

Aluna: Camilla Bacellar Mello

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Dedicatória

Dedico esse trabalho a todos os amigos que conquistei nesses cinco anos graduação, que fizeram meus estudos mais agradáveis, os trabalhos mais interessantes e a minha vida mais feliz.

Agradecimentos

A realização deste projeto contou com a colaboração, consciente ou inconsciente, de um conjunto amplo de familiares, colegas e alunos aos quais agradeço sinceramente.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo constante.

Ao meu orientador Marco Meggiolaro por me passar os conhecimentos necessários para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Ao Professor do dept. de eng. Elétrica Mauro Shwanke pela sua imensa dedicação, paciência e colaboração com o trabalho.

Aos alunos da iniciação científica Bruno Favoreto e Felipe Sacchi que não pouparam esforços para execução do projeto.

A aluna de graduação e amiga Ilana Nigri, por sua prontidão em esclarecer minhas dúvidas.

A todos os colegas de laboratório pela ajuda técnica e psicológica nas mais diversas fases do projeto

Sumário

1	Introdução	9
1.1.	Teleoperação	9
1.2.	Telecirurgia	12
2	Objetivo	15
3	Controle e Realimentação	16
3.1.	Tipos de Controle	17
3.1.1.	Controle Servo-Bilateral	17
3.1.2.	Feedback por Sensor de Força	19
3.2.	Técnica de controle	20
3.2.1.	Controle PID	20
4	Desenvolvimento do sistema	22
4.1.	Construção mecânica	23
4.2.	Comunicação Motores - Computador	28
4.3.	<i>Software</i> de controle e realimentação	30
5	Resultados	34
6	Conclusão	40
7	Referências	41
8	ANEXO	42
8.1.	Canais da Placa ServoToGo	42
8.2.	RoboteQ AX2550 Dual Channel High Power Digital Motor Controller	43
8.3.	Especificações dos motores atuadores no sistema	44
8.3.1.	Mestre – Buehler 1.61.046.311	44
8.3.2.	Escravo – Magmotor S28 – BP – 400X	45
8.4.	Programação LabView	46
8.4.1.	Vi Principal	46

8.4.2. SubVi Erro

48

8.4.3. SubVi PID

49

Lista de figuras

Figura 1 – exemplos de teleoperação	10
Figura 2 – Sistema teleoperado	11
Figura 3 – Primeira telecirurgia mundial	12
Figura 4 – Esquemático de telecirurgia	13
Figura 5 – Sensor de tato 3D, fonte <i>Robert Howe and William Peine/Harvard University</i>	14
Figura 6 – Linhas de comunicação entre mestre e escravo	16
Figura 7 – Controle Servo-Bilateral	17
Figura 8 – Problemas de rigidez aparente no controle servo bilateral	18
Figura 9 - Cálculos da extremidade para um manipulador de 2 DOFs	19
Figura 10 - Manipulador de 2 DOF com o segundo elo acionado por correia	22
Figura 11 – Desenho mecânico Manipulador Mestre	24
Figura 12 – Foto Manipulador Mestre	24
Figura 13 – Desenho mecânico Manipulador Escravo	25
Figura 14 – Foto Manipulador Escravo – vistas frontal e traseira	26
Figura 15 - Manipuladores mestre-escravo	26
Figura 16 – Placa converso A/D D/A	28
Figura 17 - Amplificador RobotQ com 2 canais analógicos	29
Figura 18 - Interface do software de controle	31
Figura 19 - Detalhe do painel do software de controle – escolha do tipo de controle	31
Figura 20 - Vi específica da placa ServoToGo	32
Gráfico 1 – Respostas para $K_p=1, 2, 3, 4, 5$ e 6	34
Gráfico 2 – Resposta para $K_p=5$ em velocidades mais elevadas	35
Gráfico 3 – Respostas para $K_p=5$ e $K_D=0, 0.5$ e 1	36
Gráfico 4 – Respostas para $K_p=5$ e $K_D= 1$ e $K_I= 0.0005$ e 0.001	37

Resumo

A teleoperação está cada vez mais presente no mundo moderno. Locais de difícil acesso ou trabalhos não favoráveis ao ser humano vêm inspirando cientistas a desenvolver sistemas acionados remotamente cada vez mais funcionais. Sistemas mestre-escravo exigem um controle preciso dos movimentos do robô além de uma resposta precisa ao operador quanto às forças experimentais escravo. O desenvolvimento de dois manipuladores em escala e a implementação de um controle capaz de suprir estes requisitos estão presentes neste trabalho que tem como inspiração aplicações em sistemas teleoperados na medicina.

Palavras-Chave: Mestre-Escravo; Teleoperação; Telecirurgia; Controle Bilateral; *Feedback* por força

1 Introdução

Cada vez mais a robótica exerce um papel relevante para o homem na medida em que ela passa a colaborar com diversas tarefas auxiliares e, algumas vezes, essenciais. A robótica é uma área multidisciplinar que envolve principalmente disciplinas de Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica e Ciência da Computação. Se levarmos em consideração também aspectos de aplicação desta área, podemos ainda considerar que a mesma engloba Ciências Cognitivas, Ciências Biomédicas e Ciências Sociais. O papel dos engenheiros eletrônica e de controle e automação neste cenário são de extrema importância, já que estes são responsáveis por integrar os sistemas mecânicos, que, em geral, são os elementos básicos da robótica. Isso é feito por meio do desenvolvimento de dispositivos de acionamento eletromecânico, sistemas embutidos, controle, sensores, técnicas de processamento de sinais e fusão sensorial, interfaces de comunicação, entre outros.

Entre outras aplicações, a teleoperação é uma área de pesquisa muito avançada dentro desta ciência. Sistemas de manipuladores robóticos remotos, com os quais o usuário pode operar máquinas à distância, são cada vez mais comuns em indústrias, construções civis, usinas nucleares e, em particular, na área biomédica. Essa última *aplicação* pode parecer inusitada, mas se pensarmos em pesquisa a nível microscópico ou na utilização de robôs em salas de cirurgia, o auxílio dessa tecnologia pode contribuir para um grande avanço na medicina moderna.

1.1. Teleoperação

Podemos traduzir teleoperação como “realização de um trabalho a distância”. Distância, neste caso, tem uma definição bastante vaga, podendo significar uma distância

Introdução

física, onde o operador está separado do robô por algum obstáculo, mas também pode ainda se referir a uma mudança de escala. Um cientista precisa utilizar um micro-manipulador para manusear partículas microscópicas quando seu movimento manual não seria capaz de produzir deslocamentos tão pequenos, ou ainda, um operador que pretende elevar uma carga a 200m na construção civil, mas por uma limitação humana necessita da ajuda de telerobôs.

Ambientes de difícil acesso ou não favoráveis ao trabalho humano têm sido as principais inspirações para o desenvolvimento de robôs operados à distância. O comando remoto de estruturas robotizadas proporciona trabalhos nunca antes possíveis, facilitando o papel do homem na indústria e promovendo avanços nunca antes imaginados. Nos tempos modernos, esse artifício pode ser encontrado nos mais diversos ramos, para exemplificar temos: manuseio de materiais radioativos em usinas nucleares, tarefas em altas profundidades oceânicas, combate a incêndios, missões espaciais, procedimentos em ambientes esterilizados, entre outras. A figura 1 ilustra alguns desses casos.

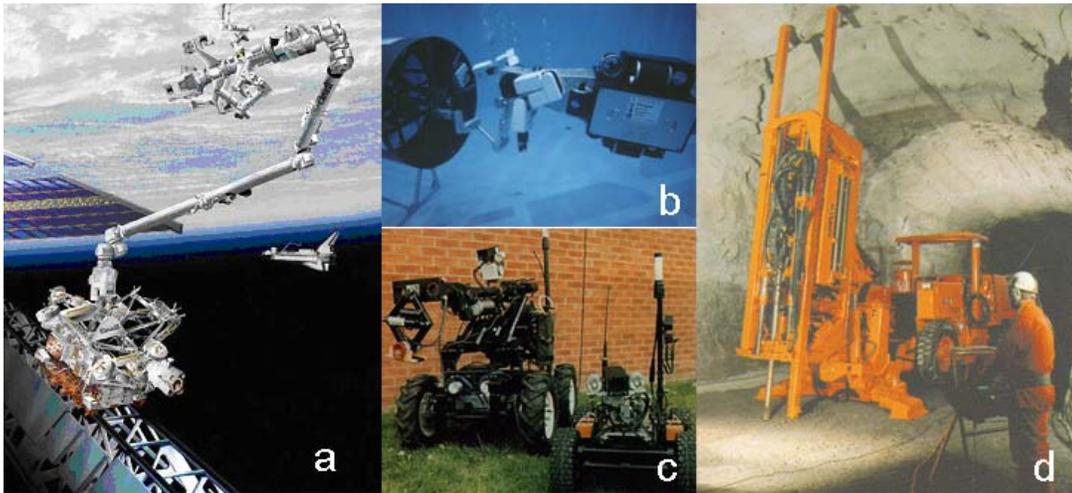


Figura 1 – exemplos de teleoperação (a) Aplicação Espacial (b) Aplicação em grandes profundidades (c) Aplicação militar (d) Aplicação para trabalhos pesados

Como podemos ver na figura 2, a seguir, um sistema teleoperado é formado por duas partes principais: a Estação Mestre, geralmente comandada manualmente e responsável pelo envio de sinais à Estação Escrava, encarregada de reproduzir os movimentos a ela incumbidos, realizando o trabalho no ambiente desejado. Na maioria

Introdução

dos casos, é importante que o operador obtenha uma resposta de seus movimentos sob o robô controlado. Observar o trabalho que está sendo realizado através de imagens ou modelos é uma solução amplamente utilizada.

O *feedback* por força também é uma solução possível para essa resposta. Nessa opção, o operador sente uma força contrária ao seu movimento segundo posicionamento do manipulador. Para esse tipo de retorno, podemos fazer uma analogia com tato sentido pelo robô. A resposta sentida pelo operador pode ser obtida a partir de controle ou utilizando-se de sensores apropriados para cada aplicação. Este assunto será discutido mais adiante.

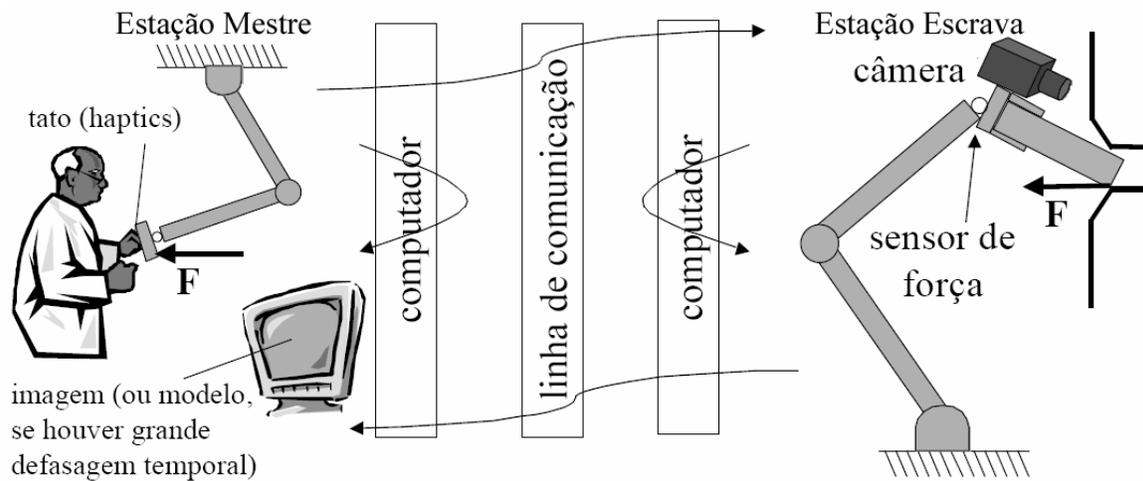


Figura 2 – Sistema teleoperado

Por fim, nos sistemas reais, onde o operador se encontra fisicamente longe do manipulador escravo, é necessário utilizar uma rede de comunicação. A rede deve ser capaz de enviar dados rapidamente e o mais importante: ser extremamente confiável, não oferecendo riscos de interromper a conexão durante a operação.

