



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica - UAEE

Relatório das Atividades de Estágio Desenvolvidas no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle - LIEC

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Relatório das Atividades de Estágio

Campina Grande
30 de março de 2011

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Relatório das Atividades de Estágio Desenvolvidas no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle - LIEC

Relatório das atividades desenvolvidas durante o período de estágio, submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Instrumentação Eletrônica

Prof. D.Sc. José Sergio da Rocha Neto
Orientador

Sumário

1	Introdução	4
2	Ligas com Memória de Forma	5
2.1	Ativação Elétrica da Liga com Memória de Forma (LMF)	8
2.2	Aplicações com LMF	9
3	Plataforma Bípede (Sensoreamento)	14
4	Sensores	18
4.1	Potenciômetro	18
4.2	Acelerômetro	19
4.2.1	Comunicação I ² C	22
5	Atuadores e Circuitos de Comando	25
6	Conclusão	27

Lista de Figuras

1	Diagrama representativo do efeito de memória de forma na LMF. . . .	7
2	Gráfico comparativo entre atuadores.	11
3	Fotografia da plataforma robótica bípede.	14
4	Estrutura do quadril.	15
5	Estrutura do joelho.	16
6	Variação angular das articulações.	17
7	Circuito do potenciômetro.	18
8	Potenciômetro ligado ao eixo de rotação do joelho.	19
9	Fotografia da placa de interface do acelerômetro.	20
10	Circuito do acelerômetro.	21
11	Comunicação I ² C.	23
12	Circuito de atuação das LMF.	26

Lista de Tabelas

1	Desempenho do ciclo de vida da LMF.	12
2	Descrição dos pinos do LIS 302 DL.	22

1 Introdução

Neste relatório abordam-se as atividades desenvolvidas durante o período de estágio (início de agosto ao fim de fevereiro, totalizando 400 horas), o qual foi realizado no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC), laboratório este pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica (UAEE) da Universidade Federal de Campina Grande. O LIEC é um laboratório que se destina a pesquisa, possuindo sete laboratórios que são: Automação Industrial; Controle e Otimização; Aplicações Wireless; RFID; Instrumentação Eletrônica; Redes Industriais; UltraSom. O LIEC possui diversas parcerias que investem no desenvolvimento de projetos ligados as áreas de pesquisa citadas anteriormente, estas parcerias promovem o suporte necessário para a realização dos trabalhos no laboratório. O LIEC ainda dispõe de salas para os professores vinculados aos projetos e para alunos de pós-graduação e graduação, dispõe também de salas modernas de multimídia. Os laboratórios possuem plataformas de testes destinadas ao uso dos alunos durante as pesquisas. Assim, o LIEC é um ambiente destinado à pesquisa no ramo de instrumentação eletrônica e controle, propiciando salas modernas e um ambiente agradável para trabalhos de pesquisa.

Neste trabalho foi realizado o estudo em conjunto com o aluno de doutorado Walter Valenzuela, que é professor da Universidade Estadual do Amazonas (UEAM), propiciando o suporte eletrônico para a construção de um robô bípede, este robô tem seus movimentos estabelecidos pela liga com memória de forma (LMF), a qual é utilizada como atuador. Neste relatório será realizada ainda a descrição de como foi feito este apoio técnico utilizando os circuitos sensores e o treinamento da liga com memória de forma (LMF).

Para este trabalho são utilizados como sensores: um potenciômetro e um acelerômetro digital. E como atuador, duas amostras de LMF, ambas do mesmo material, o nitinol, porém de comprimentos distintos. No total, teremos oito fios de LMF atuados. As LMF não são atuadas todas de uma só vez, existe uma sequência de atuação para então propiciar o movimento para o robô bípede.

2 Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma possuem características interessantes, pois estes materiais são ligas metálicas e diferentemente dos demais metais, que sofrem dilatação térmica, as LMF ao sofrerem aquecimento não apresentam dilatação e sim contração de sua forma, este comportamento curioso garante o efeito de memória de forma, e a sua utilização como atuador térmico. O aquecimento pode ser conseguido de diversas maneiras, porém neste trabalho é feito a partir de corrente elétrica.

O uso de LMF requer um planejamento bem executado, pois tal material possui características de interesse que nem sempre o fabricante informa, dentre estas características temos as tensões de formação e reversão de martensita durante a transformação de fase sob a ação de cargas mecânicas. Assim o conhecimento do comportamento termomecânico das amostras de LMF garantem um melhor uso deste material.

As Ligas com Memória de Forma (LMF) ou do inglês *Shape Memory Alloy* (SMA) possuem a característica de retornarem a sua forma, que antes tenha se determinado, após sofrerem aquecimento. O aquecimento pode ser provocado por: efeito *Joule*; convecção natural ou forçada; radiação solar. As LMF constituem uma classe de compostos metálicos que possuem a capacidade de desenvolver e recuperar deformações relativamente grandes podendo alcançar em torno de 8% sem apresentar deformações plásticas. Esta característica é devida, em grande parte, à capacidade que estes materiais possuem de desenvolver transformações de fase na presença de tensão mecânica aplicada e/ou variações de temperatura. Estas transformações são da fase austenítica, no estado livre de tensões e altas temperaturas, para diversas variantes da fase martensítica a temperaturas mais baixas que a da fase austenítica. Embora estes materiais possam ser considerados como uma tecnologia emergente, vários deles já são comercialmente disponíveis na forma de fios, tubos, chapas e barras e têm sido usados em aplicações diversas na engenharia e biomédica [Valenzuela,2005].

Estes materiais são destinados a muitas aplicações industriais, sendo utilizado como atuadores lineares. Assim a LMF utilizando de sua contração de movimento tem seu uso abrangente no campo da robótica, pois se trata de um atuador leve e silencioso. As LMF são capazes de suportar grandes quantidades de carga mecânica em comparação ao seu pequeno volume. Como as LMF desenvolvem relativamente grandes esforços em relação ao seu peso, também podemos relatar o seu baixo custo, em relação aos

atuadores convencionais, como motores elétricos por exemplo. E diferentemente destes atuadores a LMF tem o seu funcionamento silencioso.

As LMF possuem dois comportamentos um denominado efeito de memória de forma e o outro de efeito de superelasticidade. O efeito de memória de forma ocorre quando o material é submetido a uma tensão mecânica, esta tensão atinge o limite da região plástica, sem sofrer deformação definitiva, e ao retirar esta tensão mecânica a LMF possui uma deformação residual (ϵ_r). Esta deformação é recuperada por meio de aquecimento, e este aquecimento pode ser de origem elétrica, através de corrente elétrica, ou mesmo através diretamente do aumento de temperatura por meio de algum dispositivo térmico. O outro efeito, o de superelasticidade, ocorre quando a LMF submetido a altas temperaturas, temperaturas acima da temperatura de transformação, a LMF recupera a sua forma original quando ocorre o descarregamento. A deformação sofrida neste caso pode atingir grandes valores, alcançando algo em torno de 8% do seu comprimento [Valenzuela,2007].

As LMF possuem quatro temperaturas de transformação, duas da fase martensita e duas da fase austenita. Estas temperaturas indicam o grau de fração presente no material. A primeira transformação é obtida pelo resfriamento do material, resfriamento este que é realizado sem a aplicação de carga mecânica na LMF, e a temperatura abaixo da temperatura de martensita inicial M_s . Este processo de resfriamento proporciona uma transformação de estado martensita, estado que exibe variantes múltiplas. O resfriamento ocorrendo abaixo da temperatura de martensita final M_f produz uma completa transformação de fase, formando as martensitas de variantes múltiplas. Porém se a LMF estiver sob a ação de uma carga mecânica a transformação é denominada de martensita de variante simples.

Os compostos de liga com memória de forma fazem parte da inovação tecnológica, tais compostos oferecem muitas vantagens como mecanismo de atuação, possui baixo peso, baixo volume. É capaz de desenvolver grande força visto o seu volume. Assim surgiu a condição de se utilizar a LMF em mecanismos de atuação, principalmente aqueles que necessitem de atuação linear. Porém as ligas possuem alguns inconvenientes e estes inconvenientes estão relacionados com a não-linearidade. A LMF apresenta um comportamento histerético, ou seja, apresenta histerese em seu ciclo, esta histerese se apresenta pelo fato das mudanças de transições de fase. Assim na Figura 1 pode-se observar este comportamento por meio de um ciclo completo, onde são alcançadas as temperaturas de transições de fase.

