

RELATÓRIO FINAL – PROJETO DESAFIO CONTROLE DE POSIÇÃO ATRAVÉS DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Laboratório De Controle I (LECI)

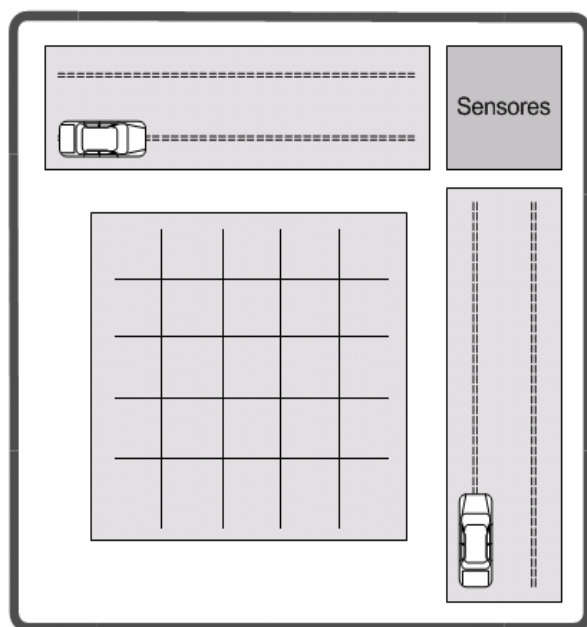
Professor: Reinaldo Martinez Palhares

Integrantes : Antônio J. R. Chaves, Marcelo P. C. Alves, Raphael C. Petronilho

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

No Laboratório de Controle I é proposto para cada grupo que seja feito, ao final do semestre, um *Projeto Desafio*, para que os alunos possam aplicar seus conhecimentos sobre Teoria de Controle, Eletrônica, Eletrônica de Potência e Instrumentação. A realização deste projeto consiste, além da concepção e montagem dos circuitos eletrônicos analógicos correspondentes ao controlador, comando do atuador e condicionamento do sinal do sensor, a concepção e montagem da planta a ser controlada.

O projeto proposto pelo grupo foi o Controle de Posição através de um sensor óptico. Um diagrama que representa a planta idealizada pelo grupo é apresentado abaixo:

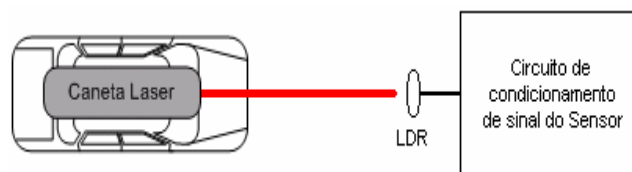


A proposta inicial constava de dois carrinhos, um para cada “dimensão” da planta. Com o desenrolar da execução do projeto, por questões envolvendo o tempo disponível, concluiu-se que não seria possível montar as

duas dimensões. Deste modo, foram utilizados apenas um carrinho, um circuito de acionamento e um circuito de sensor, o que não acarretou prejuízo relativo aos objetivos de implementar um sistema de controle de posição aplicando conhecimentos multidisciplinares. O ‘setup’ final da planta, portanto, pode ser representado conforme a figura abaixo:



O carrinho porta o atuador (motor CC embarcado). Sobre ele foi colocado um emissor raios “laser”, que serve como entrada para o sensor de luminosidade. Um esquema simples da montagem se encontra abaixo.



O circuito de condicionamento do sensor gera, deste modo, um sinal de tensão que é função da distância entre o carrinho e o elemento sensor. Este sinal é subtraído

da referência de posição, constituindo a realimentação negativa necessária ao controle da planta.

Esse documento tem como finalidade apresentar e explicar o desenvolvimento e os resultados obtidos acerca do *Projeto Desafio* descrito, considerando os problemas encontrados e as soluções implementadas, as quais possibilitaram o funcionamento da montagem.

2. MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DA PLANTA

Ao montar a planta, optamos por simplificar ao máximo sua construção para que pudéssemos conseguir terminar sua montagem em tempo hábil e fazer um bom trabalho na parte de controle, foco deste projeto.

A base da montagem foi um equipamento de autorama (já pronto), de onde foram aproveitados o carrinho e os trilhos sobre os quais este se move. Um simples desenho é mostrado abaixo.



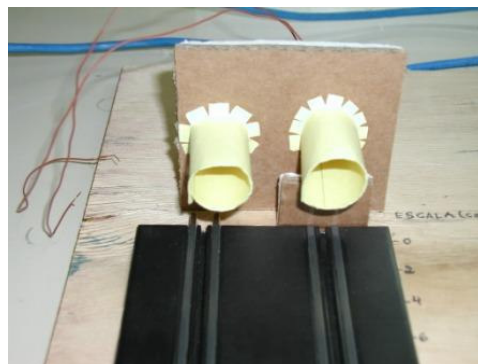
O carrinho já possui o motor de corrente contínua de que precisávamos, bem como uma estrutura física pronta para se deslocar sobre os trilhos. A pista fornece também uma grande facilidade, já que ela foi feita para que o carrinho ande por ela, o que simplifica a montagem da estrutura.

Apesar de a pista possuir um trilho de metal onde os contatos do carrinho ficariam encostados, a falta de robustez destes contatos fez com que buscássemos outra solução para alimentar o motor. Os contatos eram constituídos de malhas metálicas flexíveis presas em apenas um dos lados, o que dificultava o movimento do carrinho nos dois sentidos. Posteriormente, soldamos duas peças de metal rígidas no mesmo suporte, mas o fato de os contatos terem necessariamente de estar nivelados um com o outro nos fez descartar esta solução. Por fim, soldamos fios diretamente na parte de interna do carrinho, excluindo a dependência dos contatos existentes na pista.



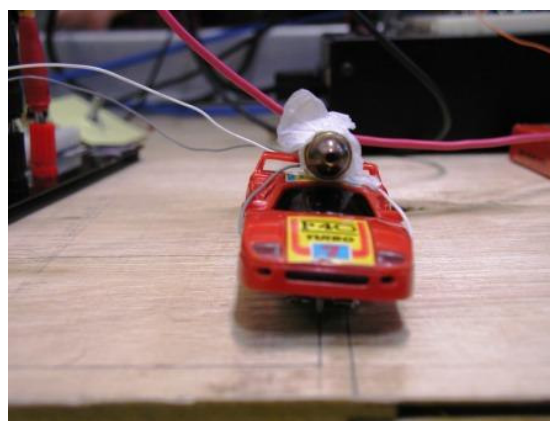
Os trilhos foram devidamente afixados com 'cola quente' em uma peça de madeira, para que a planta tenha

uma base rígida, evitando que os trilhos ficassem sobre qualquer superfície e garantindo que o controle de posição fosse implementado. Foram acoplados anteparos à pista, confeccionados com isopor e papelão, a fim de suportar o sensor de luminosidade e de evitar que o carrinho se movesse para fora dos trilhos.



