

Universidade Federal do Paraná  
Setor de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**Seguidor de Fonte Luminosa – *SunFollower***

CURITIBA

2016

Universidade Federal do Paraná  
Setor de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

Wesley Mateus Becker – GRR20122517

**Seguidor de Fonte Luminosa – *SunFollower***

Projeto realizado sob a orientação do Prof. Márlcio J. do C. Bonfim, Dr., como requisito para obtenção de nota parcial na disciplina TE-149 – Instrumentação Eletrônica – do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

2016

## 1. Sumário

1. Sumário .....	3
2. Introdução.....	5
3. Desenvolvimento Teórico .....	6
4. Soluções e Projeto.....	9
Sensores LDR.....	9
Interfaceamento para os Servos .....	10
Topologia do Circuito .....	10
Curva de Calibração.....	11
5. Controlador e afins.....	13
Signal to Noise Ratio (SNR).....	13
Identificação das Funções-Transferência.....	13
Controlador .....	14
6. Resultados Obtidos .....	15
7. Conclusões.....	16
8. Anexos.....	17
Bottom do Shield.....	17
<i>Top Layer</i> do <i>Shield</i> .....	17
<i>Bottom</i> da placa de sensores .....	18
<i>Top</i> da placa de sensores .....	18
Projeto Acabado.....	19
Face da Placa com Logo .....	20



## 2. Introdução

Este trabalho foi proposto tendo como plano de fundo o advento das energias renováveis e, especificamente, a possibilidade do aumento de colheita energética de painéis fotovoltaicos pelo controle da sua orientação. A ideia principal é medir o ângulo entre a normal de uma placa (que em uma implementação real seria o painel fotovoltaico em si) e a linha definida pelo centro da placa e a fonte luminosa da qual se quer tirar proveito (aqui considerada pontual, mas o sistema acabou se mostrando confiável mesmo para fontes extensas). A filosofia do projeto se alinha bem àquela da disciplina, já que uma grandeza é medida (o ângulo entre a normal da placa e a linha até a fonte), os dados processados por um microcontrolador (no caso, o msp430g2553 da Texas Instruments), e uma intervenção é feita no sistema por meio de atuadores (servo-motores), fechando assim a malha de controle. O ganho em *insight* do funcionamento de um sistema de controle, dos métodos de condicionamento de sinal de sensores, e os diferentes arranjos empregados para tanto foram significativos. Fica óbvio, então, o benefício do projeto semestral à formação do aluno.

### 3. Desenvolvimento Teórico

Optou-se pelo uso de sensores LDR (*Light Dependent Resistor*) pela sua abundância e seu baixo custo. Como o objetivo era medir um ângulo, dois sensores tiveram de ser empregados em cada eixo, para que se pudesse, a partir da luminosidade em cada sensor, inferir a orientação da placa.

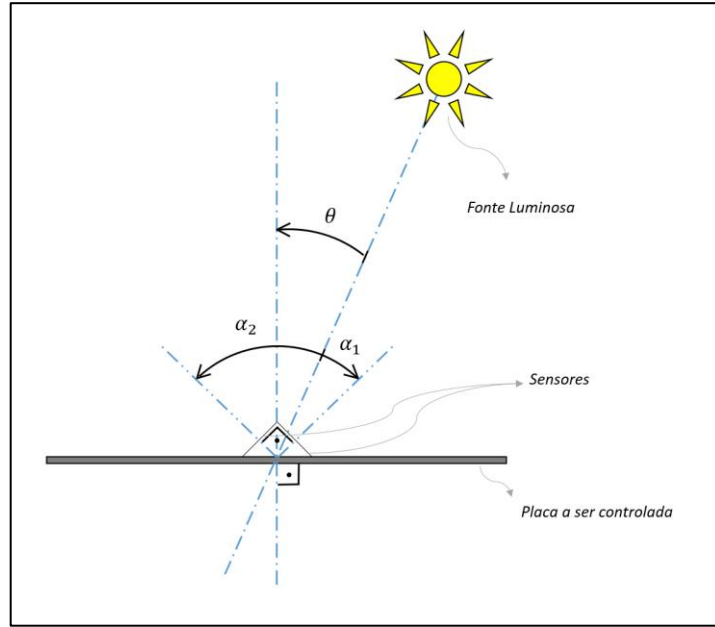


Figura 1 - Ideia geral do sensoreamento para um eixo. Podem ser observados a placa a ser controlada, a disposição dos sensores, e os principais ângulos com os quais trabalhou-se na dedução teórica das equações.

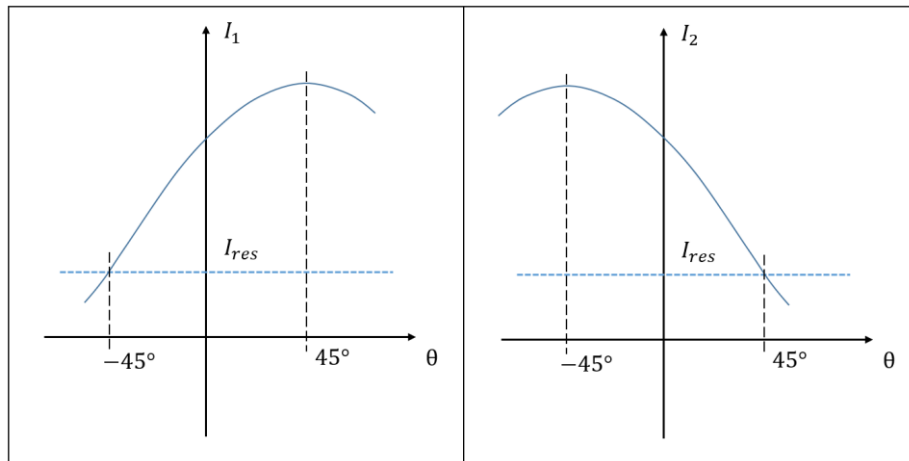


Figura 2 - Intensidade luminosa em cada sensor, como função do ângulo da normal com a fonte.

