRO, C. H. Implementação de uma técnica de roteamento para robôs móveis autônomos. 2002.

CCS. *The Source for PIC MCU Development*. 2013. Disponível em: <<http://www.ccsinfo.com/>>.

CHIRIKJIAN, G. S.; STEIN, D. Kinematic design and commutation of a spherical stepper motor. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, IEEE, v. 4, n. 4, p. 342–353, 1999.

DATE, C. J. *Introdução a sistemas de bancos de dados*. [S.l.]: Elsevier, 2004.

FÁBIO, P. Microcontroladores pic–programação em c. *Editora Erica, São Paulo*, 2003.

INVENTOR, A.; TOOLING, A. I. Autodesk®. *San Rafael, California, USA*, 2009.

JAVA, I. os tipos de aplicações. Conhecendo a linguagem de programação java. 2006.

JUNIOR, A. d. R. P. *Noções de geometria descritiva–v. 1*. [S.l.]: NBL Editora SA, 1983.

LABCENTER. *Proteus ISIS*. 2013. Disponível em: <<http://www.labcenter.com/index.cfm>>.

NAGASAWA, H.; HONDA, S. et al. Development of a spherical motor manipulated by four wires. In: *Proceedings of American Society for Precision Engineering*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 22, p. 219–221.

NETO, J. G. V. Um espectrômetro microcontrolado baseado em led branco como fonte de radiação e mídia de cd como grade de difração. 2008.

NICOLATO, F. Estudo e implementação de um método de cinemática inversa baseado em busca heurística para robôs manipuladores: aplicação em robôs redundantes e controle servo visual. Biblioteca Digital da Unicamp, 2007.

NIEDERAUER, J. *Integrando PHP 5 com MySQL*. [S.l.]: Novatec, 2005.

NORTON, R. L. *Cinemática e dinâmica dos mecanismos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2010.

ÖNER, Y. A permanent magnet spherical rotor design and three dimensional static magnetic analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 137, n. 2, p. 200–208, 2007.

PARK, H.; GO, S.; LEE, H.; LEE, J. Dqp vector control method with shaft response factor on 3-dof 4 poles spherical pm motor. In: IEEE. *Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2012. p. 623–628.

SANTOS, A.; ALVES, M. F. Sistema de arranque. 2009.

SCHILDT, H.; COWARD, D. *Java: The Complete Reference*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011.

SILVA, J. P. da. Apostila de eletrônica de potência. 2000.

SLOSS, A.; SYMES, D.; WRIGHT, C. *ARM System Developer's Guide: Designing and Optimizing System Software*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2004.

SU, H.; COLLINS, C.; MCCARTHY, J. Classification of rrss linkages. *Mechanism and machine theory*, Elsevier, v. 37, n. 11, p. 1413–1433, 2002.

VALDES-PEREZ, F. E.; PALLAS-ARENY, R. *Microcontrollers: fundamentals and applications with PIC*. [S.l.]: CRC Press, 2009.

VSPE. *Virtual Serial Ports Emulator*. 2013. Disponível em:

<<http://www.eterlogic.com/Products.VSPE.html>>.

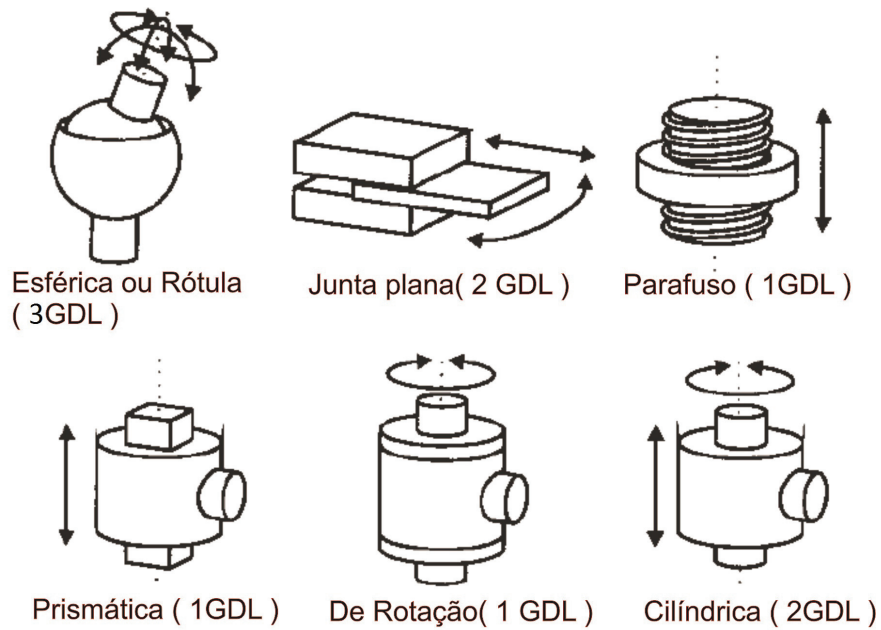
WILLIAMS, F.; LAITHWAITE, E.; EASTHAM, J. Development and design of spherical induction motors. *Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering*, IET, v. 106, n. 30, p. 471–484, 1959.

WU, T.-L.; CHEN, J.-H.; CHANG, S.-H. A six-dof prismatic-spherical-spherical parallel compliant nanopositioner. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 55, n. 12, p. 2544–2551, 2008.