1.2. Telecirurgia

“Em sete de setembro de 2001, um médico em Nova York operou um paciente de 68 anos em Strasbourg, França. O médico usou um computador com uma rede de alta velocidade para movimentar ferramentas robóticas na sala de operação francesa.” [2] A figura 3 mostra as duas equipes envolvidas separadas por aproximadamente 14.000 km. Apesar da distância, o atraso entre os movimentos do cirurgião e a resposta exibida no vídeo era de apenas 200 milissegundos.



Figura 3 – Primeira telecirurgia mundial

Fica evidente que o caso citado é uma aplicação muito avançada e delicada da teleoperação. A telecirurgia é uma área muito promissora na robótica. Com os *links* de comunicação apropriados, seria possível realizar operações em áreas rurais remotas carentes de cuidados especiais ou, salvar pacientes ainda no caminho para o hospital [1].

Antes de alcançar essa proporção globalizada, a telecirurgia tem como seu principal objetivo proporcionar meios para melhorar a destreza e a sensação do cirurgião em procedimentos regulares ou cirurgias minimamente invasivas (CMI). Isso se faz possível através do uso de manipuladores em escalas milimétricas sob comando de um profissional. Essas ferramentas podem oferecer um controle mais acurado e mais fino em movimentos delicados para alcançar o ponto desejado.

CMI consiste em técnicas que minimizam os cortes provocados pelas cirurgias de grande porte. Destaca-se o uso destes métodos nas várias áreas como na cirurgia cardíaca através da angioplastia; para o tratamento do câncer de próstata através da braquiterapia; para o tratamento dos cálculos renais, através da litotripiastia, entre muitas outras aplicações. Trata-se de procedimentos múltiplos que causam lesões mínimas para

Introdução

os pacientes, danificando um menor número de tecidos saudáveis e com isso possibilitando uma rápida recuperação pós-operatória, menos dor ao paciente, menor risco de infecções e, como consequência, reduzindo os custos envolvidos no procedimento.

A CMI, criada na França e trazida ao Brasil na década de 80, é fundamentalmente uma forma de teleoperação, já que o cirurgião, manipulando ferramentas especiais dentro do corpo do paciente, encontra-se fisicamente separado do local de trabalho. Sendo assim, aplicações com telerobôs representam um avanço natural para expandir o potencial dessas intervenções. As ferramentas cirúrgicas podem ser substituídas por instrumentos robóticos sob controle direto do cirurgião através da teleoperação. Nesses casos tem-se uma estação de trabalho na qual o cirurgião controla o robô acompanhando visualmente o procedimento através de técnicas avançadas de vídeo, uma mesa de operação onde se encontra o paciente e um robô atuador que responde aos comandos do operador. Acompanhe o esquemático completo na Figura 4.

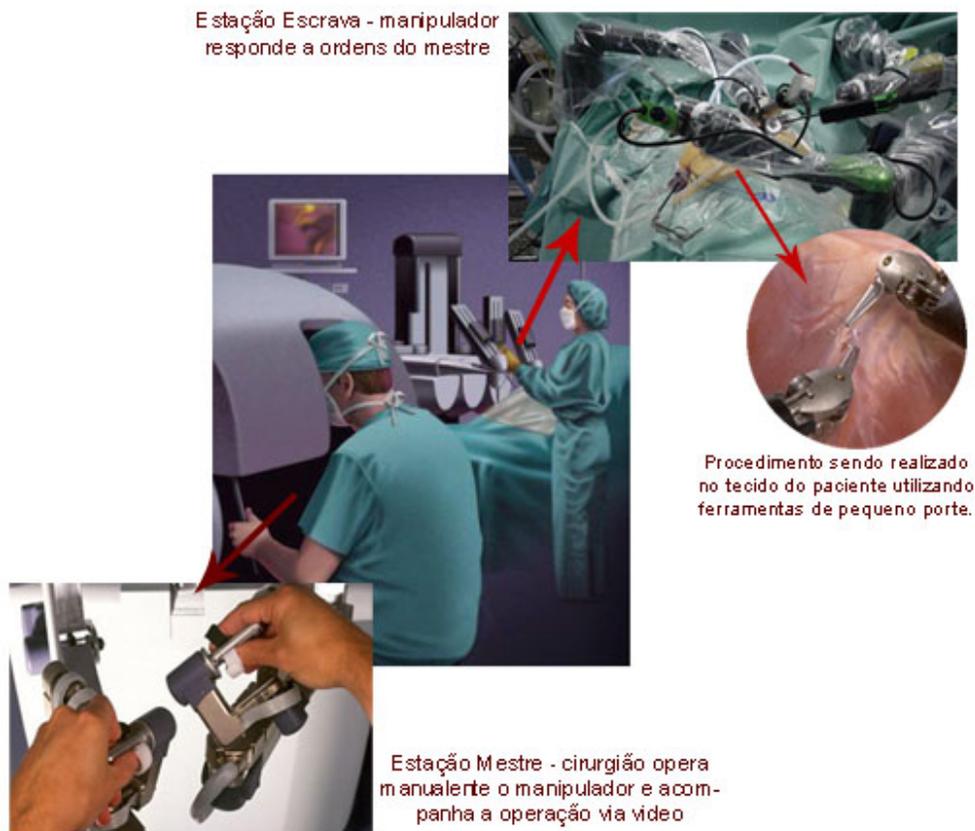


Figura 4 – Esquemático de telecirurgia

Para estas aplicações fica claro que a sensação experimentada pelo operador ao manipular a estação mestre deve reproduzir seguramente os tecidos do paciente.

Introdução

Estudos, cada vez mais avançados, tentam reproduzir esse “tato” através de sensores especialmente desenvolvidos para essa área de aplicação. No laboratório de BioRobótica de Harvard foram desenvolvidos sensores que enviam informações 3D para os dedos do cirurgião. O médico pode sentir mudanças nos tecidos do paciente e detectar pequenos tumores sem necessidade de uma grande incisão. Veja figura 5.

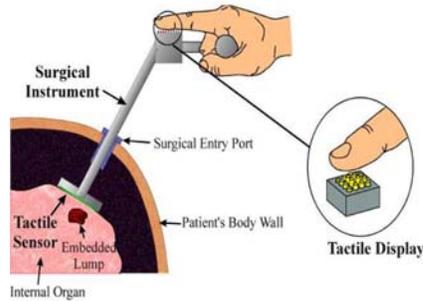


Figura 5 – Sensor de tato 3D, fonte *Robert Howe and William Peine/Harvard University*

Objetivo

2 Objetivo

Esse trabalho teve como inspiração o vasto universo da telecirurgia, no qual a utilização de robôs teleoperados tem trazido avanços extraordinários para medicina. Seu objetivo é o desenvolvimento de um sistema mestre-escravo de dois manipuladores com dois graus de liberdade (DOF) cada, como base para estudos de sistema teleoperados. O principal foco do projeto é o controle envolvido nesse tipo de sistema. Para tanto, serão discutidos os conceitos de teleoperação e a questão do *feedback* sensorial por força com seu controle e, por fim, apresentados os resultados dos testes práticos iniciais.

Neste trabalho, não temos a intenção de observar as influências da rede no sistema por isso, as estações estarão conectadas em uma única placa conversora. Focaremos as atenções no controle e na realimentação do sistema.

3 Controle e Realimentação

Como citado anteriormente, duas importantes tarefas envolvidas na telerobótica são as áreas de realimentação do sistema e seu controle.

Ainda no âmbito da telecirurgia, podemos considerar o controle de posição do manipulador escravo, segundo ordens do robô mestre, como a tarefa mais importante do sistema. Responder às ordens do operador suavemente e com exatidão são quesitos fundamentais para o sucesso da operação.

É válido ainda mencionar a questão de escala entre a Estação Mestre e a Escrava. Como colocado anteriormente, os deslocamentos efetuados pelo manipulador em sala de operação devem ser igualmente pequenos em procedimentos microscópicos, o que muitas vezes não é possível sem auxílio dessa tecnologia.

Adicionalmente, é essencial que o operador tenha um *feedback* com precisão quanto a seus movimentos para que, mesmo com contato apenas visual do paciente, possa restabelecer o tato. Em outras palavras, o sistema deve aumentar a destreza do usuário, reproduzindo características do tecido manipulado como sua geometria, sua rigidez, entre outros. Na figura abaixo podemos ver um esquemático dessa situação.

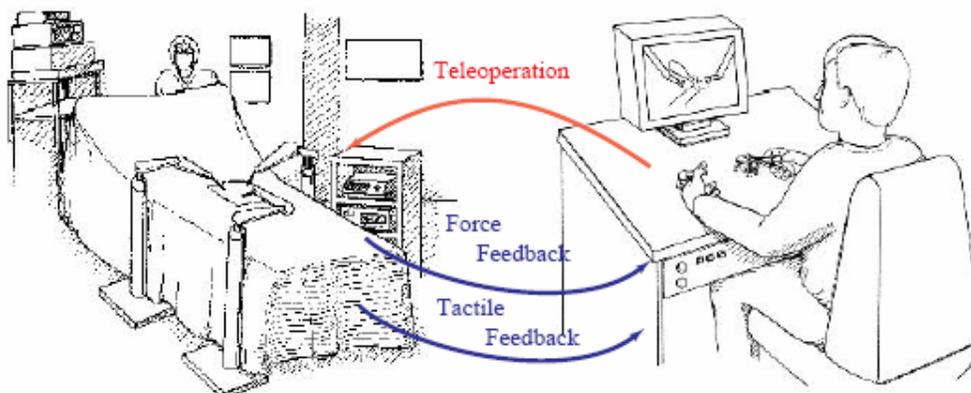


Figura 6 – Linhas de comunicação entre mestre e escravo

Para tanto vamos abordar dois tipos de controle neste trabalho. O primeiro conhecido como Controle Servo Bilateral, oferece uma resposta baseada na diferença de posições dos manipuladores mestre e escravo, exercendo no manipulador mestre uma força proporcional ao erro. O Controle com sensor de Força, por sua vez, utiliza leitores que expressam diretamente a força sentida pelo escravo.

3.1. Tipos de Controle

3.1.1. Controle Servo-Bilateral

Utiliza-se geralmente de manipuladores em escala, ou seja, mestre e escravo possuem a mesma geometria, podendo também ser aplicado a manipuladores distintos. Neste caso, a leitura de posição – feita por meio de encoders acoplados aos motores de cada junta - do manipulador mestre e do escravo é feita simultaneamente e a diferença entre estas é avaliada a cada leitura. O erro de cada junta é então aplicado a um controle para o mestre e outro para o escravo produzindo σ_m e σ_s , onde o primeiro corresponde ao torque de resposta para o mestre e o segundo o torque de atuação no escravo. A figura a seguir detalha esse funcionamento.

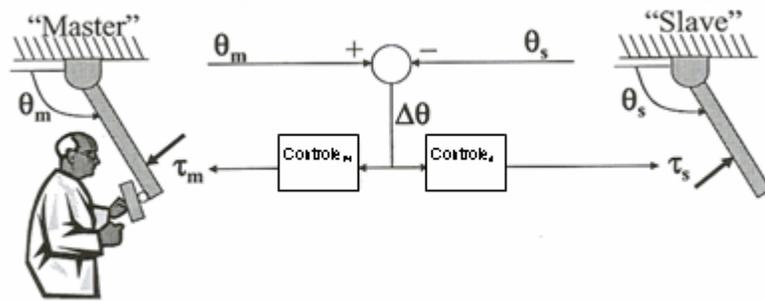


Figura 7 – Controle Servo-Bilateral

O controle bilateral oferece ao sistema uma boa estabilidade, porém apresenta problemas de rigidez aparente. Sendo K_f a constante multiplicadora no controle aplicado ao mestre, o sistema não é capaz de “sentir” objetos com rigidez maior do que K_f . Para exemplificar esta situação tem-se uma garra robótica com controle servo-bilateral simétrico. Considere K_e a constante de rigidez do objeto manipulado pelo escravo e σ_h o torque exercido pelo usuário. Temos então no equilíbrio:

$$\sigma_h = K_f \cdot (\theta_m - \theta_s)$$

$$\sigma_h = K_e \cdot \theta_s$$

A figura 8a demonstra o problema.

