

# RELATÓRIO FINAL: PROJETO DESAFIO - CONTROLE DE LUMINOSIDADE DE LED

Laboratório de Controle e Automação 1 (LECI 1)

Professor: Reinaldo Martinez Palhares

Integrantes: Edilson Santana de Souza, Leandro Terra C. Melo, Viviane Bicalho Rodrigues.

## 1 INTRODUÇÃO

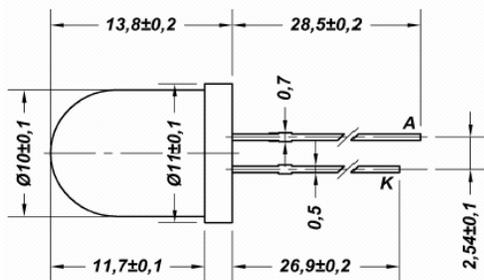
O presente trabalho visa à exposição dos detalhes de implementação, análise dinâmica e discussão de resultados de um controlador PI para controle de intensidade luminosa.

## 2 DESCRIÇÃO DO PROJETO

O projeto pode ser dividido em três partes: atuador, sensor e controlador PID. Serão analisadas a seguir estas três partes em detalhes:

### 2.1 Atuador

O atuador e a planta constituem tão somente num LED (Light Emitting Diode) de luz visível que terá sua luminosidade controlada pelo circuito. Veja ilustração:



O processo de emissão de luz do LED, é denominado eletroluminescência e é controlada por corrente elétrica. Estas variáveis segue uma relação quase linear o que será positivo para o controle deste sistema.

### 2.2 Escolha do sensor

O sensor de luminosidade escolhido foi o LDR, que é um resistor cuja resistência varia com a intensidade luminosa. Esta variação da resistência é inversamente proporcional à luminosidade. Fizemos a montagem mostrada na figura 5 para analisarmos as características do LDR. Em nossa análise consideramos a luz externa (luz ambiente) e a luz proveniente do LED incidindo sobre o LDR.

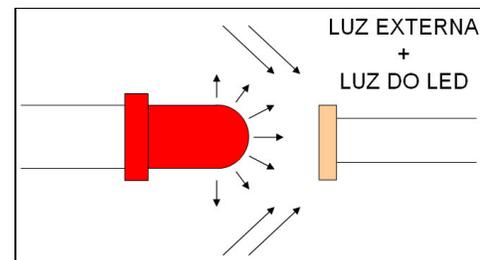


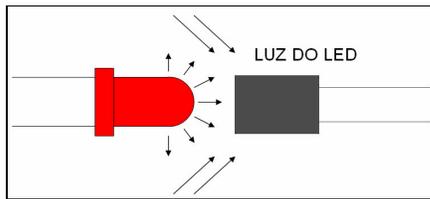
FIGURA 5: Montagem LED / LDR

Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 1:

Luz externa	Resistência do LDR ( $\Omega$ )	
	LED com brilho mínimo	LED com brilho máximo
Sala escura	100 k	843
Luz da sala acesa	7.29 k	832
Luz da sala + luz da bancada acesa	3.43 k	827

TABELA 1: Características do LDR

Observamos que o LDR é muito sensível à luz externa, qualquer variação da luz externa afeta a resistência do LDR. Optamos, então, por proteger o LDR com um tubo preto, eliminando a entrada indesejada (luz externa) do sistema (ver figura 6). Após esta nova montagem fizemos outros testes e observamos que a luz externa pouco influenciava o valor da resistência do LDR.



**FIGURA 6:** Montagem LED / LDR com proteção

Vamos trabalhar numa faixa entre 0 e 15V sobre o LED, nesta faixa a resistência do LDR varia entre 800 e 10k . E esta relação pode ser considerada como linear. Feita a montagem LED / LDR, devemos analisar o sistema a malha aberta: PLANTA + SENSOR.

### 2.3 Controlador PI

O controlador PID é uma forma refinada de controle. Antes de iniciar nosso projeto do controlador PID vamos fazer breve descrição de seus elementos principais.

O setpoint define o valor desejado para a variável do projeto. No nosso caso devemos escolher através do setpoint a intensidade luminosa que o LED deve emitir. O setpoint é uma fonte de tensão ajustável.

A variável do processo, também chamada de medida, é a variável proveniente do processo. Essa variável deve ser comparada com o valor desejado (setpoint), e é uma tensão obtida através do nosso sensor (LDR).

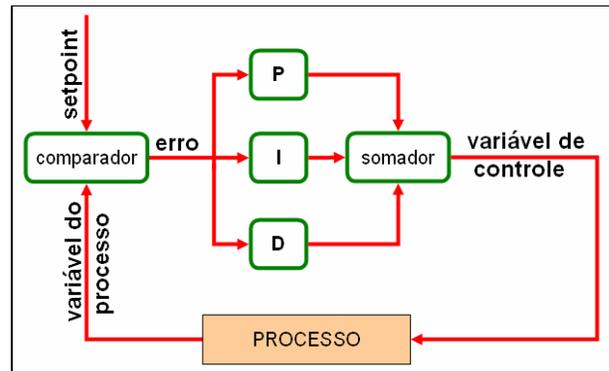
A variável de controle é a variável que sai do controlador e é aplicada no processo, com o objetivo de ajustar o parâmetro que se deseja controlar. É uma tensão fornecida pelo controlador.