Um LDR (*Light Dependent Resistor*) foi utilizado como sensor. O LDR consiste em um resistor que possui a resistência variável com a intensidade de luz que incide sobre ele.

Como já foi citado anteriormente, foi escolhido um emissor de raios laser simples (uma caneta-laser, como as utilizadas por palestrantes) para desempenhar o papel de fonte luminosa. Esta foi fixada sobre o carrinho e aponta para o LDR no canto da planta. Chegou a ser considerada a possibilidade de não se utilizar a caneta-laser, visto que o feixe de luz gerado por ela era por demais concentrado, o que proporcionava pouca variação da resistência do LDR para a distância correspondente ao percurso do carrinho. Para contornar o problema, foram colocadas duas camadas de plástico fosco em frente ao emissor de laser, a fim de dispersar a luz emitida. Esta solução resultou em variação considerável da resistência do LDR, conforme será mostrado adiante.



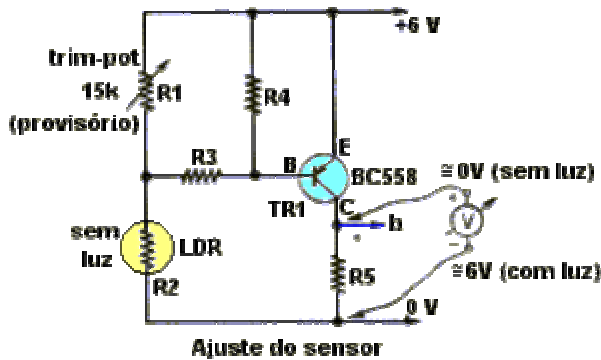
Foram confeccionados um circuito de condicionamento para o sensor e um circuito de comando para o carrinho se movimentar. Cogitou-se construir placas de circuito impresso para suportar os circuitos, mas, por falta de tempo, os circuitos foram montados sobre o protoboard adquirido pelo grupo. Os circuitos constam de resistores, amplificadores operacionais, transistores e potenciômetros.

O controlador analógico também foi montado no protoboard. Este, por se tratar apenas de um ganho proporcional, foi implementado como um amplificador não-inversor, usando amplificadores operacionais e resistores.

São, portanto, esses os componentes utilizados pelo grupo para implementar o *Projeto Desafio*. O grupo contou também com recursos do LECI (Laboratório para o Ensino de Controle e Instrumentação), como fontes DC e osciloscópios, o que possibilitou a execução de diversos testes envolvendo os circuitos e, conseqüentemente, que as decisões de projeto pudessem ser tomadas com base em observações mais precisas.

3. SENSOR DE LUMINOSIDADE

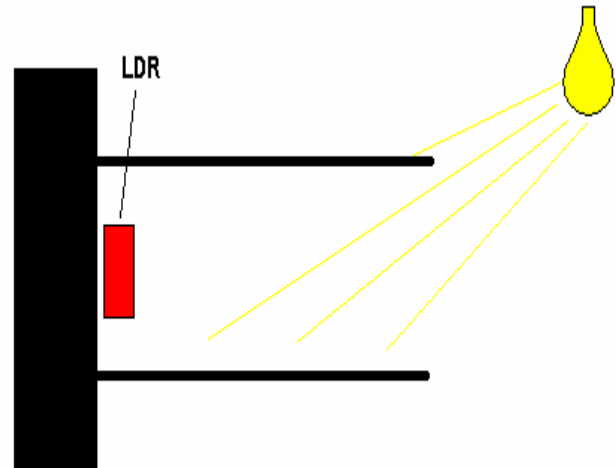
Analisamos e testamos um circuito eletrônico para “tradução” em tensão da variação da resistência do LDR. O esquema do circuito está na figura abaixo:



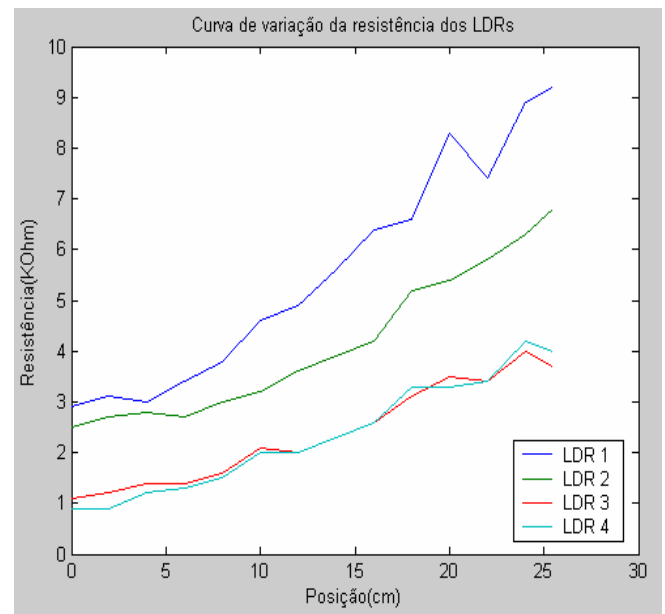
Quando da incidência de luz direta sobre o LDR, sua resistência cai sensivelmente (a luz excita elétrons de camadas mais internas, fazendo com que passem para a banda de condução), o que provoca a polarização direta da junção base-emissor do transistor (neste caso, um *pnp*), e, conseqüentemente, a circulação de corrente elétrica pelo resistor R5. A tensão sobre R5 seria, a princípio, proporcional à intensidade de luz incidente no LDR.

Entretanto, verificamos que a variação da tensão sobre R5 em resposta ao afastamento ou aproximação do laser em relação ao LDR foi mínima, o que dificulta a associação de um valor de tensão de saída do circuito do sensor com a distância do laser ao carrinho.

Avaliamos a possibilidade de serem utilizados dois LDRs braços de uma ponte de Wheatstone; um captando apenas a luz ambiente e outro tendo a fonte luminosa orientada para si (este também era influenciado pela luz ambiente). Deste modo, a diferença de potencial gerada para realimentação rejeitaria perturbações de variação da intensidade luminosa do ambiente. Para reduzirmos ainda mais a influência da luz ambiente, colocamos também os LDRs ao fundo de um cilindro que o protege da incidência direta da luz do ambiente como mostrado no esquema abaixo.



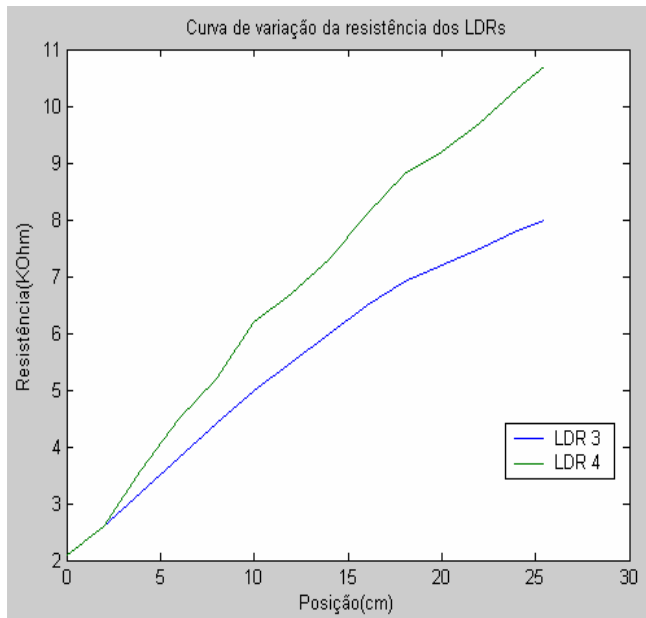
Para que pudéssemos implementar o circuito do sensor desta maneira teríamos de encontrar dois LDRs com curvas características bastante semelhantes. Para isso levantamos a curva de variação da resistência em função da posição para quatro LDRs diferentes. Os resultados encontrados são mostrados na figura abaixo.