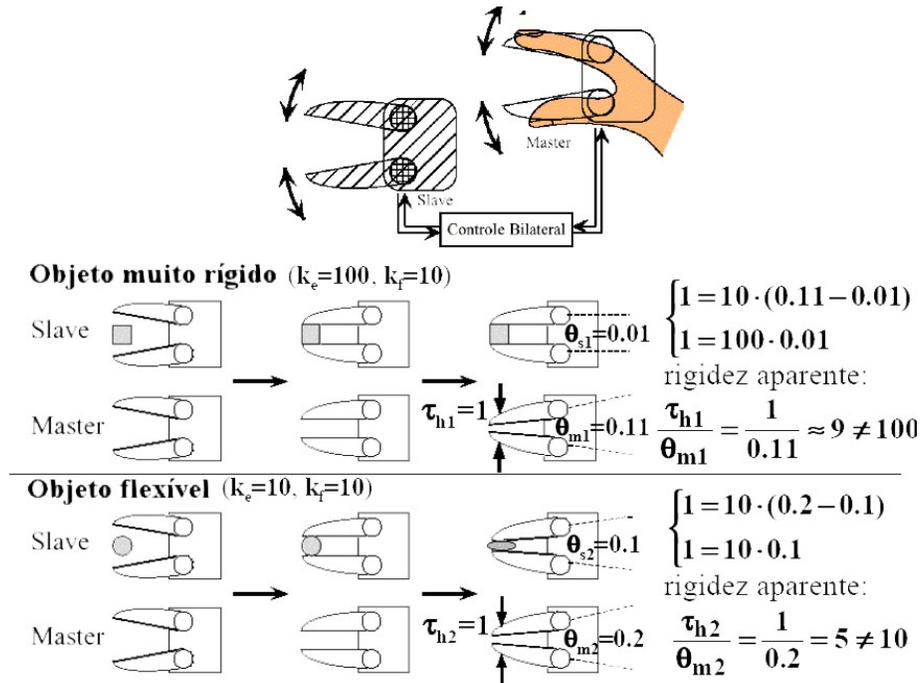
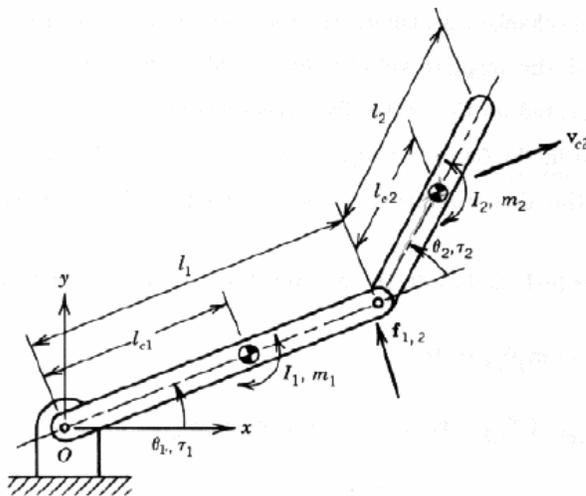


Figura 8 – Problemas de rigidez aparente no controle servo bilateral

Esse tipo de configuração permite amplificar ou reduzir a amplitude do movimento da parte extrema do manipulador a partir da razão entre os elos do mestre e do escravo. Como mencionado anteriormente os manipuladores são idênticos, salvo pelas devidas proporções. Ou seja, o escravo pode ter seus braços n vezes maior que os do mestre, realizando assim um deslocamento n vezes maior que o mestre.

3.1.2. Feedback por Sensor de Força

Assim como o controle servo-bilateral, o controle com sensor de força não exige que os manipuladores mestre e escravo apresentem geometrias iguais. Para resolver essa questão, lê-se a posição das juntas no manipulador mestre e calcula-se o deslocamento de sua extremidade pela cinemática direta. Munido desses dados calculam-se os deslocamentos de cada junta do escravo a fim de reproduzir o deslocamento desejado de sua terminação. Para exemplificar essa etapa, faremos a demonstração para manipuladores com 2 graus de liberdade:



Cinemática direta

$$\begin{aligned} \theta_1, \theta_2 &\rightarrow x, y, \Phi \\ x &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \Phi &= \theta_1 + \theta_2 \end{aligned}$$

Cinemática Inversa

$$\begin{aligned} x, y &\rightarrow \theta_1, \theta_2 \\ \left\{ \begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{y}{x} \\ x^2 + y^2 &= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ l_2^2 &= l_1^2 + x^2 + y^2 - 2l_1 \sqrt{x^2 + y^2} \cos \gamma \end{aligned} \right. \\ \theta_1 &= \alpha - \gamma = \tan^{-1}(y/x) \pm \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x^2 + y^2}} \right) \\ \theta_2 &= \pm \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \end{aligned}$$

Figura 9 - Cálculos da extremidade para um manipulador de 2 DOFs

O *feedback* ao mestre, ao contrário do controle servo-bilateral, é feito de maneira direta pela leitura de um sensor de força situado na extremidade do manipulador escravo. Como se pode perceber, não há comparação direta entre a leitura dos encoders e esse detalhe favorece as diferentes geometrias entre os robôs. Neste caso, problema de rigidez é solucionado, porém como este é um sistema não-colocado, ou seja, o atuador encontra-se em posição diferente do sensor, o sistema pode se tornar mais instável.

3.2. Técnica de controle

3.2.1. Controle PID

A técnica de controle escolhida para esse projeto foi a PID. Esta técnica consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este valor de atuação sobre o processo é transformado em um sinal adequado ao atuador utilizado, e deve garantir um controle estável e preciso. Em outras palavras, aplicando ao sistema estudado o PID deve calcular a voltagem enviada aos motores do manipulador escravo a partir da diferença de sua posição entre o respectivo elo do mestre.

De uma maneira bem simples, o PID é a composição de três ações quase intuitivas, conforme resume o quadro a seguir:

- P – correção proporcional do erro: A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
- I – Correção proporcional ao produto Erro x Tempo: Erros pequenos que existem há muito tempo requerem correção mais intensa.
- D – Correção proporcional à taxa de variação do erro: Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

Adotando a notação q para posição do elo e q' para sua velocidade. Temos então:

$$\tau = K_P(q_{des} - q) + K_D(q'_{des} - q') + K_I \int_{j=0}^i (q_{des} - q).dt \quad (1)$$

Onde K_P , K_I e K_D são os ganhos das parcelas P, I e D, e definem a intensidade de cada ação. No sistema mestre-escravo, o *setpoint* (q_{des}) passa a ser a posição do elo do manipulador mestre; da mesma maneira temos q sendo a disposição do respectivo elo no manipulador escravo. Assim, a equação (1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\tau(i) = K_p(q_m(i) - q_s(i)) + K_d(q'_m(i) - q'_s(i)) + K_i \int_{j=0}^i (q_m(j) - q_s(j)).dt \quad (2)$$

Vale lembrar que em sistemas digitais o ambiente de controle é discreto por isso a equação (2) pode ser aproximada por:

$$\tau(i) = K_p (q_m(i) - q_s(i)) + K_d \frac{((q_m(i) - q_s(i)) - (q_m(i-1) - q_s(i-1)))}{\Delta t} + K_i \sum_{j=0}^i ((q_m(j) - q_s(j)) \cdot \Delta t) \quad (3)$$

Para o sistema estudado cada elo terá seu controle independente. Correções referentes à inércia e atrito serão feitas a partir da calibração das constantes.

4 Desenvolvimento do sistema

O projeto dos manipuladores mestre-escravo deste trabalho tiveram como base um manipulador de dois DOF construído no laboratório de Controle e Automação da PUC - Rio em 2004/2005 pela aluna de graduação Ilana Nigri em seu projeto de iniciação científica. Cada manipulador possui dois elos, cada qual acionado por um motor de corrente contínua. Os motores encontram-se na base do manipulador, sendo o segundo elo acionado por um subsistema de polias e correia. Os robôs foram montados no plano horizontal e por isso qualquer influência da força gravitacional no sistema foi desconsiderada. Os manipuladores têm geometria similar ao mostrado abaixo na Figura 10.

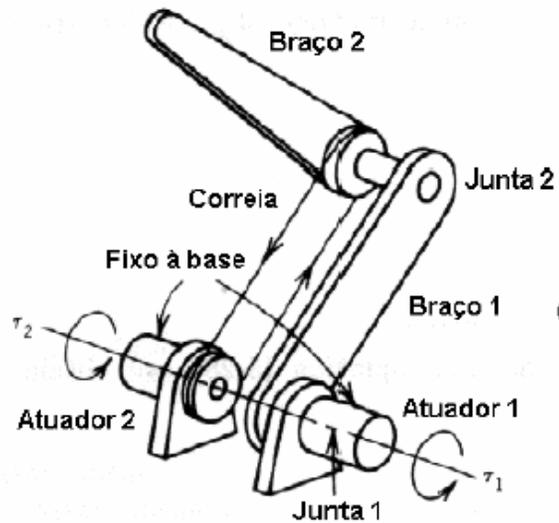


Figura 10 - Manipulador de 2 DOF com o segundo elo acionado por correia

4.1. Construção mecânica

O ponto de partida para especificação dos componentes a serem usados no projeto foram os motores de corrente DC escolhidos para o projeto. Tendo suas especificações e dimensões em mãos (ver anexo), estimamos o tamanho de cada elo: a partir dos diâmetros dos eixos de cada par de motores escolhemos as polias mais adequadas para o sistema e conseqüentemente as correias a serem utilizadas. Pelo tamanho das correias a distância entre as juntas presentes no elo 1 foi definida e por fim o comprimento do mesmo. O tamanho do elo 2 foi calculado a fim de manter as proporções entre o manipulador mestre e escravo; lembrando que para o **controle Servo-Bilateral** ser testado de forma mais simples os manipuladores devem estar em escala.

Para o controle de malha fechada do sistema, se fez necessário o uso de sensores para leitura da posição dos elos do mestre e do escravo. Como os motores atuadores escolhidos não possuem tal artifício, foi acoplado a cada atuador um segundo motor munido de um encoder de resolução igual a 2048 pulsos por volta. Esse motor apenas envia dados à placa de aquisição do sistema, sem interferir no movimento de cada elo.

Segue a lista de componentes, o desenho mecânico e a foto de cada manipulador.

Mestre:

- Elo 1: barra de alumínio de 200 mm x 1" x ½"
distância entre os centros das polias: 173 mm
- Elo 2: barra de alumínio 179 mm x 1" x ½"
distância entre o centro da polia e sua extremidade 163 mm
- 2 polias $D_{\text{primitivo}}$: 12,3mm e 20 dentes
- 1 correia Schneider 1520 MXL 80190
- 3 rolamentos D_i : 5 mm D_e : 14 mm
- Eixo (dia): 6 mm
- 1 eixo de 5 mm com rosca + porca de 5 mm
- 2 motores ativos da Buerhler – Ver anexo para mais informações
- 2 motores passivos usados como encoders com definição de 2048 pulsos/volta
- Espaçadores

