5
Sistema experimental

O sistema experimental deste trabalho tem o objetivo de analisar o desempenho de motores de passo com o controle proposto. Isso é implementado em um sistema com necessidades críticas: um manipulador robótico serial. Erros de posicionamento pequenos nas juntas dos manipuladores podem deteriorar muito a precisão da extremidade. Além disso, manipuladores de porte industrial precisam de motores de passo acoplados a redutores de velocidade. Os motores comercialmente disponíveis não dispõem de torque suficiente para acionamento direto. Entretanto, estes redutores normalmente tornam a relação entre o ângulo da junta e o do motor não linear, em função do *backlash*.

Devido exigências críticas de desempenho, um manipulador robótico serial com seis graus de liberdade é escolhido para avaliar o controle proposto. A seguir é apresentado o projeto deste manipulador.

5.1.
Projeto do manipulador

O manipulador proposto possui seis graus de liberdade, alcance de *540mm*, e capacidade de carga de *60N*. O manipulador é proposto com essas características porque elas são comuns a manipuladores comerciais de pequeno porte que não usam motores de passo. A Figura 22 mostra uma imagem gerada pelo programa CAD, utilizado para desenvolver o manipulador.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

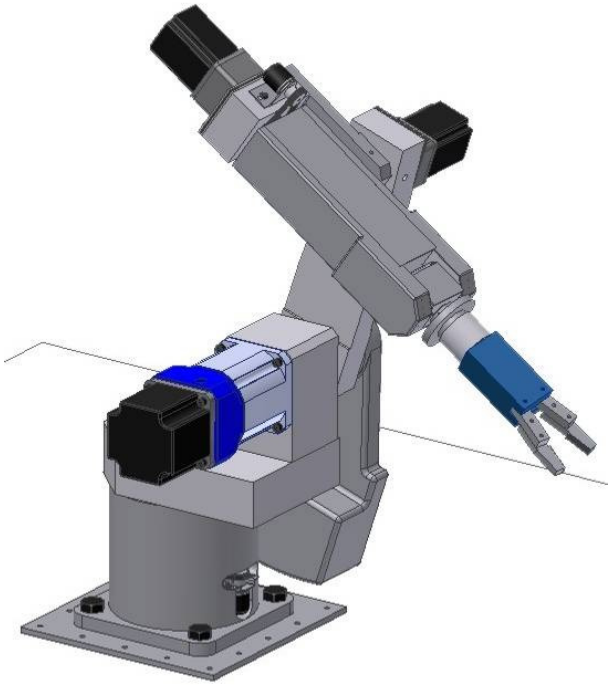

Figura 22 – Manipulador robótico

O projeto do manipulador visa gerar as maiores forças possíveis na sua extremidade, respeitando as limitações dos motores disponíveis. Então, para estudar quais termos da dinâmica do manipulador possuem relevância sobre o torque em cada junta, deve-se estudar a combinação dos efeitos:

$$Inercial + Centrífugo + Coriolis + Gravitacional = Torque \tag{5.1}$$

O primeiro termo desta equação depende do momento de inércia de cada elo e da aceleração angular. Então, para reduzir os efeitos deste termo, o manipulador deve ter elos com mínimos momentos de inércia. Neste manipulador, a aceleração máxima de cada elo é um parâmetro que deve ser informado ao controlador.

Os termos centrífugos e de Coriolis são proporcionais à velocidade, e dependem da configuração e da massa dos elos. Porém, como motores de passo não geram grandes velocidades, estes termos têm menor influência na avaliação do desempenho.

Os termos gravitacionais são resultado do torque gerado pelo peso dos elos, que depende da projeção horizontal da distância do CG de cada elo até cada uma das juntas. Então, para reduzir o efeito da gravidade sobre o manipulador, o seu projeto visa localizar o centro de gravidade de cada elo o mais próximo possível do eixo de cada junta. Deste modo, a força que pode ser gerada na extremidade é

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

maximizada, pois uma fração pequena do torque dos motores é utilizada para compensar a gravidade.

A Figura 23 contém a nomenclatura de alguns componentes do manipulador desenvolvido. Nesta figura aparecem os seis motores e o seis elos.

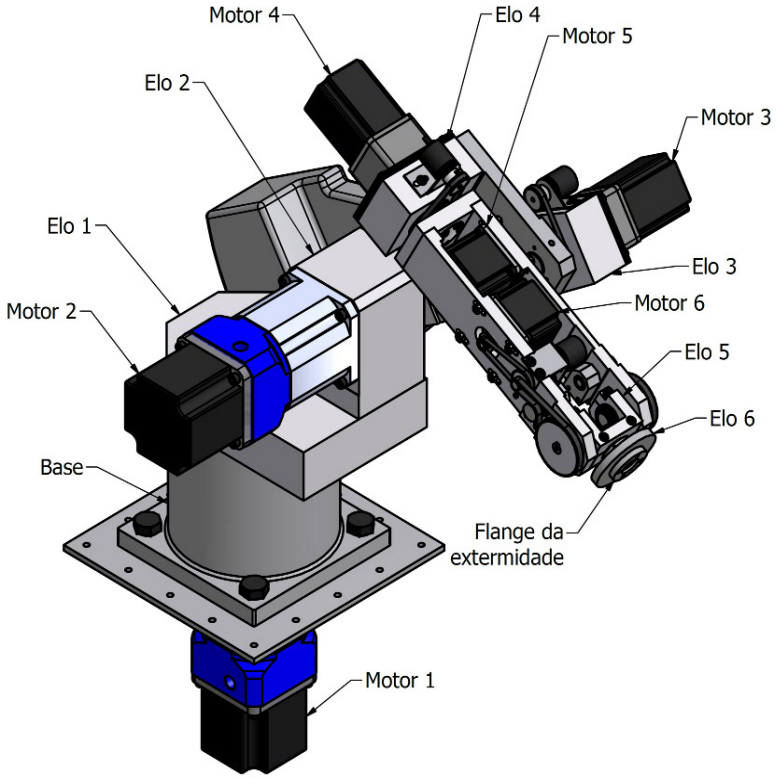

Figura 23 – Localização dos motores

5.1.1. Características principais

A Figura 24 contém as dimensões básicas do manipulador, em *mm*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

