

## **CONTROLE DE UM ROBÔ MANIPULADOR COMO INSTRUMENTO PEDAGÓGICO DE ENSINO DE ENGENHARIA**

Evandro M. de Oliveira – [evandroadventus@hotmail.com](mailto:evandroadventus@hotmail.com)

Israel G. R. da Silva – [posnaozinho@yahoo.com.br](mailto:posnaozinho@yahoo.com.br)

Ronan M. Martins – [ronan.martins@cba.ifmt.edu.br](mailto:ronan.martins@cba.ifmt.edu.br)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT

Rua Profa. Zulmira Canavarros, 95

78005-200 – Cuiabá - MT

**Resumo:** *O presente trabalho exemplifica a importância da metodologia de projetos integralizadores multidisciplinares como instrumento pedagógico facilitador e eficiente no aprendizado de vários conceitos de engenharia associando, didaticamente, os elementos usados na prática com a teoria apresentada em sala de aula. Com o propósito de demonstrar o potencial do método, esse trabalho descreve a plataforma de hardware e software desenvolvida para o controle de um robô manipulador de quatro graus de liberdade tomando como base referências bibliográficas clássicas na área de engenharia de controle moderno, de circuitos elétricos, eletrônicos e digitais e de um sistema de controle industrial típico composto por um controlador automático, atuador, processo a controlar e sensor. No caso desse trabalho, o controlador é constituído por conversores digital/analógico, comparadores e amplificadores; já o atuador compreende quatro servomotores; o processo é o robô manipulador de quatro graus de liberdade; quanto ao sensor, são usados quatro potenciômetros como medidores de posição. A estratégia de implementação baseou-se no uso, na medida do possível, de elementos eletrônicos discretos. Uma evidência dessa característica está presente no conversor digital/analógico desenvolvido no projeto que, ao invés de usar dispositivos comerciais, optou-se pelo uso de conversor digital/analógico baseado na rede R-2R. No que concerne a informática, a programação foi desenvolvida usando a linguagem de programação C++ Builder 6.0 para servir de IHM na comunicação com o hardware. Ao final do projeto integralizador multidisciplinar, o discente tem uma visão integrada e sólida dos diversos assuntos abordados ao longo do curso.*

**Palavras-chave:** *Projeto integralizado multidisciplinar, Automação de processo, Robô manipulador*

### **1. INTRODUÇÃO**

Desde os tempos remotos o homem vem trabalhando em busca de novas soluções para a realização de tarefas do dia a dia de forma automática e confortável. E com o passar dos anos, devido às necessidades surgidas, foram acumulados conhecimentos que, atualmente, possibilitam o desenvolvimento e uso de equipamentos que para a sua concretização é necessário integrar conhecimentos de áreas de conhecimentos diversas. Um exemplo disso é a área da robótica cuja utilização crescente de robôs não se verifica apenas na indústria, mas também em diferentes ramos da nossa sociedade. Dois acontecimentos no ano de 2011 ilustram bem essa realidade, isto é, o uso de robô submarino na localização e no resgate do avião da Air France 447 que caiu no Oceano Atlântico em 2009 e a utilização dos robôs de inspeção para verificar as condições estruturais da usina nuclear de Fukushima Daiichi, Japão,

afetada por um tsunami. São exemplos que mostram a grande importância e a gama de aplicações atuais dos robôs e os interesses econômicos e sociais envolvidos em relação ao seu desenvolvimento e aplicação.

Com esse cenário e com foco no desenvolvimento de um projeto integralizador multidisciplinar baseado na robótica industrial, isto é, nos robôs industriais manipuladores. No que tange as técnicas de controle de trajetória para os robôs manipuladores, podem-se citar duas: torque computado e controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo). O primeiro caso se controla o torque embasado em equações da dinâmica e no segundo tem-se o controle isolado de cada junta proporcionando facilidade de programação e uma precisão satisfatória para muitos casos. No presente trabalho utilizou-se somente a técnica de controle Proporcional com o objetivo de avaliar, apenas, a operação do manipulador por comparação de valores fornecidos pela referência, isto é, valores armazenados e enviados pelo operador do sistema por meio do computador. O controle da trajetória envolve um robô manipulador com quatro graus de liberdade e todas as juntas rotacionais. Além disso, o objetivo é mostrar a potencialidade da metodologia do projeto integralizador multidisciplinar.

O desenvolvimento do sistema de controle do robô manipulador possui um forte enfoque pedagógico que é traduzido na aplicação de conhecimentos de diversas áreas da engenharia e da computação extraídos das bases literárias típicas dessas áreas como, por exemplo, as indicadas nas referências bibliográficas. Destacam-se nas referências bibliográficas os livros (OGATA, 2010), (BOYLESTAD, 2004), (IODETA, 2010) e (SEDRA, 2007). Todo o conteúdo desenvolvimento da placa de controle baseou-se nessas referências. Já o desenvolvimento do software teve como base a referência (ARAÚJO, 2006).