Desenvolvimento do Sistema

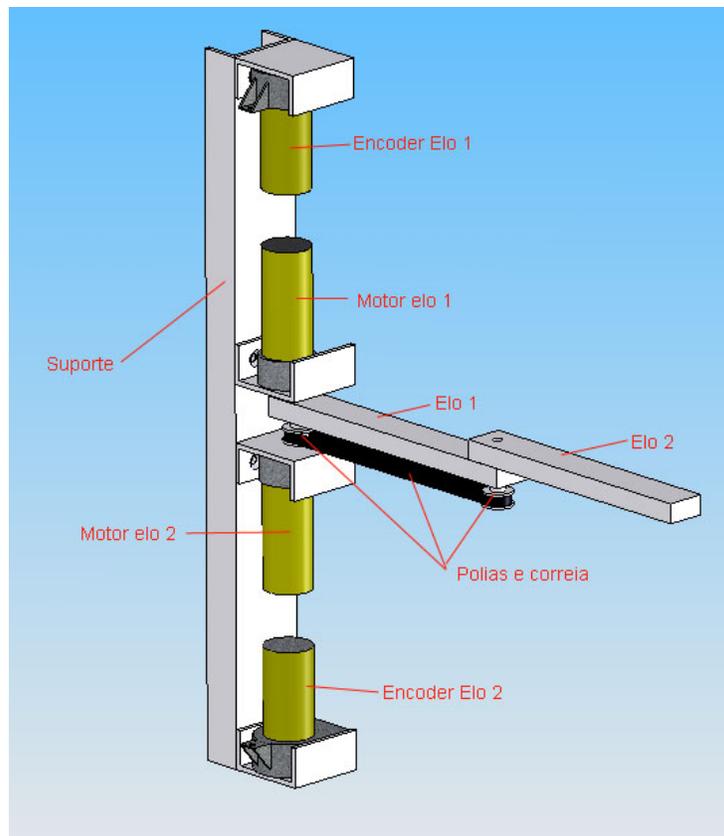


Figura 11 – Desenho mecânico Manipulador Mestre

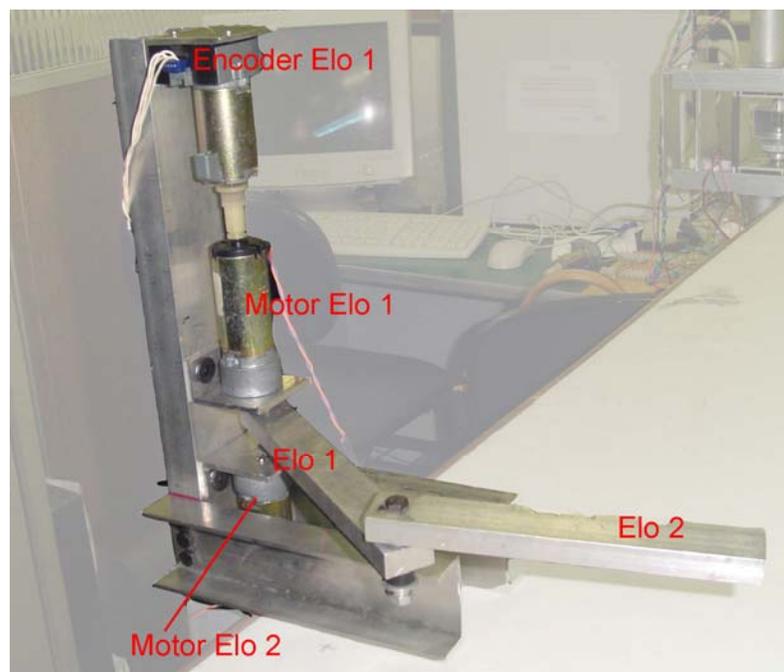


Figura 12 – Foto Manipulador Mestre

Escravo

- Elo 1: barra de alumínio de 350 mm x 2" x 1"
distância entre os centros das polias: 244 mm
- Elo2: barra de alumínio de 255 mm x 1 1/2" x 1"
distância entre o centro da polia e sua extremidade 234 mm
- 2 Polias: 28XL 037, $D_{\text{primitivo}}$: 44,6mm e 28 dentes com chaveta
- 1 correia Schneider 248 XL
- 3 rolamentos D_i : 7/8" D_e : 1 1/8"
- 1 eixo de 1/2" com chaveta
- 2 colares de 1/2"
- 2 motores ativos Magmotors – Ver Anexo para mais informações
- 2 motores passivos usados como encoders com definição de 2048 pulsos/volta
- 2 acoplamentos para os motores e encoders
- espaçadores de diversos tamanhos

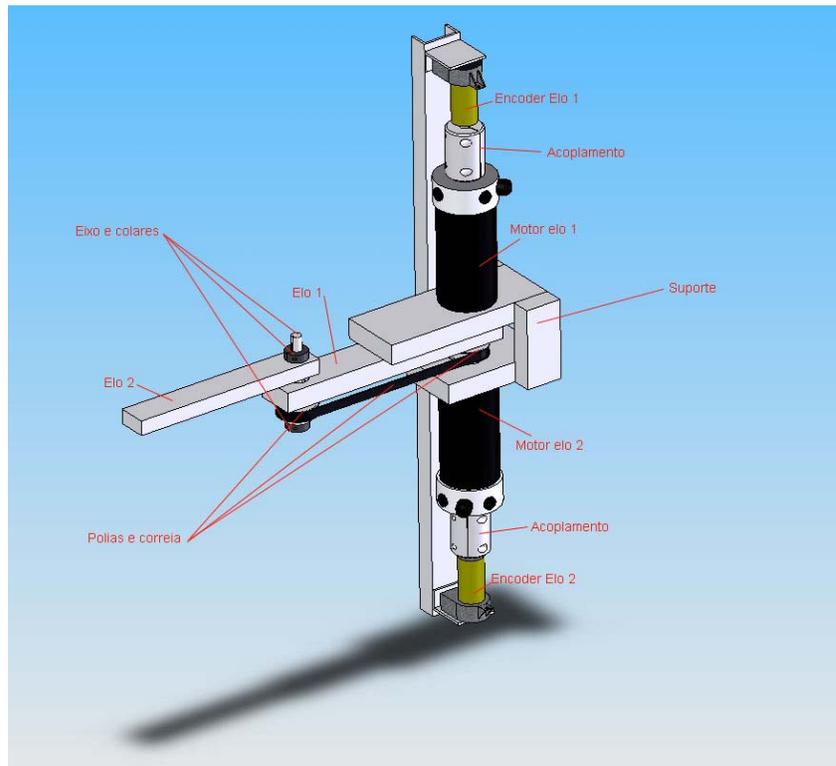


Figura 13 – Desenho mecânico Manipulador Escravo

Desenvolvimento do Sistema

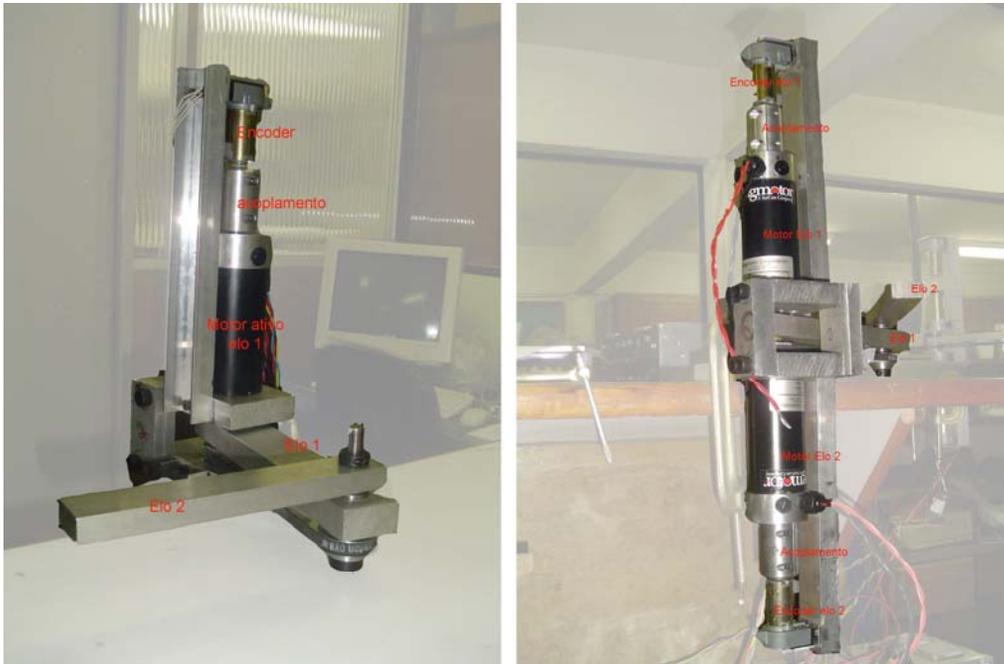


Figura 14 – Foto Manipulador Escravo – vistas frontal e traseira

O sistema completo pode ser visto nas fotos a seguir:



Figura 15 - Manipuladores mestre-escravo

A razão de escala entre os manipuladores é de 1 : 1,41. Esta razão foi calculada partir dos elos 1 de cada manipulador. Os tamanhos apresentados para o elo 2 não estão na mesma proporção pois idéia inicial do projeto inclui um terceiro motor na extremidade

Desenvolvimento do Sistema

de cada manipulador. O motor sugerido para essa aplicação somaria 15,05 mm ao comprimento final de cada elo 2 (Mestre=178 mm e Escravo=251 mm) mantendo a razão entre os elos dos robôs.

4.2. Comunicação Motores - Computador

Desprezando as implicações de rede geralmente presente em sistemas mestre-escravo, foi utilizado apenas um computador para comunicação dos motores dos manipuladores com o sistema digital. Instalada em um PC, a placa ServoToGo, mostrada na Figura 16, oferece oito canais para entradas de encoders, oito canais para entradas A/D, oito canais para saídas D/A, e 32 bits de entrada e saída digital. Esse projeto aproveitou quatro entradas para encoder para determinação da posição real dos elos de cada manipulador e quatro canais de saídas D/A, duas para posicionar elos do manipulador escravo de acordo com os movimentos do mestre e as outras duas para envio da voltagem aos motores do mestre como resposta ao movimento do escravo. Os canais utilizados podem ser encontrados no Anexo.



Figura 16 – Placa conversora A/D D/A

As saídas D/A da placa conversora foram amplificadas de 0 – 5 v para as entradas dos motores de -24 v a 24 v através do amplificador *RoboteQ AX2250* mostrado na Figura 17. Este aparelho converte sinais recebidos de rádio R/C, *Joysticks*, modem *wireless* ou microcomputadores em saídas de alta corrente e alta voltagem para controlar um ou dois motores DC.



Figura 17 - Amplificador RoboteQ com 2 canais analógicos

Para esta aplicação foi utilizado o modo analógico para dois motores independentes. Cada motor foi conectando a um canal analógico do RoboteQ pela sua porta RS232. Para cada manipulador foi usado um amplificador, já que esse só oferece duas saídas amplificadas.

Um ponto fundamental para o ideal funcionamento do amplificador é o “pré-envio” de 2,5V como voltagem de segurança ao ligar o aparelho, garantindo que suas saídas estejam zeradas. Para mais informações vide Anexo.

Para alimentação dos amplificadores foram utilizadas baterias de Ni-Cd de 24 v.

4.3. Software de controle e realimentação

Para o desenvolvimento do *software* de controle responsável pela interação usuário-manipulador foi utilizado o programa *LabView 8.0* ® da *National Instruments*. Sua interface gráfica oferece vantagens tanto para implementação do sistema, quanto para utilização do mesmo.

O primeiro passo para programação foi “igualar” os motores com diferentes reduções utilizados no manipulador mestre e no escravo. Foram feitas calibrações para converter os pulsos lidos pelo encoder em graus girados pelo elo. Para tanto foram feitas 15 leituras dos sensores girando cada elo noventa graus, fez-se a média e por fim calculou-se a proporção desejada.

O software para esse projeto seguiu alguns requisitos básicos para um funcionamento coerente. Em primeiro lugar o programa deve enviar 2,5V ao RoboteQ antes de iniciar um ensaio e ao terminá-lo. Junto a isso, o software deve obrigar o usuário a zerar os leitores de posição antes do início de um novo ensaio.

Para abranger os dois tipos de controle mencionados no trabalho, o programa deve oferecer ao usuário a opção de escolher entre o MODO 1 – controle bilateral e realimentação por força e o MODO2 – controle pela cinemática sem *feedback*. O desenvolvimento do MODO 2, que controla os elos a partir de cálculos referentes à extremidade do manipulador, ainda está em progresso.