De posse de tais dados, podemos equacionar uma expressão para o ângulo  $\theta$  em função da diferença normalizada  $\Delta I_n$ , definida como:

$$\Delta I_n = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (1)$$

É explícito que:

$$I_1(\alpha_1) = I_{\text{máx}} \cos(\alpha_1) + I_{\text{res}} = I_{\text{máx}} \cos(\theta - 45^\circ) + I_{\text{res}} \quad (2)$$

$$I_2(\alpha_1) = I_{\text{máx}} \cos(\alpha_2) + I_{\text{res}} = I_{\text{máx}} \cos(\theta + 45^\circ) + I_{\text{res}} \quad (3)$$

- $$\begin{aligned}
 I_1 - I_2 &= I_{\text{máx}}[\cos(\theta - 45^\circ) - \cos(\theta + 45^\circ)] \\
 &= I_{\text{máx}}[\cos\theta \cdot \cos 45^\circ + \sin\theta \cdot \sin 45^\circ - \cos\theta \cdot \cos 45^\circ + \sin\theta \cdot \sin 45^\circ] \\
 &= I_{\text{máx}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [\cancel{\cos\theta} + \sin\theta - \cancel{\cos\theta} + \sin\theta]
 \end{aligned}$$

$$I_1 - I_2 = I_{\text{máx}}\sqrt{2} \cdot \sin\theta \quad (4)$$

- $$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 &= I_{\text{máx}}[\cos(\theta - 45^\circ) + \cos(\theta + 45^\circ)] \\
 &= I_{\text{máx}}[\cos\theta \cdot \cos 45^\circ + \sin\theta \cdot \sin 45^\circ + \cos\theta \cdot \cos 45^\circ - \sin\theta \cdot \sin 45^\circ] \\
 &= I_{\text{máx}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [\cos\theta + \cancel{\sin\theta} + \cos\theta - \cancel{\sin\theta}]
 \end{aligned}$$

$$I_1 + I_2 = I_{\text{máx}}\sqrt{2} \cdot \cos\theta \quad (5)$$

Assim, de (1), (4), e (5), fica claro que:

$$\Delta I_n = \tan\theta$$

E, consequentemente:

$$\theta = \tan^{-1}\Delta I_n \quad (6)$$

O gráfico idealizado ficaria da seguinte forma:

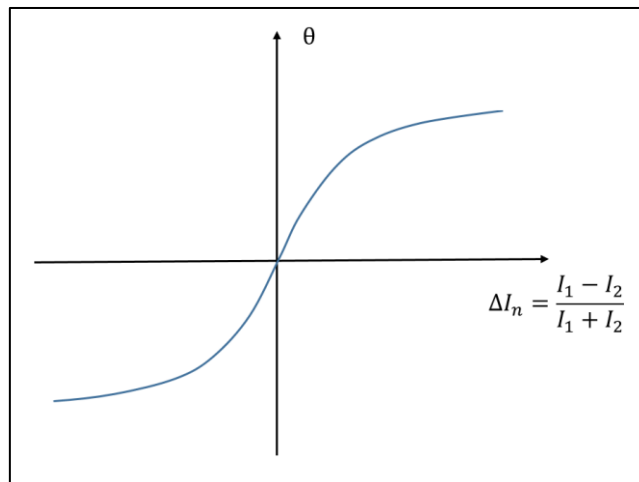


Figura 3 - Ângulo da normal da placa com a fonte luminosa como função da diferença normalizada de intensidade luminosa. Essa curva ideal é a curva  $\text{arctg}(x)$ .

Mas é claro que, com múltiplos fatores não ideais e diversas camadas de tratamento do sinal, as relações se deturpam, a começar pelos sensores, não-lineares. As curvas reais serão parecidas mais com alguma da próxima Figura 4. Ali, tomou-se como variável de abscissa a diferença normalizada da medida de luminosidade que são entregues já para o software, isto é, depois de passar pelo circuito de condicionamento e pelo conversor A/D. Portanto, espera-se que a curva de calibração final incorpore todas as relações entre os componentes e deformações pelas quais o sinal passa.