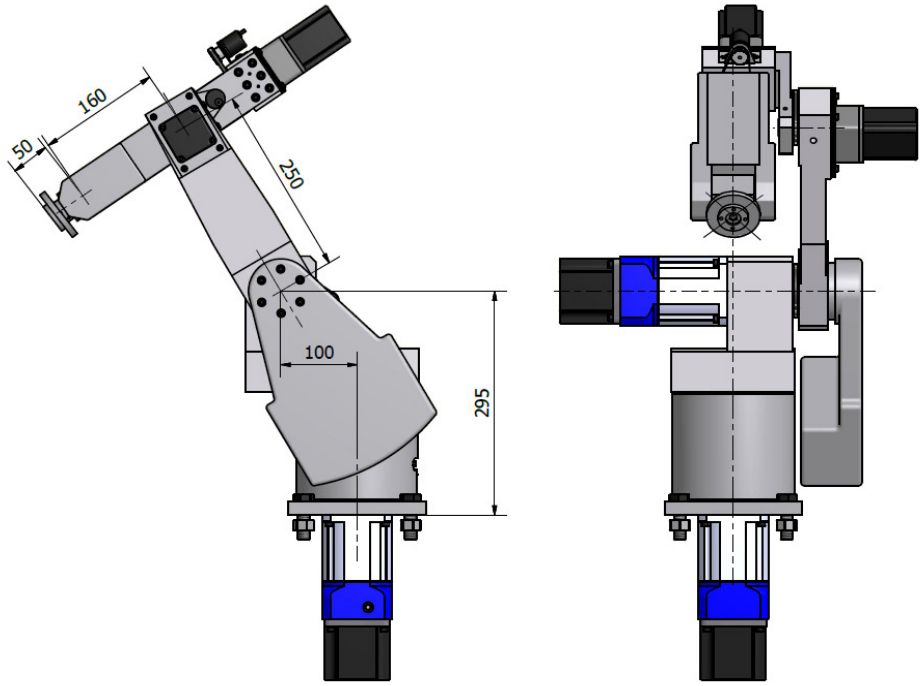

Figura 24 – Dimensões básicas

Através desta figura, é calculado que, se o manipulador estiver totalmente distendido, ele alcança *560mm* na horizontal em relação ao eixo do primeiro motor. Porém, nesta configuração, o motor da junta 4 colide com a junta 2, logo este manipulador não pode ser completamente distendido. Assim o máximo alcance real do manipulador no flange da extremidade é de *540mm*.

O atrito de cada junta é minimizado através de uma montagem com rolamentos de esfera. Na junta 1 são utilizados dois rolamentos de contato angular e um sistema de pré-carga. A Figura 25 mostra uma vista explodida das três primeiras juntas do manipulador.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

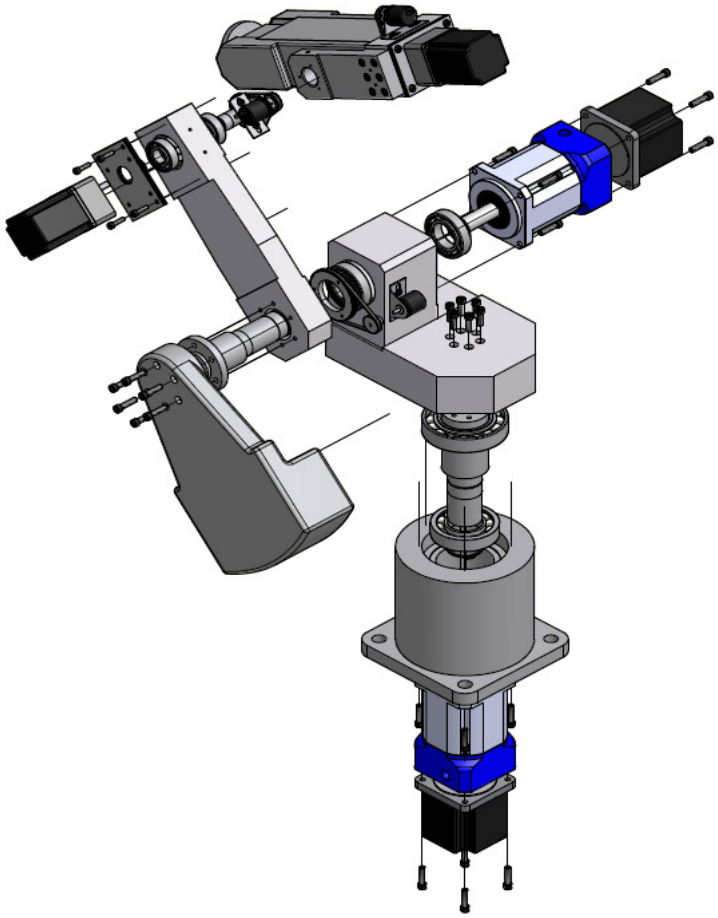

Figura 25 – Vista explodida das três primeiras juntas

Nas juntas 2, 3 e 4 são utilizados dois rolamentos de uma carreira de esfera em cada. Os motores 1 e 2 são acoplados diretamente aos seus redutores, e esses aos eixos das juntas 1 e 2. A Figura 26 mostra os motores 1 e 2 utilizados, e seus redutores de velocidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

Figura 26 – Motores 1 e 2 utilizados

O Apêndice C apresenta os dados detalhados de cada motor. Todos os motores de passo deste projeto são da empresa Akiyama. O motor 1 é do modelo AK85H/3.75-1.8, torque máximo *5,1Nm*, híbrido, 4 fios, *200* passo por volta e possui massa de *2,3kg*. Os redutores das juntas 1 e 2 são do mesmo modelo, GBPH-0902-NP-020-AA341-500 da Anaheim Automation, com redução de *1:20,* folga de *0,1°* e massa de *4,2kg*. O motor 2 é do modelo AK85H8/3.36-1.8, torque máximo *4,1Nm*, híbrido, *8* fios, *200* passo por volta e massa de *2,3kg*.

A Figura 27 mostra os motores 3 e 4. O motor 3 é um motor de passo com redutor de *1:20* acoplado. O modelo é AK57H/3G20-1.8, torque máximo de *1,5Nm*, híbrido, *6* fios, *200* passo por volta e massa de *1,2kg*. O motor 4 é um motor de passo com redutor de *1:10* acoplado. O modelo é AK57H/3G10-1.8, torque máximo de *1,5Nm*, híbrido, *6* fios, *200* passo por volta e massa de *1,2kg*.

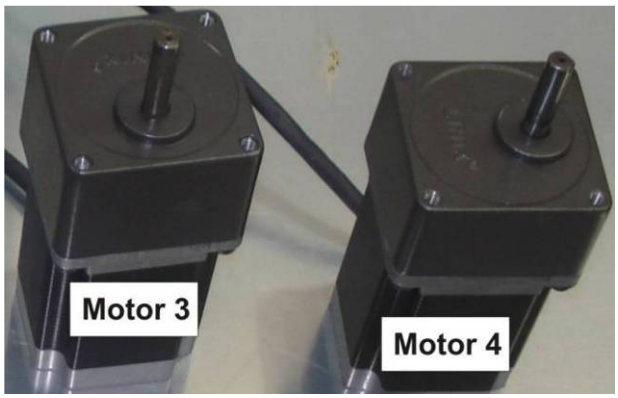

Figura 27 – Motores 3 e 4 utilizados

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

A Figura 28 mostra os motores 5 e 6, do modelo AK56H/3-1.8, torque máximo de *0,75 Nm*, híbrido, *6* fios, *200* passos por volta e com massa de *0,6kg*. Note que os motores mais próximos da extremidade possuem menores pesos, para diminuir o momento de inércia do sistema. Os motores mais próximos à base, por outro lado, precisam executar maiores torques, e portanto são de modelos mais potentes e, consequentemente, mais pesados.