A partir dessas especificações o seguinte painel de controle foi criado:

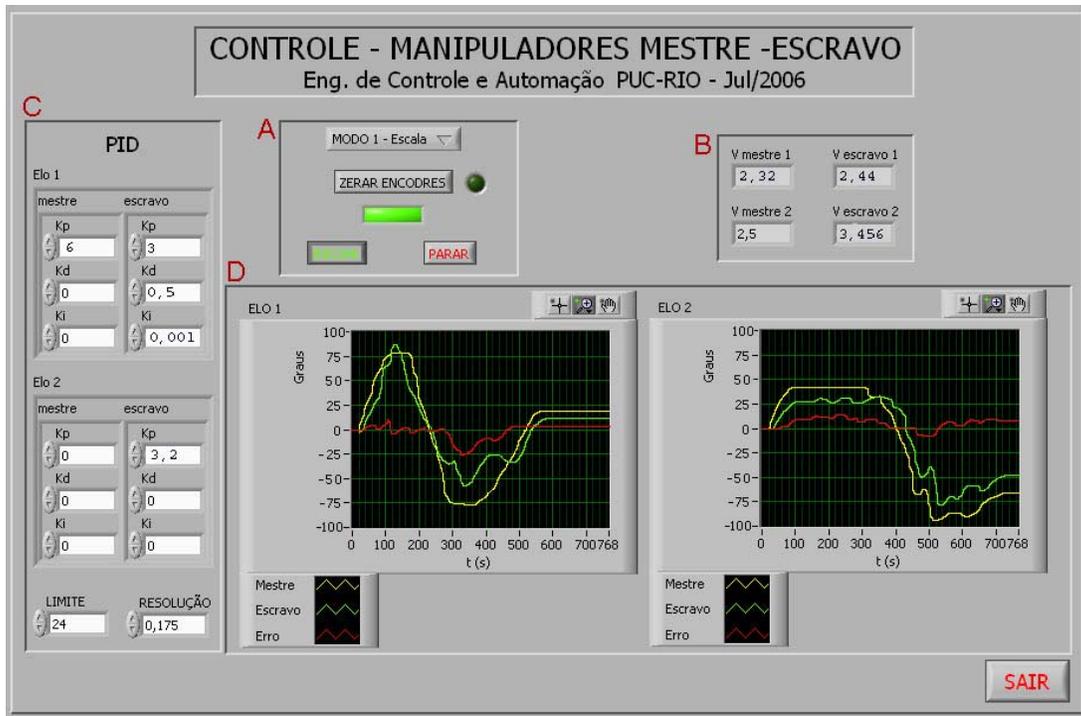


Figura 18 - Interface do software de controle

O painel de controle apresentado pode ser dividido em quatro partes principais. São elas:

A – Opções ao usuário: possibilita o usuário a escolher o tipo de controle, como mostrado no detalhe a seguir, zerar os encoders quando lhe for conveniente e iniciar/parar um ensaio.



Figura 19 - Detalhe do painel do software de controle – escolha do tipo de controle

B - Visualização das tensões: mostra em tempo real as voltagens calculadas pelo controle PID para cada motor do sistema e enviadas às entradas do RoboteQ. As voltagens variam de 0 v a 5 v.

C – Constantes PID: permite ao usuário a escolher o valor de cada o valor constante K_P , K_D e K_I independentes para cada motor do sistema conforme lhe parecer conveniente. Além disso, pode-se modificar a tensão limite dos motores e a resolução do encoder (variáveis necessárias para implementação do PID).

Para o Modo 2, o controle do PID do mestre é forçado igual à zero, já que não deve haver *feedback*.

D - Visualização gráfica: oferece uma representação gráfica da movimentação dos elos.

Para o Modo 1, os gráficos apresentam o deslocamento angular de cada elo e a diferença entre o respectivo elo do mestre e do escravo. Para o Modo 2 o gráfico mostra o deslocamento X-Y da extremidade do mestre e do escravo e a diferença entre eles.

Neste ponto do trabalho vale mencionar apenas alguns pontos básicos do código. Para aquisição e envio de dados pela ServoToGo fez-se o uso da subVI STG.vi própria para placa. Esta é uma VI polimórfica que desempenha diferentes funções dependendo do código de função escolhido (NComand). Vide figura.



Figura 20 - Vi específica da placa ServoToGo

De maneira simplificada, o programa desenvolvido recebe as posições de cada elo a partir da função *get all encoders* (114), faz os cálculos de erro necessários para o tipo de controle escolhido, controla essas variáveis através do PID e por fim, envia as respectivas voltagens aos motores elétricos através da função *set DAC all* (215) da

Desenvolvimento do Sistema

STG.vi. A programação completa por trás do painel de controle detalhado anteriormente pode ser vista no Anexo.

5 Resultados

Pensando na força dos motores Magmotors, atuadores no manipulador escravo, optou-se por reproduzir os primeiro testes do controle utilizando o manipulador mestre mencionado neste trabalho e o manipulador citado no trabalho de I. Nigri [4] como escravo.

A primeira etapa dos testes visa calibrar as constantes do controle PID do manipulador escravo sem feedback no MODO 1. O ganho proporcional foi calibrado até que o os elos do escravo reproduzissem com menor atraso e erro possível os movimentos do mestre. A figura mostra essa evolução para diferentes K_p s. Para não prolongar esta seção do trabalho serão expostos somente os resultados referentes aos elos 1 do sistema.

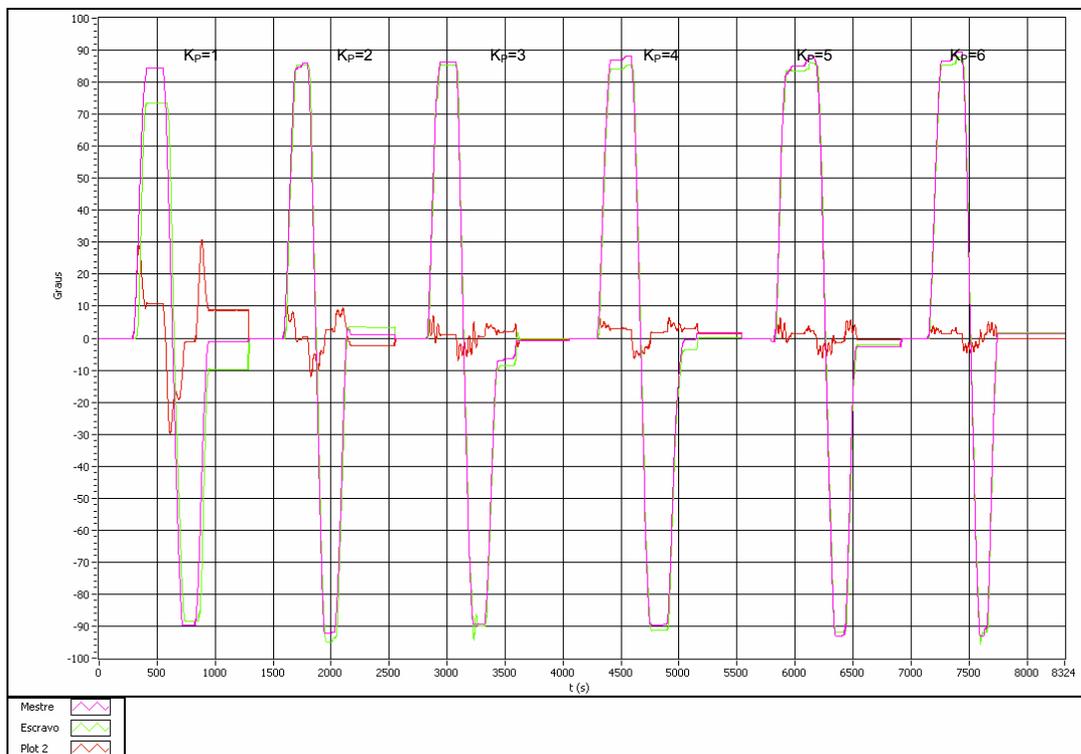


Gráfico 1 – Respostas para $K_p=1, 2, 3, 4, 5$ e 6

Resultados

O gráfico nos mostra que para $K_p=1$, principalmente, o escravo encontra-se atrasado em relação ao mestre e o erro final entre os elos é grande. Aumentando a constante a resposta do escravo se torna síncrona ao movimento do mestre. Pode-se perceber também que o erro residual diminui até certo limite e que para K_p s maiores o sistema tende a oscilar. Analisando os resultados de $K_p=5$ e $K_p=6$ percebemos que o erro residual não muda significativamente, porém para $K_p=6$ o sistema apresentou *overshoots* maiores. Com base nessas análises, o K_p para o controle do manipulador escravo foi calibrado em 5.

Em seguida foram feitos testes em velocidades angulares mais altas para examinar o comportamento do sistema. O resultado pode ser observado no gráfico abaixo.

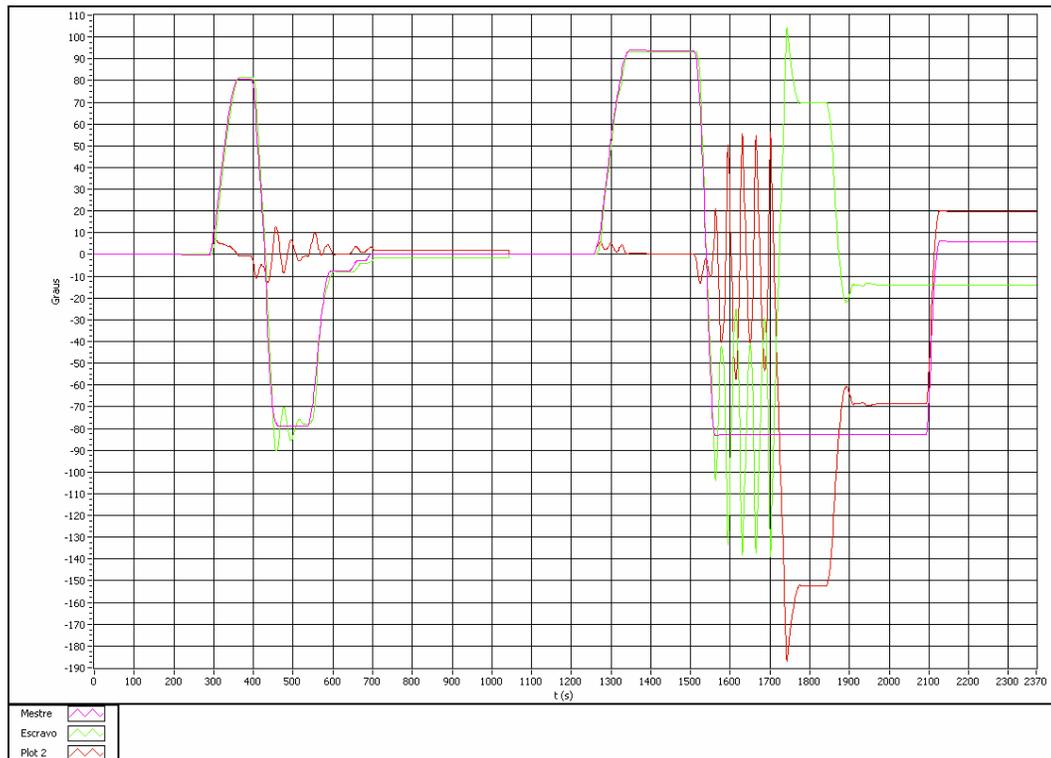


Gráfico 2 – Resposta para $K_p=5$ em velocidades mais elevadas

Como pode ser observado o sistema uma resposta altamente instável para velocidades de rotação maiores. O ganho derivativo, responsável pelo controle das oscilações de um elo foi então estudado mais a fundo, conforme o gráfico a seguir.

