

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA PARA UM BRAÇO ROBÓTICO DO TIPO PUMA

Daniel Teodoro Gonçalves Mariano, Carlos Augusto Bissochi Junior (Dr.), Felipe Adriano da Silva Gonçalves, Igor Borges Tavares, Marcus Vinicius Ferreira, Kléber Lima, Josué Silva de Morais(Dr.)
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG, dtgm@uol.com.br

Resumo - Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para um braço robótico do tipo PUMA, com 6 graus de liberdade. Um conversor eletrônico do tipo full-bridge realizará o acionamento dos atuadores (MCC), possibilitando a operação desses nos quatro quadrantes. A implementação de um controlador PID no firmware de um microcontrolador de arquitetura ARM, controlará os GDL do robô.

Palavras-Chave – Controlador PID, Firmware, Hardware, Robô, Software

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM IN CLOSED LOOP FOR A ROBOTIC ARM TYPE PUMA

Abstract - This paper presents the development of a system of closed loop control for a type PUMA robot arm with 6 degrees of freedom. An electronic converter full-bridge type will hold the drivers actuators (DC motors), enabling operation in four quadrants. The implementation of a PID controller in the firmware of an ARM microcontroller, will control each robot's DOF.

Keywords – PID Controller, Firmware, Hardware, Robot, Software

NOMENCLATURA

CC	Corrente contínua
DOF	Degrees of Freedom
GDL	Graus de liberdade
IHM	Interface Homem-Máquina
MCC	Motor de corrente contínua
PID	Proporcional – Integrativo – Derivativo
PUMA	Máquina universal programável para montagem
PWM	Modulação por largura de pulso
SC	Sistemas de controle



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

I. INTRODUÇÃO

A. Antecedentes do tema.

As empresas brasileiras encontram-se em intenso processo de investimento em inovação, o que está diretamente interligado ao desenvolvimento da automação industrial. Nessa área, os setores automobilístico, siderúrgico, de papel e celulose, petroquímico, farmacêutico e alimentício estão entre os mais desenvolvidos, segundo fornecedores de equipamentos e softwares.

Ressalta-se que a pesquisa e o desenvolvimento de dispositivos robóticos são fundamentais para a automação dos processos de fabricação industrial. Uma das vantagens dos dispositivos robóticos é que estes podem substituir o homem em tarefas de risco, que possam vir a comprometer a sua integridade. Tarefas realizadas em ambientes que apresentam altos índices de calor, ruído, gases tóxicos, esforço físico extremo, entre outros fatores, inviabilizam a execução por um operador humano. Entretanto um robô poderia desempenhar essa mesma tarefa, haja vista que essa máquina apresenta uma maior tolerância a esses parâmetros físicos e nenhum humano seria submetido a qualquer tipo de risco.

Os robôs possuem diferentes formatos que variam de acordo com o tipo de aplicação para a qual estão voltados. O artigo vigente é baseado em um trabalho de conclusão de curso, e que tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de controle para um braço robótico do tipo PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly). Este modelo de robô de coordenadas de revolução (ou articulados) possui juntas e movimentos que se assemelham aos de um braço humano. O robô PUMA é um dos projetos mais populares de robôs articulados e foi arquitetado inicialmente para cumprir com os requerimentos da indústria automobilística.

B. Motivação

O manipulador TQ MA2000 (TecQuipment) do Laboratório de Automação, Servomecanismos e Controle da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia é um robô didático que tem sido utilizado no aprendizado de estudantes. Embora este robô didático possua algumas das principais características dos robôs industriais, ele é mais barato, menor, com baixo nível de desempenho e com IHM limitada a poucas instruções padronizadas pelo fabricante, o que limita a sua utilização em diversas atividades de ensino e pesquisa.

II. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE PARA O ROBÔ TQ MA2000

A. Informações sobre Robô MA2000

O robô MA2000 é um braço mecânico do tipo PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm) da empresa TQ (TecQuipment). Possui 6 graus de liberdade sendo os três primeiros responsáveis pelo posicionamento do braço e os três últimos pela orientação do atuador localizado na extremidade do braço.



Figura 1 - O robô MA2000

Pelo fato do braço robótico ser composto por diferentes tipos de motores, é necessário aplicar a estratégia de acionamento adequada para cada um deles.

Tabela I - Informações sobre os GDL do MA2000

	GDL	Nome	Tipo Motor	Tensão Nominal	Sensor
Posicionamento	1º	Waist (Cintura)	MCC	15 V	Analógico
	2º	Shoulder (Ombro)	MCC	15 V	Analógico
	3º	Elbow (Cotovelo)	MCC	15 V	Analógico
Orientação	4º	Pitch	Servo motor	5 V	Interno
	5º	Yaw	Servo motor	5 V	Interno
	6º	Roll	Servo motor	5 V	Interno

B. Sistemas de controle com realimentação

Um sistema de controle fornece uma saída ou resposta para uma dada entrada ou estímulo. A entrada representa a resposta desejada; a saída é a resposta real. Existem muitas classificações diferentes de plantas, algumas delas são baseadas no comportamento que a planta possui, enquanto outras baseiam-se em características físicas próprias, segundo a potência dos sinais de entrada, saída e internos com que trabalham. Existem duas configurações de sistemas de controle: malha aberta e malha fechada.

O sistema a malha aberta consiste em um subsistema denominado transdutor de entrada, que converte o formato de

entrada na forma que é usada pelo controlador. O controlador atua sobre um processo ou planta. A entrada é chamada de referência e a saída é chamada de variável controlada.

Diferentes sinais, como perturbações, são somados às saídas do controlador e do processo por meio de junções de adição, as quais produzem a soma algébrica de seus sinais de entrada usando sinais associados.

A característica que diferencia um sistema a malha aberta de um sistema a malha fechada é que o primeiro não pode compensar a ação de quaisquer perturbações que sejam adicionadas ao sinal atuante do controlador, sendo comandado unicamente com base na entrada. No contexto do braço robótica as perturbações são representadas pelos acoplamentos dinâmicos e variações inerciais.

Tal inconveniência dos sistemas a malha aberta, em especial a sensibilidade a perturbações e a incapacidade de corrigir os efeitos destas perturbações, consolidou a razão para a elaboração de um sistema de controle com realimentação (malha fechada) de forma com que o sinal de saída, contendo as perturbações provocadas pela dinâmica do atuador, sejam realimentadas ao sistema.

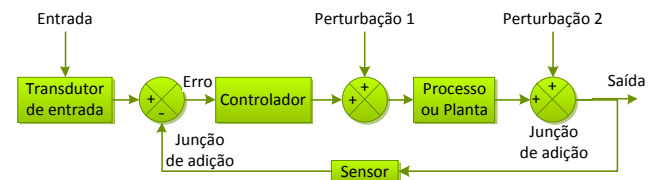


Figura 2 - Diagrama de blocos de um SC realimentado

C. Desenvolvimento do SC para controle do MA2000

Para o projeto de sistema de controle do braço robótico MA2000 foi elaborado um diagrama de forma a representar o conceito abstrato das interligações eletro-eletrônicas do sistema:

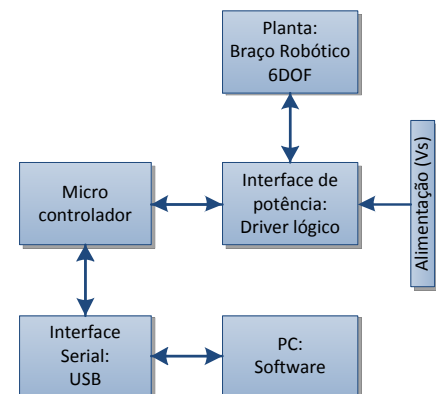


Figura 3: Diagrama de blocos do SC para o MA2000

III. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE (FIRMWARE)

Estratégias de controle pode ser compreendido como o algoritmo a ser implementado pelo controlador num sistema em malha fechada, sendo as mais conhecidas: Controle ON/OFF, Controle Proporcional, Controle PID.

A. Controle On – Off

Esta estratégia de controle opera em forma digital, pois a saída do controlador será sempre um sinal digital. A estratégia baseia-se em ativar ou não os atuadores conforme o estado dos sensores.

Estes controles podem ser implementados por processadores digitais integrados (microprocessadores, microcontroladores, computadores, entre outros) quanto por sistemas eletrônicos simples.

Existe apenas duas possibilidades de resposta para este controle (0% ou 100% da razão cíclica), sendo uma ação de controle de duas posições.

Existe uma zona diferencial de liga e desliga – histerese – devido às características mecânicas do próprio controlador. É necessário evitar manobras frequentes que poderiam desgastar elementos do sistema de controle, por isso ao reduzir esta zona diferencial a amplitude da oscilação de saída pode ser reduzida. Entretanto o aumento do número de operações da chave de controle por intervalo de tempo reduz a vida útil do componente

B. Controle Proporcional (P)

O controle proporcional é uma estratégia de controle que consiste em entregar na saída do controlador um sinal de excitação proporcional ao sinal de erro (o sinal de erro é definido como o sinal de referência menos o sinal de resposta). O controlador é um sistema de ordem 0, cuja transferência é uma constante. Esta estratégia de controle pode ser implementada tanto por processadores digitais integrados quanto por circuitos eletrônicos simples baseados em amplificadores operacionais.

Um controlador proporcional tem seu ganho ajustável, sendo que em operação normal a saída de controle estará em 100%, caso o valor do processo seja maior que a banda proporcional. A saída de controle descerá gradualmente, em proporção ao desvio, se o valor estiver dentro da banda proporcional, e a saída estará desligada, se o valor do processo atingir o alvo. A ação proporcional possibilita um controle mais estável do que a ação de controle on/off que apresenta forma oscilatório

C. Controle Proporcional – Integrativo – Derivativo (PID)

A estratégia neste tipo de controle consiste em aplicar na planta um sinal de excitação proporcional ao erro, mais a função derivada deste, mais sua função integral. A equação de controle pode ser expressa por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t}$$

Onde:

$e(t)$: erro

K_p : Constante de proporcionalidade

T_i : Constante Integrativa

T_d : Constante Derivativa

O controle PID fornece resposta rápido, com controle de estabilidade do sistema apropriado e baixo erro de regime permanente. Tais vantagens existem pelo fato de o controle PID permitir a adaptação do sistema realimentado geral. Essa estratégia satisfaz as especificações técnicas exigentes mesmo com plantas de ordem superior.

Este tipo de controle pode ser implementado tanto na forma analógico – através de amplificadores operacionais que forneçam respostas proporcional, integral e derivativa – quanto na forma digital – através de processadores digitais integrados.

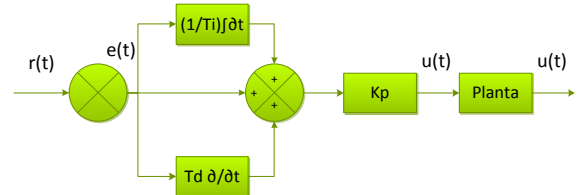


Figura 4: Diagrama de blocos de um Controlador PID

D. Equações

$$K_p e(t) \quad (1)$$

$$K_i \int e(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$K_d \partial e(t) / \partial t \quad (3)$$

Onde:

K_p - Ganho proporcional

K_i - Ganho integrativo

K_d - Ganho derivativo

t - Tempo

τ - Variável de integração

IV. HARDWARE

O MA2000 possui dois tipos de atuadores: MCC associados aos GDL responsáveis pelo posicionamento do atuador e servomotores que por sua vez estão associados aos GDL responsáveis pela orientação do atuador.

Os servomotores não constituem um tipo diferente de motor (trata-se de um MCC), entretanto as particularidades de suas características e sua aplicação fazem com que este motor seja abordado de forma particular.

Os graus de liberdade relacionados ao posicionamento do braço robótico consistem em juntas de revolução, formadas pela associação de um motor com um potenciômetro. O eixo do motor e do potenciômetro estão acoplados através de um sistema de engrenagens (as engrenagem conectadas a cada eixo estão interligadas por uma correia dentada). O potenciômetro atua como um sensor analógico cujo principio de funcionamento se baseia na variação de tensão elétrica de sua resistência à medida que sofre mudança em sua posição angular. Essa variação está relacionada ao deslocamento efetuado pelo motor que é transmitida ao potenciômetro, ou seja, para uma determinada posição angular em que o motor se encontre o potenciômetro fornecerá um valor analógico proporcional a tal ângulo. O motor utilizado nesse contexto é um motor de corrente contínua de 15V.

O acionamento do MCC foi projetado da seguinte forma: o microcontrolador enviará dois sinais (On/Off) para estabelecer o chaveamento dos pólos do motor CC e um sinal PWM para efetuar o controle de velocidade do motor. O sinal proveniente do microcontrolador é um sinal digital de 3.3 volts de amplitude. Para elevar a tensão do sinal de entrar para o valor de tensão nominal do motor (15 volts) o sinal será amplificado por um driver de potência. O circuito integrado L6203, que foi empregado no projeto, possui internamente um conversor CC-CC do tipo full-bridge,

realizando a interface de potência entre o controlador e o atuador.

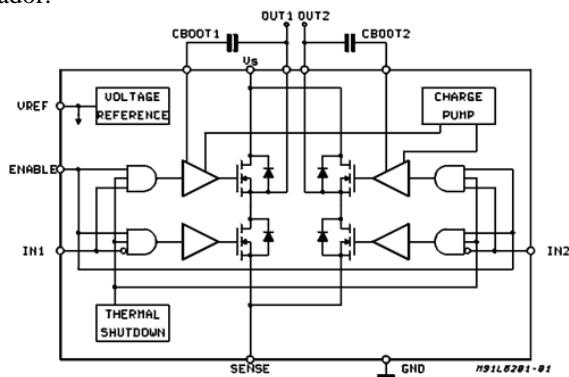


Figura 5 - Diagrama de blocos do CI L6203

No projeto vigente será empregado um CI L6203 por motor. O esquema do circuito elétrico projetado para acionar um MCC.

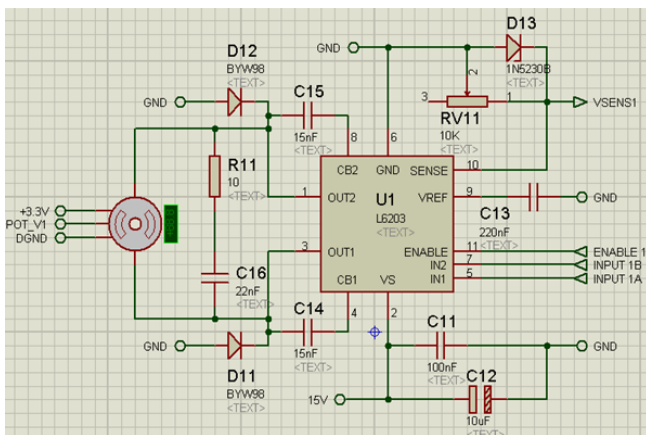


Figura 6 - Circuito eletrônico para acionamento do MCC

Os graus de liberdade relacionados à orientação do braço robótico são juntos de revolução, formados pelo emprego de servomotores. Estes exigem como entrada de referência um sinal pulsado, onde o largo do pulso é proporcional à posição desejada. Este tipo de sinal é conhecido como sinal modulado por largura de pulso (PWM). O controlador dedicado, que é constituído por um circuito integrado, tem um filtro passa baixo para determinar o valor médio desse sinal, que será proporcional à largura de pulso, e portanto esse valor médio terá uma amplitude proporcional à posição desejada.

O sinal PWM a ser fornecido ao servo-motor será oriundo do microcontrolador (LPC2148), que fornece um sinal lógico no valor de 3.3 V. O servo-motor comercial tem como características a alimentação em um nível de tensão que varia entre 5 a 6 V, frequência de PWM de 60Hz e faixa de operação do PWM (Razão Cíclica) de 5% à 10% da frequência do PWM.

Para ajustar a diferença de tensão, foi empregado um buffer não inversor, que amplifica o sinal de entrada (de 3.3 V para 5 V).

O CI 74HC4050 desempenha esta função, dispendo de até 6 canais. Na aplicação foram utilizados 3 canais, um para cada sinal PWM de cada servomotor.

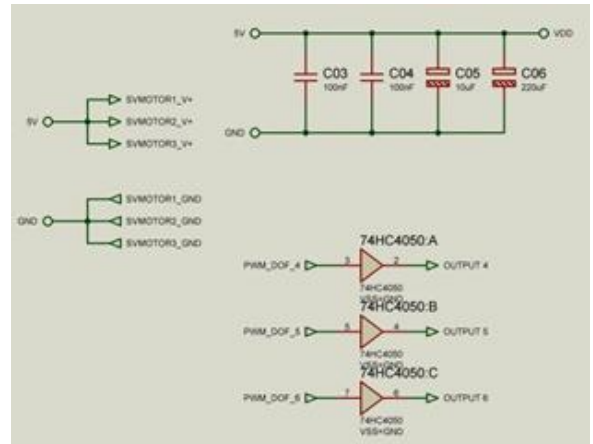


Figura 7 - Esquemático do circuito eletrônico para os servomotores do MA2000

V. RESULTADOS

Após a elaboração dos layouts dos circuitos eletrônicos e aquisição dos componentes para o projeto, foi realizada a confecção e montagem da placa.

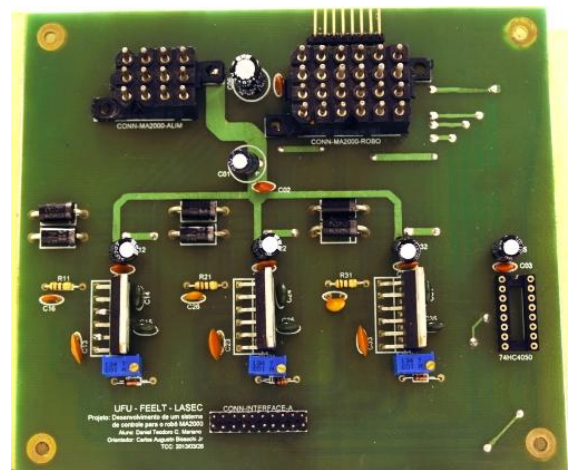


Figura 8 – Placa de acionamento dos atuadores

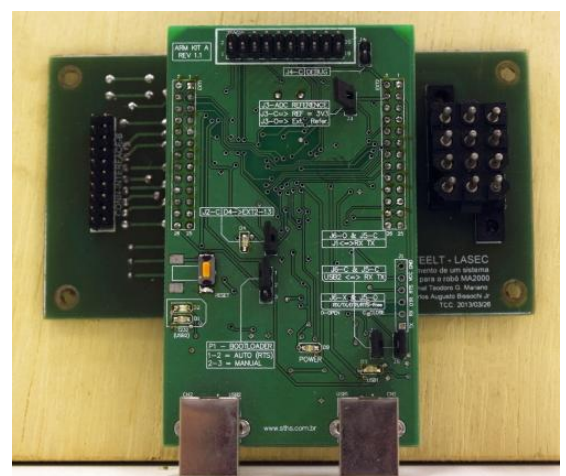


Figura 9 – Placa interface Microcontrolador/Hardware

Através de uma IHM desenvolvida em C#, linguagem computacional da plataforma .NET, foi possível ao usuário enviar os sinais de entrada para a planta. Após a conexão

UART/USB entre o microcontrolador e o PC, foram enviados parâmetros de posicionamento e das constantes do controlador digital, de forma com que o firmware, por sua vez, enviasse os sinais de acionamento aos atuadores do robô.

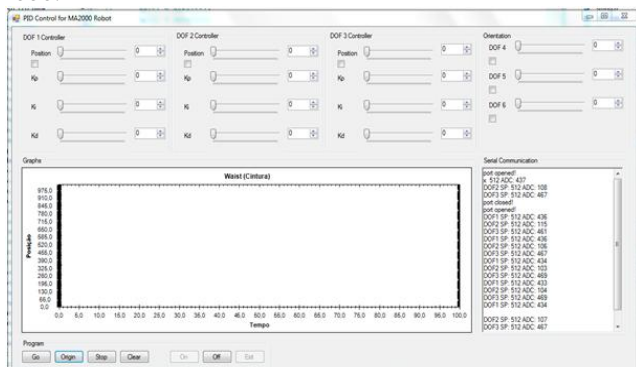


Figura 10 – IHM para controle do MA2000

Com auxílio de um osciloscópio foi comparado o sinal PWM (Ch1) enviado do microcontrolador para a *full bridge* no pino *enable* com o sinal de saída (Ch2) para o motor de uma junta (Figura 11).

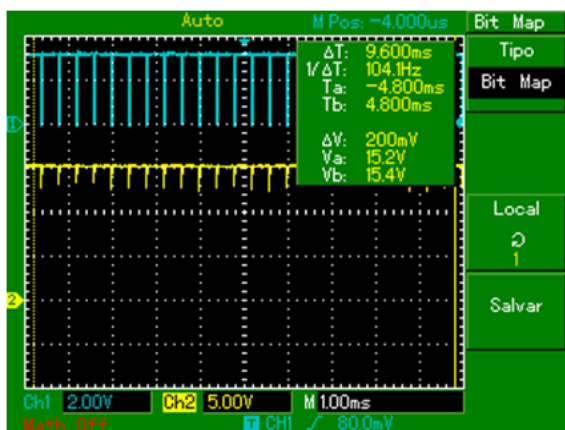


Figura 11 – Ch1: Sinal PWM Ch2: Saída do MCC

Foi analisado o sinal de realimentação proveniente do sensor potenciométrico de uma das juntas (Ch 2 da Figura 12) enquanto esta encontrava-se em uma posição fixa.

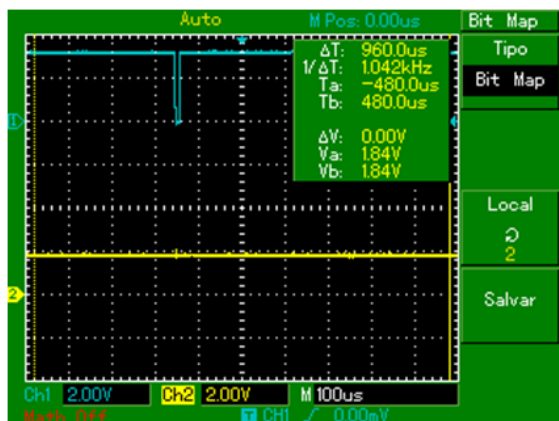


Figura 12 – Ch1: PWM Ch2: Sensor potenciométrico

No projeto desenvolvido anteriormente [8] foi observado que a escolha de um controlador *on/off* para os GDL do MA2000 não foi uma boa opção haja visto que o robô apresentou um desempenho inadequado ao receber uma instrução de posicionamento específico e não conseguir se manter em uma mesma posição.

Considerando a complexidade do sistema vigente e de suas diversas variáveis, o emprego de um controlador PID demonstrou ser uma solução melhor que a anterior para atenuar o erro de posicionamento das juntas, quando analisadas isoladamente, ou seja, ao realizar o controle de cada GDL de maneira isolada.

VI. CONCLUSÕES

Um dos objetivos estipulados para o trabalho foi o de possibilitar o interfaceamento do robô MA2000 com outros dispositivos. O projeto do hardware e a escolha do microcontrolador possibilitaram o desenvolvimento de um sistema aberto, capaz de comunicar com diferentes sistemas.

Dessa forma é possível empregar o MA2000 no desenvolvimento de projetos em diversas áreas de pesquisa: Acionamento do manipulador por biopotenciais; Tratamento de imagens para determinar a trajetória do robô; Automação de processos industriais; Desenvolvimento de controladores avançados para o controle de trajetórias, entre outros.

O software desenvolvido no projeto possibilitou ao usuário – além do controle de posicionamento dos graus de liberdade do robô – o controle das variáveis do controlador PID, ou seja, é possível ao usuário observar a variação de resposta do manipulador à medida que as variáveis do controlador (K_p , T_i , T_d) são modificadas. Foi observado que na medida em que os graus de liberdade adotavam diferentes momentos de posição e de distribuição de forças (variação nas cargas aplicadas aos eixos dos motores) a resposta do sistema mostrava comportamentos diferentes. Um melhor desempenho poderia ser obtido caso um sistema de redes neurais ou outro tipo de controlador avançado fosse empregado para configurar as variáveis do PID.

A atualização tecnológica desenvolvida neste trabalho possibilitará a sobrevida do equipamento, podendo ser utilizado como ferramenta de aprendizado para os alunos da Faculdade de Engenharia Elétrica, uma vez que este se encontrava inapto para utilização até então.

REFERÊNCIAS

- NISE, Norman S.. Engenharia de Sistemas de Controle. 3ª Edição - Rio de Janeiro: Ltc, 2002.
- PAZOS, Fernando. Automação de Sistemas & Robótica. 3ª Edição Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.
- ROSÁRIO, João Maurício. Princípios de Mecatrônica. 1ª Edição São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- NXP, Datasheet LPC2148
- DE ALMEIDA, Rodrigo Maximiano Antunes, Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2011
- ST, Datasheet L6203
- CORRÊA, Ghilson Ramalho. Controle de trajetórias de robôs usando redes neurais. 1999. 254f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Elétrica,

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - Mg,
1999.

D. T. G. Mariano, J. C. Pulheiz, C. A. Bissochi Jr, A. M. de
Freitas, “Desenvolvimento do Software e Atualização do
Hardware e Firmware do Braço Robótico MA2000”.
TeqQuipment, manual do Robô MA2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Daniel Teodoro Gonçalves Mariano, nascido em
02/05/1987 em Goiânia-GO, é engenheiro biomédico (2013)
e aluno do programa de Pós-Graduação em Engenharia
Biomédica pela Universidade Federal de Uberlândia.

Suas áreas de interesse são: Engenharia Biomédica,
Engenharia de reabilitação, Tecnologias assistivas, Interface
Homem-Máquina, Sistemas de Controle, Robótica,
Eletrônica, Microcontroladores, Softwares.