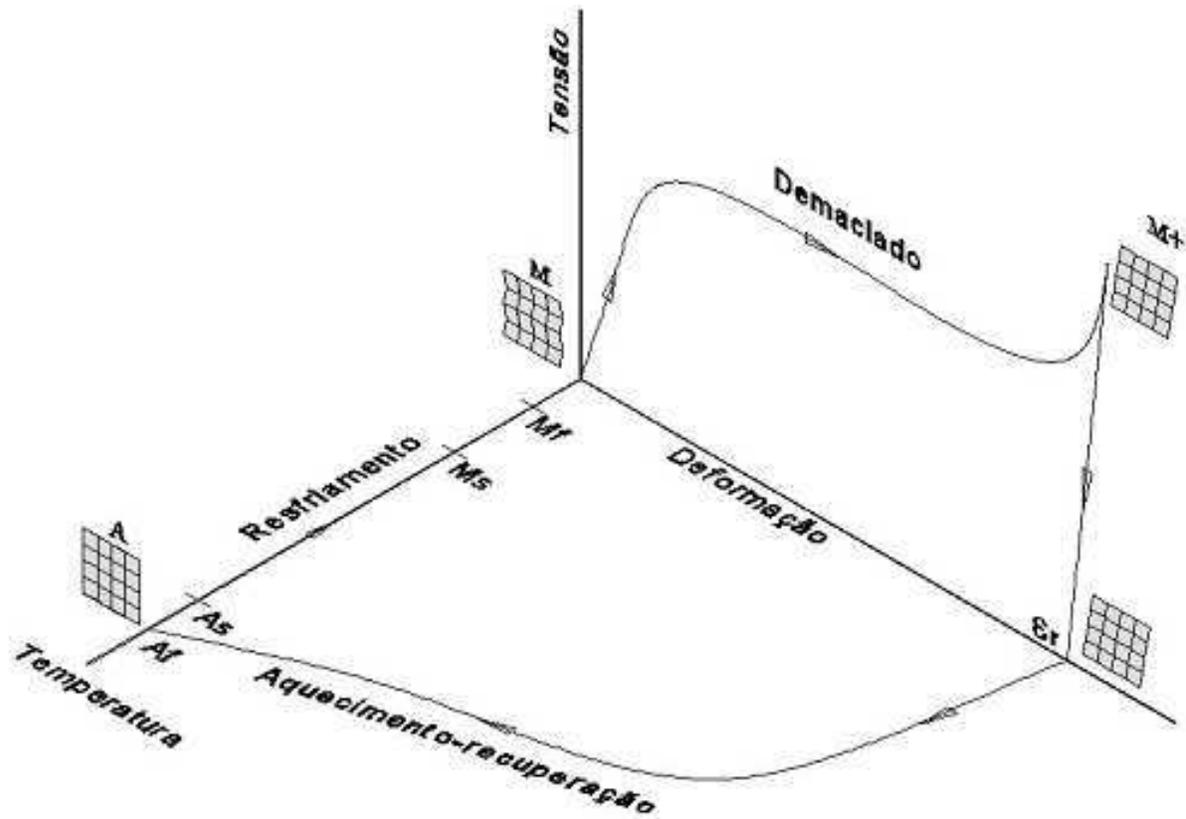


Figura 1: Diagrama representativo do efeito de memória de forma na LMF.

A Figura 1 representa o ciclo de histerese típico da LMF, este ciclo pode ser dividido em quatro partes. Inicialmente o material se encontra em estado martensítico e através da aplicação de uma força, com a temperatura constante, sobre a amostra de LMF o mesmo alcança um estado de tensão martensítica crítica, que produz a transformação de fase. Nesta fase o material está em regime elástico. A partir do estado de tensão martensítica crítica o material inicia a transformação de fase passando assim a estar na fase martensítica decaída, onde o material tem um arranjo mais organizado. Na parte seguinte, a de diminuição da tensão mecânica até que a mesma seja nula, o material assume uma deformação residual (ϵ_r) e o material está em completo estado martensítico e assume o estado linear-elástico. Na quarta parte o material sofre o aquecimento e este aquecimento ocorre acima da temperatura de transformação de austenita (A_f). Este aquecimento deve ser realizado com tensão mecânica nula e ao atingir a temperatura de transformação (A_s), a quantidade de martensita se torna bem reduzida. No fim do aquecimento, atingindo a temperatura final de austenita (A_f) o material se torna

completamente austenítico.

2.1 Ativação Elétrica da Liga com Memória de Forma (LMF)

Quando falamos de LMF temos dois aspectos que são de grande importância para as aplicações deste material, estes aspectos são: as deformações submetidas as LMF; e as temperaturas de transformações de fase. Em muitos casos a temperatura é controlada através do uso de resistências elétricas utilizadas para o aquecimento de um líquido de silicone, porém esta resistência aquece o líquido e por condução térmica a amostra de LMF, proporcionando a mudança de fase. Porém este uso necessita de um controle total da temperatura do líquido, pois o mesmo pode apresentar baixa uniformidade no aquecimento e assim a LMF não ficar submetida a mesma temperatura em seu comprimento total.

No entanto se ao invés de usarmos uma resistência elétrica, utilizarmos corrente elétrica na LMF, podemos garantir que toda a LMF estará submetida a mesma temperatura e dessa forma garantir a recuperação de forma. Porém deve-se utilizar da lei de conservação de energia para garantirmos que tal valor de corrente elétrica promova um determinado valor de temperatura. O modelo mais comum de transferência de calor é o efeito *Joule*. A corrente elétrica aplicada na LMF deve fazer com que a recuperação de forma seja possível, assim temos que primeiramente determinar que corrente garanta a recuperação de forma. Este valor de corrente elétrica tem relação com características físicas da LMF, como: comprimento; diâmetro; resistência elétrica; dentre outras grandezas. Assim temos que quando a amostra está submetida a corrente elétrica constante durante o processo de recuperação de forma a temperatura deste processo pode ser encontrada de acordo com a equação 1 [Valenzuela,2007].

$$T(t) - T_0 = \frac{R}{h_c A_c} (1 - e^{-t/t_h}) i^2 \quad (1)$$

onde:

- T_0 : Temperatura inicial;

- R : Resistência da LMF;
- h_c : Coeficiente convectivo da transformação de calor;
- A_c : Área superficial da LMF;
- i : Corrente elétrica empregada na recuperação de forma;
- t_h : Constante de tempo do processo de transferência de calor.

Esta equação indica como a temperatura varia com a corrente elétrica e fazendo o termo exponencial chegar à zero temos o valor de temperatura estável da transformação. E a equação se torna a equação 2, apresentada a seguir[Valenzuela,2007].

$$T(t) = \frac{R}{h_c A_c} i^2 + T_0 \quad (2)$$

Utilizando este estudo do comportamento da LMF podemos estimar através dos estímulos por corrente elétrica o comportamento da atuação da LMF e assim determinar a energia utilizada para a recuperação de forma. Dessa forma pode-se determinar a potência elétrica requerida pela LMF e assim termos um projeto devido para os circuitos elétricos que servirão de apoio a atuação elétrica das LMF.

2.2 Aplicações com LMF

As aplicações de ligas com memória de forma são diversas, estão presentes em muitos campos da engenharia, da medicina, na robótica e etc. E ainda há espaço para mais crescimento, substituindo os atuadores convencionais por atuadores de LMF. As ligas com memória de forma são atuadores lineares de grande qualidade, pois com seu baixo

volume pode ser capaz de desenvolver grandes quantidades de força. Neste trabalho temos uma aplicação de LMF, o uso como atuadores de trajetória linear, assim substituindo os músculos, ou seja, criando músculos artificiais. E justamente esta análise se deve ao seu poder de recuperação de forma. O uso de LMF em sistemas robóticos ainda estão em estudo, mas já tem-se muitas atividades sendo desenvolvidas.

Dentre os materiais com memória de forma se destaca o nitinol, que é uma liga metálica constituída de níquel (55% - 56%) e titânio (44% - 45%), este material possui propriedades vantajosas quando comparados com outros materiais do mesmo tipo. Eles apresentam maior deformação residual, maior estabilidade térmica e excelente resistência à corrosão. E estas ligas de memória de forma a base de níquel e titânio (Nitinol), apresentam grande uso na robótica. Sendo usadas como atuadores lineares, e justamente neste trabalho de estágio o uso deste atuador é voltado para a atuação da plataforma bípede.