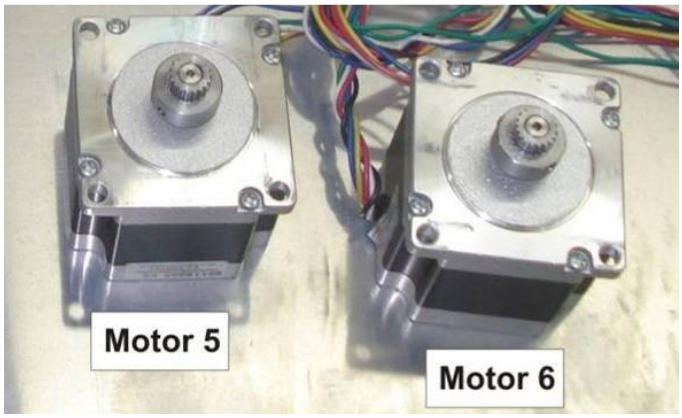

Figura 28 – Foto dos motores 5 e 6

A Figura 29 mostra uma vista explodida das três últimas juntas do manipulador.

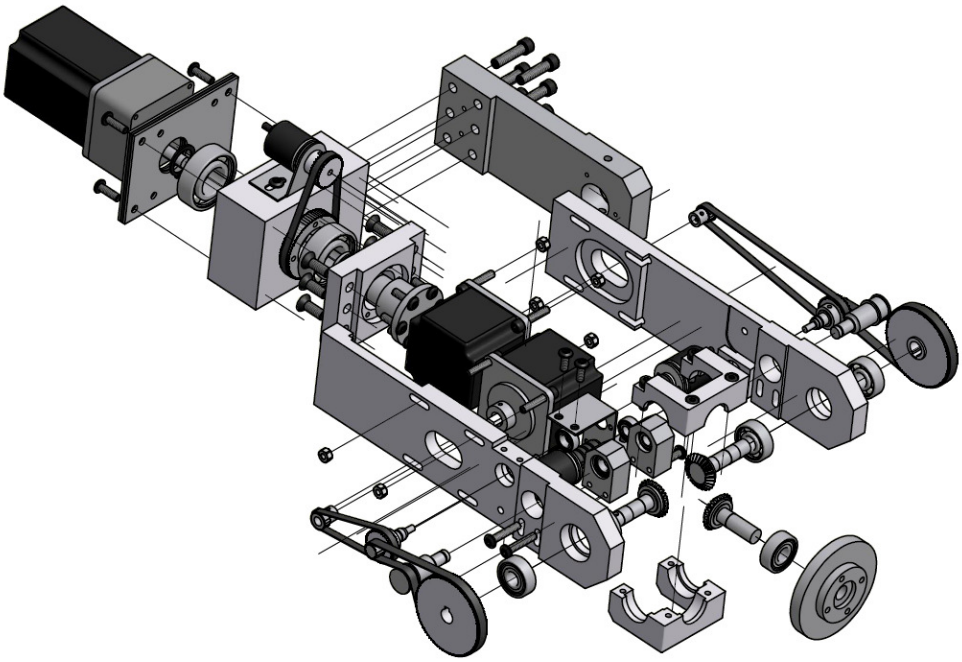

Figura 29 – Vista explodida dos três últimos elos

O motor com redutor da junta 4 é acoplado ao eixo da junta 4. No eixo dos motores das juntas 5 e 6 estão acopladas polias dentadas de *18* dentes. Cada uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

dessas polias aciona uma correia que gira outra polia, de *36* dentes. Esta polia está montada em um eixo com uma polia de *17* dentes na extremidade. Nesta polia está montada uma correia que a liga à outra polia de *85* dentes. Esta polia está montada no eixo de uma das engrenagens cônicas da extremidade. A Figura 30 mostra como esse conjunto é montado.

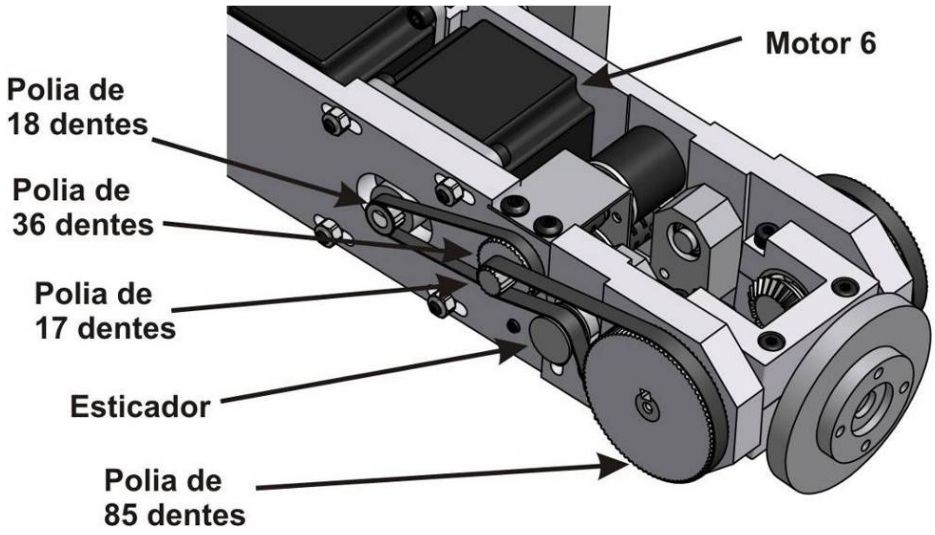

Figura 30 – Detalhe das polias do punho

Assim, pode ser calculada a relação de transmissão entre o motor e o eixo da engrenagem por

$$i_6 = \frac{18}{36} \cdot \frac{17}{85} = \frac{1}{10} \tag{5.2}$$

As juntas 5 e 6 são acionadas pelos motores 5 e 6 simultaneamente. Os motores acionam o conjunto de polias mencionado. Cada polia está acoplada a um eixo de uma engrenagem cônica. A Figura 31 mostra o mecanismo de acionamento da extremidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