Resultados

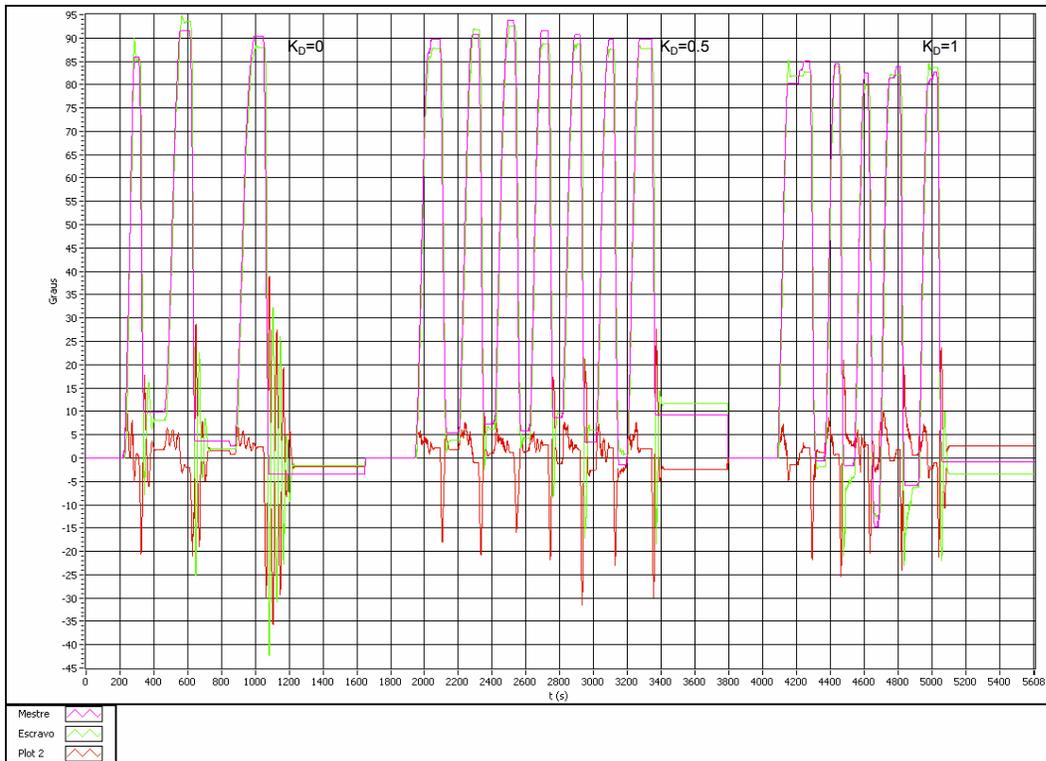


Gráfico 3 – Respostas para $K_p=5$ e $K_D=0, 0.5$ e 1

As curvas presentes no gráfico 3 ilustram bem a questão do ganho derivativo: para $K_D=0$ o sistema oscila bastante antes de atingir o *set point*, ao aumentarmos a constante o elo apresenta movimentos mais precisos, apesar de ainda existirem algumas oscilação. O sistema apresentou melhores respostas para $K_D=1$.

Nesta etapa dos testes percebeu-se que ao chegar à posição desejada, o elo ainda apresentava um movimento vibratório (oscilações de pequena amplitude). Esse comportamento foi associado à folga da engrenagem presente no motor. Para resolver esse problema foi inserida a resolução do encoder nos cálculos referentes ao erro, ou seja, se o erro entre os elos for menor que a resolução, essa parcela é desconsiderada no controle.

Tendo calibrado K_p e K_D resta diminuir o erro residual ao mínimo possível. Para isso a constante K_i deve ser avaliada. Essa etapa requer muita atenção já que pequenas variações na constante podem causar instabilidades do sistema.

Resultados

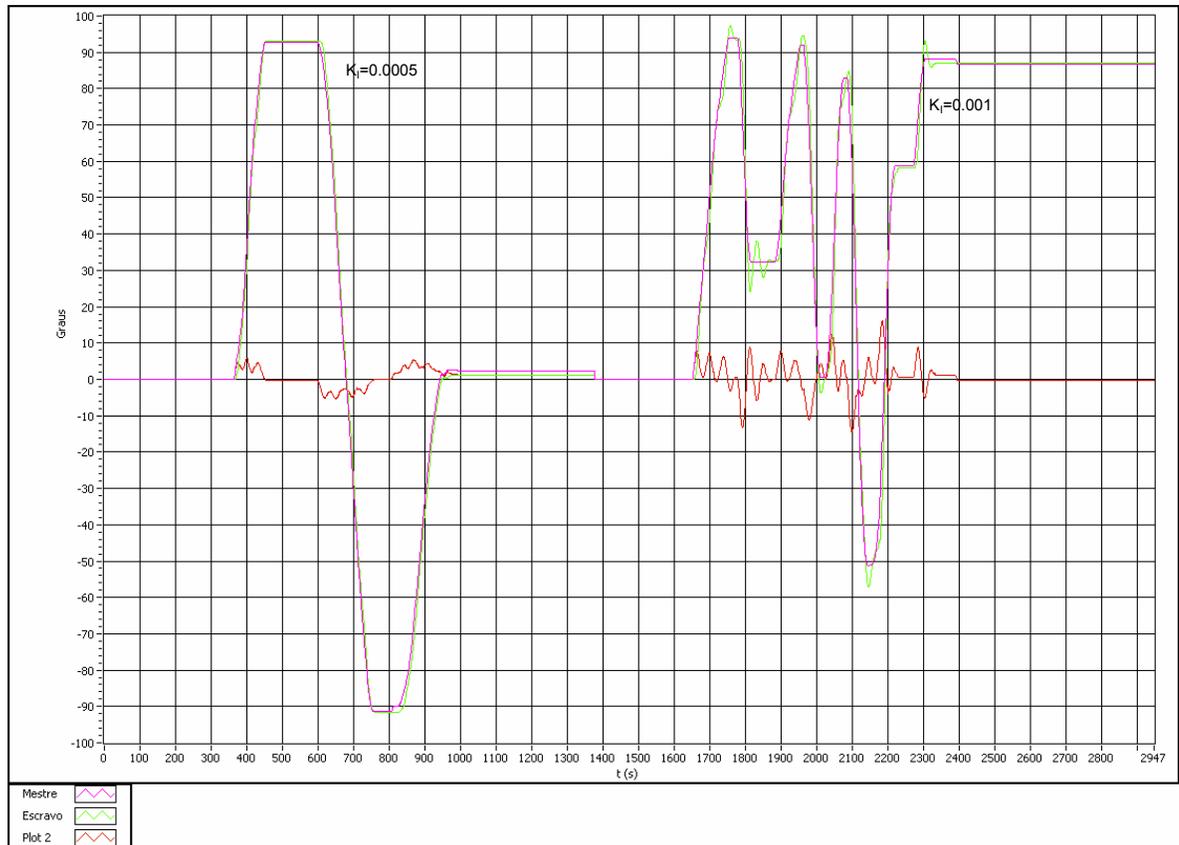


Gráfico 4 – Respostas para $K_P=5$ e $K_D=1$ e $K_I=0.0005$ e 0.001

Como pode ser observado no gráfico 4 e considerando resolução forçada de 0,5 graus, o erro entre os elos 1 do manipulador mestre e escravo é pequeno para $K_I=0.0005$. Aumentando K_I para 0.001 o sistema apresenta maiores oscilações.

De acordo com esses resultados temos para o controle PID do escravo as seguintes constantes:

- $K_P=5$
- $K_D=1$
- $K_I=0.0005$

Controlado o manipulador escravo, calibrou-se a constantes K_P do mestre a fim de sentir as forças realizadas pelo escravo. Nesta primeira etapa as constantes derivativa e integrativa foram assumidas iguais à zero para evitar danos ao motor. Os resultados foram satisfatórios dado que ao impedir a movimentação do manipulador escravo torna-se mais difícil mover o mestre. Além disso, a movimentação dos elos do mestre em

Resultados

velocidades mais altas ficou mais restrita já que este tende a acompanhar o movimento do escravo. Para o controle PID do mestre temo $K_P=8$.

Os resultados obtidos até este ponto do projeto foram satisfatórios, podendo ser aperfeiçoados quantos ao erro residual entre os elos. Vale lembrar que o manipulador testado até o momento não foi arquitetado para esta finalidade, por isso problemas relacionados à folga e atrito foram aceitos sem muita discussão.

Os resultados esperados para o manipulador escravo original do projeto ainda não foram concluídos, assim como o desenvolvimento e os teste para o controle no MODO 2 ainda estão em andamento. Por fim, a instalação de um terceiro motor na extremidade de cada manipulador, seja para adicionar um terceiro grau de liberdade na vertical, seja para funcionar como garra, também está sendo pensada.

Resultados

6 Conclusão

Com base nos dados acima apresentados confirmamos o potencial da teleoperação no mundo moderno. Foi possível demonstrar que, com sistemas mestre-escravo, trabalhos que antes pareciam tarefas árduas e muitas vezes sem solução hoje podem ser realizados facilmente. Para isso os manipuladores devem ser controlados precisamente e apresentar um *feedback* bem calibrado de acordo com a intenção de uso.

7 Referências

[1] M. C. Çavuşoğlu, W. Winthrop, F. Tendick, e S. S. Sastry, em *Robotics for Telesurgery: Second Generation Berkeley/UCSF Laparoscopic Telesurgical Workstation and Looking towards the Future Applications*, Berkeley, EUA, Outubro de 2001.

[2] <http://www.mos.org/> - Museum of Science Boston homepage, Julho de 2006

[3] J.P. Friconneau, M. Karouia, F. Gosselin, Ph. Gravez, N. Bonnet e P.Lepince em *Force Feedback Master Arms, From Telerobotics To Robotics Surgery Training*, Paris, França, 2002.

[4] I. Nigri e M.A. Meggiolaro, em *Projeto e Controle de um Manipulador Robótico de Dois Graus de Liberdade*, PUC-Rio, Brasil, 2005

8 ANEXO

8.1. Canais da Placa ServoToGo

Connector P3, Motion I/O Axis 0-3			
Pin	Name	Pin	Name
1	Analog Gnd	2	DAC 0
3	Analog Gnd	4	Analog Gnd
5	DAC 2	6	Analog Gnd
7	Analog Gnd	8	DAC 1
9	Analog Gnd	10	Analog Gnd
11	DAC 3	12	Analog Gnd
13	Gnd	14	A 0 +
15	A 0 -	16	Gnd
17	B 0 +	18	B 0 -
19	Gnd	20	I 0 +
21	I 0 -	22	Gnd
23	A 1 +	24	A 1 -
25	Gnd	26	B 1 +
27	B 1 -	28	Gnd
29	I 1 +	30	I 1 -
31	Gnd	32	A 2 +
33	A 2 -	34	Gnd
35	B 2 +	36	B 2 -
37	Gnd	38	I 2 +
39	I 2 -	40	Gnd
41	A 3 +	42	A 3 -
43	Gnd	44	B 3 +
45	B 3 -	46	Gnd
47	I 3 +	48	I 3 -
49	+ 5	50	+ 5

Connector P4, Motion I/O Axis 4-7			
Pin	Name	Pin	Name
1	Analog Gnd	2	DAC 4
3	Analog Gnd	4	Analog Gnd
5	DAC 6	6	Analog Gnd
7	Analog Gnd	8	DAC 5
9	Analog Gnd	10	Analog Gnd
11	DAC 7	12	Analog Gnd
13	Gnd	14	A 4 +
15	A 4 -	16	Gnd
17	B 4 +	18	B 4 -
19	Gnd	20	I 4 +
21	I 4 -	22	Gnd
23	A 5 +	24	A 5 -
25	Gnd	26	B 5 +
27	B 5 -	28	Gnd
29	I 5 +	30	I 5 -
31	Gnd	32	A 6 +
33	A 6 -	34	Gnd
35	B 6 +	36	B 6 -
37	Gnd	38	I 6 +
39	I 6 -	40	Gnd
41	A 7 +	42	A 7 -
43	Gnd	44	B 7 +
45	B 7 -	46	Gnd
47	I 7 +	48	I 7 -
49	+ 5	50	+ 5

 Elo 1 Mestre

 Elo 1 Escravo

 Elo 2 Mestre

 Elo 2 Escravo

DAC x - canal conversor Digital/Analógico

Analog Gnd - 0V analógico

A x+, Bx+ - Canais para leitura diferencial do encoder

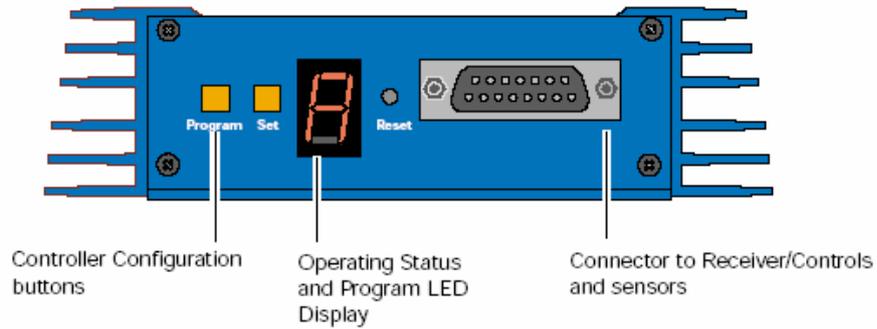
+5 - Alimentação

Gnd - 0V digital

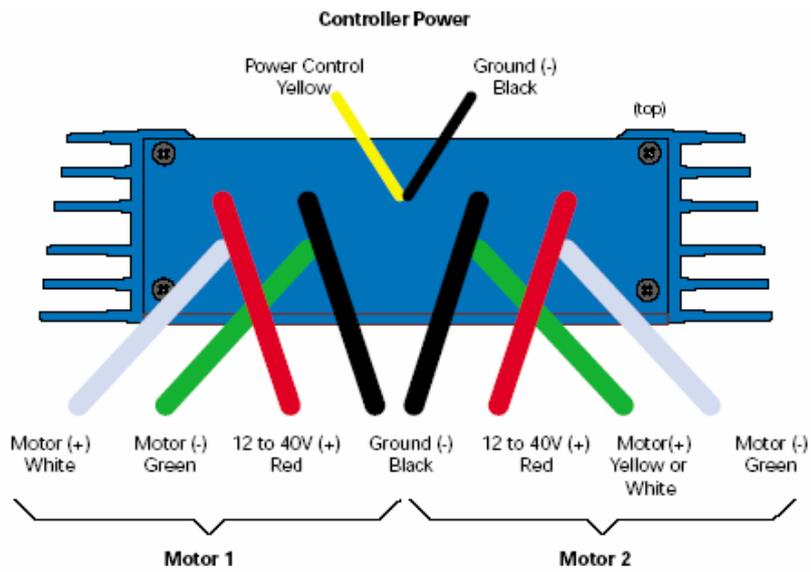
*Para que o computador possa fazer a comunicação correta com a placa ServoToGo é necessário executar o seguinte comando: net start stgdrv.

8.2. RoboteQ AX2550 Dual Channel High Power Digital Motor Controller

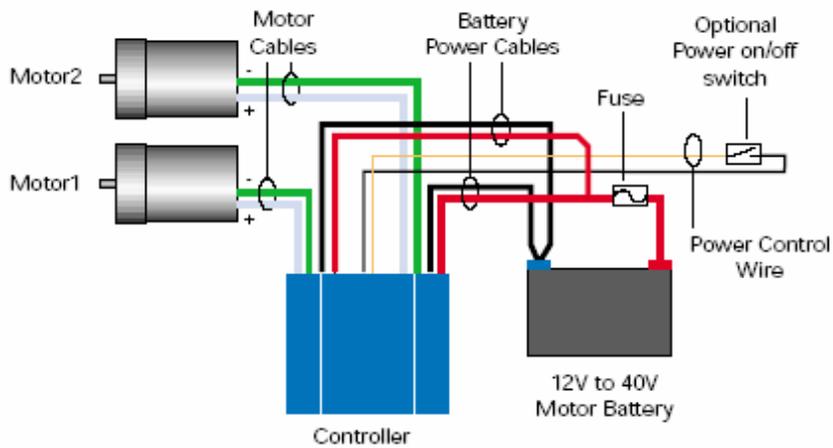
Vista frontal: botões e display



Vista traseira: Cabeamento

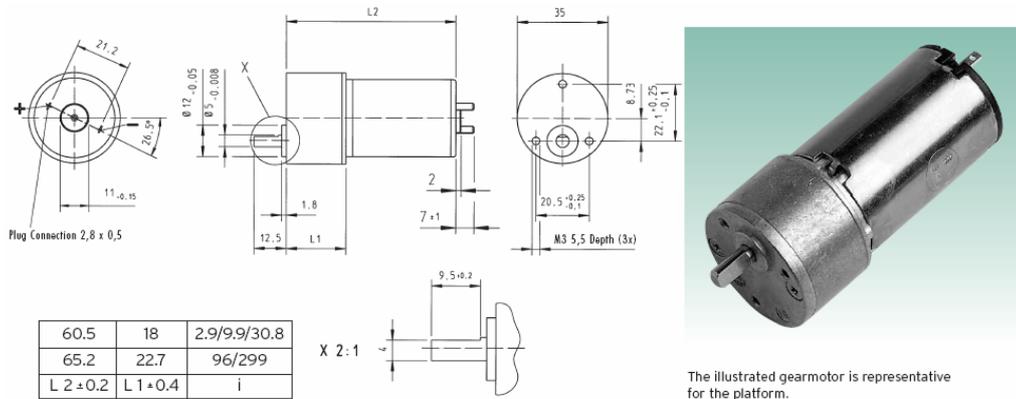


Conexão de motores e baterias



8.3. Especificações dos motores atuadores no sistema

8.3.1. Mestre – Buehler 1.61.046.311



Platform 1.61.046.		Rated Torque	Rated Speed	Rated Current	No Load Speed	Terminal Resistance	Gear Ratio	Stages
		T_N mNm	n_N r.p.m.	I_N mA	n_0 r.p.m.	R Ω	i :1	-
12 V	311	25	1040.0	700	1710.0	9.0	2.9	1
	312	70	335.0	600	500.0	9.0	9.9	2
	313	150	121.0	500	160.0	9.0	30.8	3
	314	300	43.5	390	52.0	9.0	96.0	4
	315	300	15.5	220	16.5	9.0	299.0	5
18 V	321	25	1040.0	470	1710.0	20.0	2.9	1
	323	70	335.0	400	500.0	20.0	9.9	2
	324	150	121.0	340	160.0	20.0	30.8	3
	325	300	43.5	260	52.0	20.0	96.0	4
	326	200	15.5	150	16.5	20.0	299.0	5
24 V	331	25	1040.0	350	1710.0	35.0	2.9	1
	332	70	335.0	300	500.0	35.0	9.9	2
	333	150	121.0	250	160.0	35.0	30.8	3
	334	300	43.5	195	52.0	35.0	96.0	4
	335	300	15.5	110	16.5	35.0	299.0	5

Standard types available from stock without minimum order quantity.

Standard articles produced to order, but not kept in stock.

Customized versions on request.

DESIGN:

- Integral DC PM Motor
- Brush type commutation
- 7 segment commutator
- RFI protection standard (see CE-marks)
- Gear drive made of metal gears
- Terminal dimensions 2.8 x 0.5
- Weight: 150 g

Max. allowable radial load _____ 60 N (10 mm from mounting surface)

Max. allowable axial load _____ 5 N

Axial play _____ 0.05 - 0.6 mm

Allowable temperature range _____ -20 °C/+60 °C

Examples for customized designs:

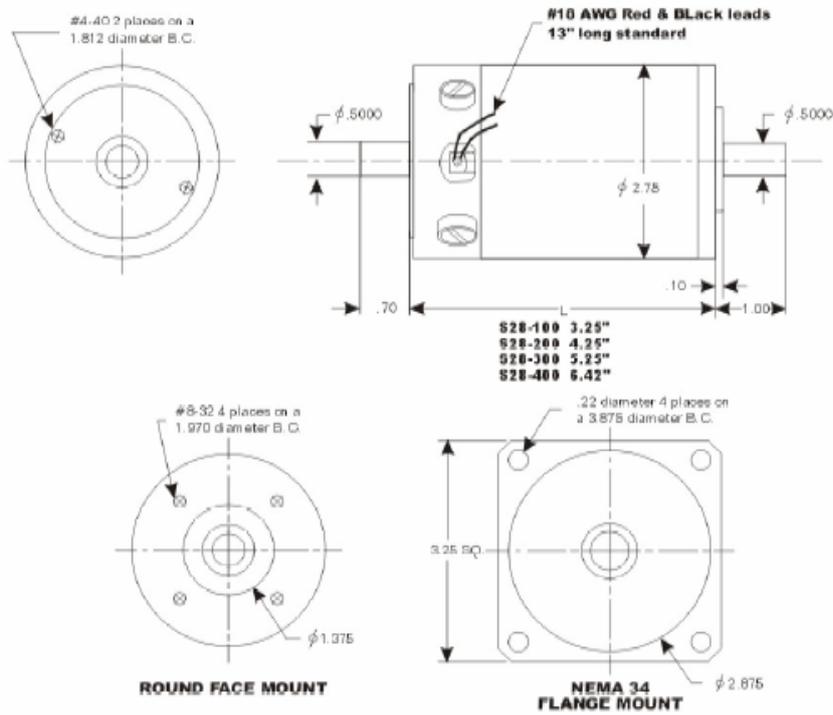
- Available with motor 113.023 motor 113.021
- Max. reduction ratio up to 3000 : 1
- Torque capability: max. torque up to 500 mNm
- Output shaft configuration: Shape according to customers specification
- Extended temperature range: -30 °C/+85 °C
- Protection class: IP44
- Add-ons: Encoder, Lead connections or Plug connections, Drive dog (e. g. pinion)

www.buehlermotor.com

8.3.2. Escravo – Magmotor S28 – BP – 400X

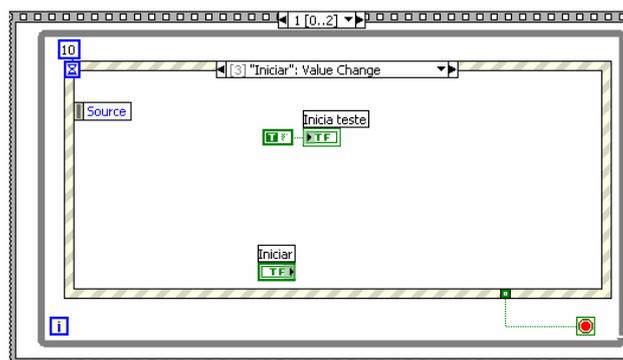
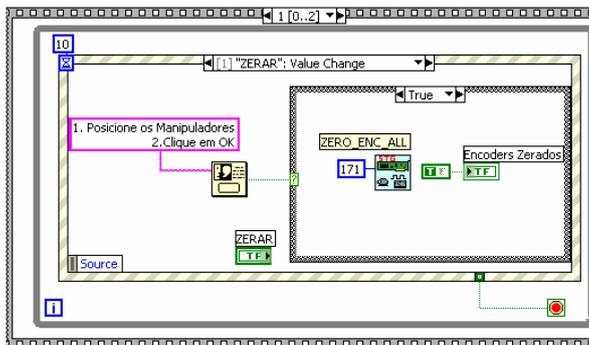
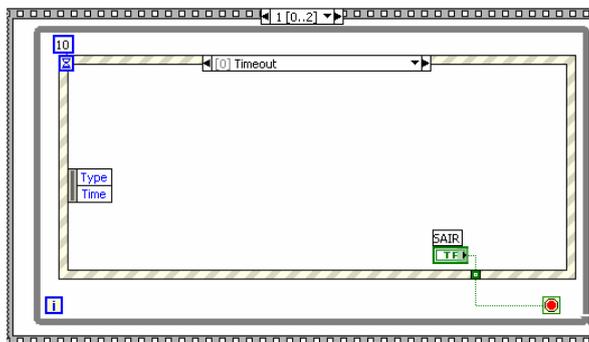
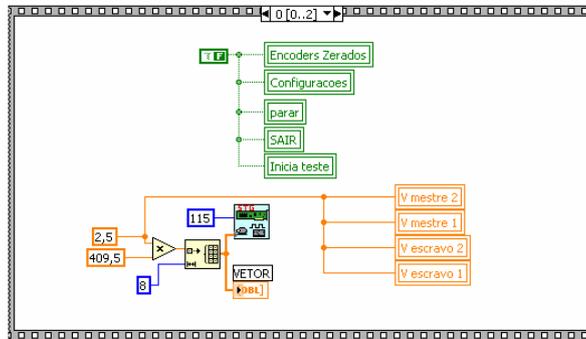
▼ Motor Characteristics

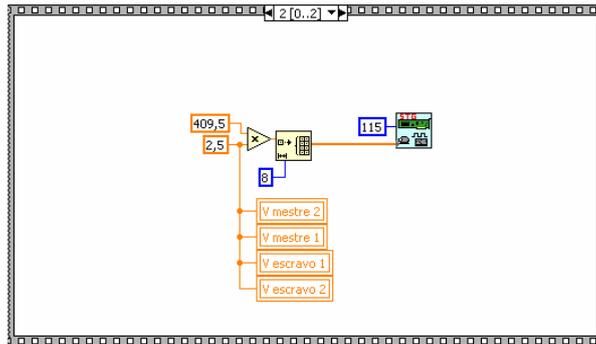
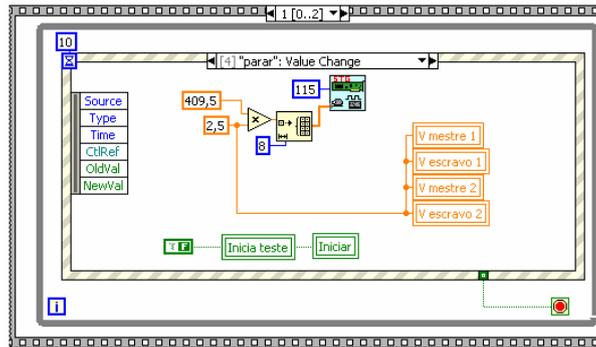
FRAME SIZE	STACK LENGTH	Peak Stall Torque (T _p) oz-in	Cont. Stall Torque (T _c) oz-in	Rotor Inertia (J _m) oz-in-sec ²	Friction Torque (T _f) oz-in	Thermal Resistance (R _θ) degC/Watt	Max Recommend Speed RPM	Max Winding Temp C°	Power Range W	Weight lb
S28 – 100		900	90	0.01	6	3.7	4,000	155	90	3
S28 – 200		1300	130	0.02	7	2.9	4,000	155	150	4
S28 – 300		1500	200	0.025	8	2.3	4,000	155	200	5.5
S28 – 400		1700	250	0.04	9	1.9	4,000	155	250	6.9



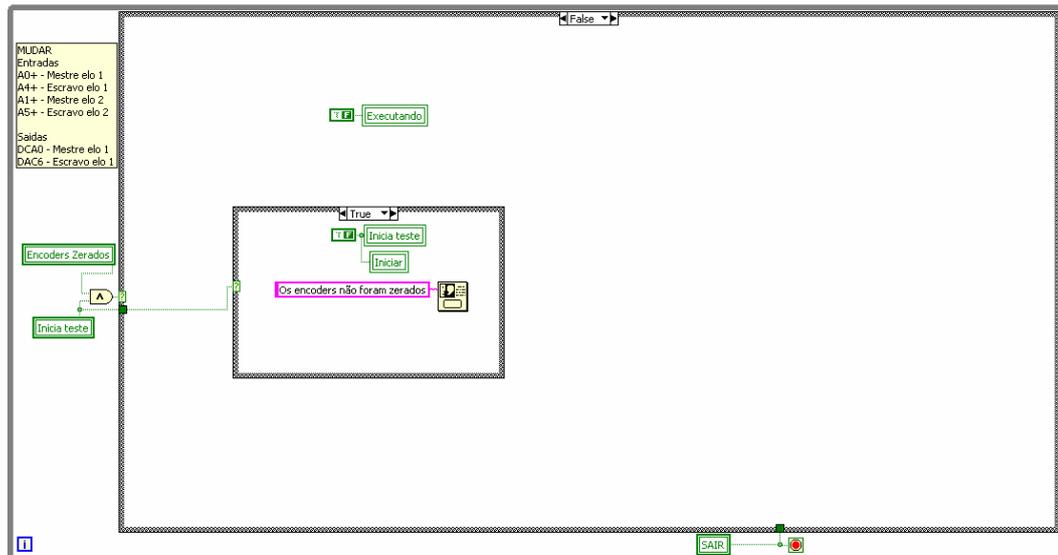
8.4. Programação LabView

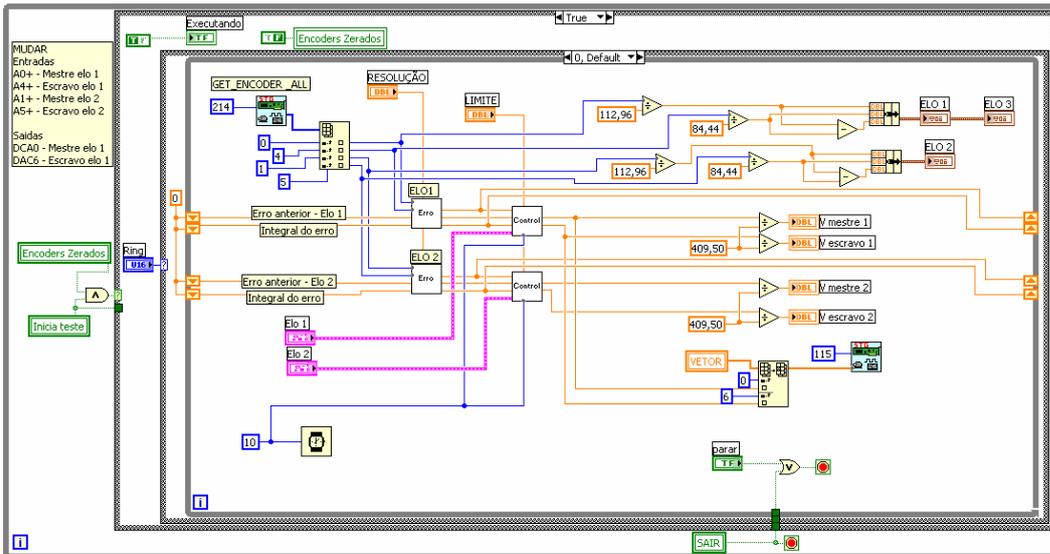
8.4.1. Vi Principal



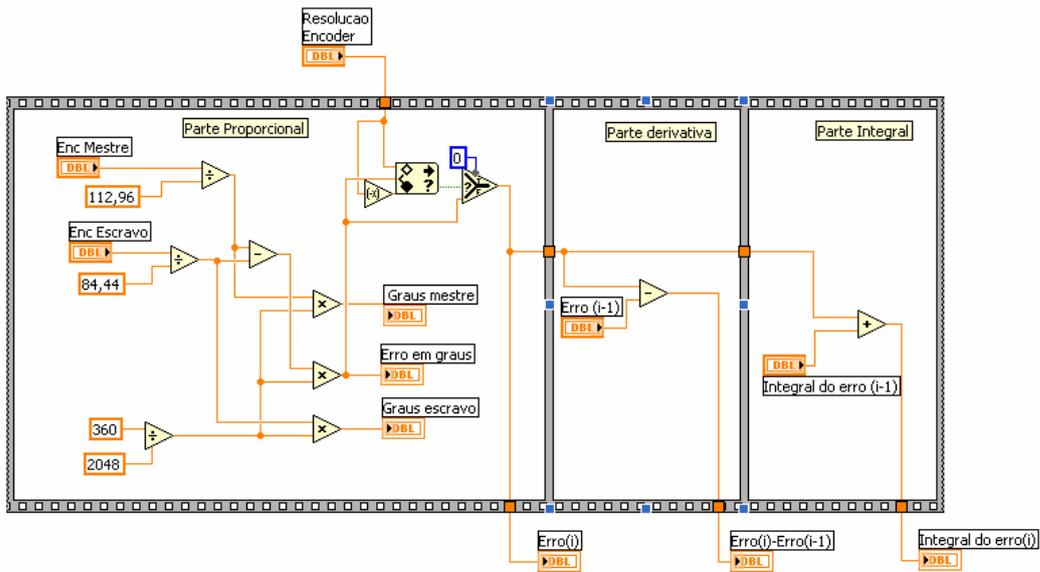


Loop paralelo

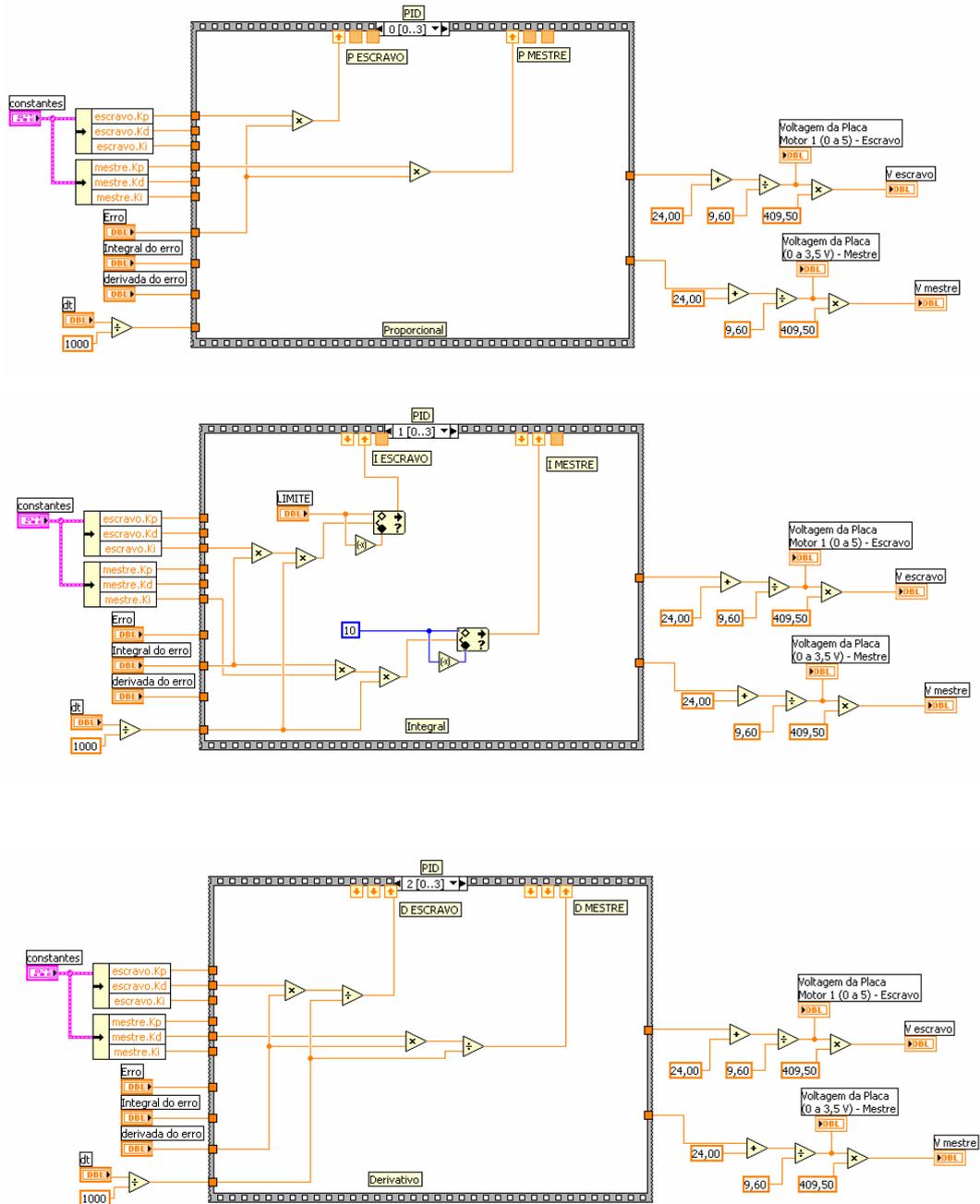


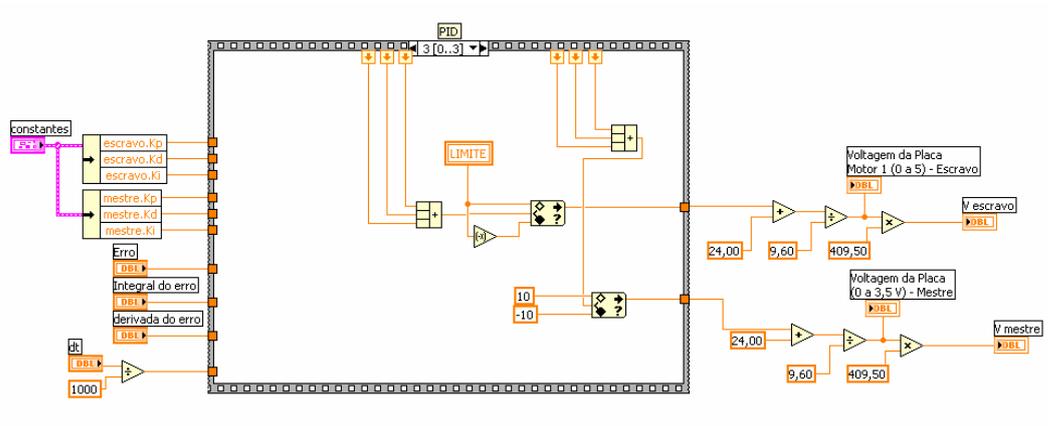


8.4.2. SubVi Erro



8.4.3. SubVi PID





O código relacionado com o MODO 2 e suas SubVis ainda estão em processo de execução.