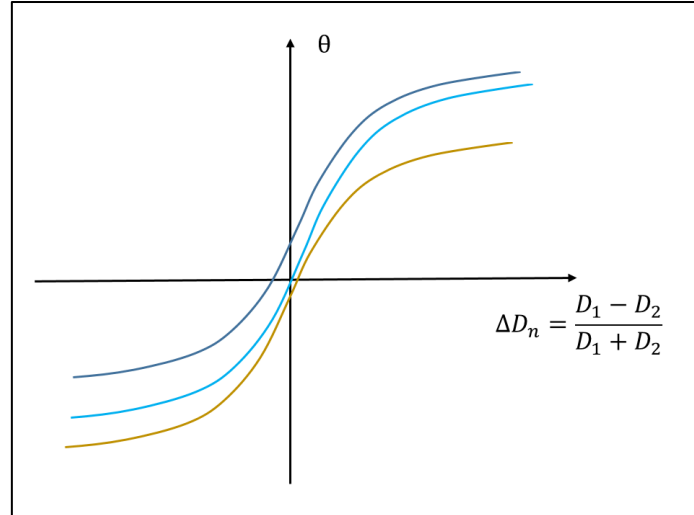


Figura 4 - Curvas que ocorrem na prática, fazendo o ângulo que se quer medir ser função, diretamente dos valores depois do conversor A/D.

Aqui, chama-se  $D_i$  o valor digitalizado da luminosidade do  $i$ -ésimo sensor, após todas as camadas de hardware.

Tendo em vista as curvas práticas esperadas, procurou-se uma função para a curva de calibração que mantivesse as principais características da  $\text{artg}(x)$ , mas que fosse parametrizável e pudesse ser facilmente implementada em código para o microcontrolador. Uma das primeiras candidatas, a função que foi finalmente adotada, é (7), com sua versão com parâmetros ajustáveis em (8).

$$f(x) = \frac{x}{1 + |x|} \quad (7)$$

$$\theta(\Delta D_n) = k_0 \cdot \frac{\Delta D_n + k_1}{1 + k_2 \cdot |\Delta D_n + k_1|} \quad (8)$$

Resultados da regressão não-linear empregada na identificação da curva de calibração de ambos os eixos do projeto podem ser acompanhados na seção.



#### 4. Soluções e Projeto

##### Sensores LDR

Os sensores de luminosidade utilizados são do tipo LDR. Seu princípio de funcionamento é a variação de sua resistência com a luminosidade, regada por (9).

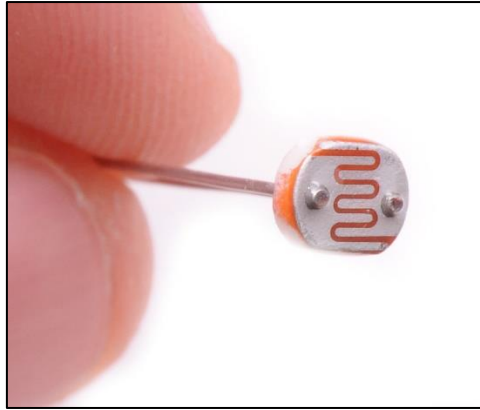


Figura 5 - Exemplar de sensor LDR como os usados no projeto.

Uma curva típica de tal sensor encontra-se na Figura 6. Notar que existe, na verdade, uma gama de curvas que o sensor pode assumir, havendo necessidade de identificar a curva de cada sensor individualmente.

$$R = \frac{a}{I^b} \quad (9)$$

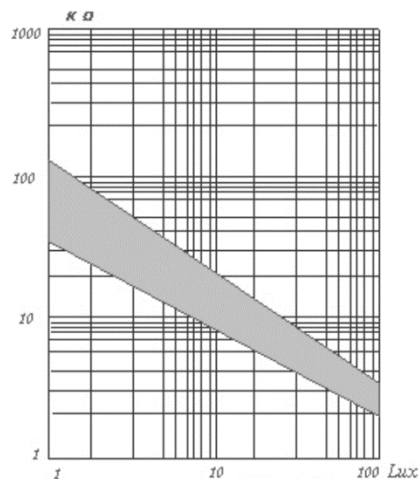


Figura 6 - Curva característica dos sensores utilizados. Nota-se a característica hiperbólica explicitada na equação (9).

Desejava-se obter um sinal de tensão que fosse diretamente proporcional à luminosidade. Para isso, utilizou-se um divisor de tensão como o da Figura 5.

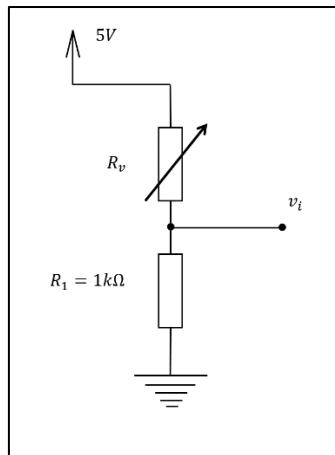


Figura 7 - Divisor de tensão utilizado para gerar um sinal de tensão a partir da resistência variável do sensor LDR.

Notar que, apesar de utilizarmos um microcontrolador sendo alimentado com 3,6 V, utilizou-se uma tensão de 5 V para a excitação do circuito. Isso foi feito devido à pequena janela de tensão que o divisor proporcionava quando se variava a intensidade luminosa do máximo ao mínimo com a tensão original. Aumentando a tensão, pode-se aumentar a resolução da medida. Aliado ao aumento da tensão de excitação, reduziu-se a tensão de referência do conversor A/D de 3,6 para 2,5 V, tornando possível o uso de mais da metade da escala do conversor e eliminando a necessidade de um amplificador.

## Interfaceamento para os Servos

O controle dos servo-motores, alimentados com 5 V, é feito com uma onda retangular de 50 Hz e, também, 5 V de pico. Novamente, como o microcontrolador é alimentado com 3,6 V, precisou-se interfacear o circuito, o que foi feito com o circuito da Figura 8.