YAN, L. *Design, Modeling and Experiments of 3-DOF Electromagnetic Spherical Actuators*. [S.l.]: Springer, 2011.

I Juntas Mecânicas

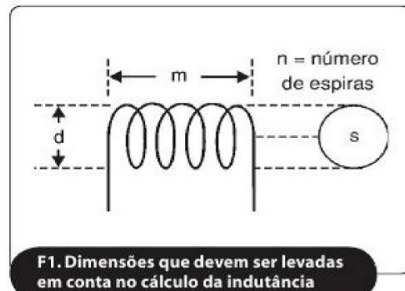
Figura I.1: Grau de liberdade



Principais Juntas empregada na robótica

A Planilha de Dimensionamento de Bobina

Cálculo de resistência



$$L = 1,257 \times (n^2 \times S) / (10^8 \times m)$$

Onde:

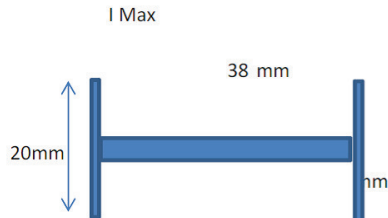
L = indutância em henry (H)

N = número de espiras

S = área da seção transversal da figura em cm²

m = comprimento do enrolamento em cm

Resist. AWG 26 U,05 Ohms/m
0,00005 Ohms/mm
diâmetro= 0,405 mm



Numero de espiras por camada =

V= 5 V
I= 2 A
R= 2,5 Ohms

Diametro Nucleo = 6 mm
Compr. do Nucleo= 38 mm

Comp/Espira= 56,83185 mm

Resist. Por espiras= 0,002842 Ohms
Obs (6mm)

Quantidade de Espiras 879,7883

	L cond.	Resist.	Acum	Espiras
	mm	Ohms	Ohms	Acumuladas
0				
1	118,3281	0,005916	0,005916	93
2	236,6562	0,011833	0,017749	186
3	354,9843	0,017749	0,035498	279
4	473,3123	0,023666	0,059164	372
5	591,640	0,029582	0,088746	465
6	709,969	0,035498	0,124244	558
7	828,297	0,041415	0,165659	651
8	946,625	0,047331	0,212991	744
9	1064,953	0,053248	0,266238	837
10	1183,281	0,059164	0,325402	930
11	1301,609	0,06508	0,390483	1023
12	1419,937	0,070997	0,46148	1116
13	1538,265	0,076913	0,538393	1209
14	1656,593	0,08283	0,621222	1302
15	1774,921	0,088746	0,709969	1395
16	1893,249	0,094662	0,804631	1488
17	2011,577	0,100579	0,90521	1581
18	2129,906	0,106495	1,011705	1674
19	2248,234	0,112412	1,124117	1767
20	2366,562	0,118328	1,242445	1860
21	2484,890	0,124244	1,366689	1953
22	2603,218	0,130161	1,49685	2046
23	2721,546	0,136077	1,632928	2139
24	2839,874	0,141994	1,774921	2232
25	2958,202	0,14791	1,922831	2325
26	3076,530	0,153827	2,076658	2418
27	3194,858	0,159743	2,236401	2511
28	3313,186	0,165659	2,40206	2604
29	3431,515	0,171576	2,573636	2697

Tabela de Conversão de AWG para Milímetros				
AWG	Ø	Área	Resistência do	Corrente
	(mm)	(mm²)	fio de cobre a 20 °C	(Amperes)
0	11,7	107	0,000161	380
000	10,4	85,0	0,000203	328
00	9,26	67,4	0,000256	283
0	8,25	53,5	0,000323	245
1	7,35	42,4	0,000407	211
2	6,54	33,6	0,000513	181
3	5,83	26,7	0,000647	158
4	5,19	21,1	0,000815	135
5	4,62	16,8	0,00103	118
6	4,11	13,3	0,00130	101
7	3,66	10,5	0,00163	89
8	3,26	8,36	0,00206	73
9	2,91	6,63	0,00260	64
10	2,59	5,26	0,00328	55
11	2,30	4,17	0,00413	47
12	2,05	3,31	0,00521	41
13	1,83	2,62	0,00657	35
14	1,63	2,08	0,00829	32
15	1,45	1,65	0,0104	28
16	1,29	1,31	0,0132	22
17	1,15	1,04	0,0166	19
18	1,02	0,823	0,0210	16
19	0,912	0,653	0,0264	14
20	0,812	0,518	0,0333	11
21	0,723	0,410	0,0420	9
22	0,644	0,326	0,0530	7
23	0,573	0,258	0,0668	4,7
24	0,511	0,205	0,0842	3,5
25	0,455	0,162	0,106	2,7
26	0,405	0,129	0,134	2,2
27	0,361	0,102	0,169	1,7
28	0,321	0,0810	0,213	1,4
29	0,286	0,0642	0,268	1,2
30	0,255	0,0509	0,339	0,86
31	0,227	0,0404	0,427	0,7
32	0,202	0,0320	0,538	0,53
33	0,180	0,0254	0,679	0,43
34	0,160	0,0201	0,856	0,33
35	0,143	0,0160	1,08	0,27
36	0,127	0,0127	1,36	0,21
37	0,113	0,0100	1,72	0,17
39	0,0897	0,00632	2,73	0,11
40	0,0799	0,00501	3,44	0,09