Estes atuadores possuem grande futuro, mas ainda precisam de mais estudos para serem consagrados. Porém fazendo uma análise comparativa sobre o seu desempenho com atuadores consagrados no mercado, vemos que as LMF apresentam várias vantagens aos demais. A LMF se trata de um atuador leve, possuindo uma relação força-volume grande, possuem a condição de desenvolver boas velocidades de atuação e propiciam um bom alcance e ainda fazem isso sem gerar ruído.

Os atuadores convencionais além de serem pesados, muitos não possuem um rendimento adequado. Alguns funcionam em velocidades altas, o que acarreta a dificuldade do uso de engrenagens de redução de velocidade para permitir os torques necessários. Estes atuadores podem ser do tipo: elétrico; hidráulico; pneumático. Estes atuadores possuem grande complexidade de uso, visto o seu grande tamanho, ou até mesmo a sua complicação de funcionamento. Na Figura 2 temos um gráfico comparativo entre alguns tipos de atuadores.

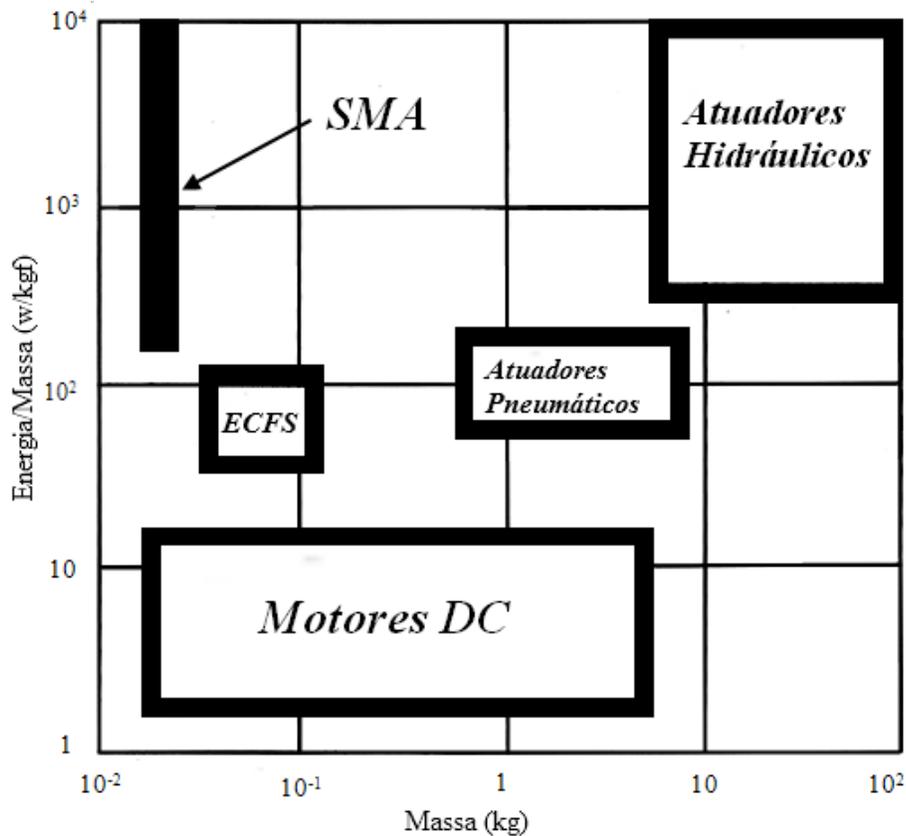


Figura 2: Gráfico comparativo entre atuadores.

Ao analisarmos o gráfico na Figura 2, temos a ideia da força que a LMF é capaz de exercer, neste gráfico a comparação da LMF com atuadores clássicos mostra o grande poder das LMF. Estes materiais produzem forças que se comparam àquelas de atuadores de grande porte, como os atuadores hidráulicos. Os atuadores pneumáticos possuem peso e força moderados, juntamente com o ECFS que são atuadores de rigidez e força controlados, esses atuadores são baseados em fluídos eletroreológicos. Os atuadores hidráulicos desenvolvem grande força, porém possuem peso consideravelmente alto. Os motores DC possuem massa de baixa a moderada, mas desenvolvem forças de baixa amplitude. Assim temos que os atuadores a base de ligas com memória de forma possuem grande aplicação em sistemas que necessitem de grande forças de atuação, mas que não tenham grande suporte mecânico.

Os formatos que as LMF são mais usados são: em forma helicoidal; ou em forma de fitas delgadas e fios de seção circular. As LMF que possuem a forma de fitas ou fios podem chegar a té deformações da ordem de 8% de seu comprimento, suportam

níveis de tensão mecânica da ordem de 500 MPa, podendo suportar uma carga de até 78000 vezes o seu próprio peso. O seu uso é idealizado para situações onde temos a transformação por tensão mecânica ou por temperatura, proporcionando uma maior amplitude de deformação com pouca variação de temperatura[Valenzuela,2005].

As aplicações utilizando as LMF são extremamente proveitosas, porém existe uma condição relevante no seu funcionamento. Quando uma LMF é submetida a transformação de fase por aquecimento através de corrente elétrica, surge a necessidade de avaliarmos o tempo de resfriamento. Este tempo será o fator que pode limitar qualquer aplicação que necessite de uma maior eficiência de atuação. Alguns fatores podem ajudar a diminuir esta relação de resfriamento, como:

- Uso de LMF na forma de fitas delgadas;
- Diminuição do diâmetro das LMF;
- Utilização de sistemas refrigeradores.

A forma de avaliar as LMF com respeito à sua vida útil, nos permite determinar o grau de confiabilidade destes materiais. As medidas de desempenho afetam as tensões mecânicas, a deformação, a quantidade de ciclos de trabalho. Estes fatores afetam diretamente a vida útil das LMF, as ligas geralmente são projetadas para cumprirem o máximo de deformação, ou seja, o máximo efeito de memória de forma, e estes valores podem ser vistos na Tabela 1 com os valores de tensão e deformação máxima permitida para cada conjunto de ciclos de acionamento.

Ciclos	Deformação Máxima (%)	Tensão Mecânica Máxima (MPa)
1	8	500
100	4	275
10000	2	140
mais de 1000000	1	70

Tabela 1: Desempenho do ciclo de vida da LMF.

A Tabela 1 apresenta valores de ciclos de vida para o nitinol, que é a liga com memória de forma mais amplamente utilizada em sistemas de atuação linear. Para aplicações robóticas a velocidade de atuação bem como a velocidade de resfriamento, tem grande importância, pois os movimentos de locomoção tem a característica de

continuidade. A utilização de corrente elétrica promovendo o aquecimento, possui uma rápida resposta da LMF, porém o resfriamento de acordo com o diâmetro da amostra de LMF pode demorar e assim a continuidade de movimento pode ficar prejudicada. Para isso utiliza-se o controle da corrente elétrica durante o aquecimento aumentando o tempo de atuação da LMF, ou utiliza-se de algum método de resfriamento para a adequação de tempo durante o movimento de caminhada da plataforma bípede, no nosso caso. Há também a possibilidade de se usar LMF de diâmetros mais estreitos, estas LMF se comportam diferentemente das que serão usadas para a construção do robô bípede. As LMF com diâmetro menores apresentam o comportamento de esfriarem mais rápido do que se aquecem, porém se perde em quantidade de força que a LMF suporta. Assim o uso se torna para aplicações de pequeno porte, onde a necessidade de atuação mecânica é baixa.

3 Plataforma Bípede (Sensoreamento)

Este trabalho se destina ao sensoreamento de uma plataforma robótica bípede, esta plataforma pode ser visualizada na Figura 3, e para que os movimentos possam ser realizados necessitamos de sensores para os critérios de decisão serem obedecidos e de um sistema de atuação que faça a estrutura realizar o que se propõe, a caminhada.



Figura 3: Fotografia da plataforma robótica bípede.

A atuação ocorre por meio da ativação da LMF, esta ativação deve ser obedecida seguindo uma lei de predominância, pois o movimento deve ser antagônico. O movimento

da plataforma deve ocorrer de maneira complementar, seguindo algumas sequências estabelecidas. Os procedimentos para a evolução da caminhada são comandados pela atuação das LMF. Foram usados oito LMF, sendo diferenciadas pelo comprimento e diâmetro. Assim quatro possuem 0,29mm de diâmetro e quatro possuem 0,20mm de diâmetro.