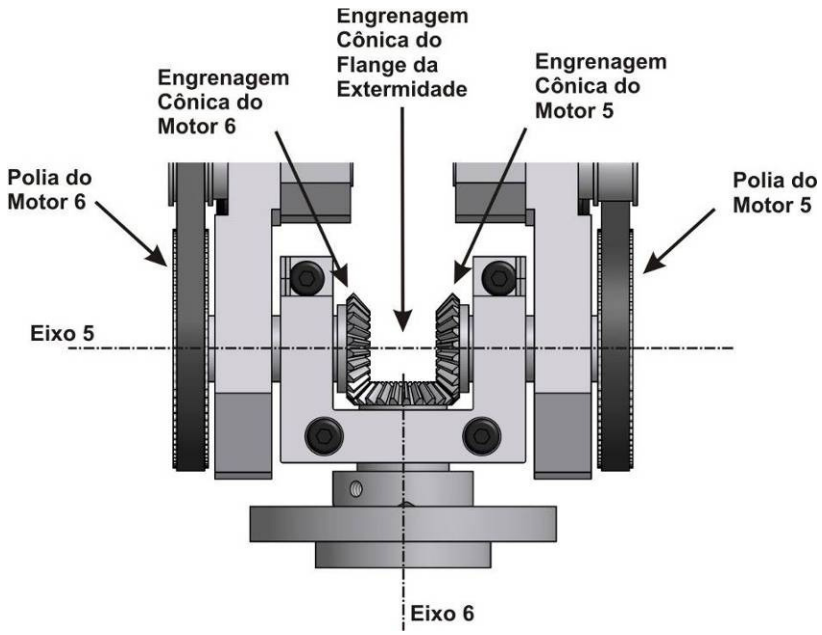

Figura 31 – Detalhe do punho

Quando a engrenagem cônica do motor 6 e a engrenagem cônica do motor 5 giram no mesmo sentido e velocidade, a extremidade do manipulador gira com o mesmo ângulo no eixo da junta 5. Quando as engrenagens são acionadas de forma análoga, mas em sentidos opostos, a extremidade gira ao longo do eixo 6.

Com base nesses dados, a Tabela 3, que relaciona a velocidade dos motores às juntas, é construída.

Tabela 3 – Deslocamento das juntas, onde θ_i é o deslocamento angular das juntas e δ_i dos motores

Elo	θ_i
1	$\delta_1 / 20$
2	$\delta_2 / 20$
3	$\delta_3 / 20$
4	$\delta_4 / 10$
5	$\delta_5 / 5 + \delta_6 / 5$
6	$\delta_5 / 5 - \delta_6 / 5$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

5.1.2.
Posição dos centros de gravidade

O projeto do manipulador é feito de modo a reduzir os efeitos da gravidade, e assim maximizar a força útil na extremidade. O peso das juntas 5 e 6 é baixo, logo os torques gravitacionais associados são naturalmente pequenos. A junta 4 gera pouco movimento na direção vertical. Na junta 3, o seu eixo é posicionado de modo a ficar próximo ao centro de gravidade dos elos 4, 5 e 6. A Figura 32 mostra a posição do centro de gravidade desses elos.

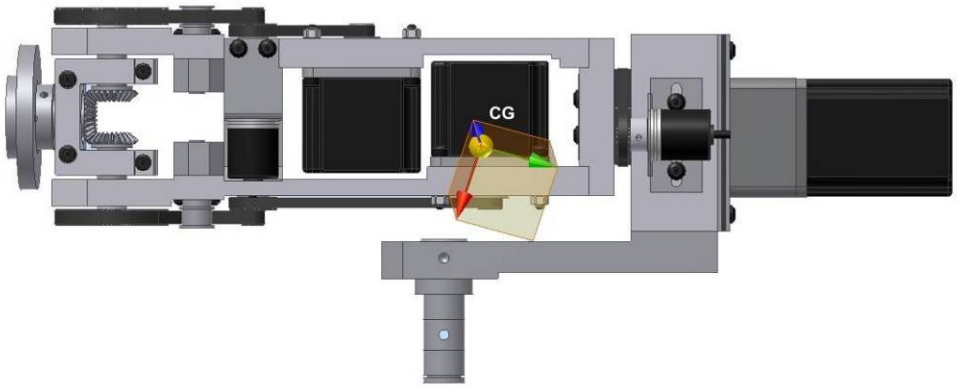

Figura 32 – Posição do centro de gravidade dos três últimos elos

Esta posição do centro de gravidade é devida aos motores 4, 5 e 6 terem sido posicionados o mais próximo possível da parte traseira do elo. Assim, apesar de a extremidade distar até *210mm* do eixo 3 quando na posição totalmente distendida, o centro de gravidade fica a apenas *18mm* do eixo 3. A posição deste centro de gravidade muda pouco em função do ângulo das juntas 4, 5 e 6.

O centro de gravidade dos elos 2, 3, 4, 5 e 6 é mostrado na Figura 33.

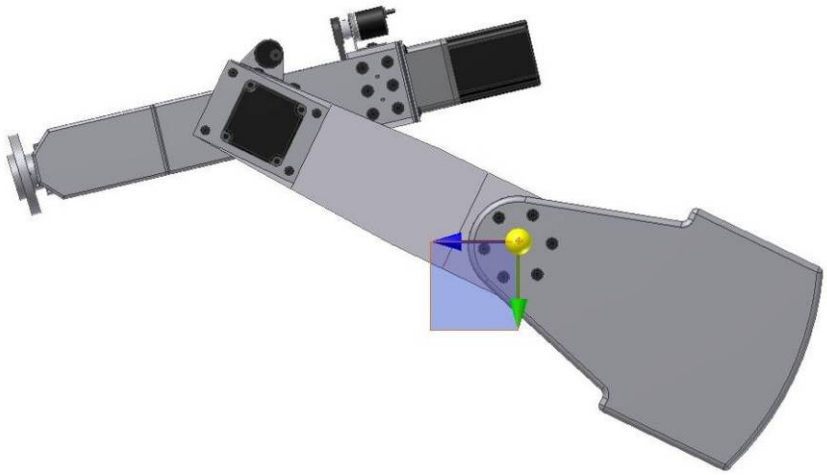

Figura 33 – Posição do centro de gravidade dos quatro últimos elos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

Este centro de gravidade fica próximo ao centro do eixo devido ao contra peso montado de forma oposta ao eixo da junta 2. Uma vez que o centro de gravidade dos três últimos elos varia pouco de posição em função da configuração do robô, a posição do centro de gravidade mostrado da Figura 33 também muda muito pouco. A junta 1 gera apenas movimento horizontal, então não sofre influência do torque gravitacional.

5.1.3. Montagem dos sensores de posição

O manipulador possui seis sensores de posição do tipo *encoder* incremental. Todos os *encoders* utilizados são do modelo B-106-23983 da Cytron Technologies. Eles possuem três saídas: duas saídas em quadratura com *500* pulsos por volta cada, e uma de indexação com *1* pulso por volta. A Figura 34 mostra como o *encoder* é montado na junta 1.