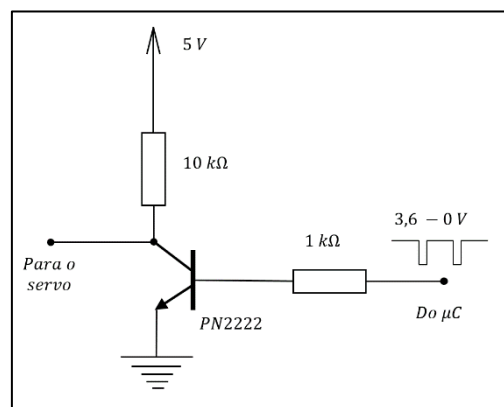


Figura 8 - Circuito de mudança de nível lógico para controle dos servos.

## Topologia do Circuito

Como precaução contra ruídos, foi adicionado um filtro passa-baixas a cada entrada do divisor de tensão dos LDRs para o microcontrolador. Isso foi feito pois a probabilidade de que o nível de ruído fosse alto era grande, já que a placa dos sensores fica separa do *shield* que é

conectado ao microcontrolador e a conexão é feita por meio de cabos planos. Os únicos componentes que não foram declarados nas seções acima são os reguladores de tensão.

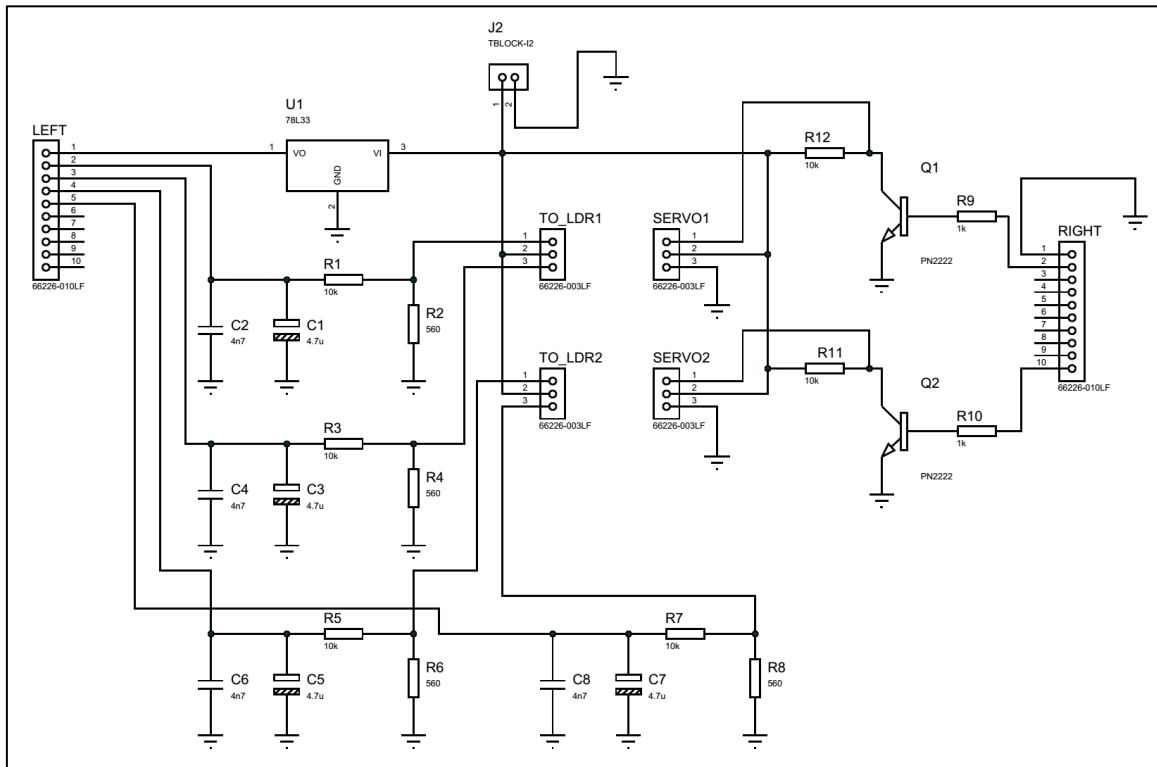


Figura 9 - Topologia de todo o circuito. Os trilhos nas laterais são as conexões para o launchpad do msp430 e os conectores no centro são saídas para os chicotes dos sensores e dos servos.

Os layouts de ambas as PCs podem ser vistos nos Anexos A e B. Modificações tiveram que ser feitas porém, pois a descuido fez com que se utilizasse portas indevidas do *launchpad*, por exemplo, o uso das portas de comunicação serial (essencial para o projeto) para conversão A/D. Tais modificações não se encontram documentadas pois foram feitas à medida que foram percebidas e corrigidas de modo provisório.