A LMF pode então se assemelhar ao músculo e com o devido uso de aquecimento através de corrente elétrica proporcionar movimento. Na plataforma são utilizados oito fios como citado anteriormente, sendo que quatro são utilizados no movimento do quadril como nota-se na Figura 4 e os outros quatro fios são usados nas coxas, que proporcionam o movimento da abertura angular do joelho. Na Figura 5 pode-se verificar a quantidade de LMF utilizadas na coxa da estrutura robótica.

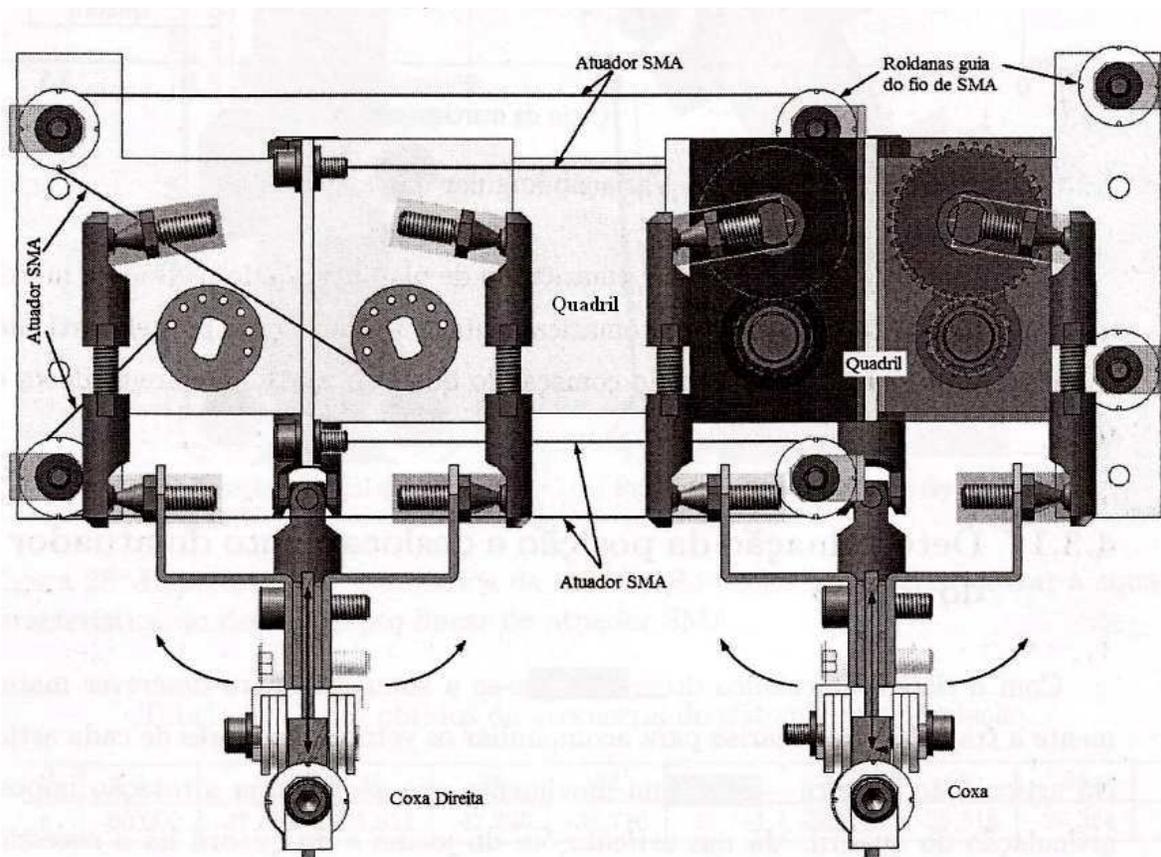


Figura 4: Estrutura do quadril.

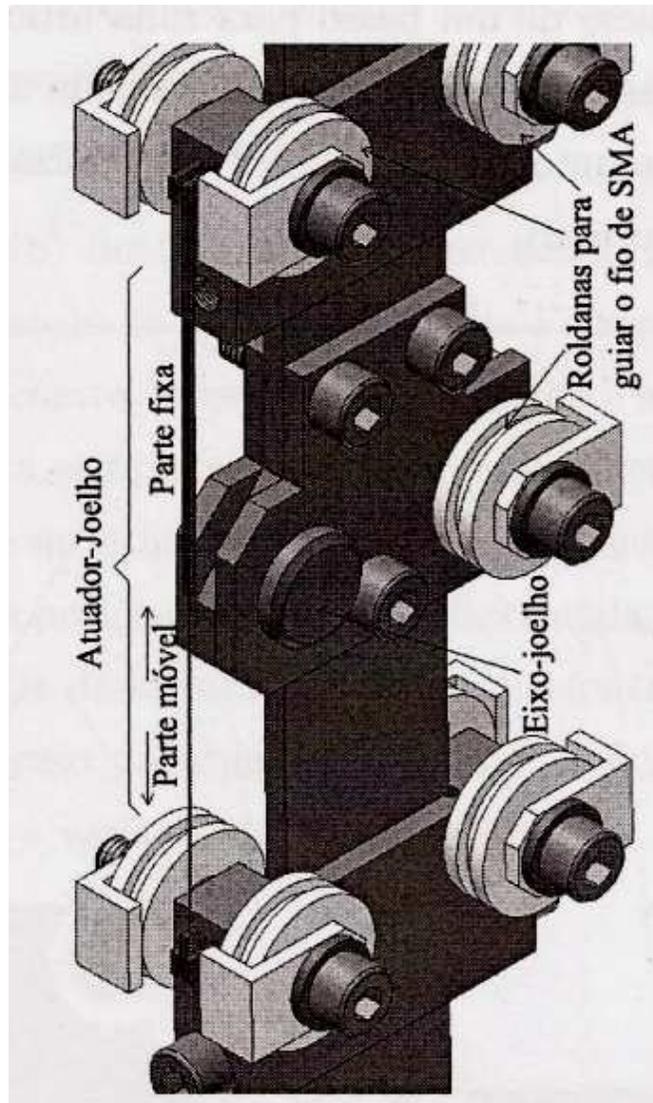


Figura 5: Estrutura do joelho.

As estruturas apresentadas nas Figuras 4 e 5 se utilizam de roldanas que proporcionam uma diminuição do atrito, como também é utilizado o uso de engrenagens que visam garantir o efeito de caminhada.

A plataforma bípede pode proporcionar através da atuação devida das LMF alguns tipos de movimento como: o levantar das pernas; a inclinação lateral; o passo da caminhada. Porém para que estes movimentos possam ser seguros temos a necessidade do uso de sensores, que permitiram a estrutura parar com a devida estabilidade e assim desenvolver o movimento seguinte.

Para que o desempenho seja o mais próximo daquele que é imaginado, necessitamos

compreender como se comporta a estrutura quando a mesma está se movimentando. Os testes foram feitos através de simulações computacionais, os dados que determinam como a caminhada deve ser seguida são apresentados na Figura 6. O projeto de tais estruturas não é o alvo deste relatório, apenas citamos como essas estruturas podem se comportar e como podemos torná-las manipuláveis através da atuação devida da LMF[Valenzuela,2005].