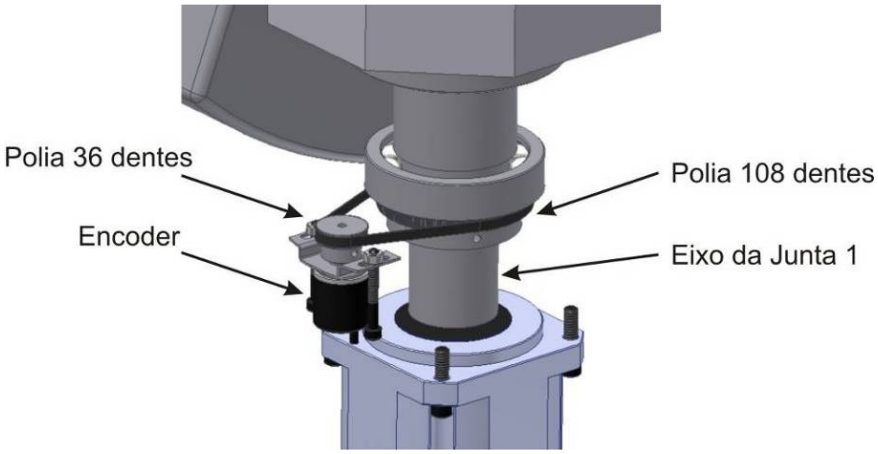

Figura 34 – Montagem do *encoder* na junta 1

Com o controlador configurado para computar o bordo de subida e descida de cada uma das fases, o *encoder* da junta 1 possui resolução de *2000* pulsos por volta. Devido à redução de velocidade proporcionada pelas polias que ligam o *encoder* ao eixo, a cada revolução da junta 1 o sensor identifica *6000* pontos.

A Figura 35 mostra como o *encoder* da junta 2 é montado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

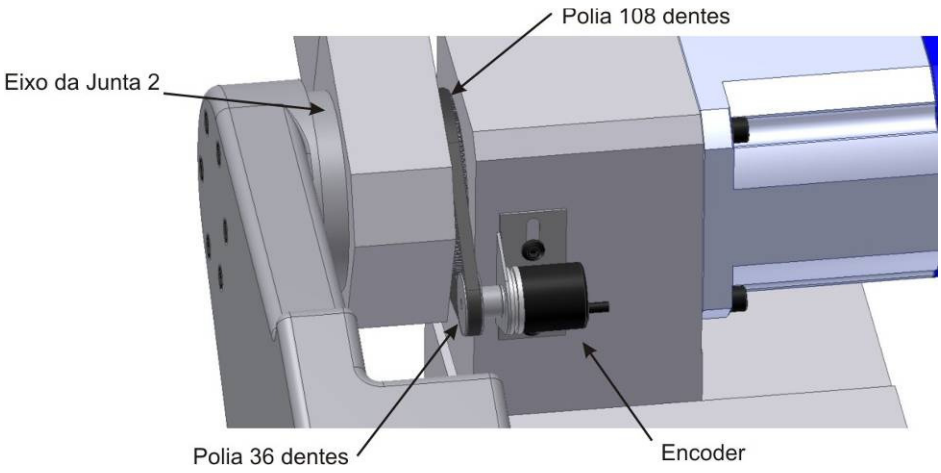

Figura 35 – Montagem do *encoder* na junta 2

Como o controlador desta junta também está configurado para computar o bordo de subida e descida de cada uma das fases, o *encoder* da junta 1 possui resolução de *2000* pulsos por volta. Devido à redução de velocidade proporcionada pelas polias que ligam o *encoder* ao eixo, o sensor da junta 2 também identifica *6000* pontos por volta.

A Figura 36 mostra a montagem dos *encoders* das juntas 3 e 4.

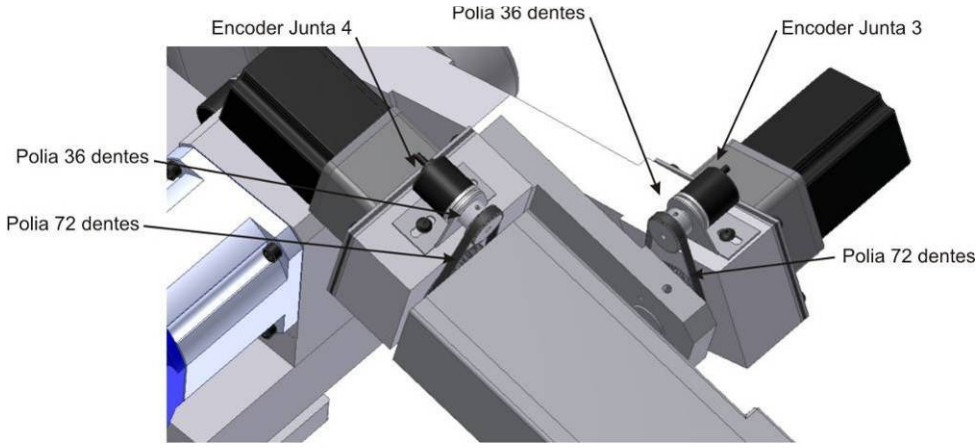

Figura 36 – Montagem dos *encoders* nas junta 3 e 4

Nas juntas 3 e 4, a cada volta das juntas o *encoder* realiza duas voltas. Como os controladores dessas juntas identificam *2000* pulsos por volta do encoder, cada junta possui resolução de *4000* pontos por volta, devido às polias.

Nas juntas 5 e 6, os *encoders* estão montados no eixo da polia intermediária, conforme pode ser visto na Figura 37. Como a cada volta do eixo das engrenagens o eixo do *encoder* realiza *5* voltas, e como o controlador identifica *1000* posições por volta do *encoder*, cada eixo lateral do punho possui resolução de *5000* pontos por volta.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