As curvas acima foram levantadas com o laser contendo apenas uma camada de plástico fosco como dispersor.

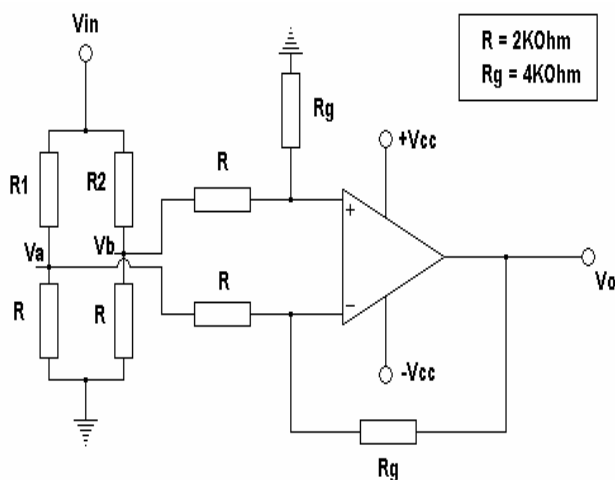
Verifica-se que as curvas correspondentes aos LDRs 3 e 4 são as mais próximas, e que as outras destoam muito destas. Além disso, estas são as curvas mais lineares, o que nos levou a escolher os LDRs 3 e 4 para implementação do circuito do sensor.

A curva para estes LDRs, com o laser contendo duas camadas de plástico fosco foi levantada, como mostrado no gráfico abaixo.

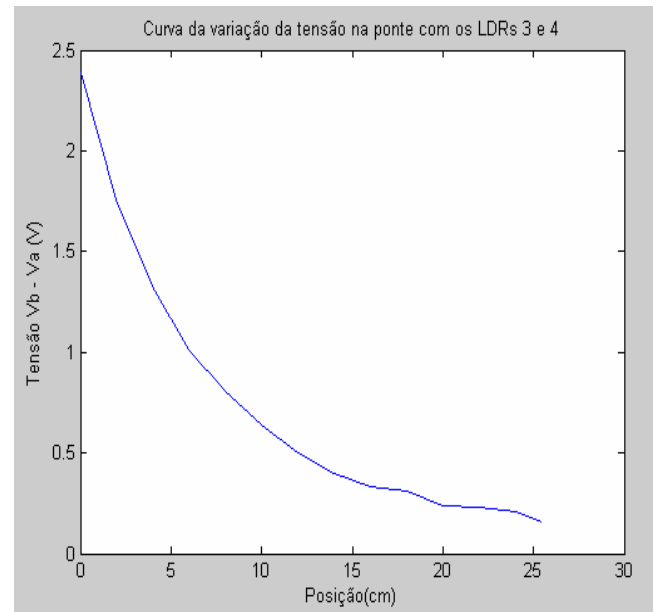


Vemos que mesmo os LDRs que possuam as curvas mais parecidas não tiveram um resultado final muito parecido. Assim sendo, fizemos testes com dois LDRs na ponte de Wheatstone e com apenas um LDR para verificarmos qual seria a melhor opção (qual dos esquemas teria uma resposta melhor).

Para realizarmos estes testes montamos o circuito de acordo com o esquema abaixo.

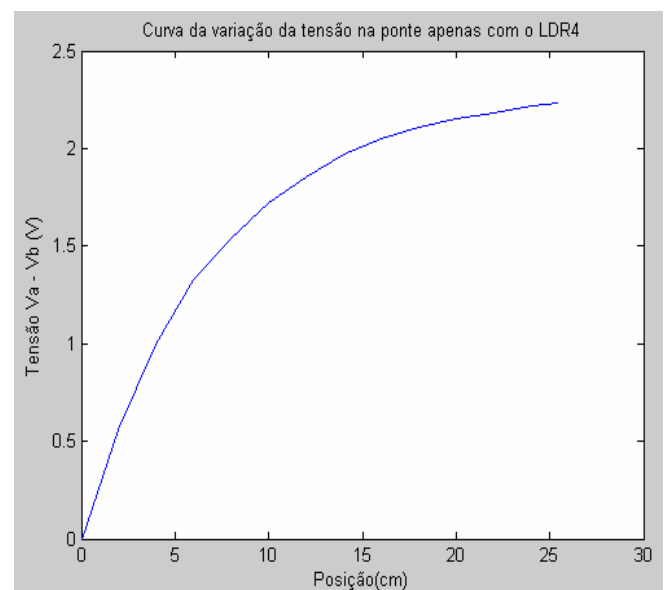


Para um primeiro teste fizemos $R1 = \text{LDR3}$ e $R2 = \text{LDR4}$. A curva da tensão $Vb - Va$ em função da posição está mostrada abaixo. Neste caso o laser incide sobre o LDR3 e o LDR4 faz a compensação da influência da luz ambiente.



Neste caso a curva é decrescente porque a diferença de tensão é máxima com o carro à distância zero do LDR 3 e à medida que distanciamos o carro esta diferença diminui. Como vemos, a curva não é linear e a faixa de valores de tensão é muito pequena.

Para um segundo teste fizemos $R1 = \text{LDR4}$ (este é mais linear do que o LDR3) e $R2 = 1,5\text{kOhm} +$ resistência de um Potenciômetro Regulável. Incluímos o Potenciômetro Regulável para podermos zerar a diferença de tensão no ponto de distância zero – esta diferença varia em função da luminosidade que incide sobre a planta no momento. A curva da tensão $Va - Vb$ em função da posição está mostrada abaixo.