### Curva de Calibração

Para cada eixo, foram coletados vários pontos, medindo-se o ângulo da fonte com a normal da placa e a intensidade luminosa (já no *range* de 10 bits) de cada sensor (pertencente àquele eixo). Como dito ao fim da seção 3, a equação usada para aproximar a curva de calibração foi a seguinte:

$$\theta(\Delta D_n) = k_0 \cdot \frac{\Delta D_n + k_1}{1 + k_2 \cdot |\Delta D_n + k_1|} \quad (8)$$

Com a dispersão de pontos de cada eixo, performou-se uma regressão não-linear, utilizando-se do pacote de funções do *software* MATLAB®. Os resultados podem ser acompanhados nas figuras subsequentes:

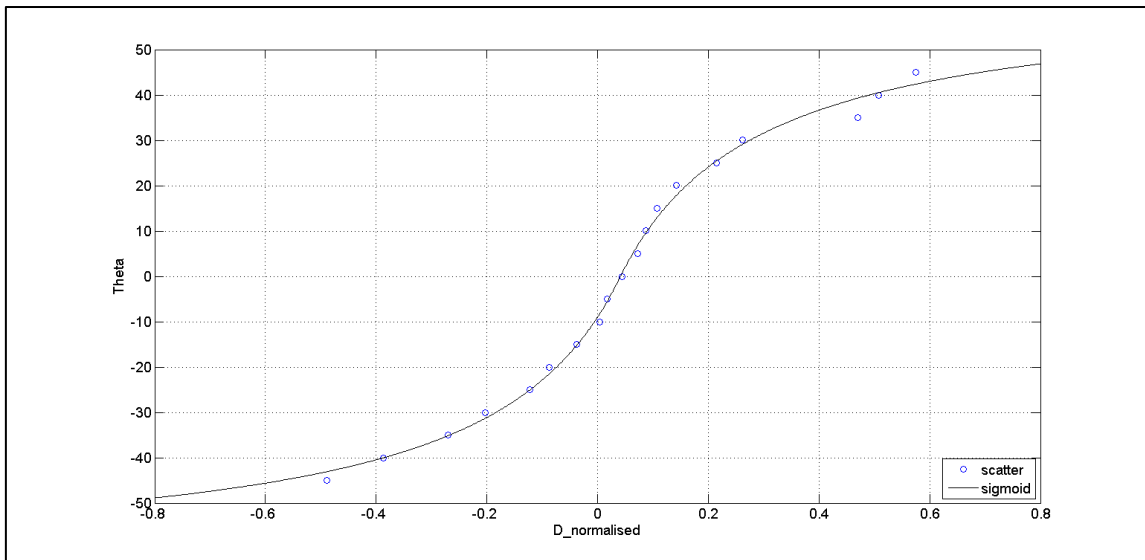


Figura 10 - Curva de calibração do eixo 0.

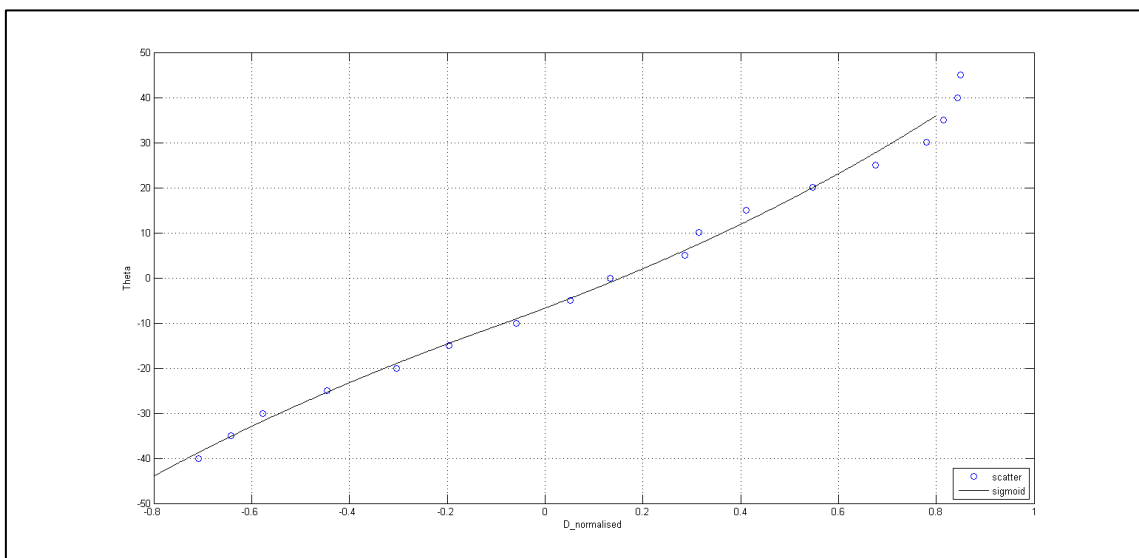


Figura 11 - Curva de calibração do eixo 1.

A segunda curva acabou ficando diferente da primeira pois a montagem mecânica não permitiu que o LED usado como excitação para os sensores ficasse sempre apontado perfeitamente para o centro da placa. Mesmo assim, os resultados obtidos com a medida do ângulo são bastante satisfatórios.

## 5. Controlador e afins

### Signal to Noise Ratio (SNR)

Foram medidos aproximadamente 200 pontos a 16° e, inicialmente, a SNR obtida foi de **74,9**. Depois da aplicação de média móvel (sugere-se que o código fonte seja referenciado para informação de como esta foi implementada), conseguiu-se uma SNR de **202,4**, que foi considerada satisfatória. Notar que a SNR inicial era baixa, apesar do filtro passa-baixas empregado na entrada do conversor A/D.