Além disso, para facilitar a identificação e a função de cada elemento da placa controladora, a implementação primou pelo uso de elementos eletrônicos discretos. Um exemplo disso pode ser verificado no desenvolvimento dos conversores digitais/analógicos baseados em rede R-2R, facilmente encontrado na literatura dos cursos de engenharia.

Dessa forma, espera-se que a meta seja atingida, ou seja, a comprovação da metodologia de projetos integradores multidisciplinares é um instrumento pedagógico facilitador e eficiente no aprendizado de vários conceitos de engenharia e de computação, associando, didaticamente, os elementos usados na prática com a teoria apresentada em sala de aula.

## 2. PROJETO INTEGRALIZADOR MULTIDISCIPLINAR

O projeto tem como meta a implementação em hardware e software da estrutura de controle segundo (OGATA, 2010) representada na figura 1.

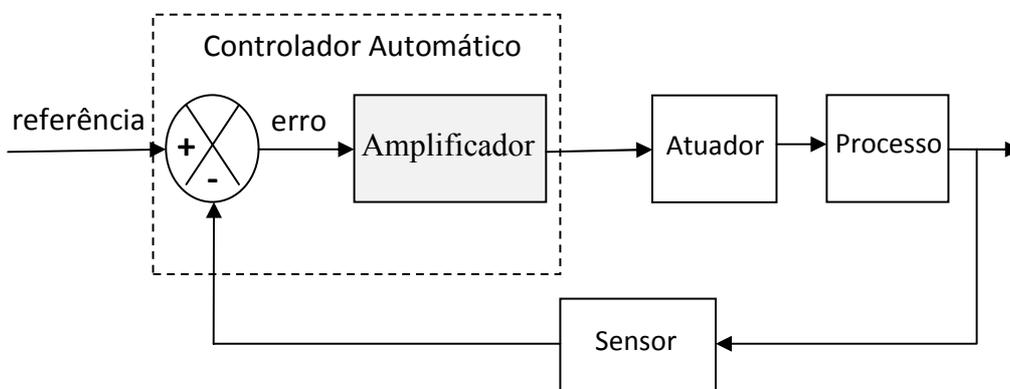


Figura 1 – Controle industrial típico (OGATA, 2010).

A estrutura de controle é composta por um controlador, um atuador, um processo a controlar e um sensor e é típica de controle industrial. No caso do projeto serão necessárias quatro estruturas iguais ao da figura 1, uma para cada grau de liberdade do robô manipulador. As referências de cada junta serão enviadas pelo operador do sistema por meio de um computador. Na sequência será descrita a composição de cada um dos elementos que compõem a estrutura de controle da figura 1.

## 2.1 Processo a controlar

O processo é composto por um robô manipulador de 4 graus de liberdade e todas as juntas são rotacionais. O acionamento do robô é realizado por 4 servomotores compostos, cada um, por motor CC (15 V), engrenagens e potenciômetro como sensor de posição das juntas do robô. A garra do robô é, simplesmente, composta por um motor CC e engrenagens. É importante ressaltar que o robô estava inoperante devido a desgastes mecânicos das engrenagens e a plataforma de controle apresentava vários problemas elétricos e eletrônicos. Todos esses problemas foram saneados antes do início da execução desse projeto. A figura 2 ilustra o esquema do robô manipulador.

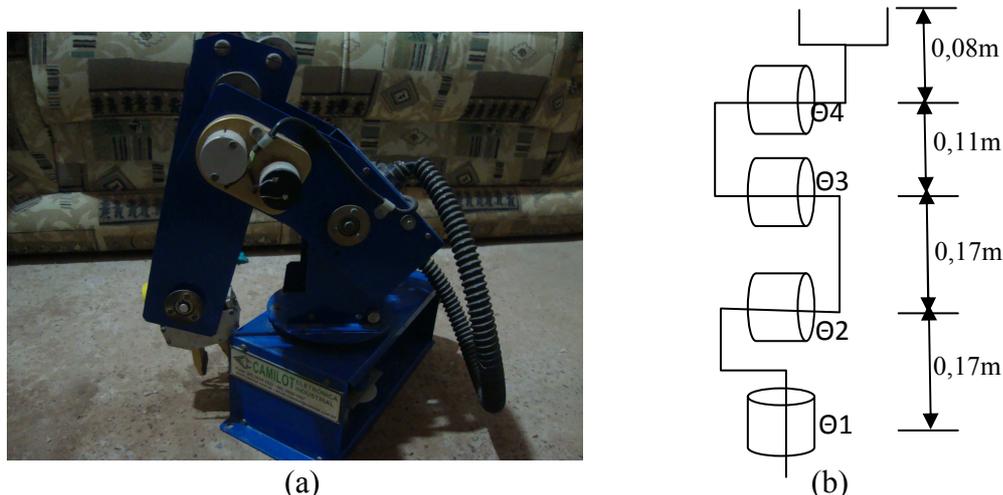


Figura 2 – Robô manipulador com quatro graus de liberdade (a) e esquema (b).

## 2.2 Implementação da estrutura de controle

A estrutura de controle implementada no projeto está, esquematicamente, ilustrada na figura 3. Verifica-se que o controle de posição da junta do robô é composto por um computador, microcontrolador, buffer (Latch), conversor digital/analógico, comparador com realimentação negativa, amplificador push-pull e servomotor. A trajetória referência de cada junta do robô é definida pelo operador do sistema que envia à placa controladora a trajetória desejada da junta. A posição de referência é recebida na placa controladora pelo microcontrolador que transfere ao latch o sinal digital de referência que, por sua vez, entrega esse sinal na entrada do conversor digital/analógico. O comparador com realimentação negativa recebe nas suas entradas, o sinal analógico da posição referência e a posição da junta medida pelo potenciômetro acoplado ao eixo do motor da junta. Finalmente, o sinal é amplificado pelo circuito eletrônico push-pull e entregue nos terminais do servomotor do robô manipulador resultando em uma nova posição da junta. Essa sequência é a mesma para todas as juntas do robô manipulador.

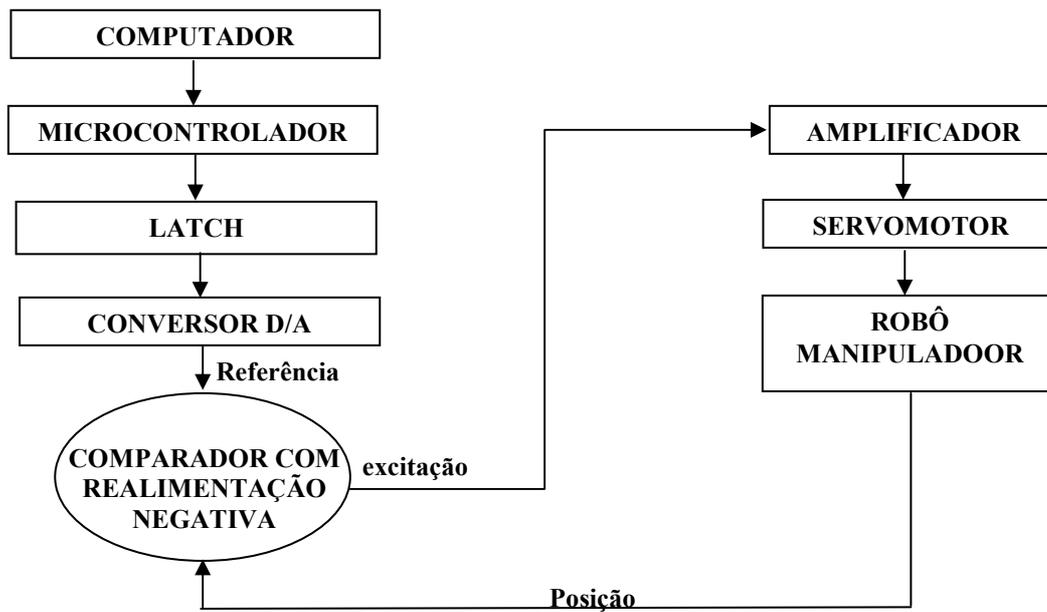


Figura 3 – Esquema de implementação do controle do robô.

### 3. DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DO CONTROLE

A estrutura de controle proporciona, didaticamente, a relação dos conceitos teóricos da engenharia com a prática conforme fica demonstrado nas subseções: fonte de tensão; geração da trajetória-referência; microcontrolador e latch; Conversor digital-analógico R-2R e comparador com realimentação negativa; circuito eletrônico push-pull de amplificação para os servomotores e garra.

#### 3.1. Fonte de tensão

A fonte de tensão apresenta três níveis diferentes de tensão: 5 V; +12 V e -12 V. A figura 4 apresenta o esquema eletroeletrônico da fonte de tensão.

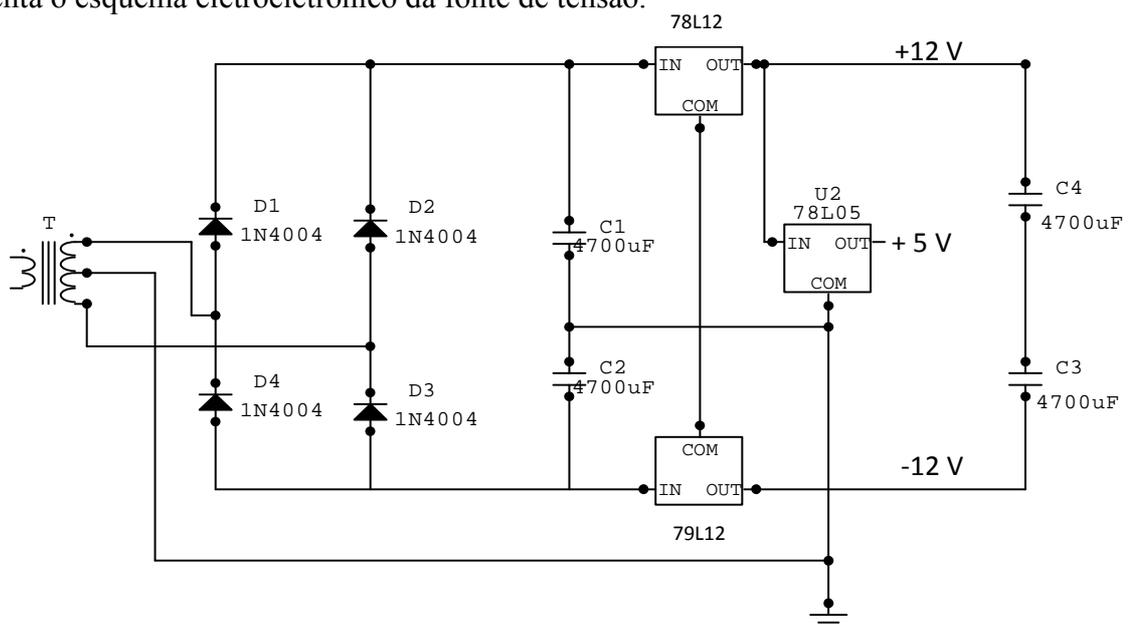


Figura 4 – Esquema eletroeletrônico da fonte de tensão em +5V, +12 V e -12V.

A tabela 1 relaciona a especificação dos componentes utilizados no esquema da figura 7.

Tabela 1 – Especificação dos componentes utilizados na figura 7.

Componente	Especificação
Transformador (T)	110/220/12+12
Capacitor	4700 $\mu$ F
Diodo	1N4004
Regulador de tensão	7812, 7805 e 7912

### 3.2. Geração da trajetória-referência

A geração da trajetória de referência do robô manipulador foi estruturada na linguagem C++ Builder (ARAUJO, 2006) cuja interface de interação com o operador do sistema está ilustrada na figura 5.

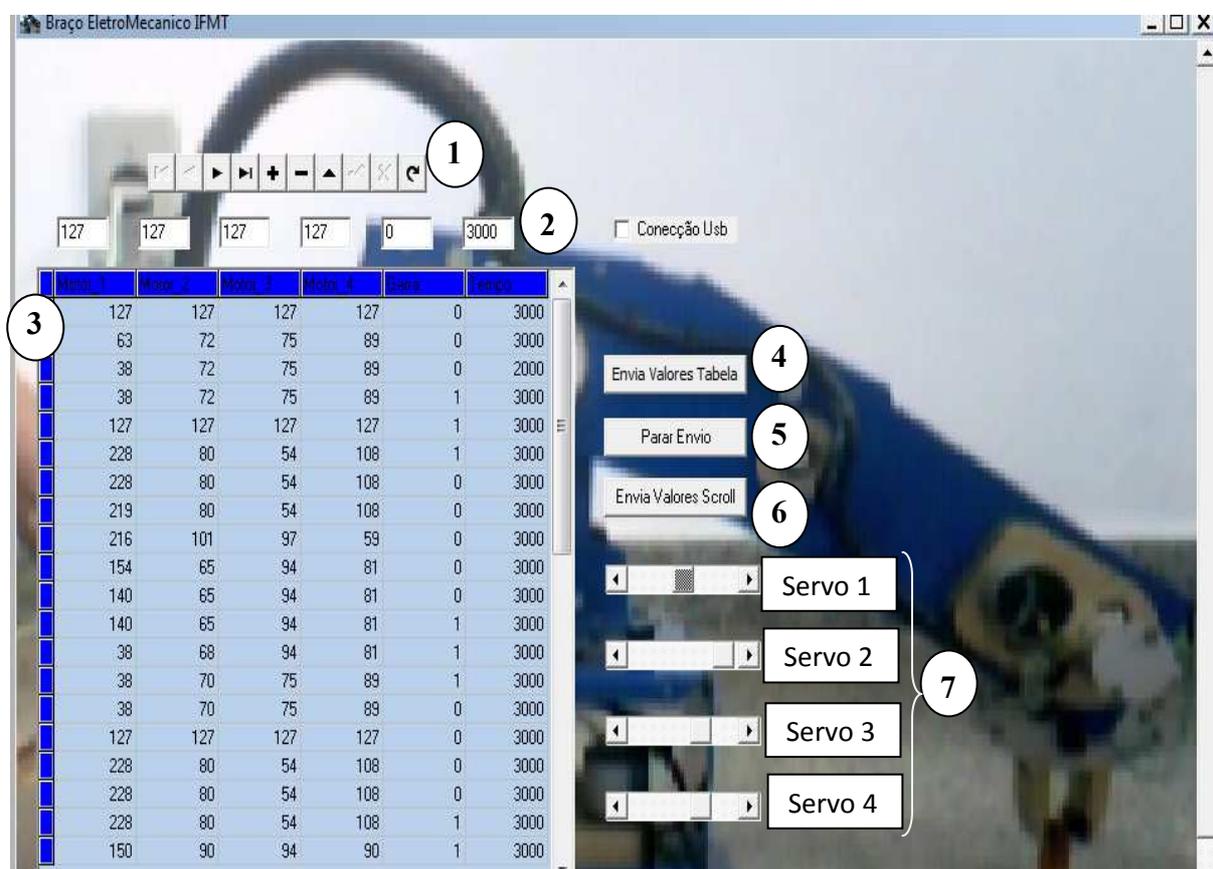


Figura 5 – Interface para a geração das trajetórias das quatro juntas do robô manipulador.

A interface de geração de trajetória do robô manipulador é composta por sete objetos cuja identificação está em destaque na figura 5, isto é:

- 1 – Objeto para operação de navegação, edição e inserção dos registros das trajetórias armazenadas no bando de dados “MySQL”.
- 2 – Objetos que mostram os dois campos do registro selecionado pelo objeto 3.
- 3 – Objeto da tabela do banco de dados que contém todos os registros de uma trajetória desejada. Observa-se que a tabela possui 6 campos, ou seja, 4 campos

relacionados a posição de cada junta, 1 campo para a garra e outro para o tempo de leitura do sensor de posição. Ressalta-se que os valores dos 4 primeiros campos são dados em decimal, tendo como ordem máxima 1 byte, ou seja, 0 a 255. Já o campo denominado “Garra” indica valor 1 ou 0 para a garra fechada e aberta, respectivamente. O último campo “Tempo” mostra o tempo em milissegundos (ms).

4 - Objeto que envia as posições desejadas para a tabela do banco de dados. À medida que a posição desejada é atingida, as posições são enviadas para a tabela e, conseqüentemente, armazenadas no banco de dados. Essa mesma operação, também, pode ser efetuada pelo objeto 1.

5 – Objeto de finalização da geração da trajetória desejada do braço, ou seja, a trajetória final do robô é gravada no banco de dados para, posteriormente, ser enviada para a placa de controle do robô.

6 – Objeto que habilita os “scrolls” para movimentar cada um dos servomotores indicados pelo objeto 7.

7 – Objetos “scrolls” que possibilitam o movimento específico de uma determinada junta do robô manipulador.

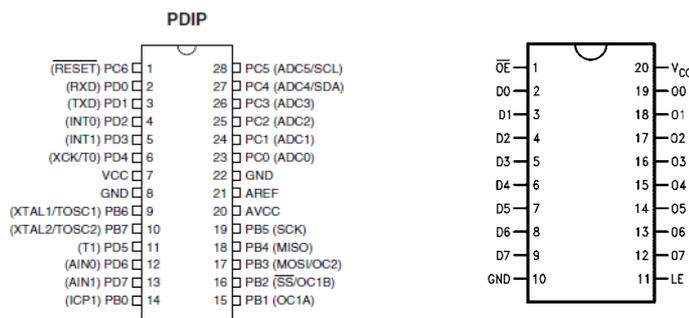
É indispensável comentar que o protocolo USB de comunicação entre o computador e o microcontrolador Atmega8 usado no projeto foi realizado por uma DLL denominada “AVR309”. A justificativa desse procedimento deve-se ao fato de que, no início dos trabalhos não havia microcontroladores com suporte USB nativo. A figura 6 destaca a DLL localizada na linha 11 do programa fonte. Essa DLL possibilitou fácil acesso ao microcontrolador ATMEGA 8.

```
10 #endif
11 #define AVR309DLL "AVR309.dll";
12 //return values from AVR309DLL functions:
```

Figura 6 – Uso no programa fonte da DLL “AVR309DLL”.

### 3.3 Microcontrolador e Latch

O microcontrolador (SEDRA, 2007) usado na implementação do controle foi o ATMEGA 8 ilustrado na figura 7 (a) e na sua saída foi conectado o latch 74LS573 conforme mostra a figura 7 (b). O latch (IODETA, 2010) possui oito entradas e oito saídas de alta velocidade, com duas entradas Latch Enable (LE), quando igual a um habilita a leitura da entrada e salva, Output Enable (OE), quando igual a zero transfere para a saída o valor salvo. Ao todo são quatro “latches”, um para cada servomotor. O sistema de geração de trajetória (subseção 3.2) envia a trajetória de cada junta e, ao mesmo tempo, o endereço correspondente de cada uma. O microcontrolador ao receber as informações da trajetória, envia a referência para latch corresponde ao endereço e, conseqüentemente, o microcontrolador “sabe” pra qual latch enviar.



(a) (b)  
Figura 7 – Microcontrolador ATMEGA8 (a) e Latch 74LS573.

### 3.4 Conversor digital-analógico R-2R e comparador com realimentação negativa

A figura 8 mostra o esquema eletrônico do conversor digital-analógico (BOYLESTAD, 2004) de 8 bits usado no projeto e o comparador com realimentação negativa.