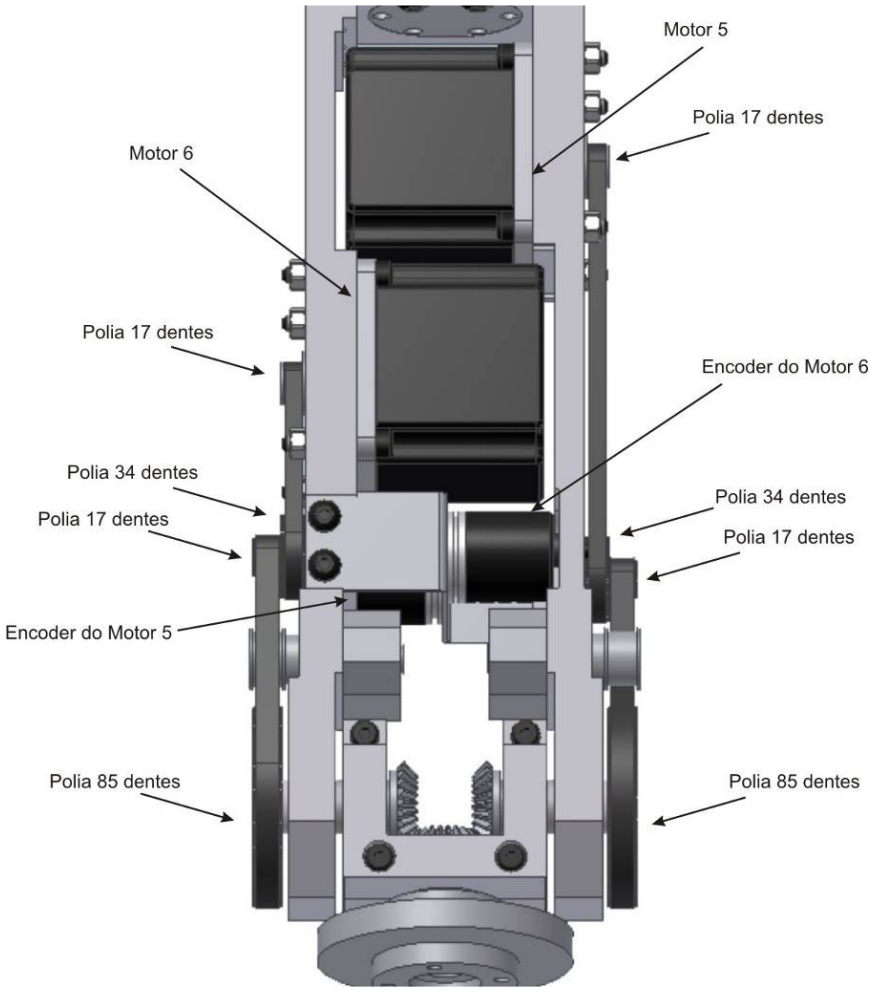

Figura 37 – Montagem dos *encoders* nas juntas 5 e 6

5.2. Projeto do controlador

O projeto dos controladores é feito com base no microcontrolador PIC18F2431. A série de microcontroladores PIC18 possui alta capacidade computacional com baixo custo [26]. Dentro desta série, a família PIC18Fxx31 possui dispositivos para o controle de alto desempenho de motores.

5.2.1. Interface do Encoder

O PIC18F2431 é escolhido por apresentar uma interface para tratamento automático dos sinais do *encoder*, chamada de *Quadrature Encoder Interface* (QEI). O uso desta interface requer uma configuração específica de alguns registradores do microcontrolador para sua inicialização. A Figura 38 apresenta o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

fragmento de *datasheet* dos microcontroladores PIC18Fxx31 onde o registrador da QEI é configurado.

REGISTER 16-2: QEICON: QUADRATURE ENCODER INTERFACE CONTROL REGISTER

R/W-0	R/W-0	R-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
$\overline{\text{VELM}}$	QERR(1)	UP/$\overline{\text{DOWN}}$	QEIM2(2,3)	QEIM1(2,3)	QEIM0(2,3)	PDEC1	PDEC0
bit 7							bit 0

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
-n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

bit 7 **$\overline{\text{VELM}}$:** Velocity Mode bit
1 = Velocity mode disabled
0 = Velocity mode enabled

bit 6 **QERR:** QEI Error bit(1)
1 = Position counter overflow or underflow(4)
0 = No overflow or underflow

bit 5 **UP/$\overline{\text{DOWN}}$:** Direction of Rotation Status bit
1 = Forward
0 =Reverse

bit 4-2 **QEIM2:QEIM0:** QEI Mode bits(2,3)
111 = Unused
110 = QEI enabled in 4x Update mode; position counter reset on period match (POSCNT = MAXCNT)
101 = QEI enabled in 4x Update mode; INDX resets the position counter
100 = Unused
010 = QEI enabled in 2x Update mode; position counter reset on period match (POSCNT = MAXCNT)
001 = QEI enabled in 2x Update mode; INDX resets the position counter
000 = QEI off

bit 1-0 **PDEC1:PDEC0:** Velocity Pulse Reduction Ratio bits
11 = 1:64
10 = 1:16
01 = 1:4
00 = 1:1

Figura 38 – Registrador QEI
(Fonte: Datasheet do PIC18F2431)

O *bit 7* determina se o *encoder* está configurado para medir posição ou velocidade. O *bit 6* configura como o contador deve se comportar quando o pulso de *index* do *encoder* é acionado e o contador está com erro. O *bit 5* determina o sentido da contagem. Os *bits 4-2* determinam o modo de operação da QEI. O valor da posição pode ser computado a cada bordo de subida ou descida da fase A, sendo a resolução duas vezes o número de pulsos da fase A. Ou pode ser computado a cada subida e descida dos pulsos de qualquer uma das fases. Assim, a resolução é de quatro vezes o número de pulsos das fases A ou B. Os *bits 0-1* estão relacionados à taxa de medida da velocidade.

A largura mínima do pulso também deve ser informada, em outro registrador, para ser utilizada como filtro. Após essa configuração inicial, a interface QEI atualiza automaticamente o valor da variável posição que está sendo usada no programa. Como neste projeto é necessário interpretar pulsos de entrada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

e gerar pulsos de saída, o tratamento automático dos pulsos do *encoder* aumenta o desempenho do sistema.

5.2.2. Visão Geral do *Software*

A implementação do algoritmo de controle no microcontrolador é feita com o compilador C CCS. Os controladores construídos possuem o mesmo circuito elétrico, mas cada motor necessita de uma programação específica do microcontrolador. A Figura 39 apresenta o circuito elétrico do controlador construído para acionar os motores de passo.

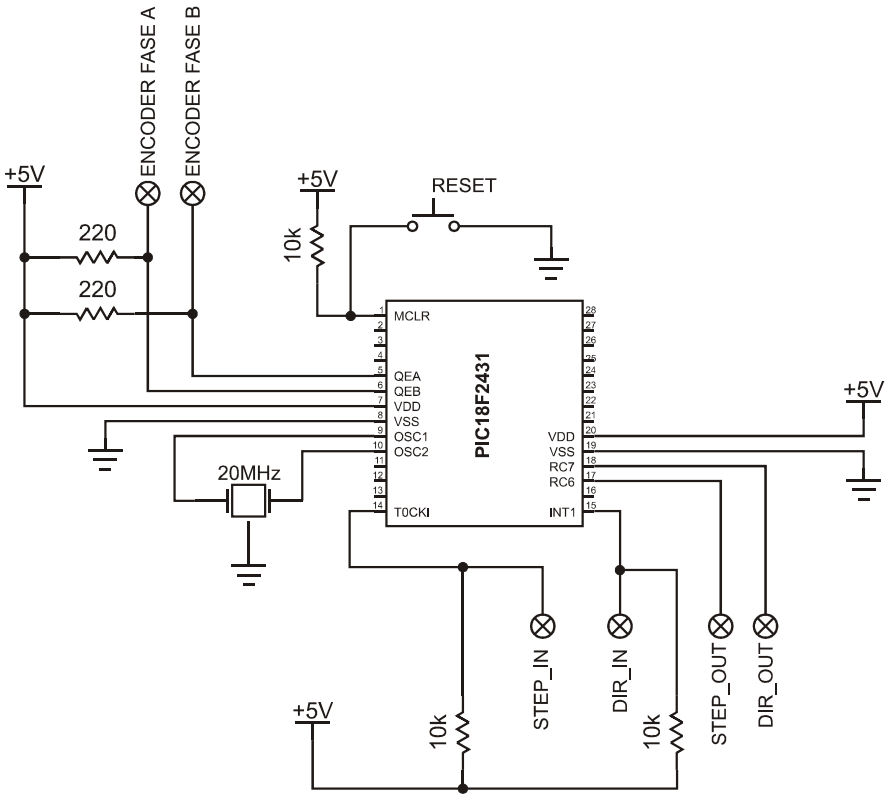

Figura 39 – Diagrama elétrico do controlador

Os pinos QEA e QEB do microcontrolador realizam as leituras das fases do *encoder*. A interface QEI é configurada conforme apresentado na seção anterior. O borne STEP_IN recebe pulsos de passos que o sistema deve realizar, e o borne DIR_IN determina a direção. O pino T0CKI é ligado a STEP_IN. Este pino é configurado como contador de pulsos. No código-fonte, o comando *get_timer0()* retorna os pulsos contados desde o último comando que zera o contador, *set_timer0()*. Durante o *loop* de controle, o sistema lê os pulsos contados. Se a entrada DIR_IN é positiva, esses pulsos contados são somados à posição desejada,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