### Identificação das Funções-Transferência

Foram aplicados degraus de 400 milésimos de amplitude do movimento dos servos (essa era, inclusive, a resolução empregada para o PWM dos servos, de 1000 partes). A partir das respostas, identificou-se as plantas e a resposta a degrau de ambas foram plotadas juntamente com as respostas originais.

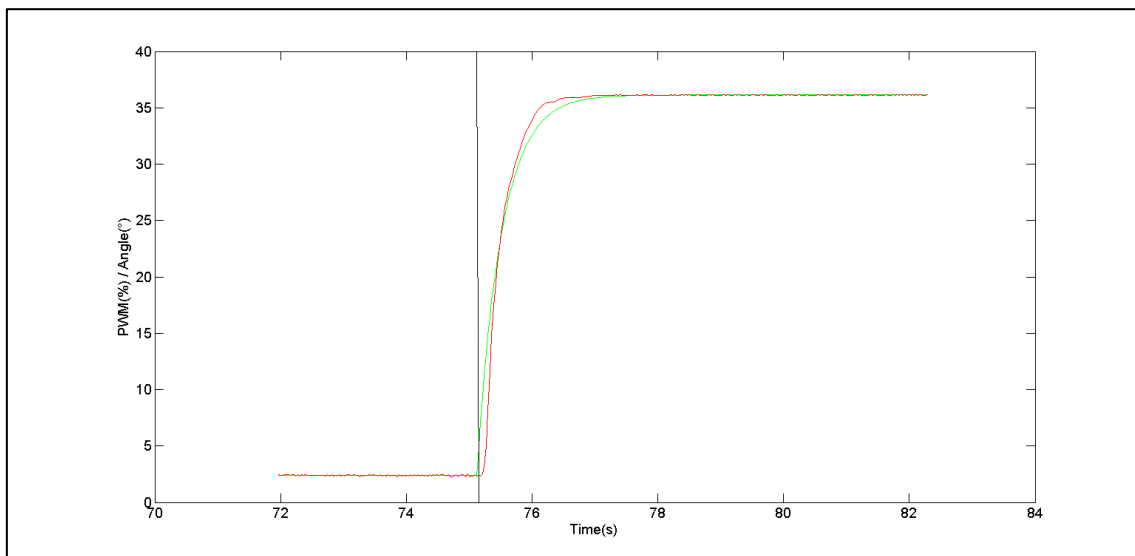


Figura 12 - Resultados do processo de identificação da planta do eixo 0. Em vermelho, a resposta ao degrau original, em verde, a resposta da função transferência encontrada.

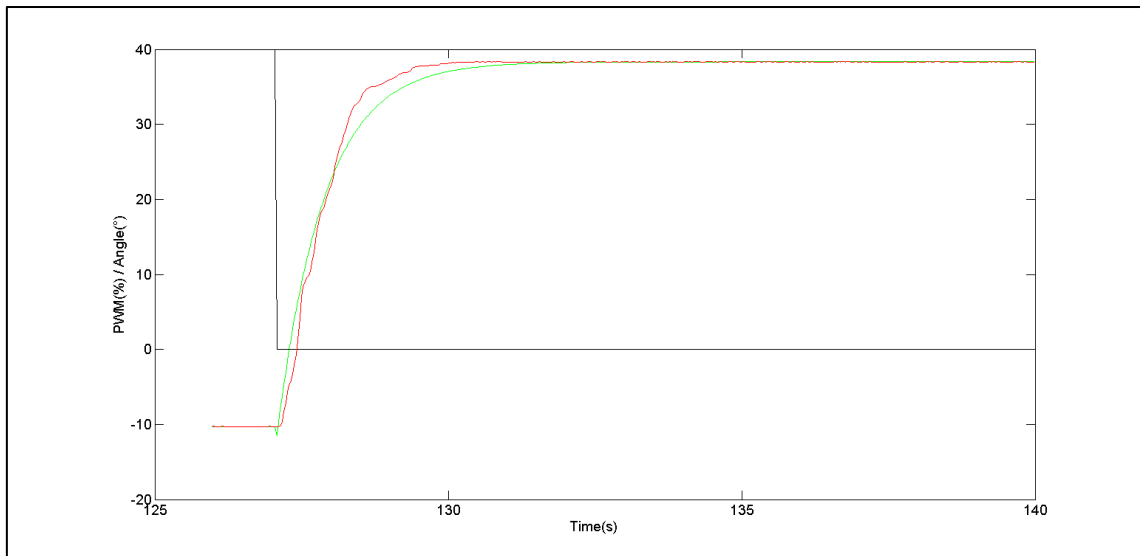


Figura 13 - Resultados do processo de identificação da planta do eixo 1. Em vermelho, a resposta ao degrau original, em verde, a resposta da função transferência encontrada.

Os modelos não se aproximam tanto das respostas reais, mas são suficientemente bons para o controle desejado e apresentaram resultados satisfatórios.

As funções-transferência encontradas foram:

$$H_0(s) = \frac{-84,35 \cdot 10^{-3}}{0,39 \cdot s + 1}$$

$$H_1(s) = \frac{-121,53 \cdot 10^{-3}}{0,80 \cdot s + 1}$$

## Controlador

Para o controlador, foi utilizado uma arquitetura PI, já esse é o costumeiro para sistemas de primeira ordem e deseja-se zerar por completo o erro em regime permanente. Os ganhos foram ajustados de forma empírica e ficaram:

Eixo 0:

$$K_p = -20; \quad K_I = -0,5$$

Eixo 1:

$$K_p = -20; \quad K_I = -0,8$$

## 6. Resultados Obtidos

Por fim, os resultados foram o esperado. Desejava-se um tempo de subida moderado, para que não se comprometesse a estrutura mecânica do projeto, mas queria-se que o erro em regime permanente fosse zerado.