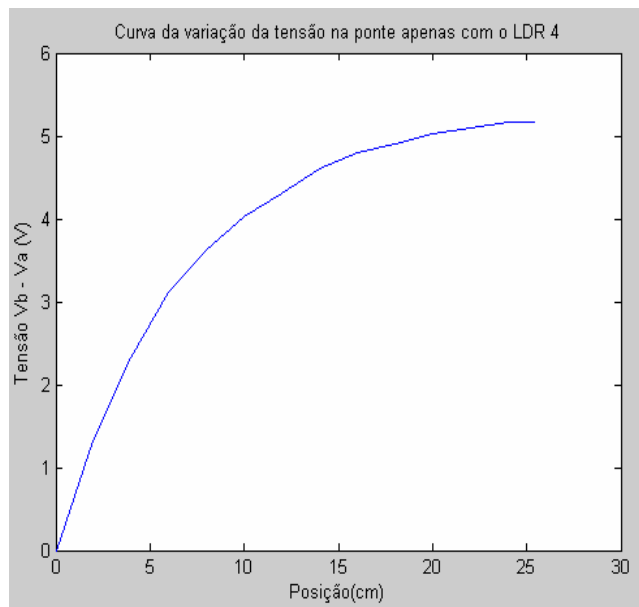
Neste caso a curva é crescente porque colocamos o potenciômetro para regularmos o zero no ponto de distância zero e medimos $Vb - Va$. Como vemos a curva também não é linear e a faixa de valores é praticamente a mesma, mas a variação agora é positiva.

Como havíamos visto antes, a curva dos dois sensores é um pouco diferente, sendo assim, escolhemos o esquema de montagem do circuito de acordo com o segundo teste, feito com apenas o LDR 4 na ponte. Apesar do sensor ser não linear isto não atrapalhou a determinação das escalas de referência da planta, visto que foi possível colocar uma escala não linear na referência.



No esquema do circuito, além da ponte de Wheatstone temos também um circuito amplificador-subtrator. O propósito deste circuito é amplificar o sinal do elemento sensor (diferença de tensão na ponte) para que a tensão fique numa faixa de operação maior, facilitando a detecção de variação da posição.

A curva da saída do circuito em função da variação da posição está mostrada abaixo. O ganho do sistema é, de acordo com o esquema, $R_g/R = 2$, o que pode ser visto na resposta abaixo onde os pontos da curva são cerca de 2,3 vezes maiores do que a curva anterior.



Abaixo, os dados referentes à curva calibração do sensor mostrada acima, tanto para a saída da ponte de Wheatstone como para a saída do circuito do sensor (saída do subtrator).

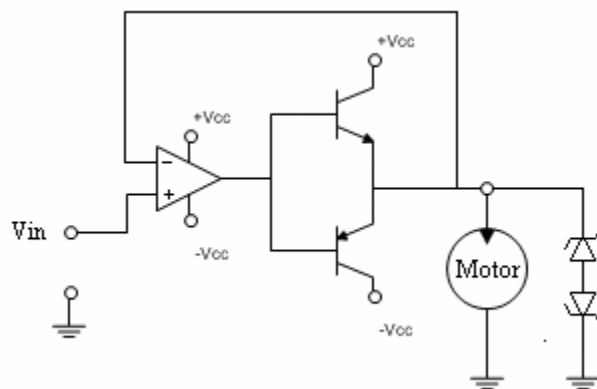
Distância	Tensão na Ponte	Tensão de Saída
0	0	0
2	0,56	1,33
4	1	2,33
6	1,33	3,11
8	1,54	3,62
10	1,72	4,02
12	1,85	4,3
14	1,97	4,6
16	2,05	4,79
18	2,11	4,91
20	2,15	5,02
22	2,18	5,09
24	2,22	5,16
25,5	2,23	5,17

4. ACIONAMENTO DO MOTOR

O motor de corrente contínua utilizado é de pequena potência e possui campo fixo (ímãs permanentes). Tiveram que ser feitas algumas adaptações nas engrenagens do motor, pois, por não ser muito robusto, estava apresentando problemas de folgas entre suas conexões e entre o motor. Foi preciso fixar melhor a engrenagem do motor e fixar o motor no carrinho de maneira com que essas folgas fossem diminuídas.

O circuito de acionamento foi projetado para que ele atenda uma especificação imprescindível de projeto: deve ser permitido ao motor girar nos dois sentidos.

O modelo do circuito é apresentado abaixo:



Foram escolhidos transistores que suportam correntes mais elevadas (maiores que 600mA) para que não houvesse problemas na alimentação do motor. Os transistores são do tipo TIP31 (NPN) e TIP32 (PNP).

Esse circuito possui a propriedade de fornecer tensões positivas e negativas em sua saída, na qual o motor está conectado, acompanhando o sinal da tensão de entrada Vin. Considerando um transistor ideal, a saída seria apenas +Vcc ou -Vcc, mas como não há essa idealidade, quando a tensão de entrada é muito pequena (por volta de 0,1 V ou menos), a tensão de saída não chega ao valor ideal. Esse comportamento não afeta significativamente o sistema.

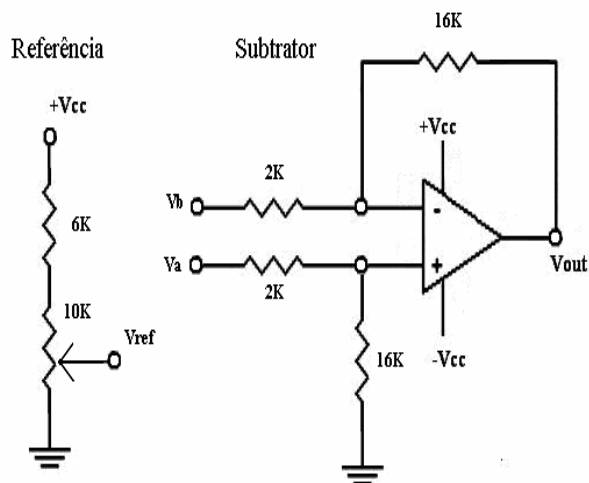
A alimentação do circuito, $\pm V_{cc}$, é feita com $\pm 5V$. Essa tensão é suficiente para que o Amplificador Operacional não sature antes de fornecer a tensão necessária para a alimentação do motor. Esse, não deve ser alimentado com mais de $3V$, pois sua velocidade pode ser muito alta com essa alimentação, e também sua estrutura física pode ser prejudicada.

Pode-se notar também que foi adotada uma medida de segurança para que a tensão no motor seja limitada. Dois diodos Zener, de $3,1V$ cada, foram colocados na saída para que a alimentação seja limitada.

Esse circuito se mostrou muito eficiente na planta, visto que a sensibilidade do motor foi conservada e a especificação foi atendida.

5. CIRCUITOS

Alguns outros circuitos precisaram ser incorporados à montagem, como o circuito subtrator e o circuito de referência do sistema. Tais circuitos são mostrados abaixo:



O circuito de referência consiste apenas em um resistor em série com um potenciômetro. A faixa de saída do divisor de tensão é de $6,25V$, para acompanhar, com certa folga, a saída do sensor. O potenciômetro será marcado, indicando a relação entre a tensão de saída e a posição do carrinho na pista.

O circuito subtrator possui a seguinte saída:

$$V_{out} = 8 \times (V_a - V_b)$$

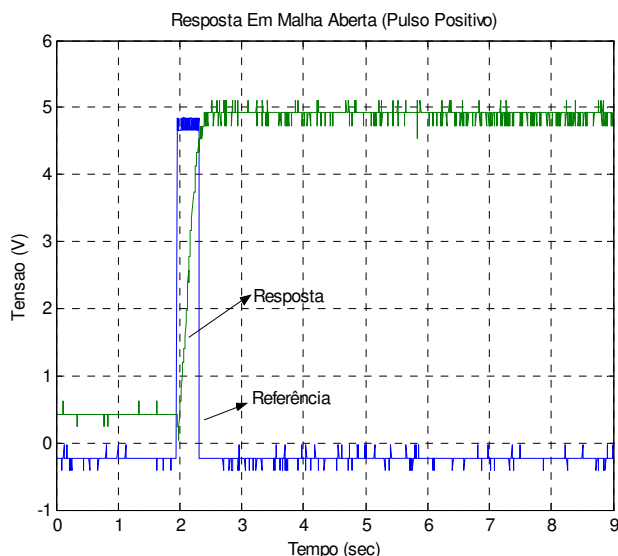
O objetivo desse circuito é fazer de sua saída, a entrada para o circuito de acionamento do motor. Em V_a coloca-se a tensão de referência (V_{ref} do circuito de referência) e V_b é a tensão de saída do circuito do sensor. Ao introduzir esse circuito no sistema, estamos fechando a malha de controle. O ganho associado a esse circuito se deve à sensibilidade do sistema. O objetivo é que, mesmo que haja pequenas variações da referência, o motor possa percebê-las.

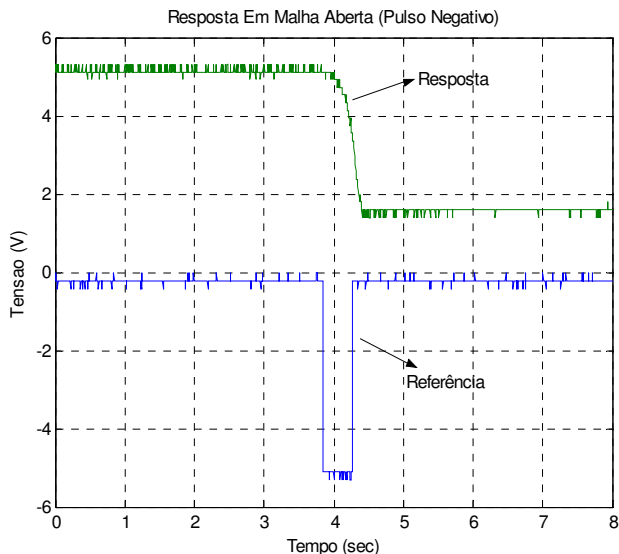
No apêndice é mostrado um desenho do esquema completo dos circuitos do sistema, considerando a malha

fechada (com o subtrator proporcionando a realimentação do sensor). O circuito designado como 'Proporcional' implementa o controlador escolhido para o sistema. Considerações sobre a determinação do controlador serão feitas no item correspondente à *malha fechada*.

6. MALHA ABERTA

A fim de obter um modelo para o sistema em malha aberta, foram aplicados pulsos de $5V$ na entrada do sistema, e coletada a saída do circuito de condicionamento do sensor, com o auxílio de um osciloscópio digital. Para tanto, Substituímos o circuito de referência representada no esquema do circuito eletrônico utilizado pela aplicação manual do pulso de tensão (colocar e retirar o fio manualmente no protoboard); para que o circuito ficasse em malha aberta, a saída do circuito do sensor não é ligada à entrada inversora do amplificador operacional do subtrator. Não foram aplicados degraus porque o sistema contém um integrador, isto é, em se aplicando uma entrada constante (tensão constante nos terminais do motor), o motor responde com uma velocidade constante, o que implica um aumento linear na posição enquanto esta entrada é aplicada. Como o percurso do carrinho é limitado, a entrada em pulso é a mais simples (e, portanto, adequada) para o levantamento do modelo. Abaixo seguem as respostas coletadas, bem como as respectivas entradas aplicadas (Pulsos de $+5V$).





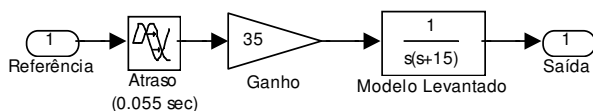
Com base nas respostas acima, foi levantado um modelo para a planta em malha aberta. Inicialmente, pensamos em elaborar um modelo considerando a planta apenas como um integrador associado a um ganho e a um atraso puro de tempo, mas devido à não linearidade do sensor, o modelo, que representava satisfatoriamente a resposta para o pulso positivo, não representou bem a resposta para o pulso negativo. Então, tentamos acrescentar ao modelo anterior um pólo real. Os valores do atraso e do ganho a serem considerados no modelo podem ser obtidos por inspeção dos pontos coletados pelo osciloscópio para a resposta. Pudemos verificar que o atraso envolvido na resposta ao pulso positivo de tensão é de 0.055 segundos; a princípio é um valor relativamente pequeno, mas foi considerado para enriquecimento da análise. Vale lembrar que o ganho atribuído ao circuito subtrator já é considerado nas respostas plotadas acima.

Após algumas iterações de atribuição de valores para o pólo e para o ganho (processo realizado com auxílio do Matlab), foi obtido o seguinte modelo:

$$\theta = 0.055 \text{ sec}$$

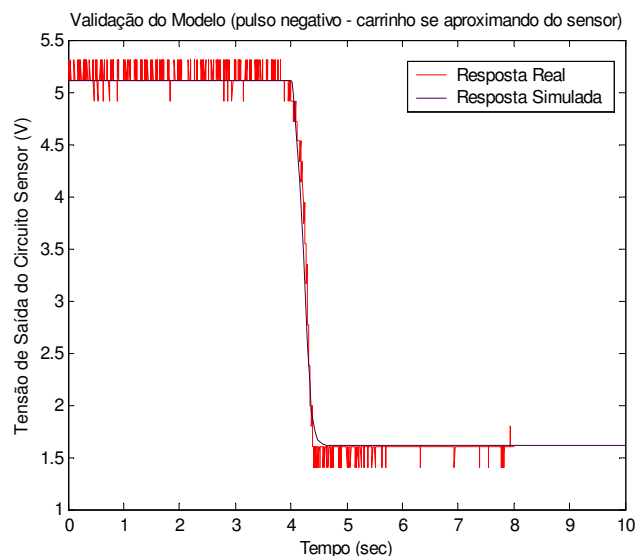
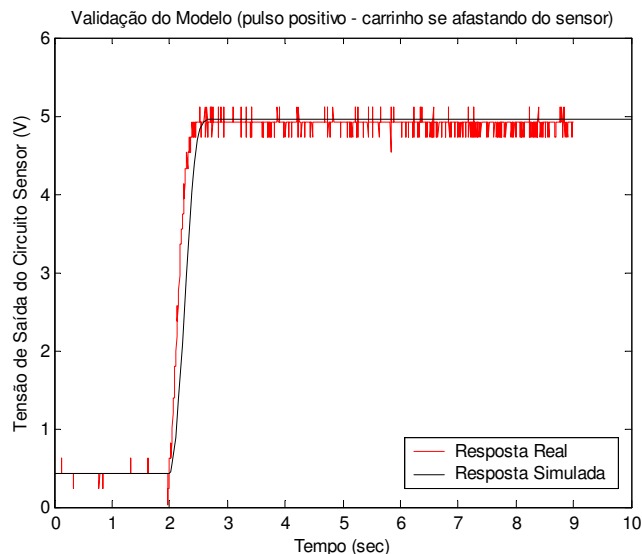
$$G_{planta} = \frac{35e^{0.055s}}{s(s+15)} = \frac{35}{s(s+15)} \times \frac{3636-s}{3636+s} = \frac{-35s+1273}{s(s^2+51.36s+54.55)}$$

O diagrama de blocos considerando o modelo determinado é:



Abaixo temos a comparação entre as respostas obtidas na prática (plotadas acima) e as respostas geradas

por simulação baseada no modelo representado por G_{planta} , considerando entradas idênticas às aplicadas no teste real:



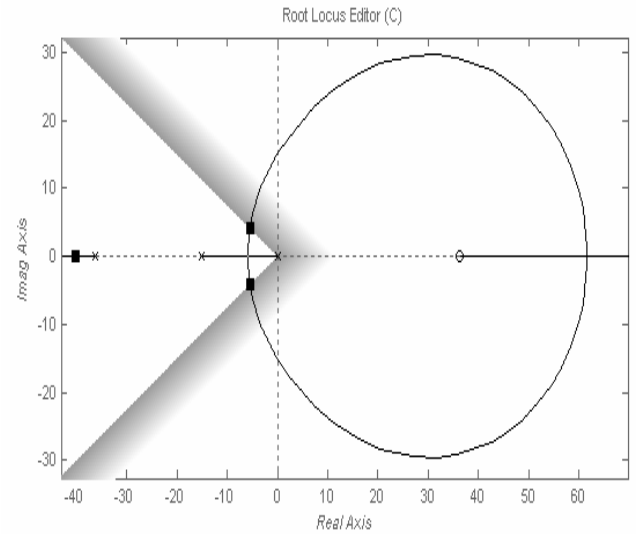
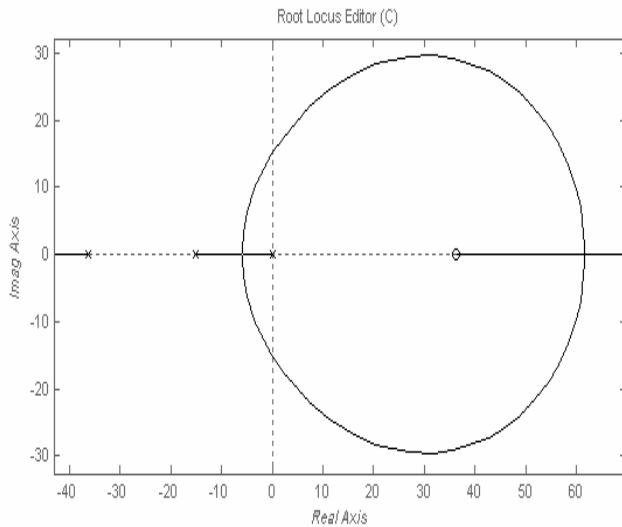
Podemos verificar, portanto, que o modelo obtido aparentemente fornece uma boa aproximação para a dinâmica da planta construída.

7. MALHA FECHADA

Considerando o modelo obtido para a malha aberta apresentado

$$G(s) = \frac{-35s + 1273}{s(s^2 + 51.36s + 54.55)}$$

com o auxílio da GUI `rltool` disponível no Matlab, obtém-se o seguinte gráfico para o lugar das raízes (Root Locus):



Como consideramos o atraso (ainda que aparentemente pequeno) na confecção do modelo, o lugar das raízes caracteriza um sistema de fase não-mínima (zero localizado no semi-plano direito do plano s). Verifica-se, portanto, que, em se aumentando o ganho em malha aberta, o sistema pode responder de maneira instável (as raízes migram para o semi-plano direito).

Inicialmente, pensamos em utilizar um controlador PI (*proporcional-integral*), mas a adição de mais um pólo na origem reduziria a margem de estabilidade do sistema, de maneira que o ganho da parcela integral deveria ser muito pequeno para que o comportamento do sistema se aproximasse do desejado (pequeno overshoot e, principalmente, razoável rejeição a perturbações em pulso – ao dar um ‘toque’ no carrinho retirando-o da posição de referência, ele deve voltar ao ponto original – e pequeno erro em estado estacionário para entrada em degrau). Deste modo, foi utilizado apenas um controlador *proporcional*.

Assim, temos a função de transferência:

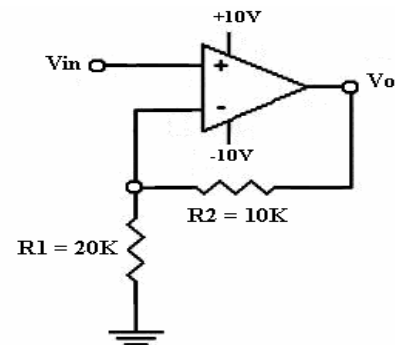
$$C(s).G(s) = Kp \cdot \frac{-0,9625 \cdot s + 35}{s(0,0275 \cdot s^2 + 1,413 \cdot s + 15)}$$

onde temos apenas Kp como parâmetro.

A linha que delimita o coeficiente de amortecimento (ζ), igual a 0.800 é apresentada no gráfico. As raízes apresentadas se referem à

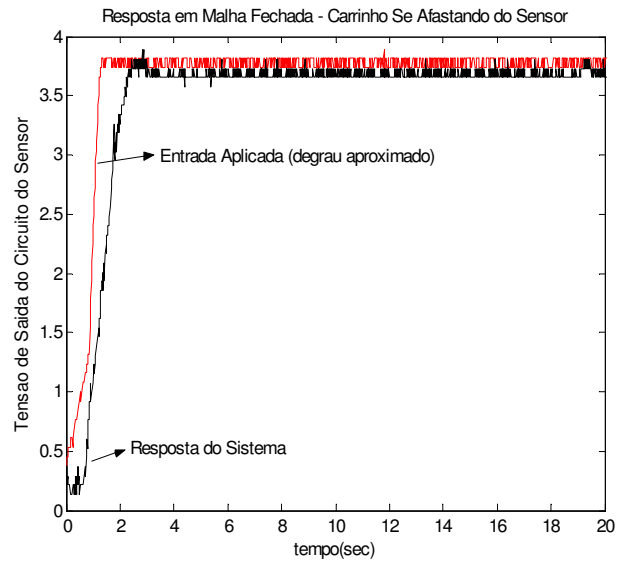
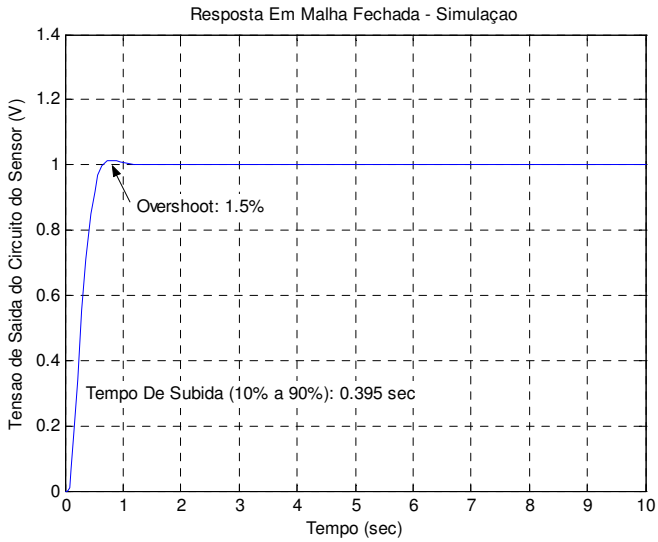
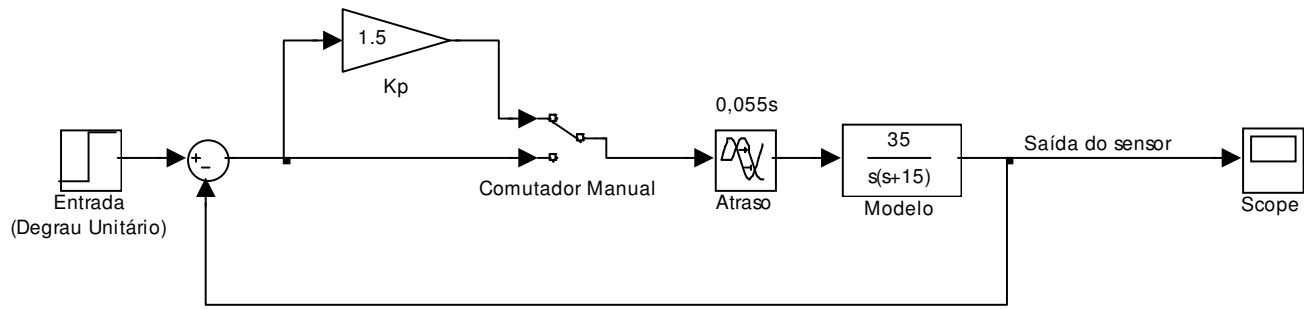
$$C(s) = Kp = 1,5$$

O circuito do controlador é bastante simples, e como já fora mencionado, consiste em um amplificador não-inversor. Seu desenho é mostrado a seguir, assim como sua função de transferência.

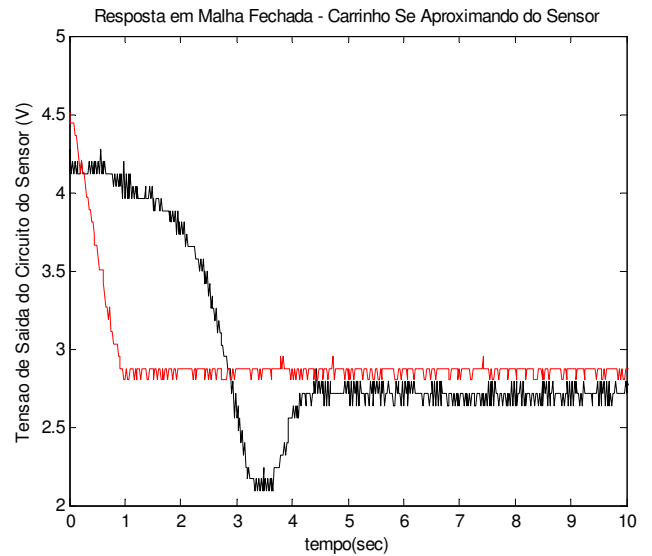


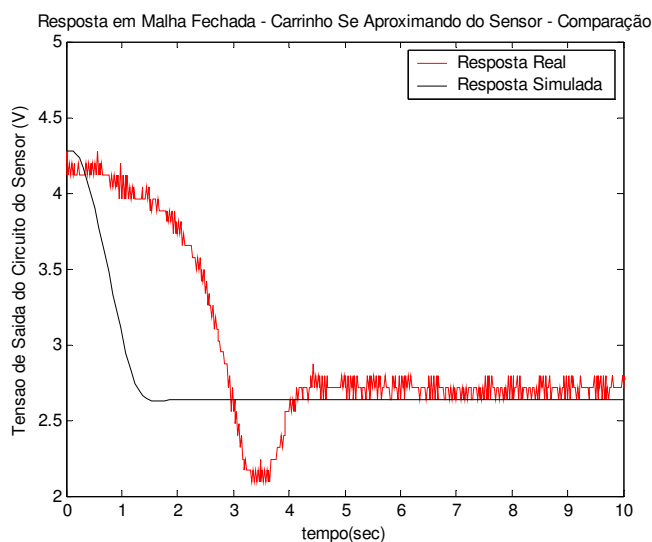
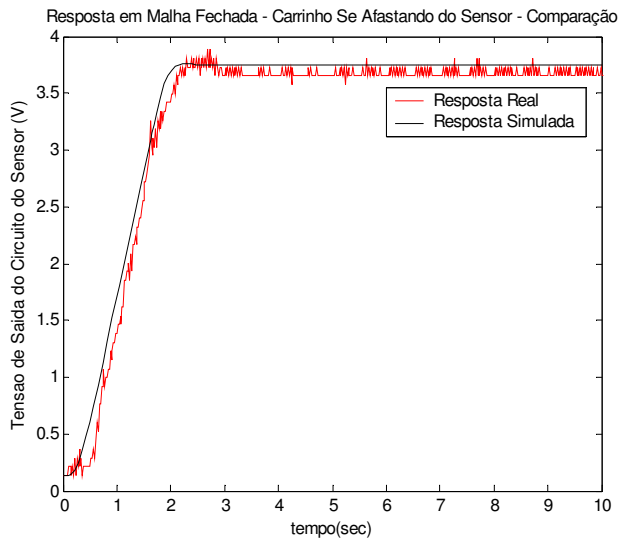
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1,5$$

A seguir são mostrados o diagrama de blocos correspondente ao sistema em malha fechada e a respectiva resposta obtida através da simulação com o Simulink, onde verificamos um overshoot de 1.5%.