pos_d. Caso contrário, eles são subtraídos. Entretanto, quando o pino DIR_IN muda seu estado, o sistema deve ser capaz de contabilizar os pulsos antes da mudança. Por isso, sempre que a tensão alterna entre nível baixo e alto no pino *INT1*, uma interrupção é gerada. Essa interrupção, chamada *#int_ext1*, determina se os pulsos, contados na entrada *T0CKI*, irão somar ou subtrair a posição desejada. Se a entrada DIR_IN mudar de nível baixo para alto, os pulsos que estavam no contador são contados negativamente. Caso contrário, positivamente. Os pulsos da entrada, STEP_IN, são relativos ao incremento de rotação do *encoder*, e não ao motor. Se o *encoder* possui resolução de *400pulsos/rev.* e o motor *200passos/rev.*, então um incremento unitário da posição demandada ao controlador faz o motor realizar dois passos. O botão RESET reinicia o controlador.

O borne STEP_OUT é a saída de pulsos gerados pelo controlador para o driver do motor, e DIR_OUT o sinal de direção. A frequência dos pulsos de saída está relacionada ao módulo *timer0*. O controlador calcula o valor a ser colocado no contador do *timer0* para que o motor gere a velocidade demandada. A rotina de controle está dentro do *timer0*, mas o período de controle é constante. O controlador calcula quantos ciclos do *timer0* o *loop* de controle deve ser executado para que o período seja de *0,01s*. O programa utilizado no microcontrolador está no Apêndice A.

5.3. EMC (Enhanced Machine Controller)

O EMC é um *software* de distribuição livre utilizado para controle em tempo real de tornos, fresadoras, manipuladores seriais e paralelos [27]. Neste trabalho é utilizada a segunda versão deste sistema, o EMC2. Este *software* é modular e flexível, se tornando assim integrável a vários tipos de equipamentos. O EMC começou a ser desenvolvido no NIST (*National Institute of Standards and Technology*, nos EUA) usando sistema operacional Windows NT. O objetivo do NIST era desenvolver um controlador de movimentos para servir como plataforma de teste para conceitos e padrões. Desde o início é solicitado que todo o sistema fosse de domínio publico e seu desenvolvimento publicado na Internet. A partir destas publicações, alguns desenvolvedores independentes se interessaram em adaptar o *software* para o sistema operacional Linux, de domínio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

público, e arquitetura PC. Este sistema pode ser adaptado em máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) em substituição a sistemas originais, muitas vezes antigos e defasados. Após perceberem a contribuição de vários desenvolvedores individuais, o portal LinuxCNC foi criado na internet. Este portal disponibiliza cópias do sistema gratuitamente.

O EMC2 provê várias opções gráficas para a interface homem-máquina. Esta interface aceita a inserção de rotinas usando o código G (segundo padrão RS-274) para programar os movimentos do equipamento. O EMC2 controla até nove atuadores, através de saída PWM com realimentação de posição, ou em malha aberta com saídas de pulso e direção para motores de passo. Alguns dos vários módulos cinemáticos disponíveis são para tornos de dois eixos, fresadoras de até 5 eixos, e manipuladores paralelos e seriais de até seis eixos. A partir da edição de uma série de arquivos de texto, as características da máquina são informadas ao EMC2. Como se trata de um *software* de fonte aberta (*open source*), novos módulos cinemáticos podem ser criados. A Figura 40 mostra um diagrama básico de como os módulos são configurados para que o sistema possa ser integrado ao manipulador utilizado nos testes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