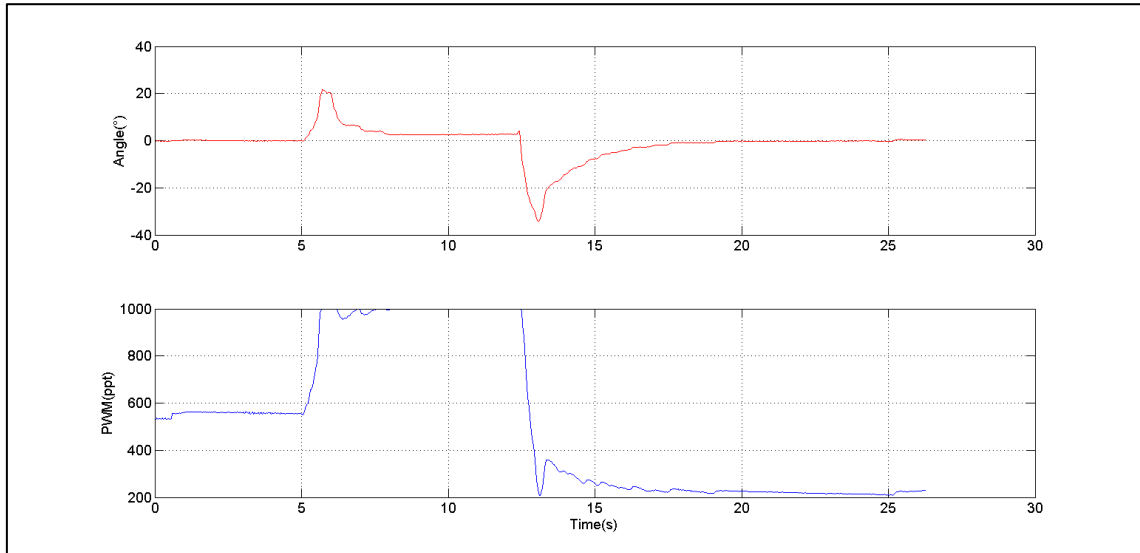


Figura 14 - Resultados do controle do eixo 0. Foram aplicados vários distúrbios e o ângulo pode ser sempre guiado de novo para zero com rapidez e exatidão (e precisão) satisfatórios.

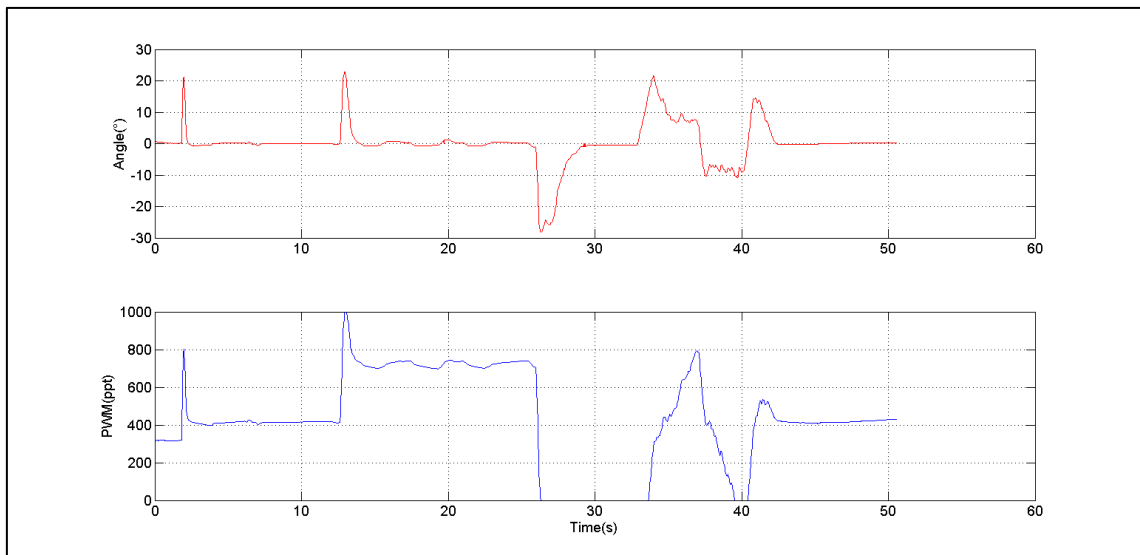


Figura 15- Resultados do controle do eixo 1. Foram aplicados vários distúrbios e o ângulo pode ser sempre guiado de novo para zero com rapidez e exatidão (e precisão) satisfatórios.