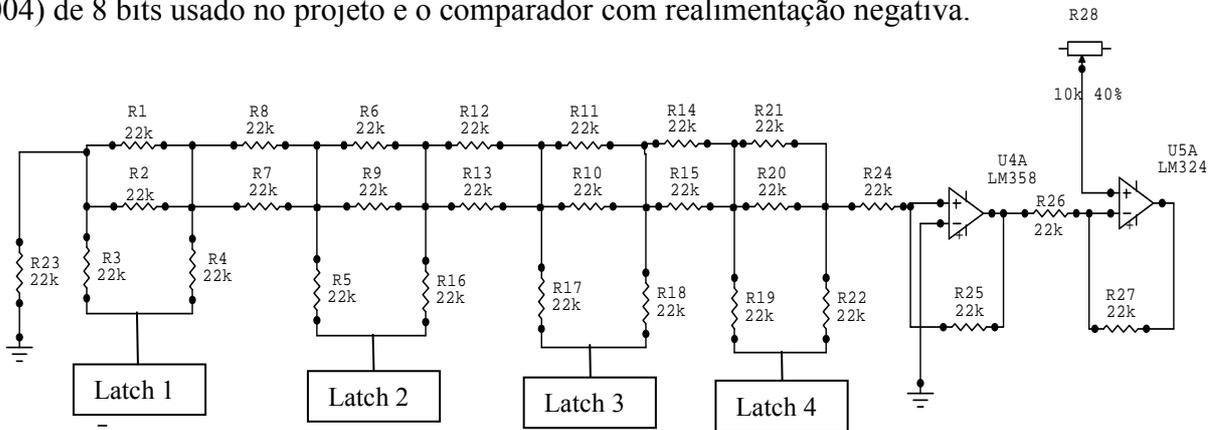


Figura 8 – Conversor digital-analógico de 8 bits e comparador com realimentação negativa.

Verifica-se na figura 8 que as entradas do conversor são compostas pelos sinais enviados pelos latches 1, 2, 3 e 4 e a saída do conversor compõem uma das entradas do comparador, sendo que a outra entrada corresponde ao sinal de posição enviado pelo sensor de posição acoplado ao eixo de cada servomotor. A tabela 2 lista os componentes utilizados no conversor digital-analógico e no comparador.

Tabela 2 – Especificação dos componentes do conversor e do comparador.

Elemento	Especificação
Resistência	22KΩ
Amplificador	LM358N
Comparador	LM324N

O mesmo esquema da figura 8 é utilizado nas outras juntas, ou seja, são necessários quatro esquemas iguais a esse.

### 3.4 Circuito eletrônico push-pull de amplificação para os servomotores e a garra do robô

O mesmo circuito eletrônico push-pull (BOYLESTAD, 2004) é usado para amplificação para os servomotores e para a garra. Destaca-se na figura 9 o acionamento, abertura e fechamento, da garra do robô.

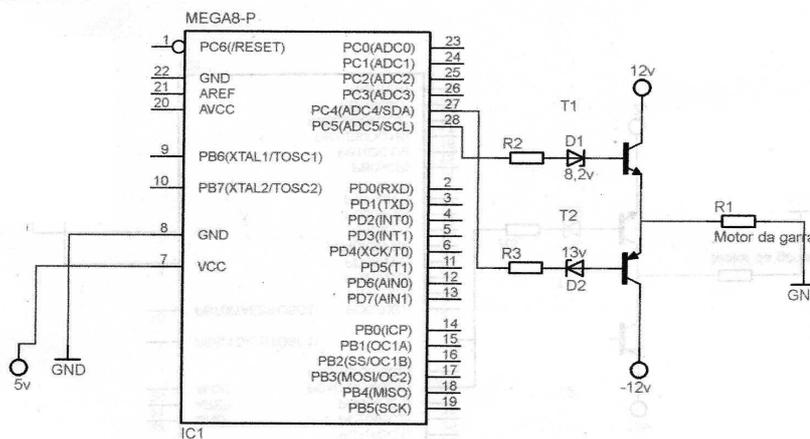


Figura 9 – Circuito eletrônico push-pull da garra.  
A tabela 3 relaciona a especificação dos componentes do circuito eletrônico da garra do robô.

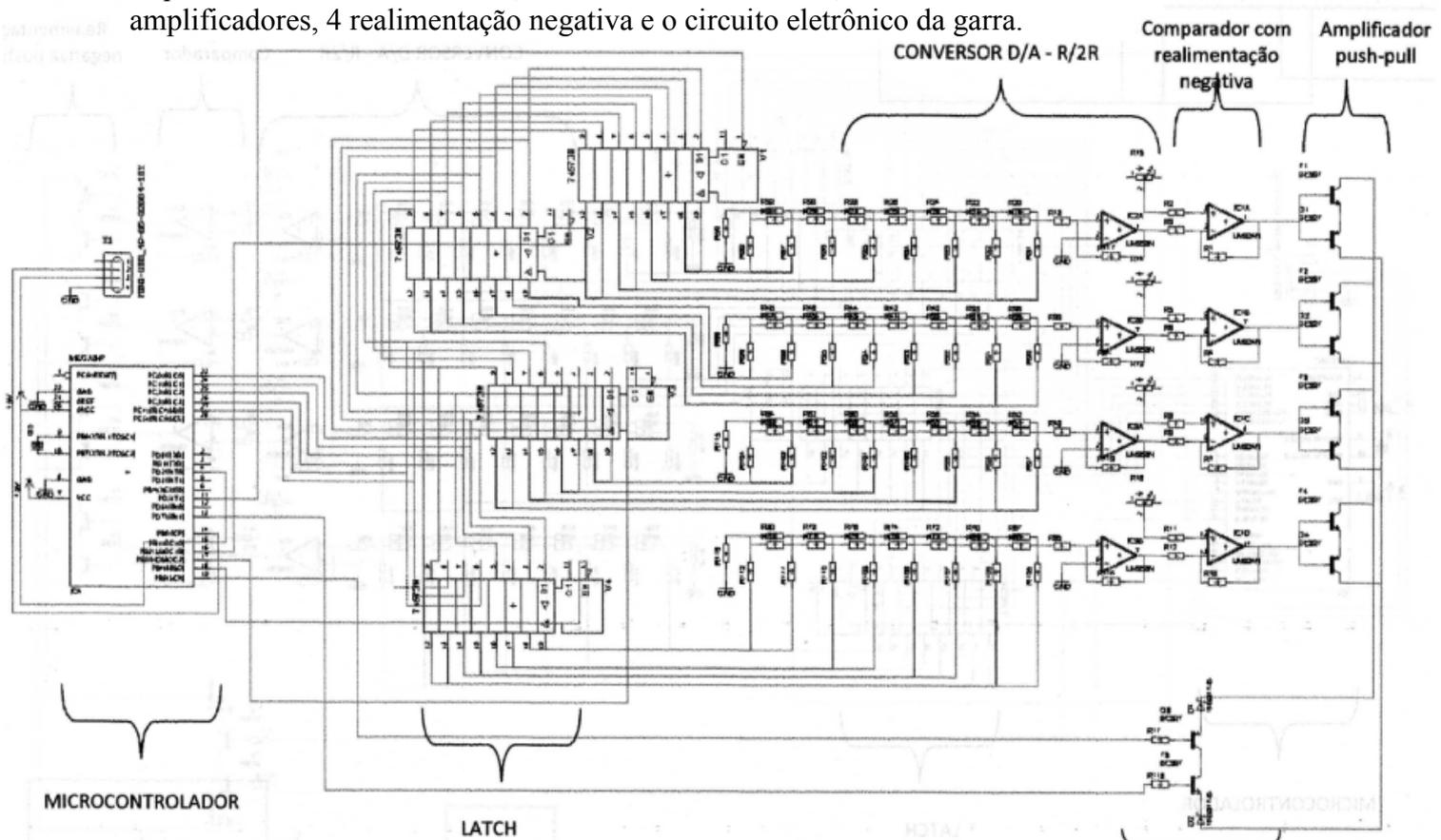
Tabela 3 – Especificação dos componentes da garra.

Elemento	Especificação
Resistência	1 K
Diodo zener	1n5817b 18 v
Diodo zener	1N5817b 12v
Transistores	BC327 e BC 337

O circuito eletrônico push-pull recebe o sinal de controle do microcontrolador com a finalidade de abrir ou fechar a garra obedecendo a seguinte estratégia de funcionamento. O transistor T1 NPN garante a rotação do motor no sentido anti-horário, abrindo a garra, enquanto o transistor T2 PNP garante a rotação do motor no sentido horário, fechando a garra. A diferença de potencial entre a fonte de alimentação e a base de T2 PNP fará com que o motor seja acionado, ou seja,  $V_{motor} = V_{fonte} - V_{baseT2}$ . Observa-se que a tensão de bloqueio do diodo zener colocado no emissor de T2 PNP é de 12 V. Dessa forma, quando o sinal na base de T2 PNP for zero, o motor é acionado, haja vista que a tensão resultante será de 15 V, maior que a tensão de bloqueio do diodo zener. Por outro lado, no transistor T1 NPN a diferença da tensão da fonte e a base de T1NPN é de 20V, quando houver o sinal na sua base, acionado o motor, haja vista que a tensão resultante será maior que a tensão de bloqueio de 18 V do diodo zener inserido no emissor de T1 NPN. Em resumo, quando o nível lógico for “1” em ambos os transistores, apenas T1 conduz e quando o nível lógico for “0” apenas T2 conduz, realizando assim, a abertura e o fechamento da garra respectivamente.

### 3.5. Placa controladora do robô manipulador

A figura 10 mostra o hardware de completo desenvolvido no projeto. Visualiza-se no esquema o microcontrolador, 4 latches de 8 bits, 4 conversores D/A 8 bits, 4 amplificadores, 4 realimentação negativa e o circuito eletrônico da garra.



### 3.6. Resultados e discussões

O principal problema técnico encontrado no desenvolvimento desse trabalho deu-se logo no início quando foi observada uma instabilidade do robô manipulador em torno da posição de referência. Como o robô manipulador possui potenciômetros para determinar a posição de cada junta, foi elaborado um teste baseado no esquema ilustrado na figura 11.

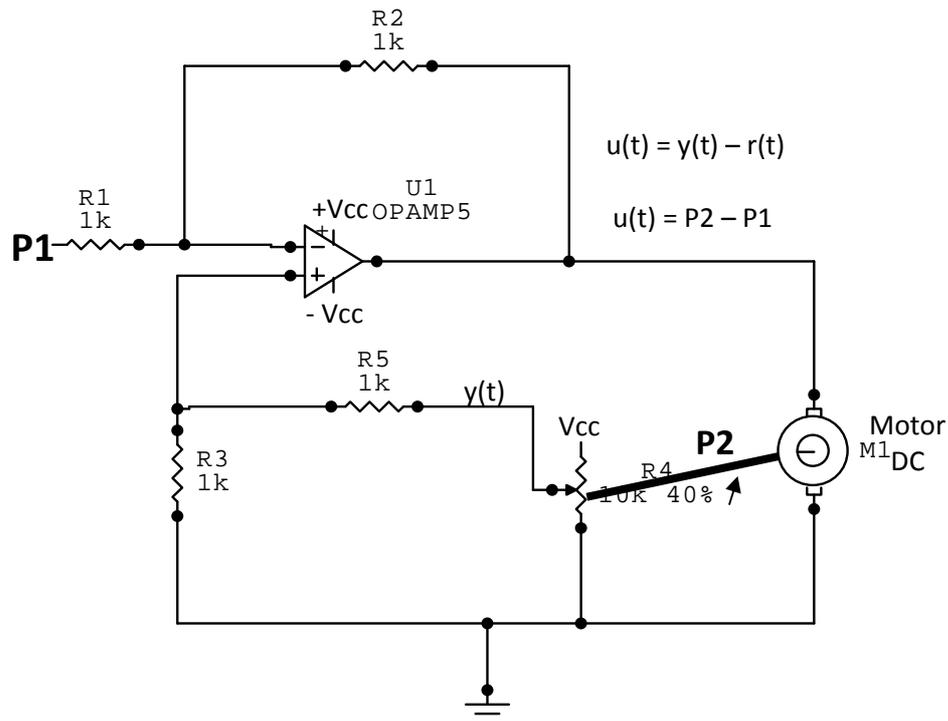


Figura 11 – Esquema para teste de estabilidade do controlador do robô manipulador.

Inseriu-se um potenciômetro denominado “P1” externo, responsável pela referência, e comparando esse sinal com aquele enviado pelo servomotor “P2”, verificou-se que quando o valor de P1 era maior que o valor de P2, o servomotor rotacionava no sentido horário. No instante em que o valor de P2 atingisse o valor igual a P1, a inércia dos servomotores não permitia que o valor do erro permanecesse em zero em decorrência de que P2 tornava maior que P1, invertendo o sentido de rotação dos servomotores. Dessa forma, o sistema oscilava em torno da referência. Para solucionar esse problema foi inserida um comparador com realimentação negativa, proporcionando a estabilidade necessária na referência.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se que o desenvolvimento desse trabalho integrador multidisciplinar envolve vários assuntos e áreas de conhecimento, porém, integradas durante a execução do projeto. Além disso, a premissa do uso de elementos eletrônicos discretos permite fácil compreensão da aplicabilidade da teoria na prática.

A metodologia oportuniza ao estudante um estudo abrangente dos assuntos vistos em sala de aula, indo muito além daquilo que é ensinado em sala de aula, fortalecendo os outros dois

segmentos, extensão e pesquisa, que compõem a tríade ensino/pesquisa/extensão e garantindo a indissociabilidade entre esses segmentos.

### ***Agradecimentos***

*Os nossos sinceros agradecimentos ao PET AutoNet/IFM-SeSU/MEC.*

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ARAUJO, Everton C. C++ Builder. 1. Ed. São Paulo: Visual Books., 2006. P. 310, ili.
- BOYLESTAD, Robert L.. Introdução à análise de circuitos. 10. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. P. 810 p, ili.
- BOYLESTAD, Robert L.. Dispositivos eletrônicos e Teoria de circuitos. 8. ed. São Paulo São Paulo: Prentice Hall, 2004. P. 810 p, ili.
- IODETA, Ivan Valeije; CAPUANO, Francisco G..Elementos de Eletrônica Digital. 40. ed. São Paulo: Érica, 2010. 534 p, Il.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010, ili.
- SEDRA, Adel S; SMITH, Kenneth, C. Microeletrônica. 5. Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2007 p. 864, ili.

## **CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR AS A TEACHING TOOL FOR ENGINEERING EDUCATION**

**Abstract:** *This work exemplifies the importance of paid-disciplinary design methodology as an educational tool and efficient facilitator in the learning of various engineering concepts by involving didactically the elements used in practices with the theory presented in classes. In order to demonstrate the potential of the method, this paper describes the hardware and software platforms that have been developed for the control of a four degrees of freedom manipulator robot which is based on the classical references in the field of modern control engineering, electrical, electronic an digital circuits as well as a typical industrial control system consists of automatic controller, actuator, process control and sensor. For this work, the controller comprises digital/analog converter, amplifiers and comparators, the actuator comprises four servomotors, the process is the manipulator of four degrees of freedom, as the sensor, four potentiometers are used as measures of position. The implementation strategy was based on the use, wherever possible, elements of discrete electronic. One evidence of this trait is present in the digital / analog converter developed in the project, instead of using commercial devices, we chose the use of digital/analog converter based R-2R network. Regarding the computer, the programming was done using the programming language C + + Builder 6.0 to serve as a HMI communicating with the hardware. At the end of the multidisciplinary project paid, the student has an integrated view of the various topics covered in class.*

**Key-words:** Multidisciplinary project paid, Process automation, Control manipulator