O princípio básico do controlador é comparar o setpoint com a variável do processo, conforme a equação:

$$\text{SETPOINT-VARIÁVEL\_DO\_PROCESSO} = \text{ERRO}$$

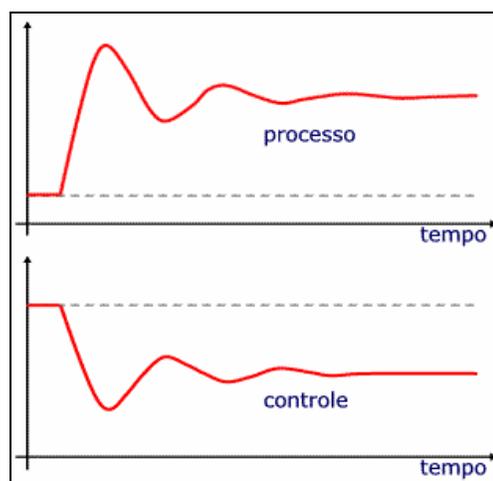
Se o erro for constante e igual a zero, não há o que fazer, caso contrário uma alteração no controlador deve ocorrer a fim de tornar o erro nulo.

A figura 1 mostra um esquema simples de um controlador PID.



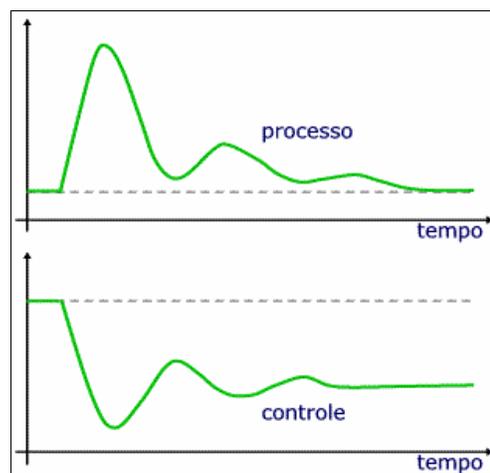
**FIGURA 1:** Esquema de um controlador PID

O controlador PID pode ser considerado como uma soma de parcelas: proporcional (P), integral (I) e derivativa (D). A figura 2 mostra um comportamento típico das variáveis de processo e de controle em sistema apenas proporcional. Pode ser observado que a atenuação das variáveis não é boa, que ocorre um deslocamento (offset), exigindo a correção manual.



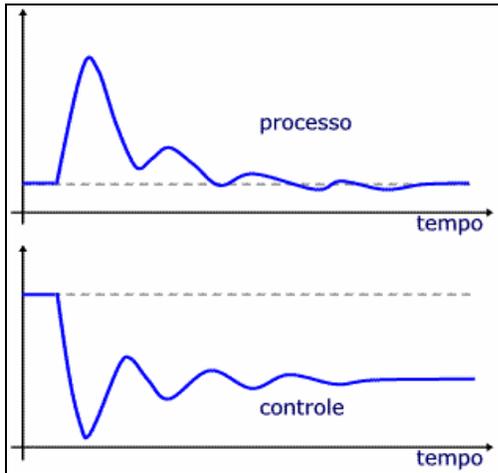
**FIGURA 2:** Comportamento das variáveis do sistema proporcional

A figura 3 mostra o comportamento de um controle com os métodos proporcional e integral. O deslocamento (offset) é eliminado, mas a regulação não é das melhores.



**FIGURA 3:** Comportamento de um controle com ação proporcional e integral

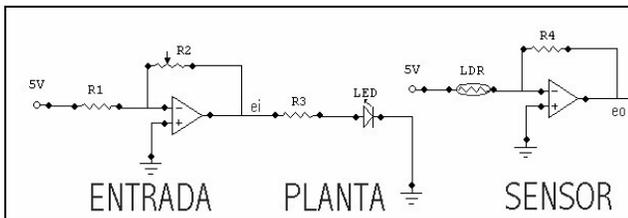
A figura 4 mostra o comportamento de um controle com ação proporcional, integral e derivativo. A ação da derivada tende a se opor às variações da variável do processo, fazendo com que o controle se aproxime do setpoint, propiciando uma estabilidade mais rápida e uniforme do processo.



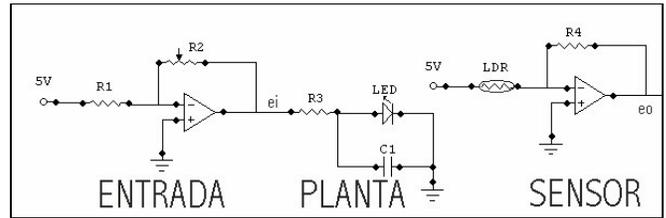
**FIGURA 4:** Comportamento de um controle com ação proporcional, integral e derivativa

### 3 ANÁLISE E MODELAGEM DO SISTEMA A MALHA ABERTA

Para modelar nosso sistema é preciso analisar o sistema a malha aberta. Primeiro fizemos a configuração conforme a figura 7. O sistema mostrado comporta-se como um sistema de ordem zero. Optamos por modelar um sistema de primeira ordem, para isso introduzimos um capacitor em paralelo com o LED (ver figura 8).