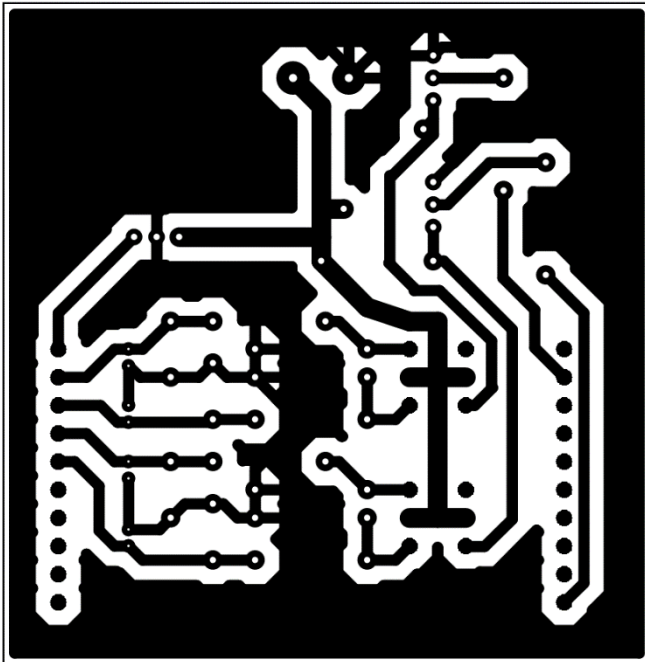
## 7. Conclusões

Os resultados de controle alcançados foram satisfatórios. Porém, várias melhorias ainda poderiam ser feitas, a começar pelo *hardware*. O software também apresenta alguns pequenos *bugs* que não foram completamente localizados nem sanados. Outra melhoria certa é a compra de melhores motores. Sua confiabilidade sempre foi um problema, no decorrer de todo o projeto. O ganho de experiência com o projeto, porém, foi, como era seu objetivo, o maior resultado obtido. Houve um sensível crescimento do poder de resolução de problemas, tanto no projeto e confecção de hardware, como (na verdade, principalmente) na composição de código para microcontroladores (e máquinas em geral, já que o código foi escrito em C++).

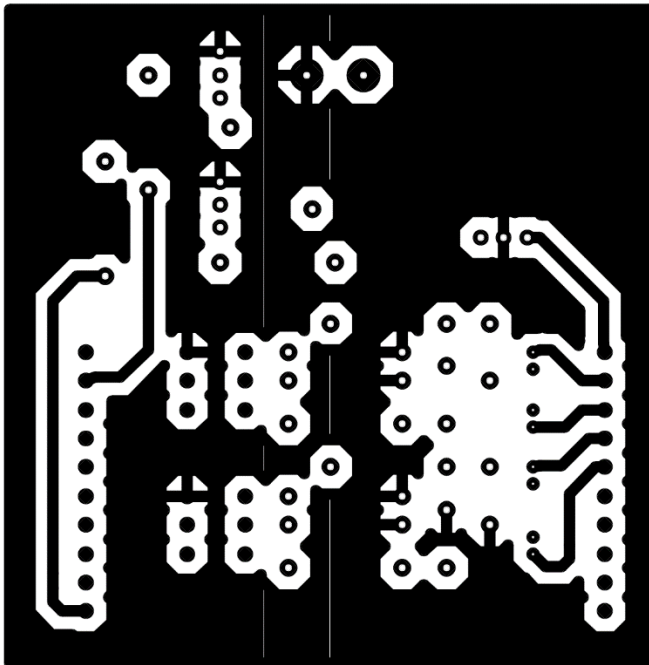


## 8. Anexos

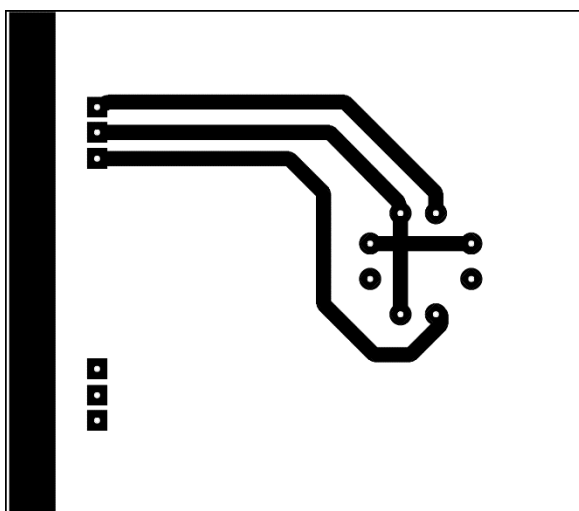
### Bottom do Shield



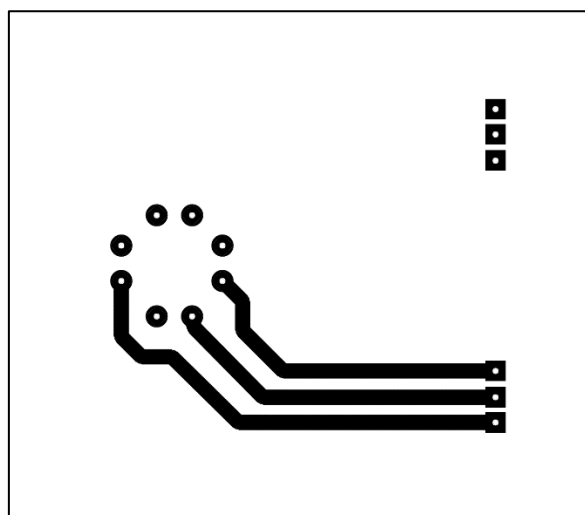
### Top Layer do Shield



*Bottom* da placa de sensores



*Top* da placa de sensores



Projeto Acabado



Face da Placa com Logo