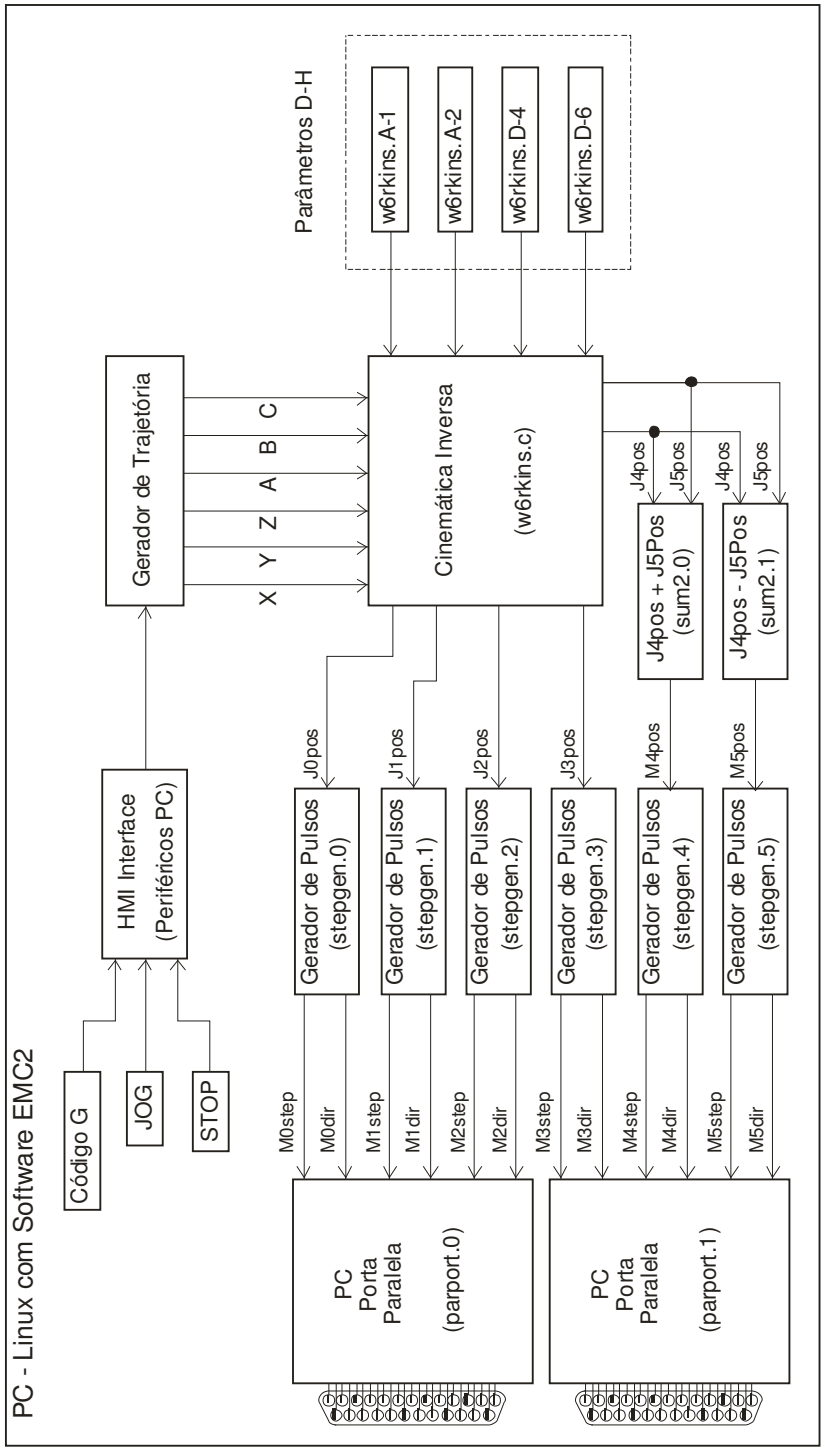

Figura 40 – Diagrama do *software* implementado

A interface HMI (*Human Machine Interface*) recebe as rotinas de movimento, comandos manuais (JOG) ou comando da parada de emergência (STOP). Esta interface encaminha esses dados para um módulo que gera a trajetória demandada em um espaço cartesiano. O módulo de cinemática inversa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

("*w6rkins*") calcula os ângulos a serem colocados em cada junta para alcançar a posição desejada. Este módulo utiliza o código fonte apresentado no Apêndice D. Os sinais de pulso e direção para o sistema são gerados nos módulos geradores de pulsos ("*stepgen*"). Os ângulos das juntas 1, 2, 3, e 4 são passados diretamente para o módulo gerador de pulsos. Entretanto, as juntas 5 e 6, devido à cinemática do mecanismo do punho, precisam passar por módulos auxiliares para que o ângulo do motor 5 seja a soma dos ângulos das juntas 5 e 6, e para que o ângulo do motor 6 seja a sua diferença. Os pulsos gerados são encaminhados às portas paralelas que estão ligadas aos controladores. A Figura 41 apresenta uma foto do PC com o sistema instalado e uma do manipulador.

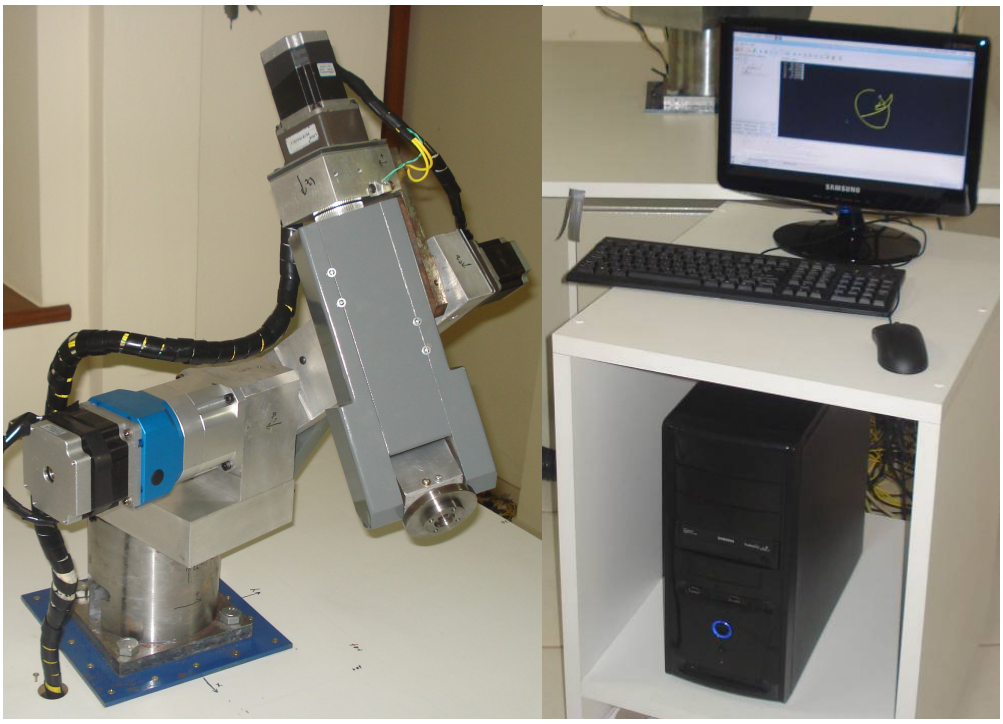

Figura 41 – Foto do computador e manipulador utilizado

A Figura 42 apresenta o diagrama de conexões da junta 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA

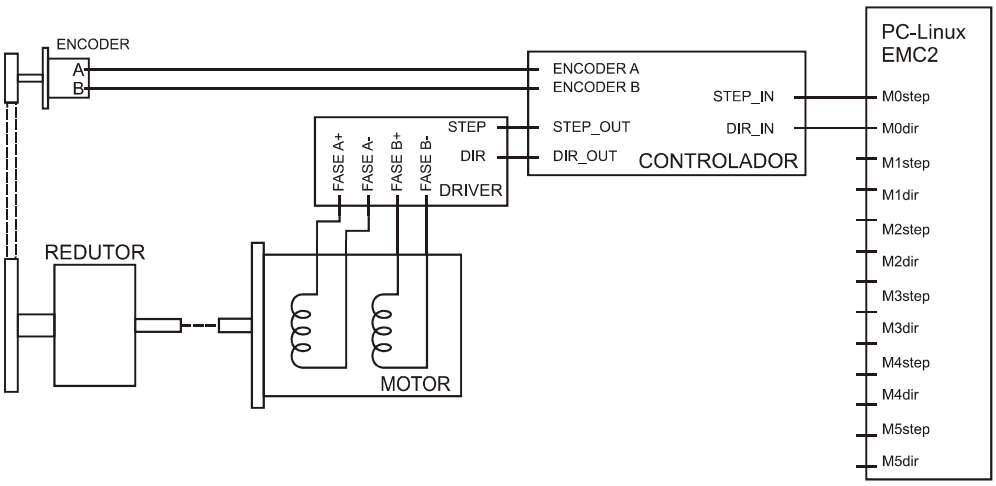

Figura 42 – Diagrama geral de conexões

Os pulsos gerados pelo EMC2 são enviados para o controlador de cada junta. O diagrama apresenta apenas dados referentes à junta 1, mas as demais juntas do manipulador possuem conexões semelhantes. O controlador recebe os pulsos, determina a posição demandada, e executa seu algoritmo de controle. O EMC2 envia os pulsos como se fosse para um sistema em malha aberta. Ou seja, o PC é utilizado para gerar a trajetória demandada em função da entrada feita na interface HMI. Caso o manipulador se desvie muito de sua posição demandada, o controlador deve enviar um sinal de parada de emergência ao EMC2. Entretanto, isto não é implementado no sistema construído.

No próximo capítulo, o manipulador desenvolvido é modelado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA