

PROJETO E CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Aluno: Ilana Nigri
Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Introdução

Nos últimos anos tem-se observado um vertiginoso crescimento nas aplicações de sistemas robóticos. Sistemas robóticos - como braços mecânicos articulados, veículos terrestres, aéreos ou submarinos - são dispositivos mecânicos versáteis equipados com sensores e atuadores, sob o controle de um sistema computacional. Por serem facilmente reprogramáveis, sistemas robóticos possuem grande potencial para a execução de diversas tarefas [1]. O desenvolvimento destes sistemas requer um conhecimento multidisciplinar nas Engenharias Eletrônica, Mecânica e de Computação. A área de robótica industrial traz benefícios como a melhoria da eficácia, da qualidade, redução de mão-de-obra, além de mais eficiência, confiabilidade e redução de custos. Vantagens adicionais incluem a capacidade de realizar tarefas para as quais os humanos teriam grande dificuldade, e a remoção de humanos de tarefas em ambientes potencialmente perigosos.

Mais recentemente, o enfoque tem se voltado na melhoria da precisão e eficiência destes sistemas. Para tanto, é necessário utilizar técnicas de controle que permitam utilizar estes sistemas em velocidades maiores sem sacrificar sua precisão. Dentre as diversas técnicas de controle existentes, as mais comuns são os controles PID (Proporcional-Integral-Derivativo) e de Torque Computado [2, 3, 4]. Estas técnicas vêm sendo utilizadas, por exemplo, em manipuladores de alto desempenho para a indústria de wafers de silício, como visto nas Figuras 1 e 2.

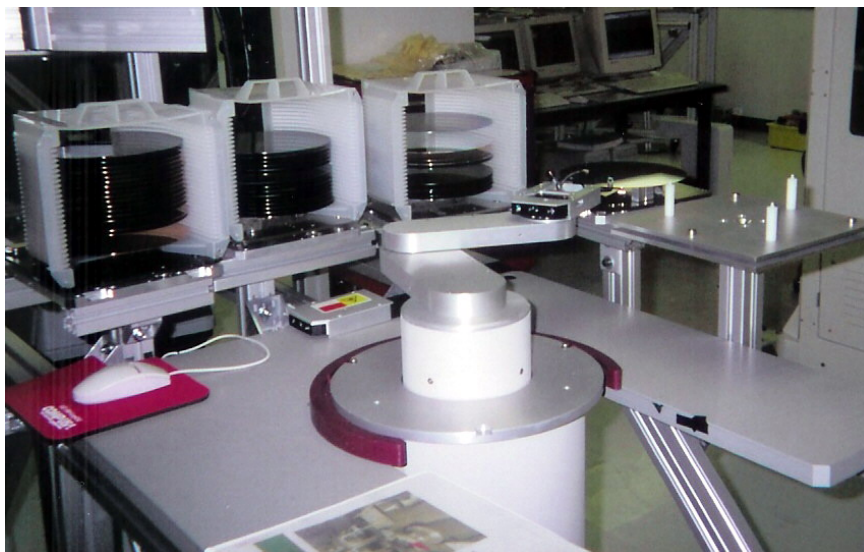


Figura 1 – Manipulador de 2 graus de liberdade (Brooks Automation)

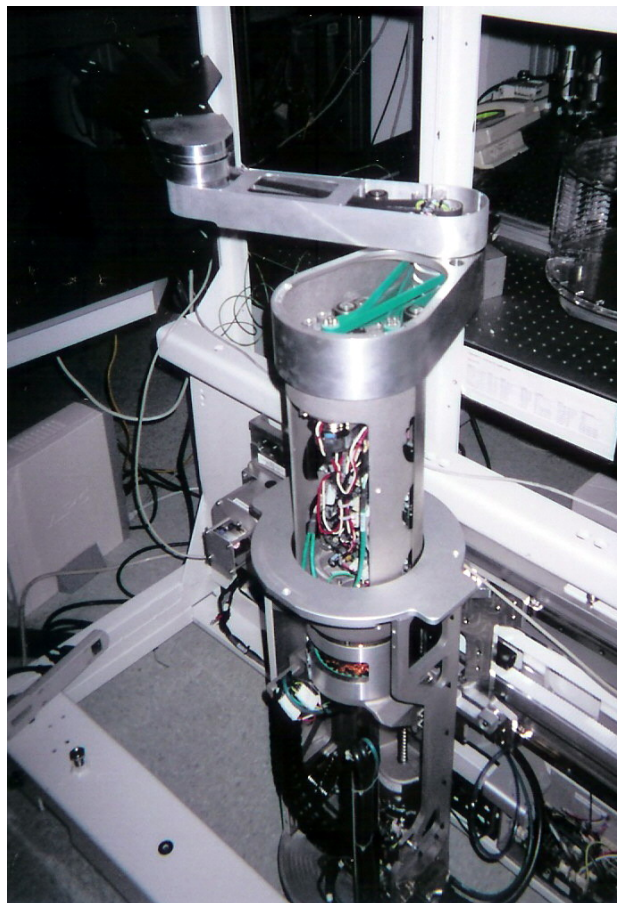


Figura 2 – Visão interna de um manipulador de 2 graus de liberdade (Brooks Automation)

A principal característica do Controle PID é o fato de ter seu controle isolado para cada junta. Ele é muito utilizado por sua facilidade de programação e por oferecer uma precisão satisfatória para muitos casos. A grande desvantagem desta técnica sobre as demais, é o fato de não levar em consideração os efeitos da dinâmica. Isso pode ser facilmente percebido, no controle de trajetórias onde os pequenos erros se acumulam e a diferença final é visível.

Para uma melhor precisão, é utilizado o Controle de Torque Computado. Este visa determinar um controle de torque baseado em equações bastante complexas da dinâmica e por isso, não são muito utilizados em casos de controles lineares.

Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um manipulador robótico de dois graus de liberdade controlado por computador, para posicionamento e geração de trajetórias em baixa ou alta velocidade, com compensação de efeitos dinâmicos. Foram utilizadas, as duas técnicas de controle mais comuns (PID e Torque Computado), e procurou-se observar as principais diferenças entre elas.

Metodologia

O procedimento experimental do projeto foi composto das seguintes etapas:

- Estudo das técnicas de controle
- Desenvolvimento do manipulador

- Estudo da comunicação entre o manipulador e o computador
- Desenvolvimento do programa de controle de posição e trajetórias

1. Técnicas de controle

Para ambas as técnicas utilizadas será utilizada a notação q para posição do manipulador, \dot{q} para velocidade (derivada da posição q) e \ddot{q} para a aceleração (segunda derivada da posição).

1.1. Controle PID

O controle PID controla cada junta individualmente, e por isso suas equações são as mesmas para todos os elos do manipulador:

$$\tau_i = u_i = Kp_i(q_{des} - q) + Kd_i(\dot{q}_{des} - \dot{q}) + Ki_i \int_0^t (q_{des} - q) dT$$

onde, Kp é a constante de proporcionalidade, que controla a rigidez das juntas do manipulador ao se deslocar para a posição desejada; Kd é a constante derivativa, um termo de amortecimento que influi nas oscilações realizadas pelo manipulador sobre a posição desejada; e Ki é a constante integral, que é responsável por corrigir o erro residual. Entende-se por erro como sendo a diferença entre a posição para qual o manipulador deve ir e a sua posição real e é caracterizado na equação por $q_{des} - q$.

1.2. Controle de Torque Computado

Este controle é descrito pela equação genérica abaixo:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n H_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + G_i$$

onde, H_{ij} são os coeficientes da matriz de inércia do manipulador, h_{ijk} é o coeficiente de três índices de Christoffel, e G_i é o termo gravitacional. Para o projeto foram utilizadas as equações da dinâmica de um manipulador de dois graus de liberdade que possui seu segundo elo (elo mais afastado do eixo) acionado remotamente, ou seja acionado por correias, vide Figura 3:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= H_{11} \ddot{\theta}_1 + H_{12} \ddot{\theta}_2 - h \dot{\theta}_2^2 \\ \tau_2 &= H_{22} \ddot{\theta}_2 + H_{12} \ddot{\theta}_1 + h \dot{\theta}_1^2 \\ H_{11} &= I_1 + m_1 l c_1^2 + m_2 l_1^2 \\ H_{22} &= I_2 + m_2 l c_2^2 \\ H_{12} &= m_2 l_1 l c_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \end{aligned}$$

onde θ_1 e θ_2 são os ângulos das juntas (equivalentes a q_1 e q_2), l é o comprimento do elo, l_c é a distância entre cada junta e o centro de massa do elo seguinte, e I é o momento de inércia de cada

elo, onde $I = \frac{ml^2}{12}$, e o coeficiente do termo centrífugo (h) é igual a:

$$\frac{dH_{12}}{d\theta_2} = -m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2 - \theta_1) = -h$$

$$\frac{dH_{12}}{d\theta_1} = m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2 - \theta_1) = h$$

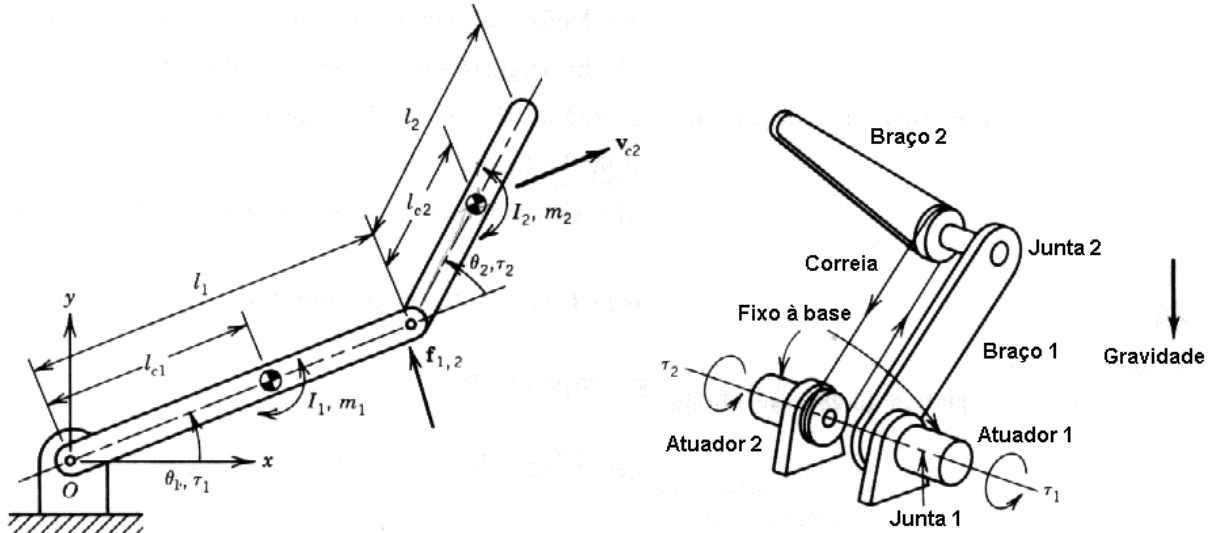


Figura 3 – Manipulador de 2 graus de liberdade.

Note que o ângulo θ_2 considerado aqui é medido em relação à horizontal, logo ele equivale ao ângulo $\theta_1 + \theta_2$ da Figura 3. Além disso, o manipulador se move em um plano horizontal, logo os efeitos gravitacionais podem ser desprezados ($G_1 = G_2 = 0$).

No controle de torque computado, os termos de aceleração dos ângulos das juntas são substituídos pelas saídas de controladores PID calibrados para massas unitárias.

2. Desenvolvimento do manipulador

A estrutura mecânica do manipulador foi construída utilizando dois moto-redutores de corrente contínua (CC) para acionamento do sistema (um para cada grau de liberdade), um par de polias e correia para acionamento remoto do elo 2, e perfis de alumínio para a construção dos elos e da base. Para a leitura da posição foram utilizados encoders, que são sensores óticos de posição, embutidos ao motor, medindo pulsos. Os encoders utilizados continham 2048 pulsos por volta, vide a Figura 4.



Figura 4 - Disco óptico do encoder de alta resolução utilizado.

Como os motores utilizados para o acionamento do sistema não possuíam encoders, a solução encontrada foi acoplar estes motores a outros motores que possuísem os sensores. Portanto foram utilizados mais dois motores CC passivos que além de funcionarem como encoders, funcionando também como sensores de velocidade (tacômetros), ao serem utilizados como geradores de energia elétrica, vide Figura 5.



Figura 5 – Acoplamento do motoredutor (acima) com o tacômetro/encoder (abaixo, dourado).

O motor no topo da Figura 5 é o responsável pelo acionamento de um dos elos do sistema, e o motor mais abaixo é o responsável pela medição de velocidade e posição. O cabo inferior dirige a informação da posição do manipulador para uma placa A/D D/A modelo ServoToGo, dentro de um computador PC. Este procedimento foi feito da mesma maneira para o outro elo.

Por fim foi adicionado uma ponteira laser na ponta do elo 2 para melhor visualizar as trajetórias. As Figuras 6, 7 e 8 apresentam a parte mecânica do manipulador desenvolvido.

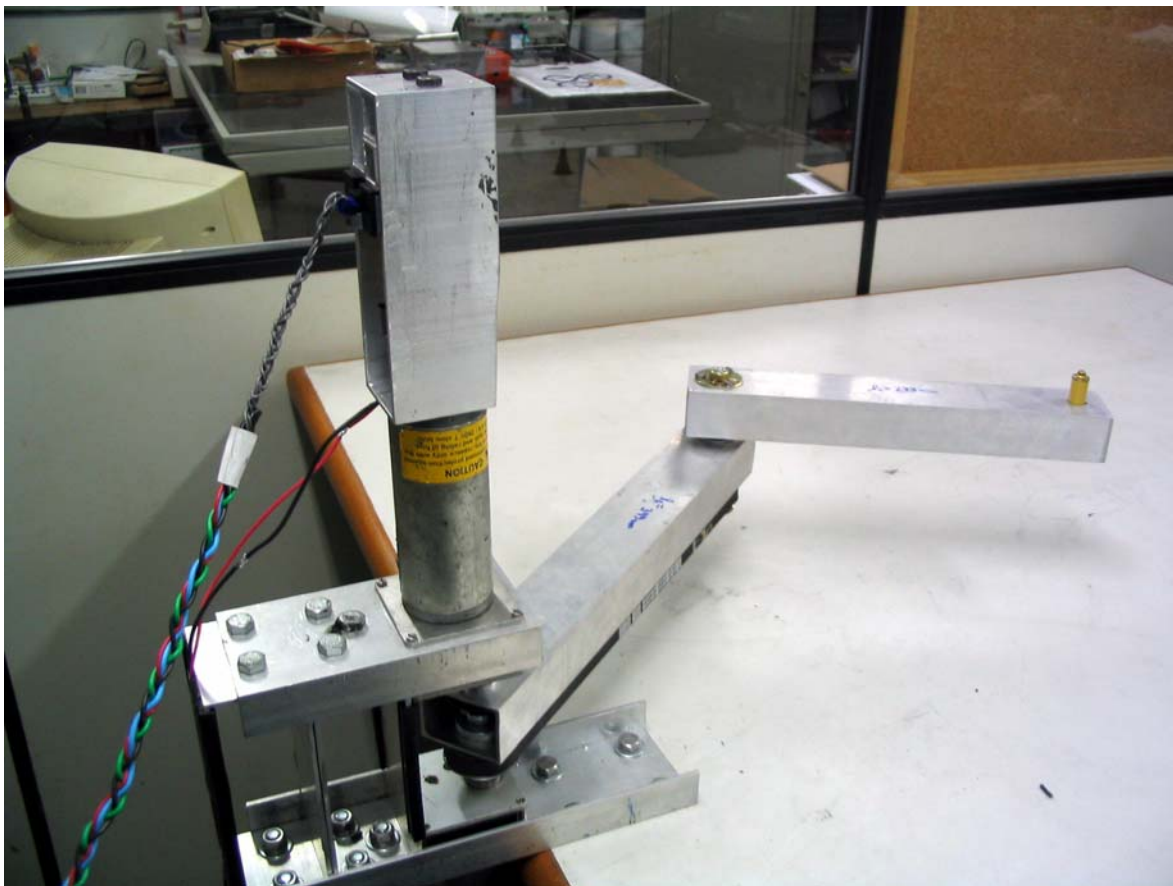


Figura 6 – Vista do manipulador desenvolvido.

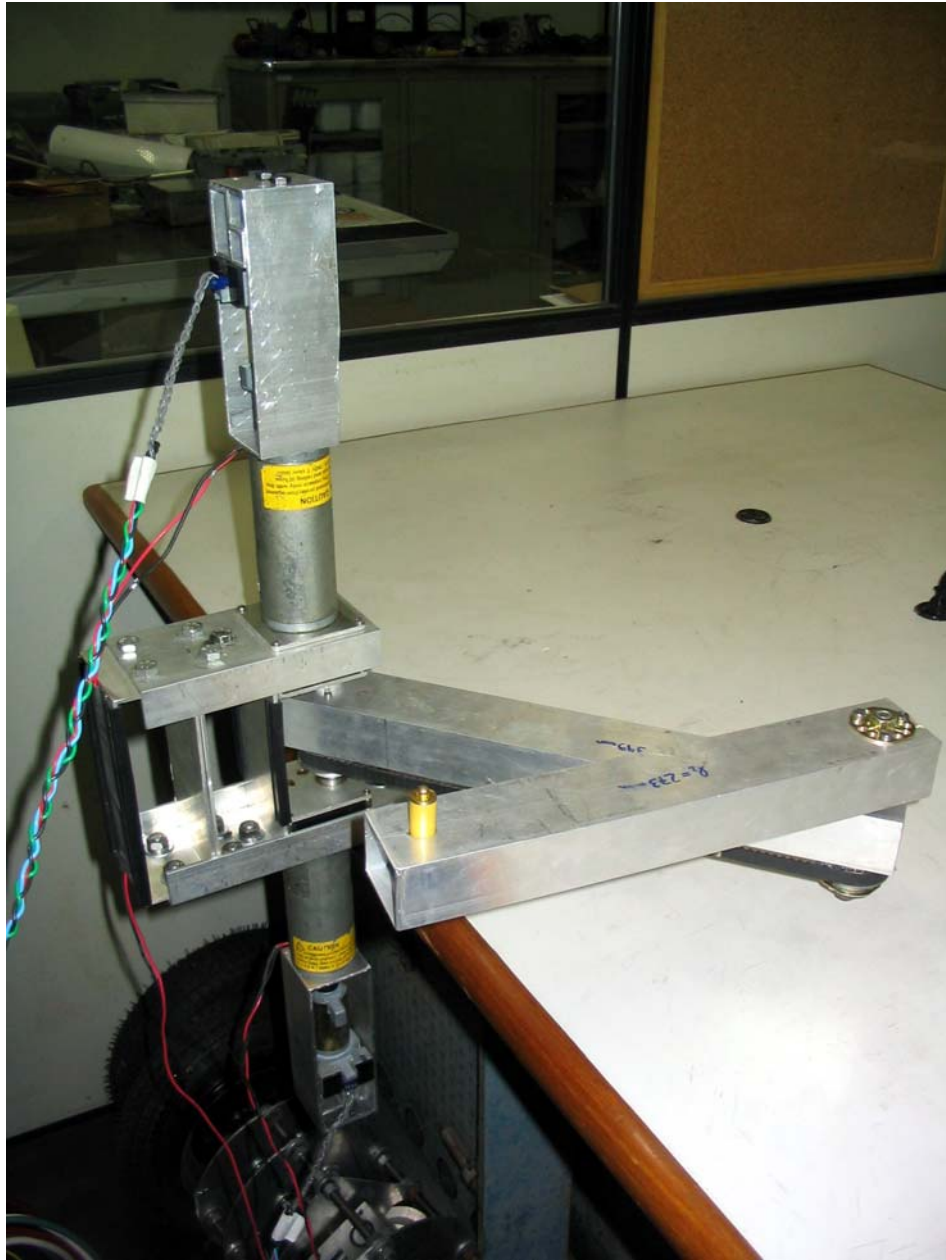


Figura 7 – Manipulador em outra configuração.

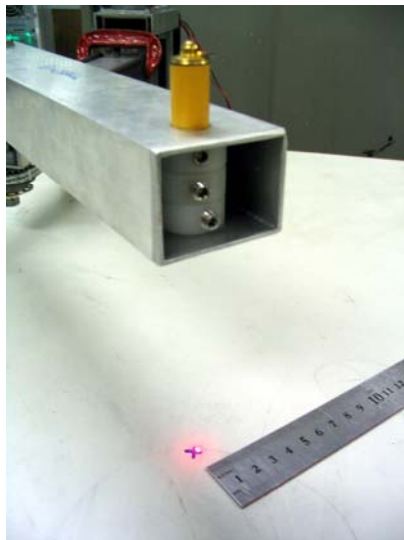


Figura 8 – Ponteira laser colocada na extremidade do elo 2

2.1. Comunicação entre o manipulador e o computador

Para conexão manipulador-computador, foi utilizada uma placa conversora analógico-digital e digital-analógica ServoToGo, de 8 canais de entradas analógicas, 8 canais de saídas analógicas, 8 canais de entradas para encoders, e 32 bits de entrada e saída digital. Destes canais, foram utilizadas duas entradas para encoders, para determinar a posição real de cada elo, e dois canais de saídas digitais, para o envio da voltagem final decorrente do controle.



Figura 9 – Placa A/D D/A ServoToGo.

Foi utilizado um controlador/amplificador da marca RoboteQ, para amplificar o sinal vindo da placa ServoToGo, transformando proporcionalmente cada sinal da placa ServoToGo de 0 a 5 volts em voltagens entre -24 e 24 volts para os motores, vide Figuras 10 e 11.



Figura 10 - Amplificador RoboteQ.

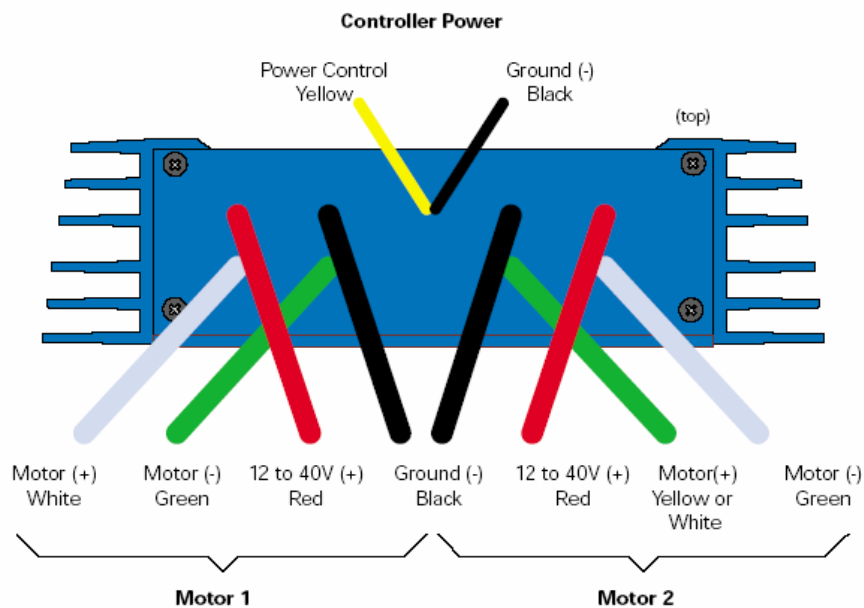


Figura 11 – Saídas do amplificador Roboteq.

Na Figura 10 pode-se observar o controlador/amplificador RoboteQ, e seu conector para as entradas. Já na Figura 11 as conexões para o controle dos dois motores. Através do conector da entrada, o controlador recebe a saída digital da placa, e através das saídas verde e branca (Figura 11), o sinal amplificado se dirige para os motores.

A Figura 12 permite visualizar as conexões do motor com o controlador RoboteQ, e a conexão deste com a placa ServoToGo, dentro do computador.

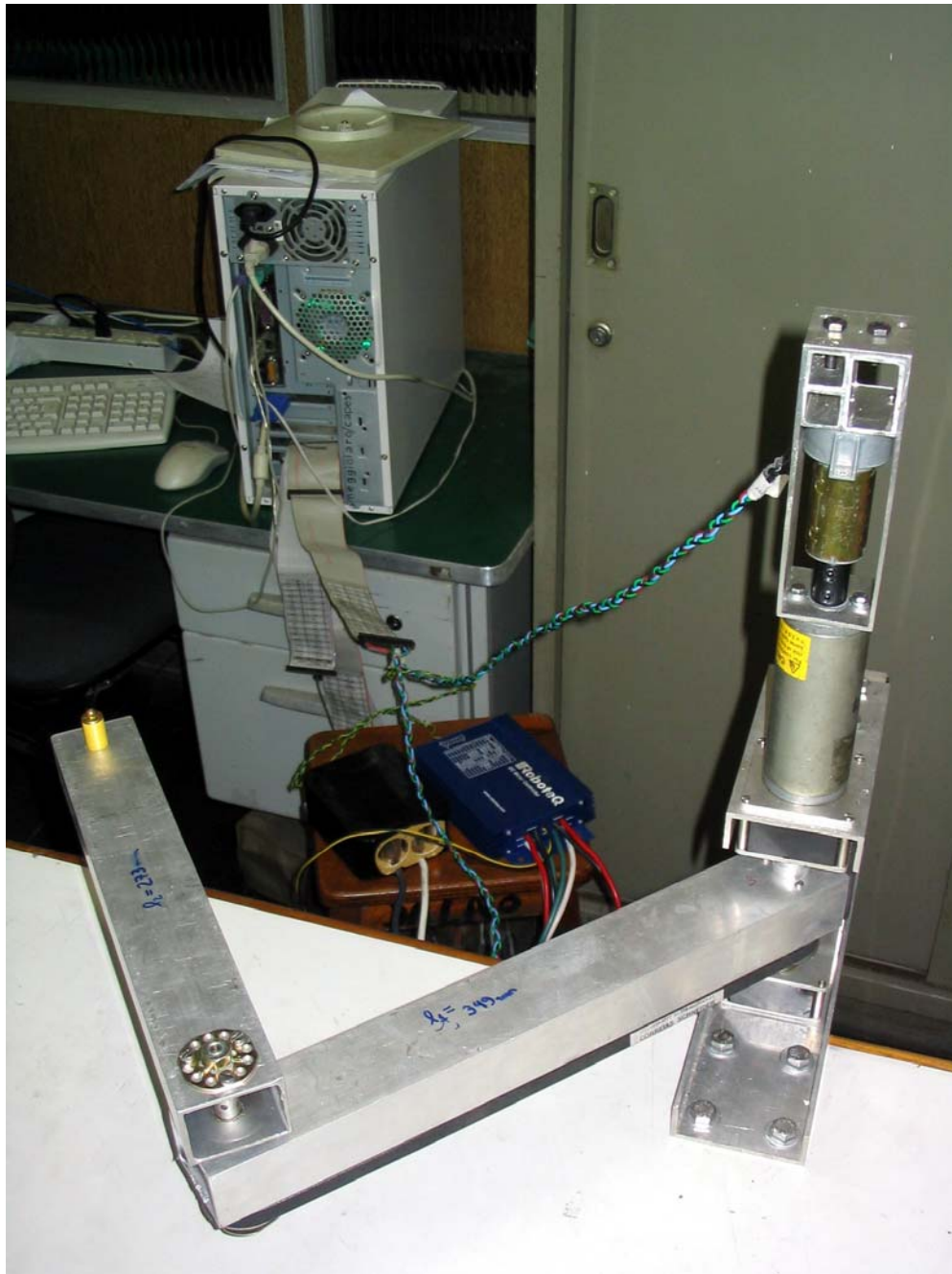


Figura 12 – Manipulador, Controlador/Amplificador e Computador

3. Software de controle de posição

O *software* desenvolvido possibilita a interface entre um computador PC e a eletrônica de potência. O *software* foi desenvolvido utilizando o programa LabVIEW da *National Instruments*, escolhido pela rapidez de implementação e interface gráfica intuitiva. A Figura 13 apresenta a interface principal do programa.

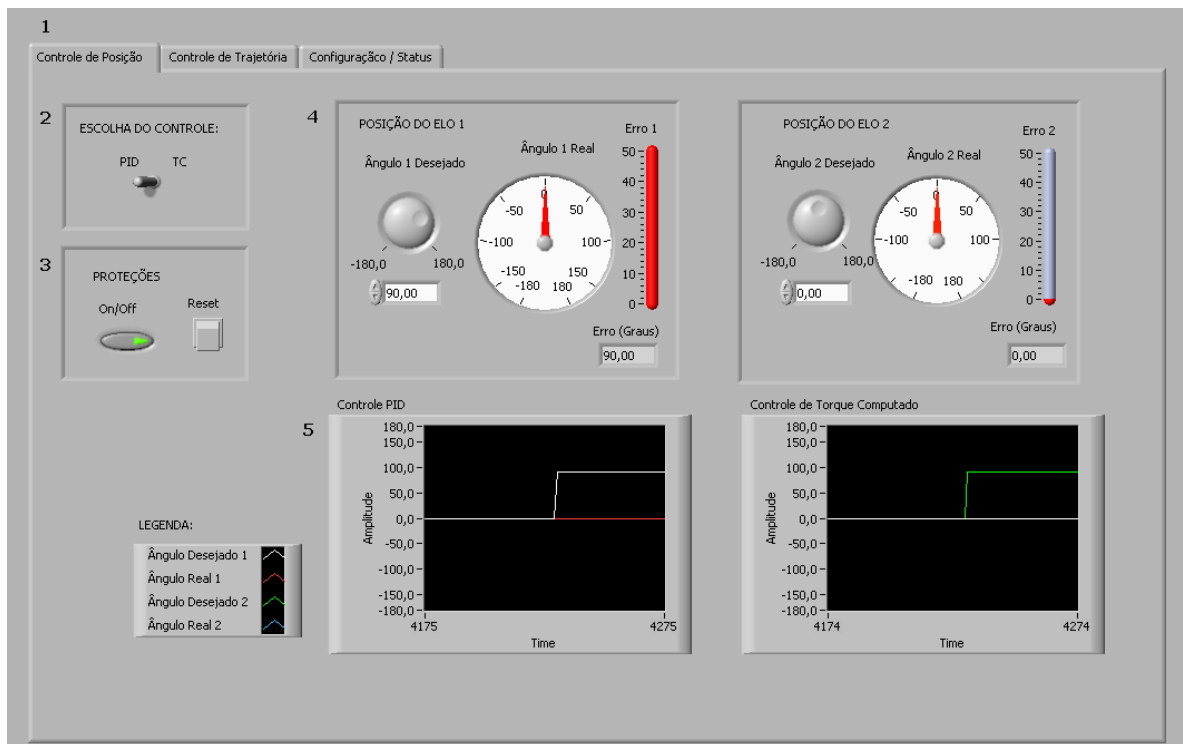


Figura 13 - Tela de Controle de Posição

Os números 1 a 5 da Figura 13 representam:

1- Através dessa tabela, o usuário é capaz de navegar entre as opções: controle de posição, controle de trajetória e configuração/status.

2- Primeiro passo do programa. Neste botão é possível escolher qual dos dois controles utilizar: Controle PID e Controle de Torque Computado (TC).

3- Proteções

Botão On/Off: Caso este botão seja ativado, o computador envia 0 (zero) volts para os motores e estes param o movimento. Este botão foi criado para segurança do manipulador.

Botão Reset: Antes de iniciar o programa, deve ser gravado a posição de referência do manipulador. Para isso, o manipulador deve ser colocado na posição considerada como referência, e pressionar este botão. Este procedimento fará com que os encoders (sensores de posição) zerem a contagem.

4- Posições dos elos 1 e 2

Ângulo Desejado: Através destes botões são escolhidos os ângulos desejados para cada elo do manipulador independentemente.

Ângulo Real: Este indicador mostra o ângulo real dos elos.

Erro: Diferença entre a posição para qual o manipulador deve ir e a sua posição real.

5- Gráficos gerados.

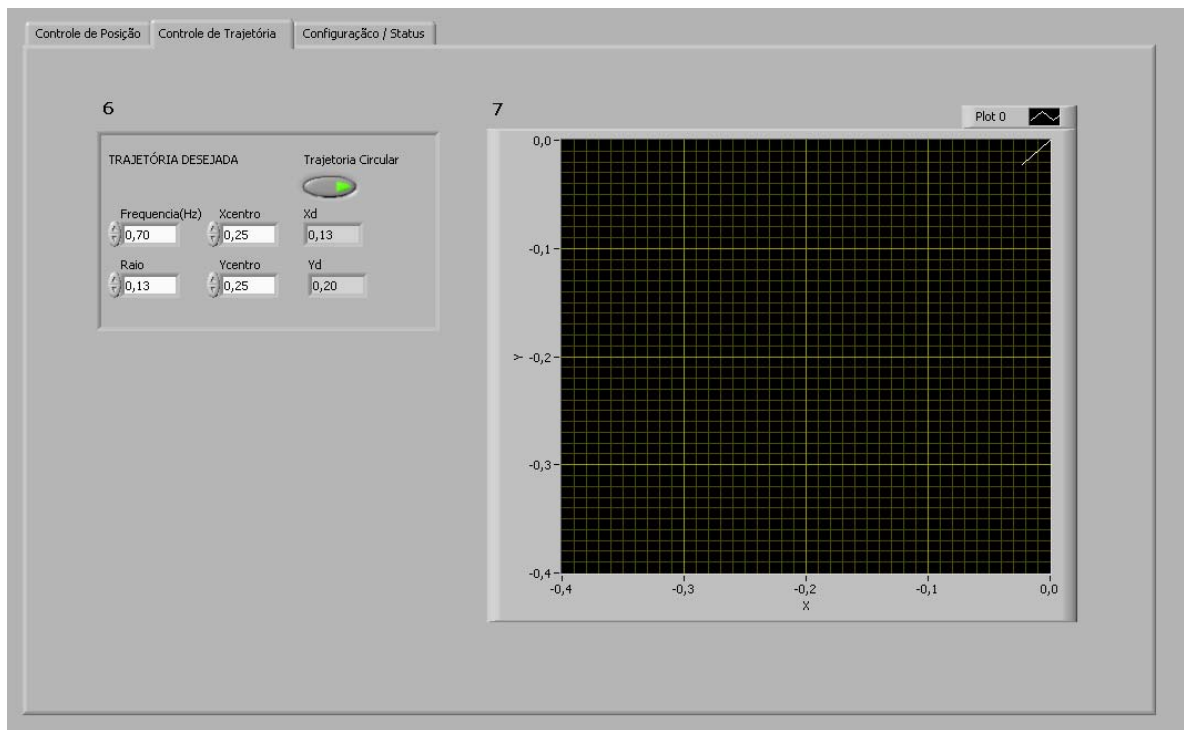


Figura 14 - Tela de Controle de Trajetória

Os números 6 e 7 da Figura 14 representam:

6- Trajetória Desejada

Trajétoria Circular: Com este botão acionado, o manipulador inicia uma trajetória circular, de acordo com os parâmetros fixados.

Frequência: Escolha da frequência desejada para a trajetória.

Raio: Escolha do raio desejado para o círculo.

Xcentro, Ycentro: Escolhas das coordenadas centrais do círculo.

7-Gráfico X versus Y

Neste gráfico estão representadas as trajetórias circulares real e desejada.

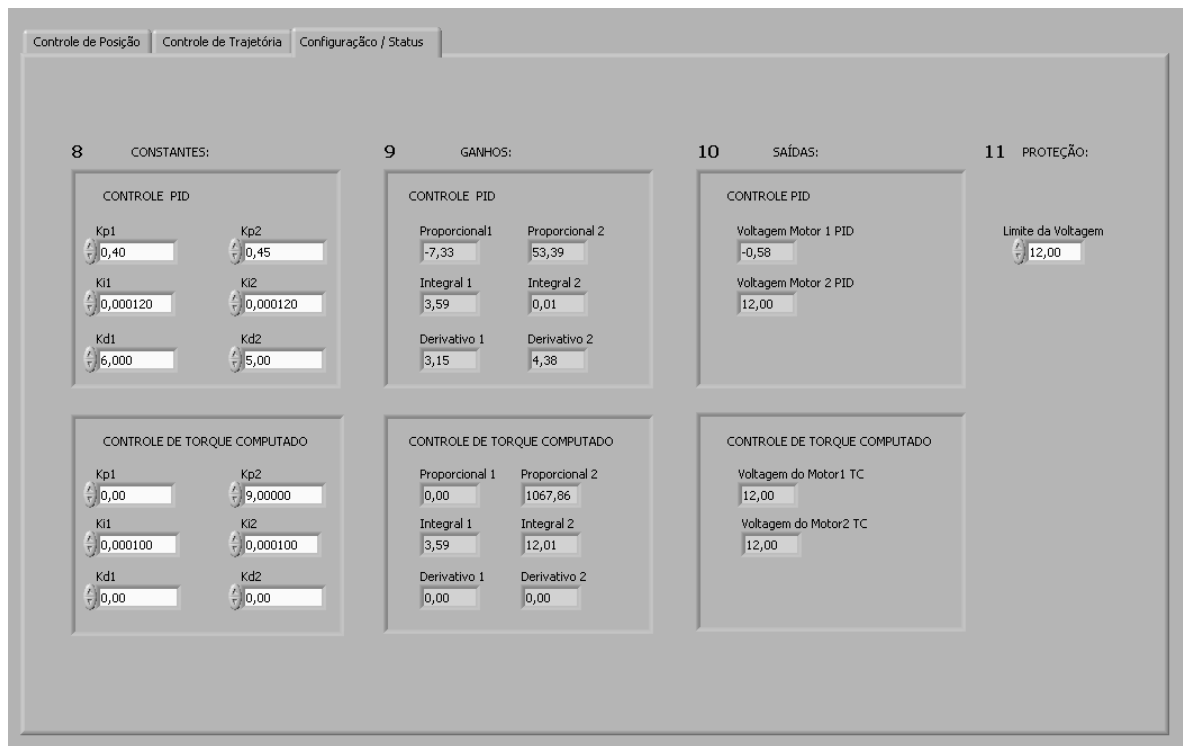


Figura 15 - Tela de Configuração / Status

Os números 8 a 11 da Figura 15 representam:

8- Constantes

Nestes quadros, pode-se calibrar as constantes do sistema (K_p , K_d , K_i), explicadas no item 1.1. Estas constantes podem variar com o sistema, com o elo e com o controle.

9- Ganhos

Nestes quadros, são indicados os ganhos proporcionais, derivativos e integrais de ambas as juntas.

10-Saídas

Nestes quadros, indicam-se as voltagens que estão sendo enviadas aos motores 1 e 2. Estes indicadores são mostrados independentes do controle utilizado, porém a voltagem real transmitida para os motores é a do controle escolhido na tela inicial (Controle de Posição).

11-Proteção

Apesar do motor suportar voltagens de -24 a 24 volts, este botão permite que a voltagem final se limite a um valor menor. O botão indica o módulo da voltagem.

4. Experimentos e Resultados

Para iniciar os testes, deixou-se o elo 1 imobilizado, possibilitando apenas que o elo 2 se movimentasse. Com isso, foi possível configurar todas as constantes de modo satisfatório para o elo 2. Nesta primeira etapa, aplicou-se um ângulo desejado de 45 graus e obteve-se os seguintes gráficos de erro:

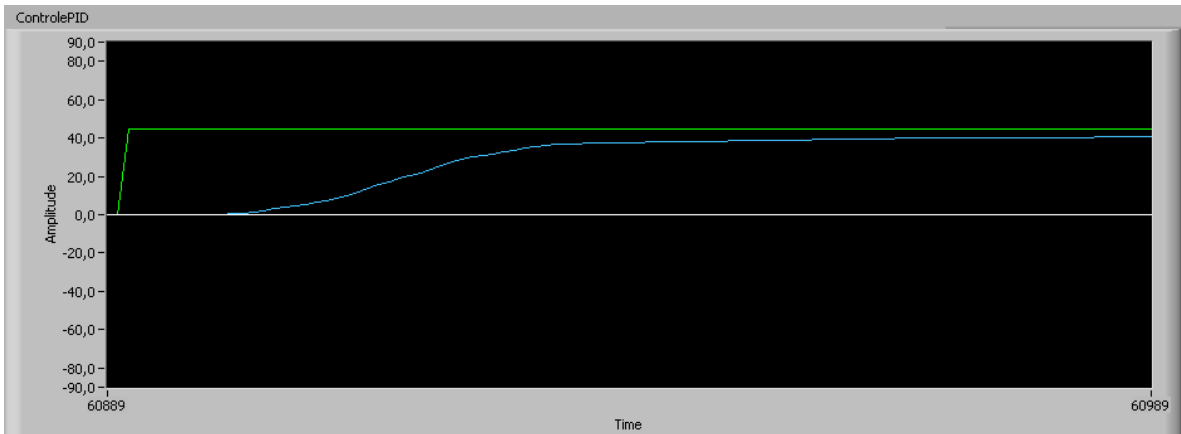


Figura 16 - Controle PID – Controle do Elo 2 com o Elo 1 imobilizado (linhas branca e verde: posições desejadas dos elos 1 e 2; vermelha e azul: posição real dos elos 1 e 2, tempo em ms)

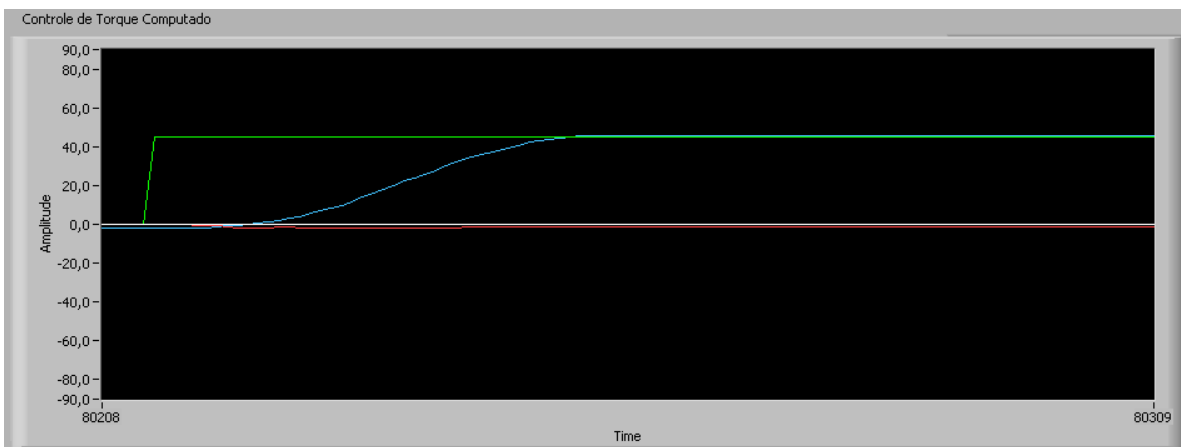


Figura 17 - Controle de Torque Computado – Controle do Elo 2 com o Elo 1 imobilizado (linhas branca e verde: posições desejadas dos elos 1 e 2; vermelha e azul: posição real dos elos 1 e 2, tempo em ms)

Observa-se que o Controle de Torque Computado, ao compensar os efeitos dinâmicos, é capaz de atingir a posição desejada em um tempo menor e com menos erro residual.

Libera-se então o movimento do Elo 1 e calibram-se suas constantes. Neste caso ambos os elos estariam em movimento. Para testar esta etapa, foi aplicado um ângulo desejado ao elo 1 de 45 graus. Os resultados se encontram a seguir. Nota-se mais uma vez a superioridade do Controle de Torque Computado, que conseguiu manter baixos os erros da junta 2 (linha azul) enquanto a junta 1 (linha vermelha) se movimentava, compensando os efeitos do acoplamento dinâmico.

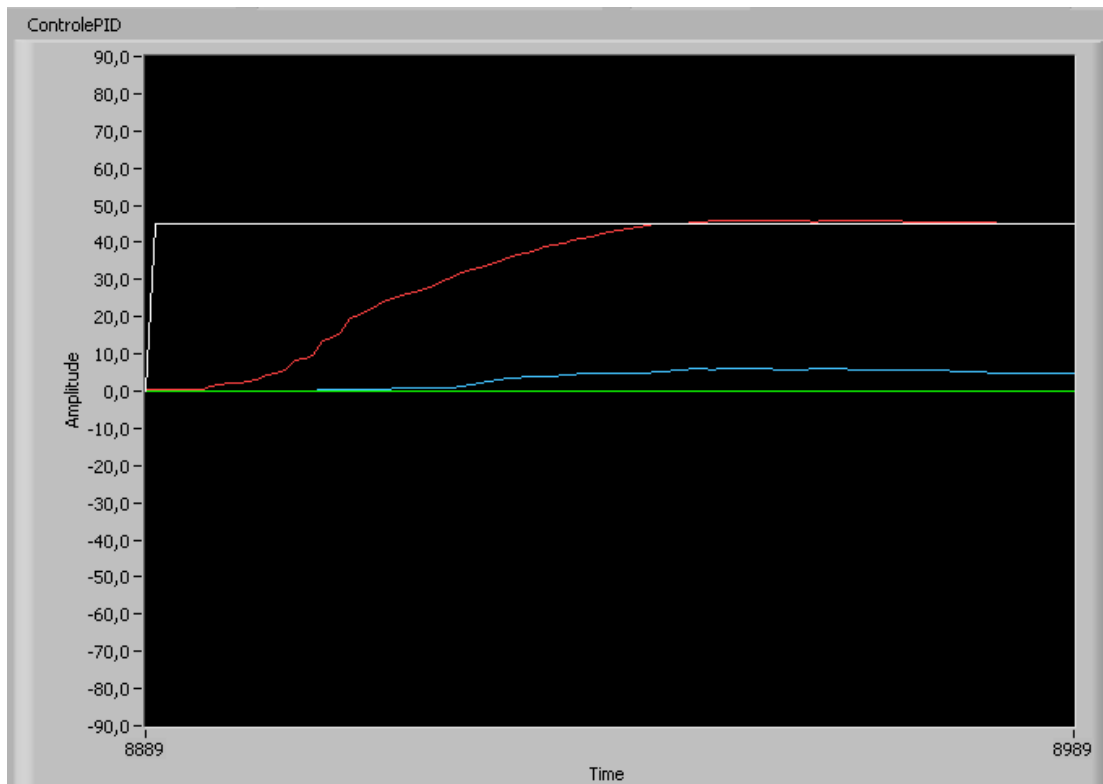


Figura 18 - Controle PID – Controle combinado dos elos 1 e 2 (linhas branca e verde: posições desejadas dos elos 1 e 2; vermelha e azul: posição real dos elos 1 e 2, tempo em ms)

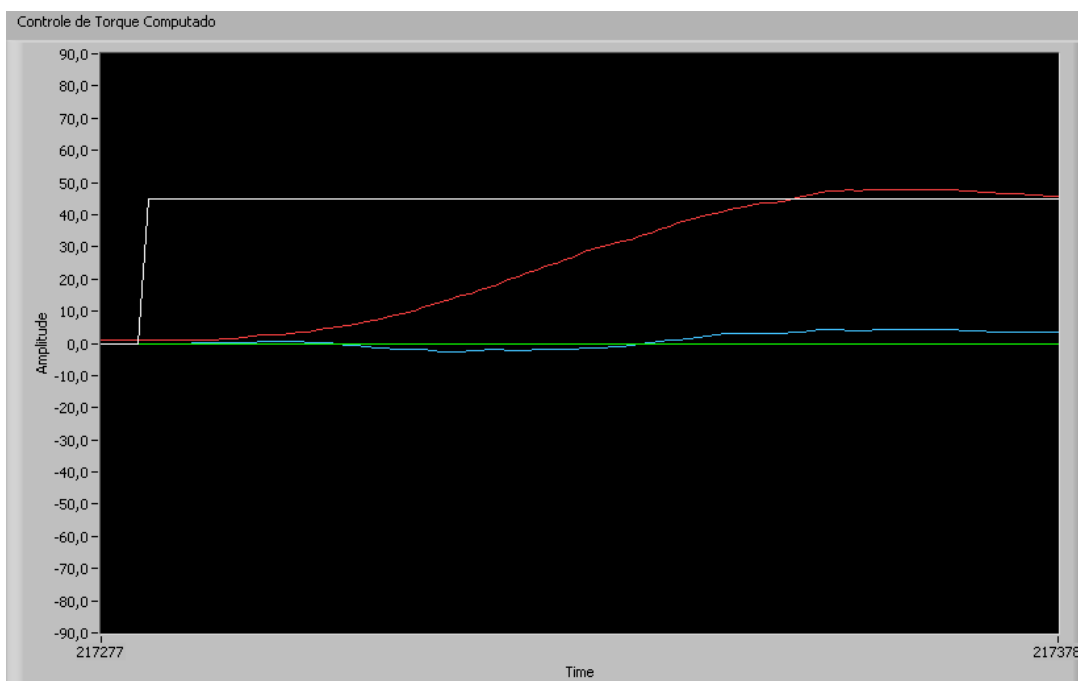


Figura 19 - Controle de Torque Computado – Controle combinado dos elos 1 e 2 (linhas branca e verde: posições desejadas dos elos 1 e 2; vermelha e azul: posição real dos elos 1 e 2, tempo em ms)

Tendo já calibrado as constantes de ambos os elos, implementou-se uma trajetória circular para a extremidade do manipulador com diferentes frequências. Para comparar o desempenho dos dois controles foi realizada uma trajetória circular de raio igual a 180mm e frequência igual a 1 Hz, vide as figuras abaixo.

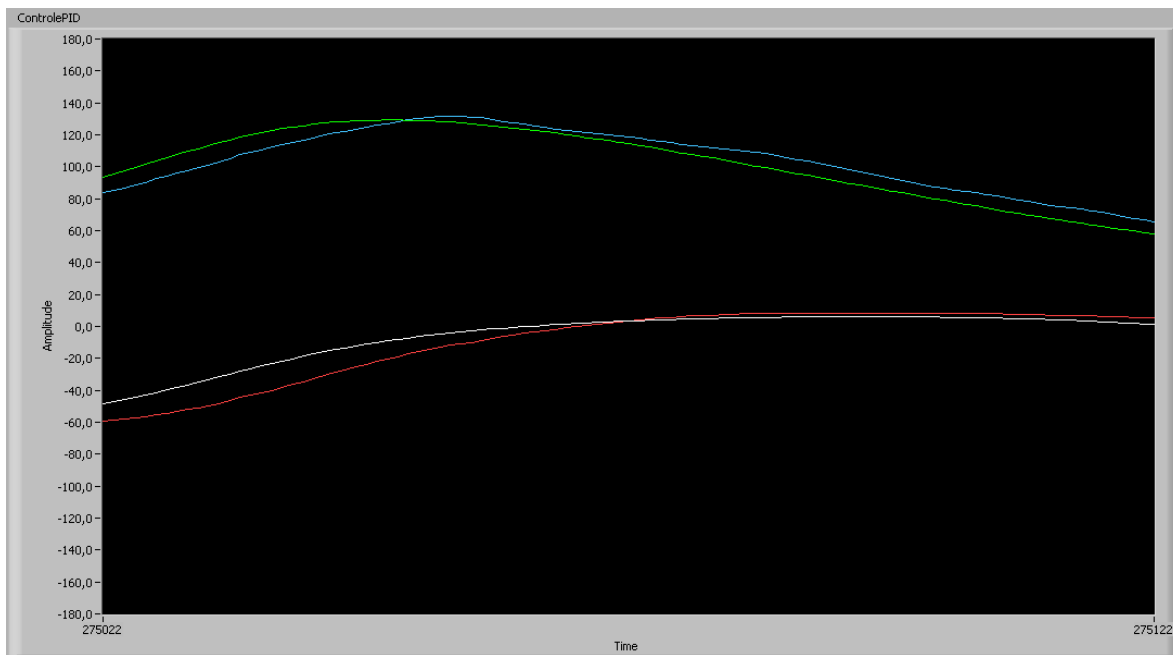


Figura 20 - Controle PID - Trajetória circular, raio 0.18 m e frequência igual a 0.8 Hz (linhas branca e verde: posições desejadas dos elos 1 e 2; vermelha e azul: posição real dos elos 1 e 2, tempo em ms).

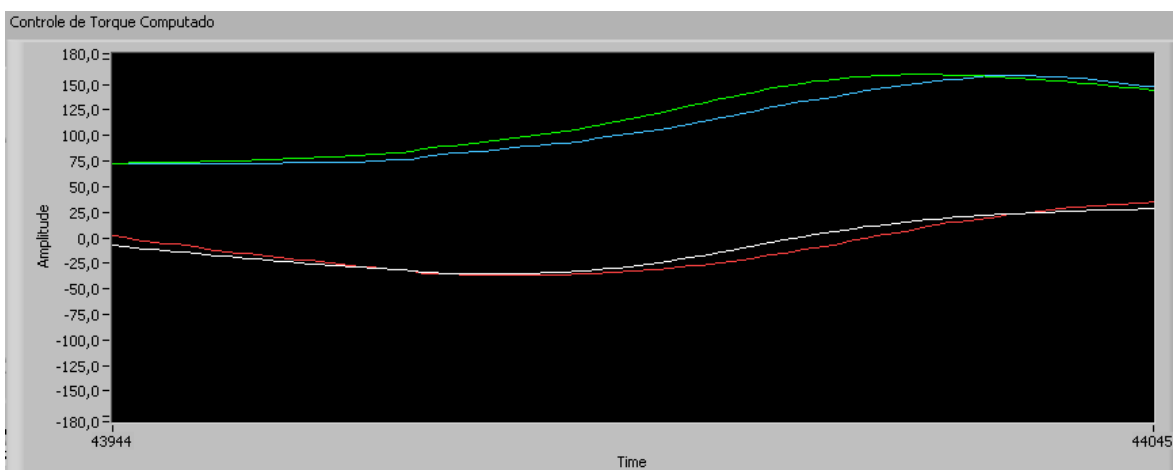


Figura 21 - Controle de Torque Computado – Trajetória circular, raio 0.18 metros e frequência igual a 0.8 Hz (linhas branca e verde: posições desejadas dos elos 1 e 2; vermelha e azul: posição real dos elos 1 e 2, tempo em ms).

Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos a parte mecânica, eletrônica e *software* de um manipulador de 2 graus de liberdade. Foram implementados controles PID e de Torque Computado. O controle PID não considera os efeitos dinâmicos, portanto só apresentou bons resultados para baixas velocidades angulares (tipicamente menor que 90 graus por segundo). Já o Controle de Torque Computado, que compensa os efeitos dinâmicos, apresentou melhores resultados que o PID, em especial ao percorrer trajetórias em alta velocidade. Ambos os controles ainda assim apresentaram erros de posicionamento, que podem ser atribuídos a um grande atrito nas juntas. Estes controles não conseguem compensar estes efeitos, a menos do uso de um ganho integral, o qual prejudica a velocidade de resposta do sistema e pode gerar instabilidade.

Referências

- 1 - ASADA, H., SLOTINE, J.J. **Robot Analysis and Control**. Wiley, 1986.
- 2 - SPONG, W., VIDYASAGAR, M. **Robot Dynamics and Control**. Wiley, 1989.
- 3 - CRAIG, J.J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. Addison-Wesley, 1986.
- 4 - OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice-Hall do Brasil, 1990.