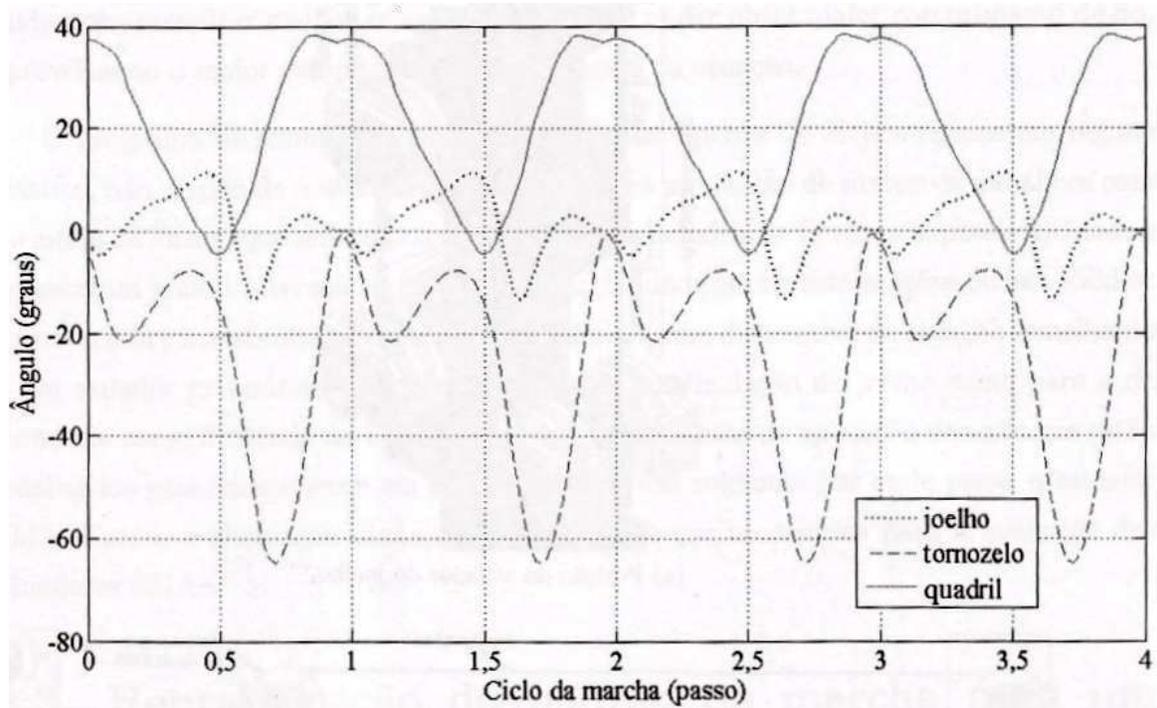


Figura 6: Variação angular das articulações.

4 Sensores

A seguinte definição de sensor é dada por LUECKE: “ Um sensor é um dispositivo que detecta uma quantidade física natural e converte em saídas que os humanos podem interpretar ”[Luecke,2005]. Na plataforma robótica são utilizados dois sensores, um sensor analógico e outro sensor com saída digital.

4.1 Potenciômetro

O sensor analógico é um potenciômetro, que está conectado na articulação do joelho, esta articulação por sua vez necessita de uma determinada abertura angular e quando a LMF for atuada, ou seja, aquecida por corrente elétrica, o potenciômetro varia a sua resistência. Na Figura 7 pode-se ver o circuito utilizado para o sensoramento do joelho.

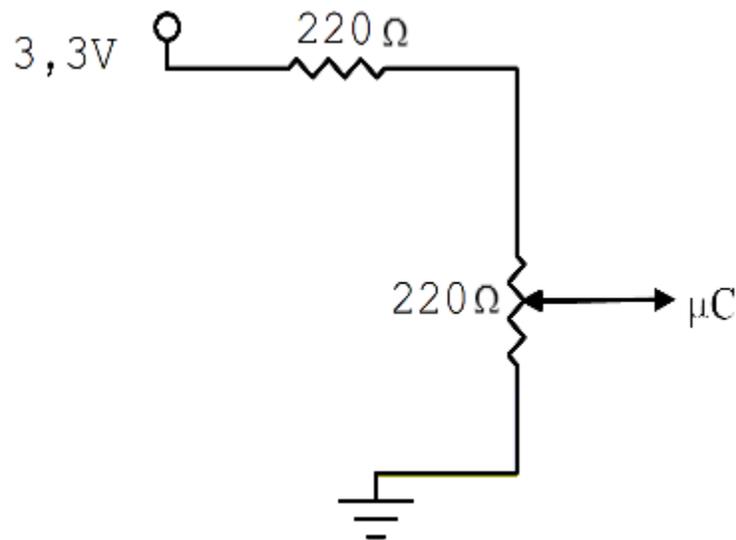


Figura 7: Circuito do potenciômetro.

O circuito consta de um resistor de 220 Ω e o potenciômetro também de 220 Ω, a alimentação é oriunda da placa do microcontrolador, pois a corrente utilizada é muito baixa, assim não temos a preocupação de sobrecorrente e por ventura vir a danificar o microcontrolador. Assim o circuito será um divisor de tensão e como a resistência

é diretamente proporcional ao deslocamento angular que a perna robótica irá efetuar teremos simplicidade de cálculo. Como medida de proteção o sinal que será usado no microcontrolador nunca será maior que os 3,3 V que ele suporta, no entanto ao colocar o potenciômetro no eixo da articulação do joelho, teve-se o cuidado de calibrar o potenciômetro em valores medianos, ou seja, foi deixado como valor de resistência inicial 110Ω . Garantindo assim que o valor lido nunca se aproxime de 3,3 V. Na Figura 8 pode ser visualizada uma fotografia de como o potenciômetro está conectado à articulação do joelho. Este circuito se aplica ao dois joelhos da plataforma robótica.

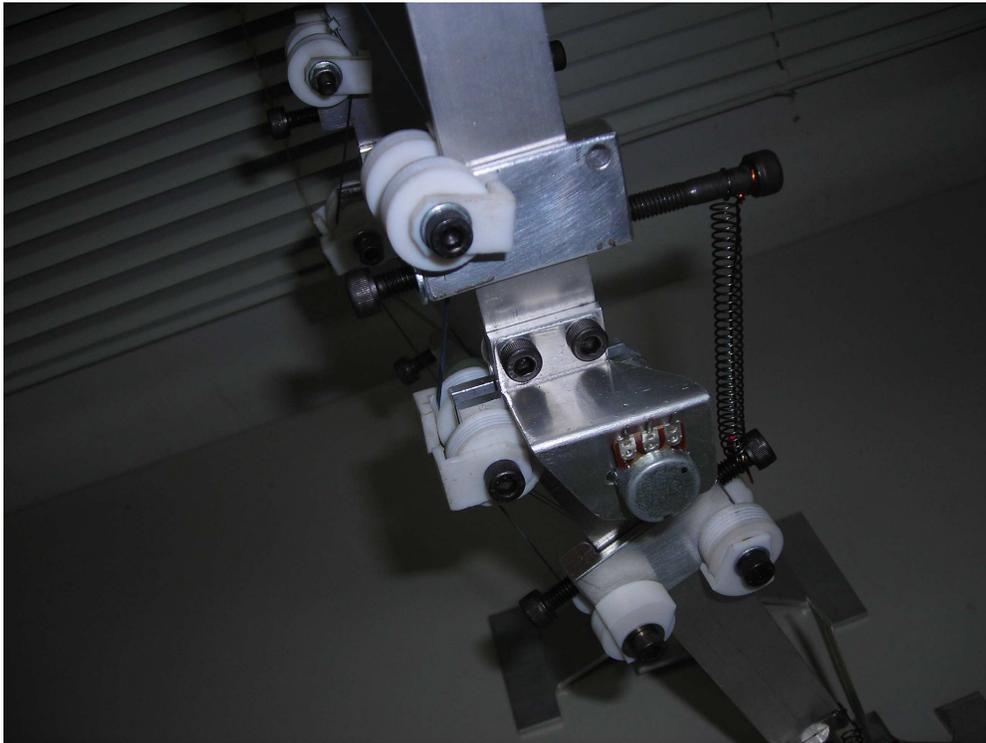


Figura 8: Potenciômetro ligado ao eixo de rotação do joelho.

4.2 Acelerômetro

O sensor digital se trata de um acelerômetro de três eixos, sendo utilizado para medirmos a variação da inclinação do quadril, como citado anteriormente. Este acelerômetro possui tamanho bem reduzido, e assim baixo consumo. Tem a possibilidade

de trabalhos em alguns tipos de barramentos de dados. O barramento utilizado neste trabalho se trata do barramento I²C, protocolo de comunicação que é implementado na comunicação entre o microcontrolador e os dispositivos escravos que são os acelerômetros digitais. Na Figura 9 pode ser vista a placa de interface do acelerômetro, podendo-se notar o seu tamanho reduzido.

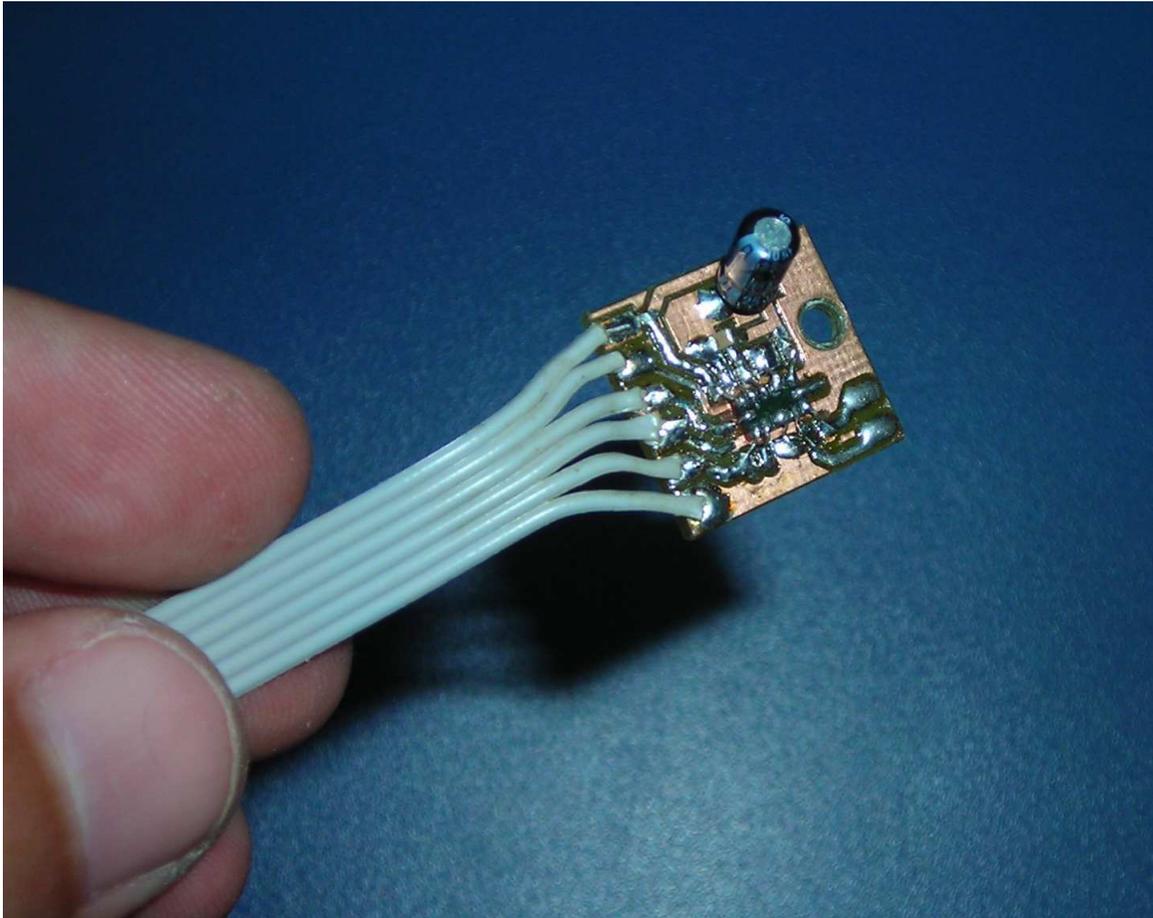


Figura 9: Fotografia da placa de interface do acelerômetro.

Os acelerômetros são dispositivos capazes de medir aceleração, mas também podem ser utilizados como medidores de inclinação que é justamente o caso proposto para este trabalho. Se a variação for apresentada de forma lenta o dispositivo responde na forma de variação de leitura de inclinação. Eles podem ser de dois ou três eixos, e compreendem diversos valores de aceleração. Isso é possível pois o acelerômetro nada mais é que um capacitor, pois ele possui um dielétrico preso a uma mola e quando o mesmo está submetido a determinada inclinação esta mola se contrai ou se expande proporcionando medidas a serem utilizadas em sistemas microprocessados.

O modelo do acelerômetro utilizado neste trabalho é o LIS 302 DL, que possui várias aplicações já consolidadas na indústria, principalmente na indústria de telefonia. O LIS 302 DL se trata de um acelerômetro digital, sendo assim temos que utilizar algum tipo de comunicação entre ele e o microcontrolador. Este acelerômetro possui dois tipos de comunicação que podem ser utilizadas, a comunicação SPI (três fios) e a comunicação I²C (dois fios) [Philips,2003].

O circuito do acelerômetro pode ser visto na Figura 11, onde notamos a presença de capacitores, que são utilizados para o desacoplamento da fonte de alimentação. O LIS 302 DL foi alimentado com uma tensão de 3,3 V, este acelerômetro possui 14 pinos de conexão que são utilizados para a sua comunicação, alimentação e *clock*. A descrição destes pinos é apresentada na Tabela2.

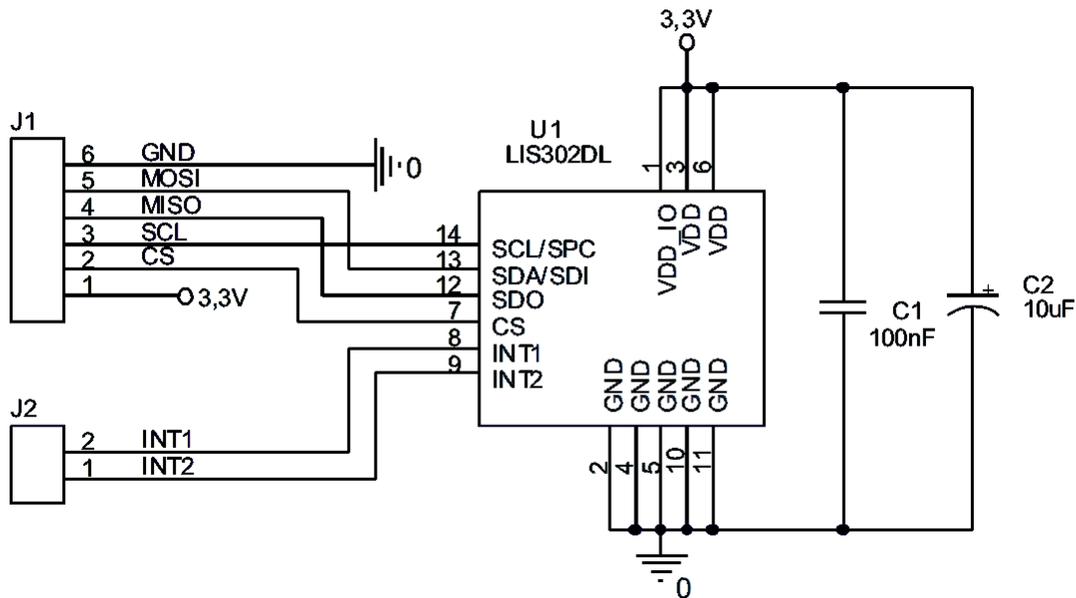


Figura 10: Circuito do acelerômetro.

Pinos	Nome	Função
1	Vdd_IO	Alimentação para entrada/saída
2	GND	Aterramento
3	Reservado	Conectado à Vdd
4	GND	Aterramento
5	GND	Aterramento
6	Vdd	Alimentação
7	CS	Modo de Seleção
8	INT 1	Interrupção 1
9	INT 2	Interrupção 2
10	GND	Aterramento
11	Reservado	Conectado ao aterramento
12	SDO	Bit menos significativo do dispositivo
13	SDA	Dado Serial
14	SCL	Clock Serial

Tabela 2: Descrição dos pinos do LIS 302 DL.

4.2.1 Comunicação I²C

O protocolo de comunicação I²C foi desenvolvido pela Philips e inicialmente foi utilizado em aparelhos de TV, sendo usado para a redução de custos e fazer com que os dispositivos se tornassem mais modulares. O I²C é uma contração do inglês *Inter Integrated Communication* e consiste de um protocolo síncrono mestre-escravo. São utilizados dois fios, um é utilizado para os sinais de dados enquanto o outro é utilizado para o sinal de *clock*. O protocolo também informa que os dispositivos não podem colocar ambas as linhas em nível lógico alto, pois os barramentos se utilizam de *drivers* com o coletor ou o dreno aberto.

Há dois sinais associados ao barramento I²C, um é o SCL (*Serial Clock Line*) e o outro é o SDA (*Serial Data Line*), o tráfego de informação ocorre na linha SDA, que é bidirecional. Sendo assim a linha SDA é utilizada para efetuar leituras e efetuar escritas na interface. Tanto a linha SCL como a linha SDA são conectadas a alimentação

através de resistores denominados de resistores de *pull-up*. Os resistores utilizados neste trabalho foram de $10\text{ k}\Omega$, e quando o barramento não estiver sendo utilizado, ou seja, sem troca de informação, ambos os resistores devem colocar as linhas em nível alto. Na Figura 11 é mostrado como os resistores de *pull-up* estão conectados as linhas SDA e SCL e como a comunicação pode acontecer.

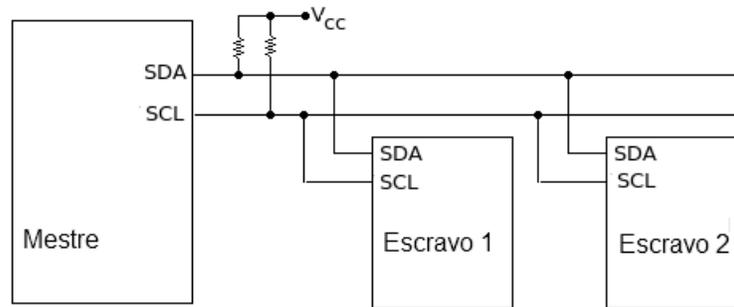


Figura 11: Comunicação I²C.

Quando fazemos a comparação do protocolo I²C com o outro protocolo que é utilizado pelo acelerômetro em questão, que é o SPI, podemos dizer que o I²C utiliza menos fios e possui a condição de endereçar até 127 dispositivos no mesmo barramento. A desvantagem é a velocidade que é reduzida em relação ao SPI e ainda é um pouco mais complicado de ser implementado.

A transferência no barramento I²C é iniciada através do sinal de START (ST). Uma condição de START é obtida quando ocorre uma transição do nível lógico alto para o nível lógico baixo na linha de dados (SDA) enquanto a linha de clock (SCL) estiver em nível lógico alto. Após esta condição o barramento é considerado ocupado e o próximo *byte* pode ser transmitido. O *byte* de dados transmitido após a condição de START contém o endereço do escravo nos primeiros sete *bits* e o oitavo *bit* informa se o mestre está recebendo dados do escravo ou enviando os dados para o escravo[Philips,2003].

O acelerômetro LIS 302 DL possui um endereço escravo associado, é o 001110xb. O pino SDO pode ser usado como um modificador de endereço, modificando o *bit* menos significativo de endereço do dispositivo podemos endereçar então dois acelerômetros no mesmo barramento I²C. Para a transmissão de dados deve existir sempre um aviso de reconhecimento, o transmissor deve liberar a linha de dados (SDA) durante o pulso de reconhecimento. O receptor, em seguida, deve fazer com que a linha de dados seja colocada em nível lógico baixo e assim deve permanecer enquanto ocorra o pulso de reconhecimento de clock.

O LIS 302 DL deve ser usado apenas como escravo, sendo dado o papel de mestre ao microcontrolador utilizado que deve ter suporte então sobre o tipo de comunicação I²C. O microcontrolador utilizado neste experimento foi o ADuC 7026 da Analog Devices [Analog,2006]. O código escrito para o funcionamento conjunto entre microcontrolador e os acelerômetro se encontra em anexo.

5 Atuadores e Circuitos de Comando

Os atuadores utilizados na plataforma robótica são as ligas com memória de forma, estas ligas quando acionadas irão garantir o torque necessário para que tenha-se o movimento da caminhada. As LMF serão as substitutas dos músculos humanos, tendo disposição suficiente para o trabalho em questão. As ligas foram submetidas ao treinamento no próprio laboratório, sendo utilizado um microcontrolador para o controle do tempo que as amostras de LMF passaram sobre a atuação da corrente elétrica e também que pudesse limitar esta corrente elétrica em níveis seguros para o uso da LMF. Como utilizou-se de dois tamanhos de LMF foram utilizados testes com limites de corrente elétrica diferentes. As LMF foram ligadas ao circuito de acionamento que é apresentado na Figura 12, este circuito pode efetuar o treinamento de até quatro LMF e este mesmo circuito foi utilizado para atuação da LMF já incorporada ao bípode[Teh,2003].

O treinamento da LMF ocorreu com uma carga fixada em uma extremidade da mesma, e dessa forma foi feito passar corrente elétrica. Os níveis de massa e corrente elétrica dependem da amostra de LMF que se utiliza. Para este trabalho se utiliza duas LMF com diâmetros distintos, e cada qual com a sua carga máxima suportável e a corrente elétrica máxima utilizada nos testes. Assim foram utilizadas as LMF com os seguintes dados:

- LMF 1

- Diâmetro: 0,29 mm

- * Carga Utilizada: 1200 g;

- * Corrente Elétrica: 1,4 A.

- LMF 2

- Diâmetro: 0,20 mm

- * Carga Utilizada: 700 g;

* Corrente Elétrica: 700 mA.

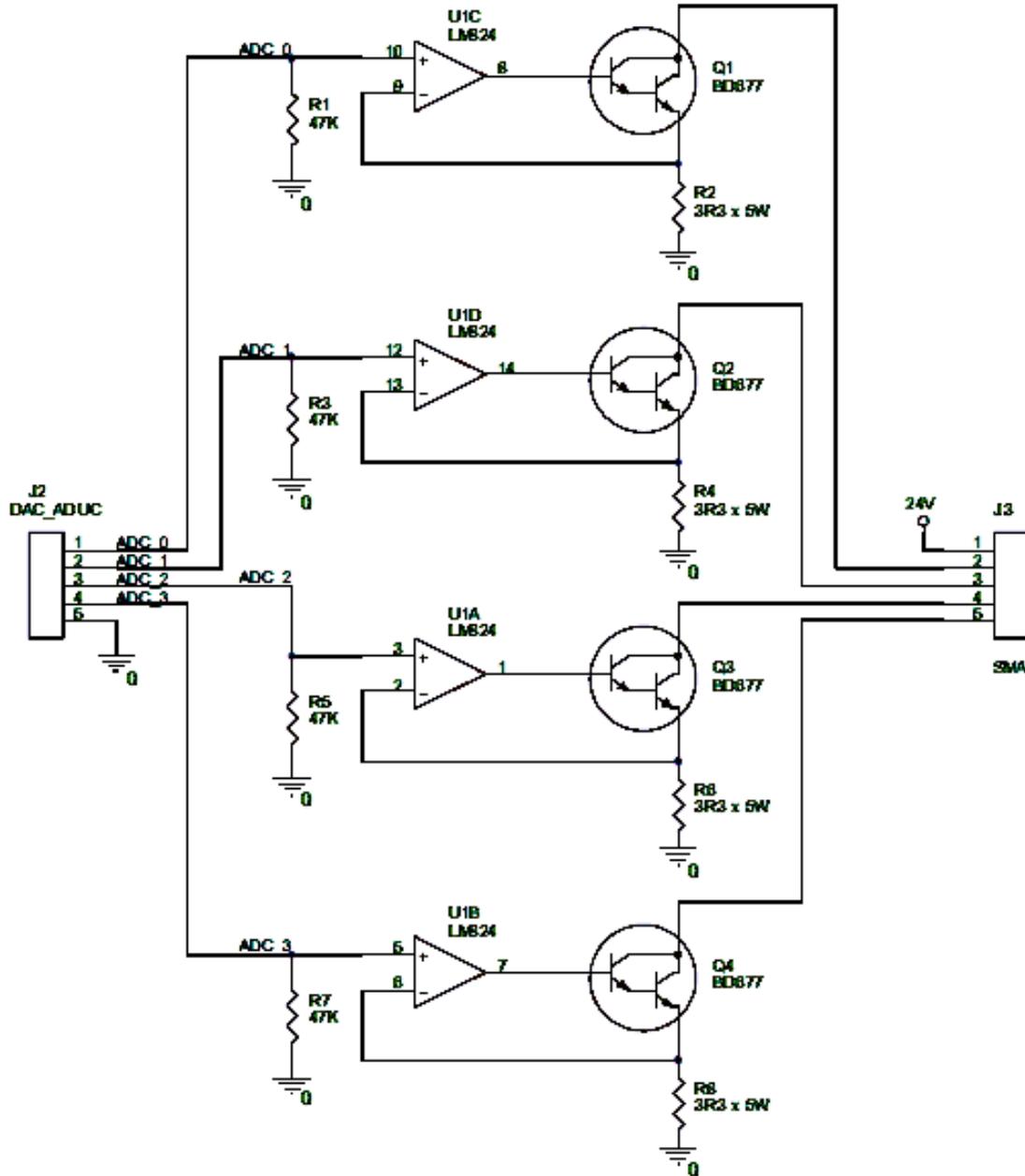


Figura 12: Circuito de atuação das LMF.

O treinamento foi efetuado em cem ciclos e teve como objetivo alcançar a região de martensita induzida por tensão. Os testes foram repetidos com os oito atuadores de memória de forma utilizados.

6 Conclusão

Os resultados obtidos através dos testes foram adequados, pois foi conseguido verificar a variação completa de inclinação à que a plataforma robótica estará sujeita, que é no máximo 5° , e a abertura angular proporcionada pelo joelho, em torno de 11° . Os testes utilizaram estes valores para limite de atuação e ambos os resultados estão dentro do esperado pelo proposto pelo aluno de doutorado Walter Valenzuela. Os resultados aqui encontrados serão de uso na Tese do aluno de doutorado Walter Valenzuela, que seguirá os testes específicos da movimentação do bípede.

Referências

- [Teh,2003] Y. H. Teh . A Control System for Achieving Rapid Controlled Motions from Shape Memory Alloy (SMA) Actuator Wires. B. Engineering Honours Thesis, Dept. Engineering, The Australian National University, Australia, 2003.
- [Valenzuela,2005] VALENZUELA, W. A. Sistema de articulação atuado por meio de liga com memória de forma. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- [Valenzuela,2007] VALENZUELA, W. A. Modelagem e Simulação de um Atuador de Liga Metálica com Memória de Forma. Tese (Projeto de Pesquisa) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Maio 2007.
- [Analog,2006] Analog Devices. Precision analog microcontroller, 12-bit analog i/o, arm7tdmi mcu, 2006.
- [ST,2011] <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00135460.pdf>
Acessado em: 02/02/2011.
- [Philips,2003] Philips Semiconductors. Application note: I2C Bus, AN10216-01, March 24, 2003.
- [Luecke,2005] LUECKE, J. Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications. 1^o. ed. [S.l.]: Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-7810-0.

ANEXO

```
1 /*-----
2
3 Programa para comunicação com o acelerômetro LIS302DL
4 usando o protocolo I2C
5
6 -----
7
8 #include <ADuC7026.h>
9 #include <stdio.h>
10 #include <string.h>
11
12 void IRQ_Handler() __irq;
13 void FIQ_Handler() __fiq;
14
15 void EscritaI2C(unsigned char End_Dispositivo, unsigned char End_Registrador,
unsigned char Num_Bytes);
16 void LeituraI2C(unsigned char End_Dispositivo, unsigned char End_Registrador,
unsigned char Num_Bytes);
17
18 //Variáveis
19 unsigned char Estado = 0, Passo = 0;
20 signed char Dado_Acel_1[5] = {0}, Dado_Acel_2[5] = {0};
21 unsigned char Dado_Escrito[3] = {0};
22 unsigned char Flag = 0, Flag_2 = 0;
23
24 //-----
25 void main() {
26 1
```

```

27 1 //Configurando a pinagem da Porta 1:
28 1 //P1.0(SIN); P1.1(SOUT); P1.2(SCL1); P1.3(SDA1)
29 1 GP1CON = 0x2211;
30 1
31 1 //Configurando UART para 9600 bps com CD = 1
32 1 COMCON0 = 0x80;
33 1 COMDIV0 = 0x44;
34 1 COMDIV1 = 0x00;
35 1 COMCON0 = 0x03;
36 1
37 1 //Configurando o I2C1 para funcionar como Mestre (gerando o clock) à 100
kHz
38 1 I2C1CFG = 0x82;
39 1 I2C1DIV = 0xCFCF;
40 1
41 1 //Habilitando a interrupção do I2C1 Mestre no modo FIQ (Fast Interrupt)
42 1 FIQEN = 0x800;
43 1
44 1 //Configurando o LIS302DL 1: taxa de saída de dados em 100 Hz e modo ativo
45 1 Dado_Escrito[0] = 0x47;
46 1 EscritaI2C(0x1C, 0x20, 1);
47 1
48 1 //Leitura do registrador "Who_Am_I" do LIS302DL 1
49 1 LeituraI2C(0x1C, 0x0F, 1);
50 1 printf("WAI_1: %d\n", Dado_Acel_2[0]);
51 1
52 1 //Configurando o LIS302DL 2: taxa de saída de dados em 100 Hz e modo ativo
53 1 Dado_Escrito[0] = 0x47;
54 1 EscritaI2C(0x1D, 0x20, 1);
55 1
56 1 //Leitura do registrador "Who_Am_I" do LIS302DL 2
57 1 LeituraI2C(0x1D, 0x0F, 1);
58 1 printf("WAI_2: %d\n", Dado_Acel_2[0]); ARM COMPILER V2.42, Tempe-
rature 01/03/11 09:47:57 PAGE 2
59 1

```

```

60 1 //Configurando o contador Timer0 para modo periódico e clock/256
61 1 TOLD = 0xFFFF; //8200*12,25us = 100,45ms
62 1 T0CON = 0xC8;
63 1
64 1 //Habilitando a interrupção do Timer0 no modo IRQ
65 1 IRQEN = 0x04;
66 1
67 1
68 1 while(1) {
69 2 if (Flag == 1) {
70 3 /*printf("X1: %d Y1: %d Z1: %d\nX2: %d Y2: %d Z2: %d\n", Dado_Acel_1[0],
Dado_Acel_1[2], Dado_Acel_1[4],
71 3 Dado_Acel_2[0], Dado_Acel_2[2], Dado_Acel_2[4]);*/
72 3 printf("X: %d - Y: %d - Z: %d\n", Dado_Acel_2[0], Dado_Acel_2[2], Dado_Acel_2[4]);
73 3 //printf("Y: %d\n", Dado_Acel_2[2]);
74 3 Flag = 0;
75 3 }
76 2 }
77 1
78 1 }//-----
-----
79
80
81 //Função para escrita de dados I2C -----
-----
82 void EscritaI2C(unsigned char End_Dispositivo, unsigned char End_Registrador,
unsigned char Num_Bytes) {
83 1
84 1 //SAD + W
85 1 Estado = 0;
86 1 Passo = Num_Bytes + 1;
87 1 I2C1ADR = End_Dispositivo << 1;
88 1 I2C1CNT = Num_Bytes - 1;
89 1 I2C1MTX = End_Registrador;
90 1 while (Passo != Estado){}

```

```

91 1
92 1 }//-----
-----
93
94
95 //Função para leitura de dados I2C -----
-----
96 void LeituraI2C(unsigned char End_Dispositivo, unsigned char End_Registrador,
unsigned char Num_Bytes) {
97 1
98 1 //SAD + W
99 1 Estado = 0;
100 1 Passo = 1;
101 1 I2C1ADR = End_Dispositivo << 1;
102 1 I2C1MTX = End_Registrador;
103 1 while (Passo != Estado){}
104 1
105 1 //SAD + R
106 1 Estado = 0;
107 1 Passo = Num_Bytes;
108 1 I2C1CNT = Num_Bytes - 1;
109 1 I2C1ADR = (End_Dispositivo << 1) + 1;
110 1 while (Passo != Estado){}
111 1
112 1 }//-----
-----
113
114
115 //IRQ Rotina de Serviço -----
-----
116
117 void IRQ_Handler() __irq {
118 1
119 1 //Timer0
120 1 if ((IRQSTA & 0x04) == 0x04) {

```

```

121 2 Flag_2 = 0;
122 2 LeituraI2C(0x1C, 0xA9, 5); //Leitura do 1o acelerômetro ARM COMPILER
V2.42, Temperature 01/03/11 09:47:57 PAGE 3
123 2 Flag_2 = 1;
124 2 LeituraI2C(0x1D, 0xA9, 5); //Leitura do 2o acelerômetro
125 2 Flag = 1;
126 2 T0CLR1 = 0;
127 2 }
128 1
129 1 }//-----
-----
130
131
132 //FIQ Rotina de Serviço -----
-----
133 void FIQ_Handler() __fiq {
134 1
135 1 //I2C1 Mestre
136 1 //Transmite
137 1 if(((I2C1MSTA & 0x4) == 0x4) && (Estado < (Passo-1))) {
138 2 I2C1MTX = Dado_Escrito[Estado];
139 2 Estado++;
140 2 }
141 1
142 1 else if (((I2C1MSTA & 0x4) == 0x4) && (Estado == (Passo-1))) {
143 2 Estado++;
144 2 }
145 1
146 1 //Recebe
147 1 else if(((I2C1MSTA & 0x8) == 0x8) && (Estado <= (Passo-1))) {
148 2 if(Flag_2)
149 2 Dado_Acel_2[Estado] = I2C1MRX;
150 2 else
151 2 Dado_Acel_1[Estado] = I2C1MRX;
152 2

```

```
153 2 Estado++;
```

```
154 2 }
```

```
155 1 }//-----
```