**FIGURA 7:** Sistema de ordem zero a malha aberta – PLANTA + SENSOR



**FIGURA 8:** Sistema de primeira ordem a malha aberta – PLANTA + SENSOR

Os parâmetros do sistema mostrado na figura 8 são os seguintes:

**Entrada:**

- $R_1$ :  $10k // 820 = 757.86 \Omega$
- $R_2$ : entre 0 e  $2 k\Omega$
- tensão de entrada: +5V
- tensão de saída  $e_i$ : entre 0 e 13.2V

**Planta:**

- $R_3$ :  $1 k\Omega$
- LED: queda de tensão 1,2V
- $C_1$ :  $220 \mu F$

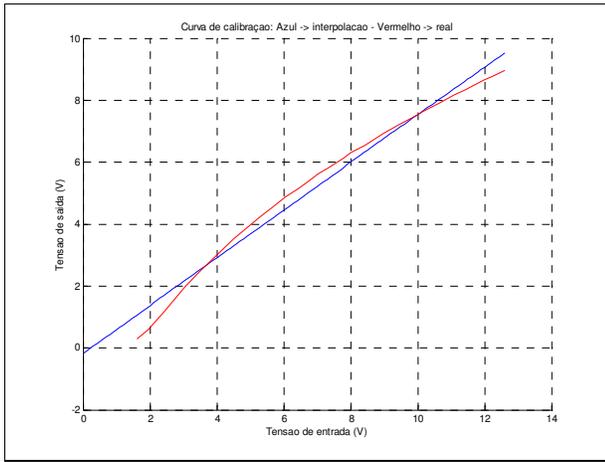
**Sensor:**

- LDR: entre 900 e  $10 k\Omega$
- $R_4$ :  $1.6 k\Omega$
- tensão de entrada: +5V
- tensão de saída  $e_o$ : entre 0 e 9V

Para obter a função de transferência a malha aberta  $GH(s)$  devemos calcular dois valores: a constante de tempo  $\tau$  e o ganho estático, conforme a equação 1:

$$GH(s) = \frac{K_e}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Obtivemos o ganho  $K_e$  através da curva  $e_i \times e_o$  em regime estacionário, ver figura 9. A tabela 2 mostra os dados obtidos.

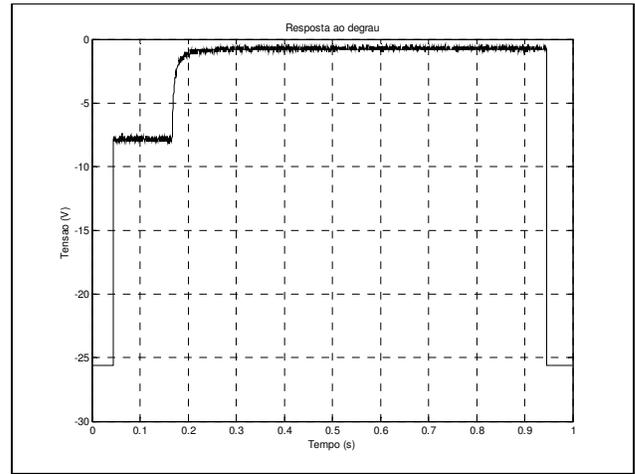


**FIGURA 9:** Curva de calibração

$e_i$ (V)	$e_o$ (V)
0.01	0.23
0.66	0.23
0.95	0.23
1.30	0.23
1.49	0.20
1.61	0.28
1.94	0.59
2.40	1.16
3.05	1.98
3.49	2.47
3.98	3.00
4.51	3.52
4.90	3.88
5.31	4.24
5.64	4.52
6.07	4.87
6.46	5.17
6.74	5.39
7.03	5.61
7.35	5.93
7.80	6.14
8.02	6.30
8.41	6.55
8.97	6.92
9.27	7.10
9.38	7.17
9.91	7.48
10.15	7.63
10.62	7.90
11.10	8.17
11.40	8.34
11.98	8.65
12.26	8.80
12.60	8.97

**TABELA 2:** Dados da curva de calibração

A constante de tempo  $\tau$  foi obtida a partir da resposta ao degrau. Aplicamos uma onda quadrada na entrada do sistema, e através da resposta obtida (figura 10) calculamos a constante de tempo.



**FIGURA 10:** Resposta ao degrau

Os resultados obtidos foram os seguintes:

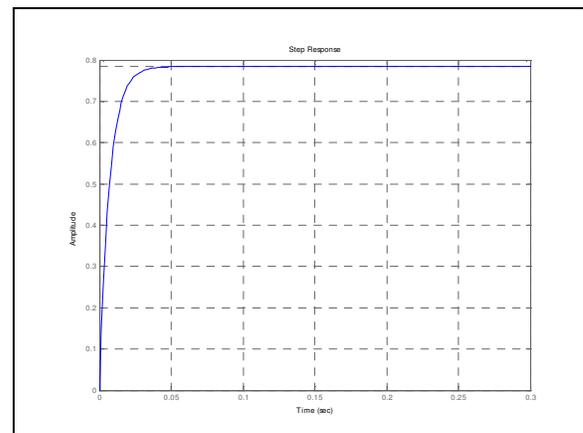
$$K_e = 0.7846$$

$$\tau = 0.007 \text{ s}$$

Então a função de transferência planta + sensor é:

$$GH(s) = \frac{0.7846}{0.007s + 1}$$

A figura 11 mostra o resultado da simulação do sistema a uma entrada em degrau unitário.



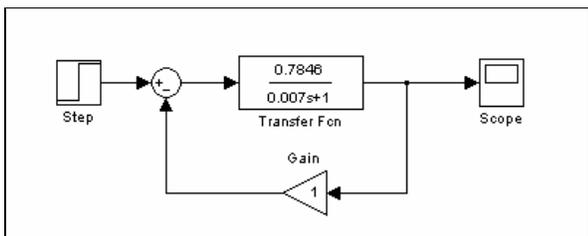
**FIGURA 11:** Simulação da resposta a uma entrada em degrau

## 4 PROJETO DO CONTROLADOR PI

O desenvolvimento de um controlador tem como o objetivo melhorar a resposta de nossa planta em malha fechada. Logo, o estudo do comportamento de nosso sistema em malha fechada é o primeiro passo para o desenvolvimento do controlador.

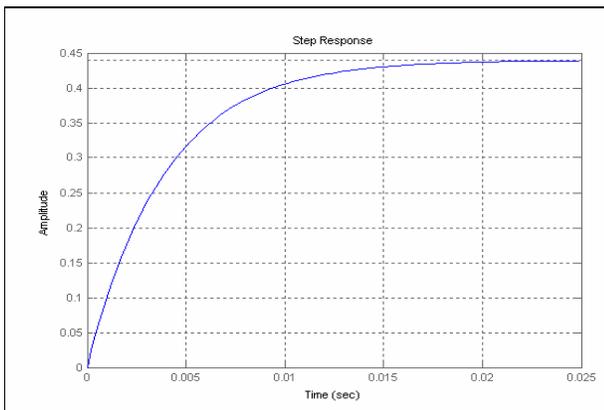
A aquisição de dados e modelagem do sistema em malha aberta foi realizada com a integração do sensor na planta. Isso é o que, de fato, acontece em situações reais, pois é sempre necessária a utilização do sensor para que a obtenção dos resultados, mesmo que em malha aberta, possa ser analisada. Dessa forma, a função de transferência do sensor,  $H(s)$ , pode ser considerada com o sendo igual a 1.

O diagrama abaixo ilustra a malha fechada utilizada no desenvolvimento do controlador.



**DIAGRAMA 1** – Malha fechada sem controlador

A resposta ao degrau unitário do malha mostrada acima é a seguinte.



**FIGURA 12** – Resposta ao degrau em malha fechada

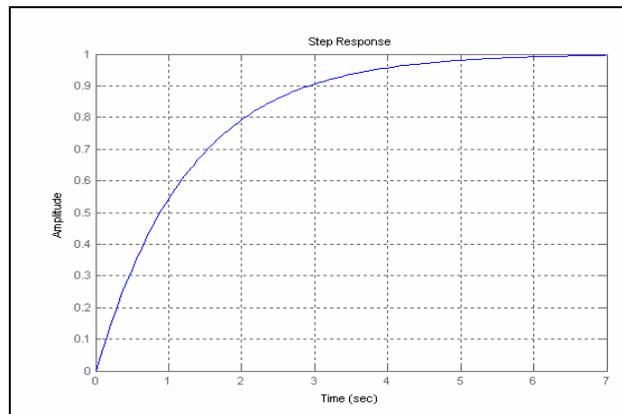
Como pode ser visto, a malha aberta do sistema é modelada por uma função de transferência de 1ª ordem com um pólo  $p$  em -142,9. Conseqüentemente, essa planta apresentará um erro em estado estacionário para uma entrada ao degrau – isso é facilmente observado pelo fato da função de transferência não apresentar um integrador. Nesse caso específico o erro em estado estacionário é o seguinte.

$$e_{ss} = \frac{A}{1,7846}$$

onde  $A$  é a amplitude do degrau de entrada.

O primeiro requisito desejado para esse sistema é que esse erro em estado estacionário para entrada em degrau seja minimizado ou, até mesmo, excluído por completo.

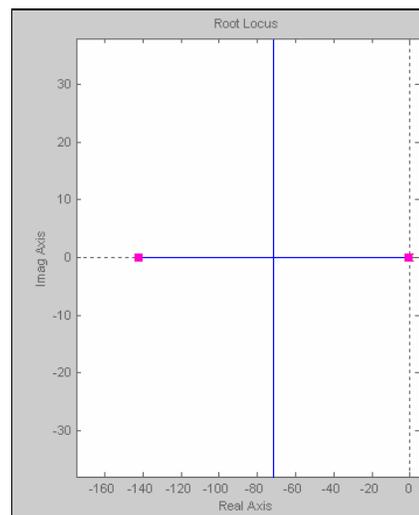
Adicionando um controlador integrador ao sistema, eliminamos, através do pólo na origem, o erro em estado estacionário do sistema para a entrada em degrau. No entanto, observa-se que o tempo de resposta do sistema que antes era determinado pela constante de tempo  $\tau = 0,007$  segundos cresce bastante. Observe, pela a figura 13, a curva de resposta ao degrau do sistema obtido com o fechamento da malha.



**FIGURA 13** – Resposta ao degrau com integrador

O próximo passo é, então, reajustar a malha com o objetivo de diminuir a nova constante de tempo do sistema para um valor menor.

Inicialmente, é bastante válido observar o gráfico do lugar das raízes do sistema. É notável, devido à presença dos dois pólos – um da malha aberta e o outro do integrador, a formação de uma reta vertical, paralela ao eixo imaginário, representando o caminho das raízes da equação característica do sistema à medida que há uma variação no ganho. A figura 14 ilustra a situação para um ganho unitário (como o lugar das raízes representa o caminho dos pólos do sistema a medida que o ganho varia de 1 a infinito, os pólos do sistema estão exatamente na posição inicial da variação do ganho, ou seja, situação em que os pólos da malha fechada são os mesmos da malha aberta).



**FIGURA 14** – Lugar das raízes para malha fechada com integrador

Intuitivamente, pode-se pensar que se o ganho for aumentado em determinada proporção, de forma que os pólos do sistema passem a se localizar sobre a reta vertical do lugar das raízes, ter-se-á, então, uma resposta oscilatória típica de um sistema de segunda ordem. Logo, notar-se-á a presença de um pico de ultrapassagem e, conseqüentemente, um tempo de pico inversamente proporcional a este.

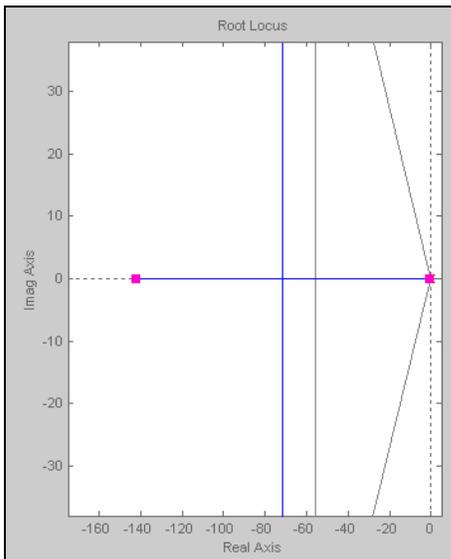
Tendo em vista esse fato, é razoável pensar na possibilidade de aumentar o ganho do sistema e, ao mesmo tempo, verificar tanto a constante de tempo do sistema de segunda ordem ( que no caso é definida como sendo  $1/\zeta\omega_n$  ) como seu tempo de assentamento. A partir daí, podem ser estabelecidos os valores ideais de parâmetros para o sistema.

Levando em conta a análise da malha aberta do sistema, os princípios fundamentais das leis de controle e o comportamento desejado para o sistema em malha fechada, considera-se, como requisitos desejados para o sistema os seguintes pontos:

- Percentual de overshoot menor que 10%
- Tempo de acomodação menor que 0.07 segundos (mesmo valor da constante de tempo da malha aberta)

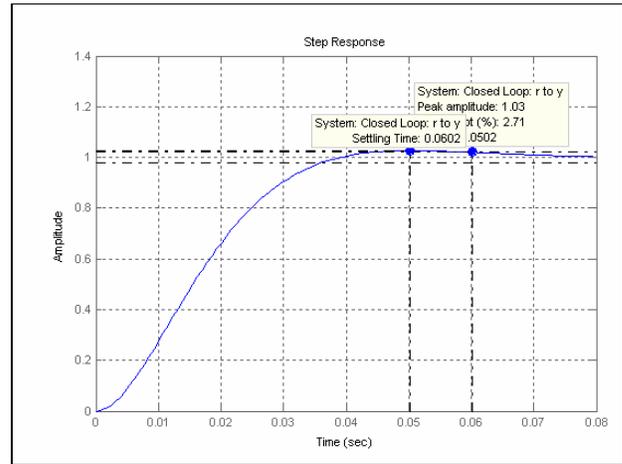
Para auxiliar a concretização do objetivo acima, foi usada a ferramenta SISO Tool do MATLAB para fazer as devidas variações de ganho no sistema e a obtenção dos respectivos resultados.

Incorporando as restrições feitas ao sistema, pode-se observar, pela figura 15, que o integrador com ganho unitário não satisfaz os requisitos. Observe que a presença do ponto na origem contrariando as especificação do sistema.



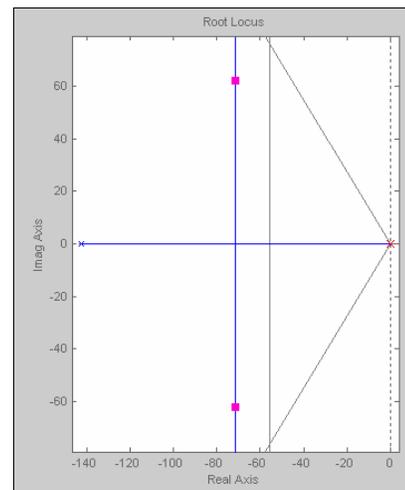
**FIGURA 15** – Lugar das raízes com restrições do sistema

Ao longo de alguns experimentos, chegou-se a um valor de ganho integrador igual a 80 e uma resposta ao degrau do sistema mostrada pela figura 16.



**FIGURA 16** – Resposta ao degrau com ganho 80 do integrador

Como pode ser notado, os valores para percentual de overshoot e tempo de assentamento são, respectivamente, P.O. = 2,71% e  $T_a = 0,00602$  segundos. O gráfico do lugar das raízes para o sistema nessa configuração é mostrado pela figura 17.



**FIGURA 17** – Lugar das raízes com ganho corrigido

Adicionalmente, pode ser incorporado um fator proporcional a ser somado com o fator integral recém criado no sistema para formar um controlador PI. Com uma boa sintonia desse controlador, pode-se obter, em termos de desempenho, resultados melhores ainda.

Durante a sintonia do controlador PI, o ganho integral recém-descoberto pode sofrer alterações, visto que, agora, é de extrema importância que o conjunto  $K_p$  e  $K_i$  determinem o bom comportamento do sistema.

Após algumas tentativas de variações dentro das restrições colocadas – vale citar mais uma vez que as restrições foram colocadas dentro do gráfico do lugar das raízes para facilitar o

processo, chegou-se aos seguintes valores dos ganhos integral e proporcional:

$$K_p = 0,5220$$

$$K_i = 180$$

A função de transferência do controlador é, então, a seguinte.

$$C(s) = \frac{0.5220s + 180}{s}$$

O gráfico do lugar das raízes para o sistema com os determinados ganhos e a resposta ao degrau unitário do mesmo são mostrados, respectivamente, pelas figura 18 e 19. Observa-se que os novos valores para percentual de overshoot e tempo de assentamento são, respectivamente, P.O. = 4,82% e Ta = 0,039 segundos.

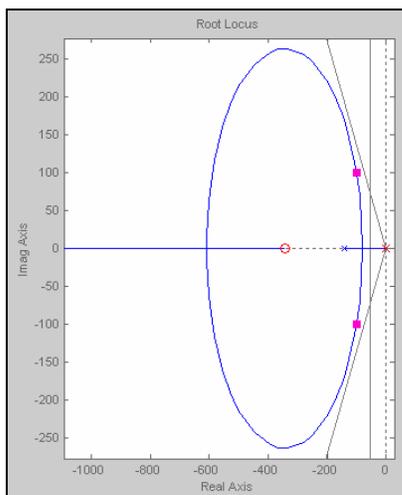


FIGURA 18 – Lugar das raízes do PI

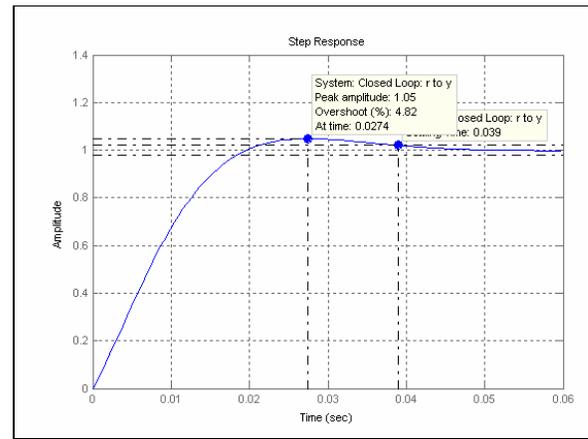


FIGURA 19 – Resposta ao degrau do PI

## 5 ESQUEMA ELETRÔNICO DO CONTROLADOR

Vamos descrever todos os passos para obtenção dos valores dos componentes eletrônicos. A figura 20 mostra todo o circuito do projeto.

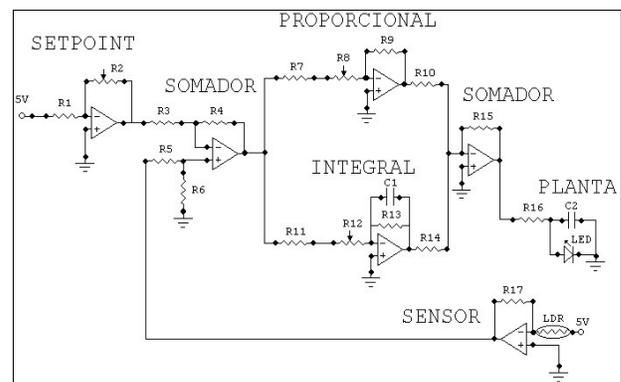


FIGURA 20: Circuito do projeto

### 5.1 Sensor

Durante a modelagem do sistema a malha aberta vimos que a resistência do LDR varia entre 900 e 10k  $\Omega$ , e definimos os seguintes valores para os componentes relacionados ao sensor:

- LDR: varia entre 900 e 10k  $\Omega$
- R17 = 1600  $\Omega$
- tensão de entrada: +5V
- tensão de saída: varia entre 0 e 9V

## 5.2 Setpoint

Devemos projetar o setpoint para que forneça tensão na mesma faixa de valores que o sensor. Os valores escolhidos foram os seguintes:

- R2: trimpot, cuja resistência varia entre 0 e 2k  $\Omega$
- R1: 1k  $\Omega$
- tensão de entrada: +5V
- tensão de saída varia entre 0 e 10V

## 5.3 Planta

A planta é formada pelo LED, que está em paralelo com um capacitor, que juntos estão em série com uma resistência. Seus valores são os seguintes:

- C2 = 220  $\mu$ F
- R16 = 1k  $\Omega$

## 5.4 Controlador proporcional

A equação abaixo mostra a função de transferência que define o ganho proporcional.

$$\frac{e_o}{e_i} = - \frac{R9}{R7 + R8}$$

O ganho proporcional ideal é 0.522, então os valores dos componentes são os seguintes:

- R9 = 1k  $\Omega$
- R7 = 100  $\Omega$
- R8: trimpot, cuja resistência varia entre 0 e 2k  $\Omega$
- ganho proporcional  $K_p$  : varia entre 0.476 e 10

## 5.5 Controlador integral

A equação que define o valor do ganho do integrador é:

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{R13}{(R11 + R12)(R13C1s + 1)} = \frac{1}{(R11 + R12)\left(C1s + \frac{1}{R13}\right)}$$

se R13 for grande, temos:

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{(R11 + R12)C1s}$$

O ganho que desejamos obter é 180, então os valores escolhidos são:

- C1 = 2.2  $\mu$ F
- R11 = 2k  $\Omega$
- R12: trimpot que varia entre 0 e 2k
- ganho do integrador  $K_i$  : varia entre 113.63 e 227.27

## 5.6 Somador do controlador

A resistência do somador é igual às resistências das saídas do P e do I, e são:

- R10 = R14 = R15 = 1k  $\Omega$

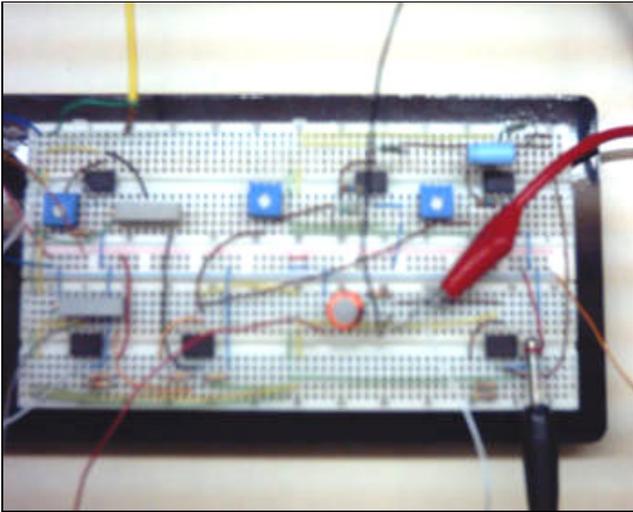
### 5.6.1 Somador (erro)

Como o ganho do integrador é muito alto foi necessário diminuir o valor da tensão de entrada no PI, para isso demos um 0.0082 no erro. Os valores das resistências são:

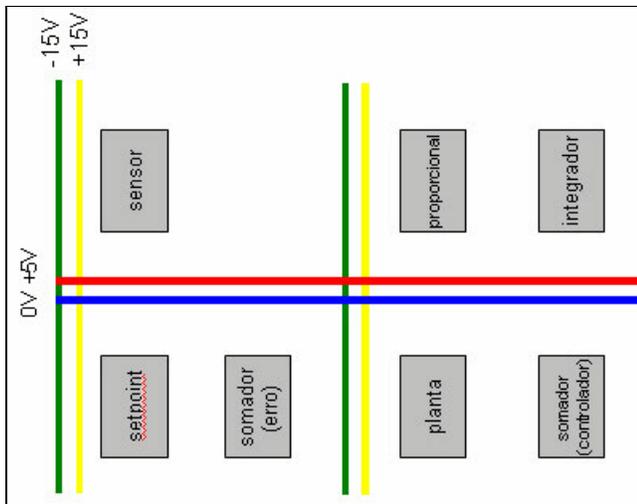
- R4 = R6 = 100k  $\Omega$
- R3 = R5 = 820  $\Omega$

## 6 CONFIGURAÇÃO DO PROTO BOARD

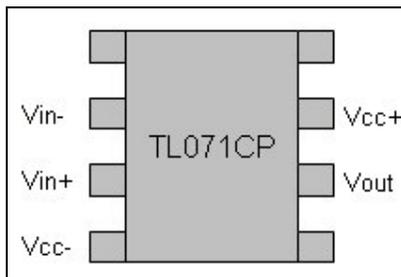
As figuras 21 e 22 mostram a configuração do proto board. O amplificador utilizado foi o TL071, e sua configuração está mostrada na figura 23.



**FIGURA 21:** Proto board com o circuito do projeto



**FIGURA 22:** Esquema do proto board

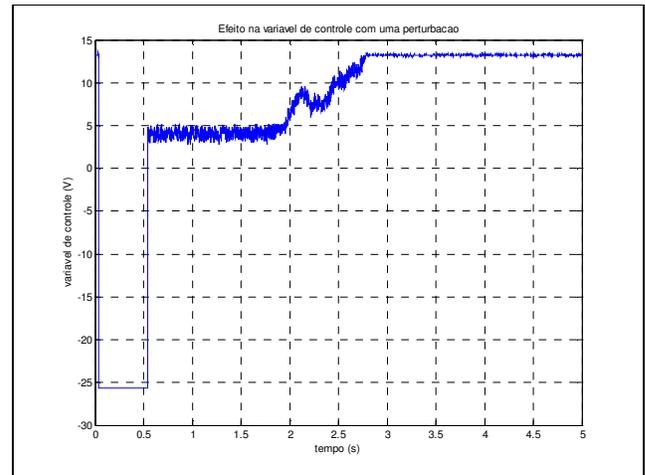


**FIGURA 23:** Configuração do AmpOP

## 7 ANÁLISE DOS DADOS

Fizemos vários testes em nosso sistema, ele respondeu como esperávamos. Durante a faixa estipulada para o setpoint (0 e 10V) o erro é zero em regime estacionário, sendo o tempo de resposta é muito rápido.

A figura 22 mostra a variável de controle sob o efeito de uma perturbação. Ao isolar o sensor do sistema a tensão aplicada na planta se torna máxima, pois o erro também se torna máximo.



**FIGURA 22:** Resposta do sistema a uma perturbação

## 8 COMENTÁRIOS FINAIS

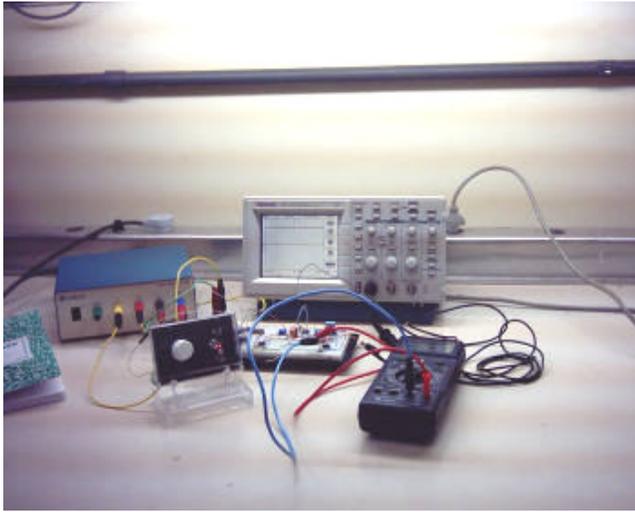
Este circuito desenvolvido além de servir para estudo e análise das dificuldades com a eletrônica do projeto, visa à compreensão de uma malha de controle SISO (Single Input Single Output).

Foi levantado o modelo matemático do sistema e sua dinâmica. Com estas informações prosseguiu-se para a última parte que é o controle da planta.

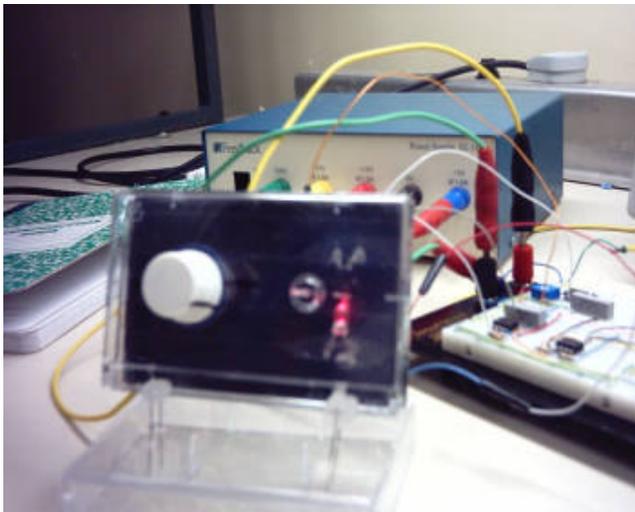
Por se tratar de um circuito que é aplicado na grande maioria dos controladores implantados na indústria mundial, constitui-se base fundamental no estudo da Teoria de Controle.

## 9 APÊNDICE

Como material complementar, estão disponibilizadas algumas fotografias tiradas do projeto:



**FIGURA 23** – Panôramica do circuito do projeto e instrumentos de medição



**FIGURA 24** – Panôramica do circuito do projeto e instrumentos de medição



**FIGURA 25** – Participantes do Projeto

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYLESTAD, R. L. e Nashelsky, L. (1998). Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. *Prentice-Hall do Brasil*, pp. 001-035.
- DOEBELIN, E.O., (1990). Measurement Systems, Application and Design, 2nd Edition, *McGraw-Hill International*;
- DORF, R.C. e BISHOP R.H., Sistemas de Controle Moderno, *Prentice-Hall do Brasil*.