Para um degrau negativo, a resposta seria a mesma, mas com o eixo das ordenadas crescendo negativamente. Abaixo, as respostas obtidas, tanto para quando o carrinho se afasta como para quando se aproxima do sensor, bem como uma comparação entre a resposta esperada obtida via simulação e a resposta real (as entradas reais foram aproximadas para realização da simulação):



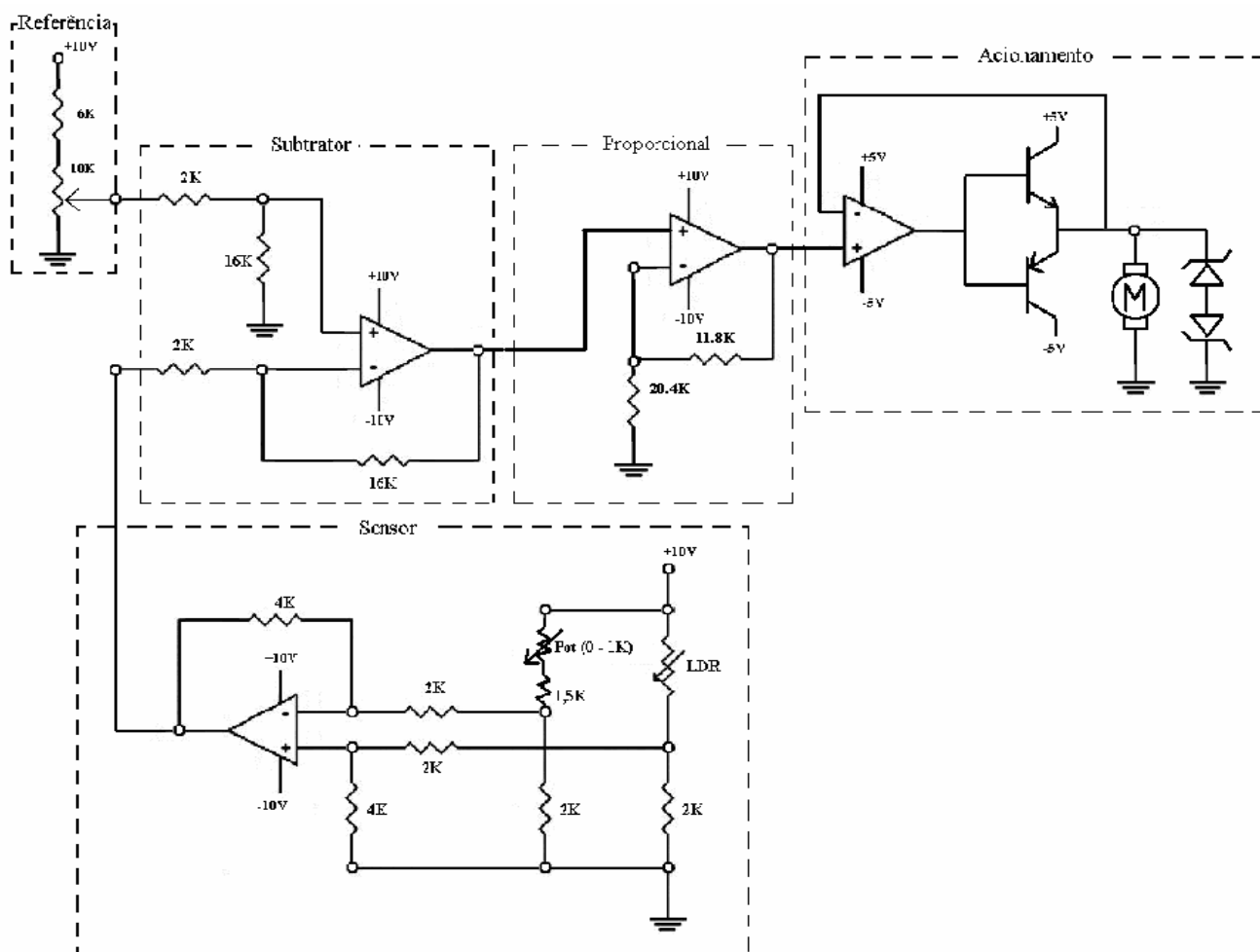


Para o primeiro gráfico verificamos um percentual de overshoot de 4%, um valor ainda pequeno, e, portanto aceitável, embora seja maior do que o especificado (1.5%). Para o segundo, verificamos um percentual de overshoot bem maior do que o desejado (23%). Isso pode ser explicado pela não linearidade do circuito sensor (conforme pôde ser verificado nas curvas de resposta do circuito do sensor mostradas anteriormente): quando o carrinho se afasta, a tensão varia cada vez menos com a posição, o que não provoca variação brusca no sinal de erro caso a tensão de saída do circuito do sensor ultrapasse a tensão fornecida pelo circuito de referência; por outro lado, quando o carrinho se aproxima, a tensão varia cada vez mais com a distância, de maneira que o sinal de erro diminui mais rapidamente em sua magnitude, provocando uma ação de controle mais brusca sobre o acionamento do motor, a qual não é capaz de frear o carrinho tão rapidamente.

8. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do Projeto Desafio foi uma grande oportunidade para aplicarmos os conhecimentos adquiridos de eletrônica analógica e teoria de controle. Mas, mais ainda, uma experiência que nos colocou em contato com muitas dificuldades de um projeto real principalmente na questão do prazo de entrega e na ocorrência de imprevistos. A parte da montagem dos circuitos eletrônicos foi, sem dúvida, a parte mais trabalhosa do desenvolvimento, principalmente a montagem do circuito do sensor, em que testamos diversas topologias de circuitos, tendo ainda que lidar com a alta variabilidade das propriedades do elemento sensor (LDR). O saldo final, portanto, é positivo: apesar de os resultados não serem exatamente como os especificados, o sistema funciona razoavelmente, e é resultado da dedicação dos componentes do grupo em fazê-lo funcionar.

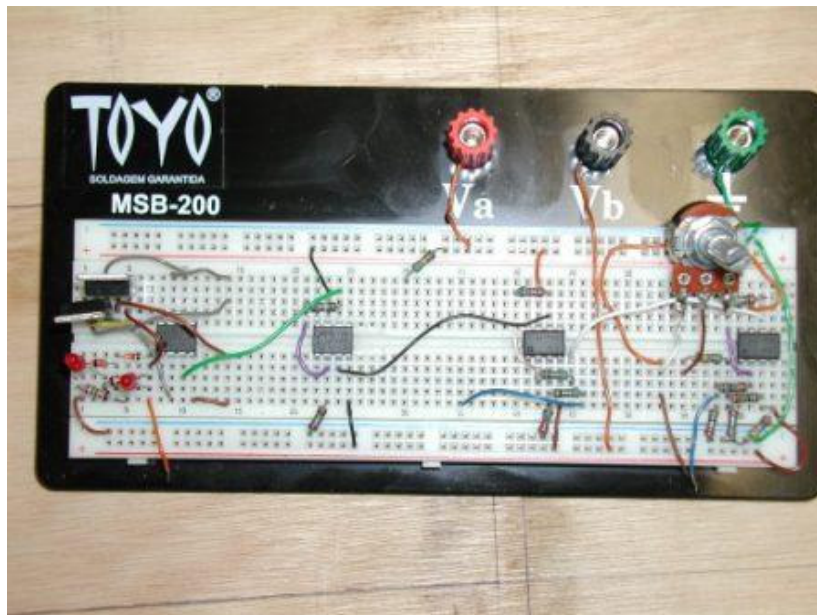
9. APÊNDICE



Esquema – Circuitos Eletrônicos



Montagem em teste



Circuitos Eletrônicos