

Controle Servo-Bilateral de um Manipulador Robótico Teleoperado

Aluno: Bruno Favoreto Fernandes Soares

Orientador: Ricardo Tanscheit

Co-Orientador: Marco Antônio Meggiolaro

Introdução

A robótica vem se desenvolvendo em um ritmo acelerado, mostrando-se cada vez mais presente na vida moderna e atuando em diversos setores como, por exemplo, nas linhas de montagem automobilísticas e na fabricação de *wafers* na indústria de semicondutores. No entanto, é possível observar um desenvolvimento particularmente acentuado da telerobótica, área que abrange o controle remoto de sistemas robóticos. Suas principais aplicações incluem a manipulação de materiais tóxicos, tele-cirurgia, construção civil, forças de segurança e nas indústrias aeroespacial e submarina. Estes sistemas são baseados em uma arquitetura mestre-escravo, na qual o operador interage diretamente com o manipulador mestre cujos sensores definem os valores de referência a serem aplicados no manipulador escravo.

Visando um aumento da eficiência de um sistema remoto, é desejável que o operador seja submetido a sensações tácteis referentes ao ambiente no qual o escravo está inserido. Desta forma o operador tem a real sensação de manipulação dos objetos tocados pelo escravo, melhorando sua sensação de realidade e, portanto, a qualidade da tarefa executada. Esta meta pode ser alcançada através da realimentação cinestésica de força em um manipulador mestre ativo, possibilitando a realização de esforços proporcionais àqueles observados pelo sistema escravo. Com isso, viabiliza-se a realização de tarefas delicadas como micro-cirurgias e neutralização de material explosivo.

Uma das técnicas para implementação da realimentação cinestésica de força é denominada controle servo-bilateral. Nesta técnica em particular utiliza-se os erros de posicionamento do escravo como variáveis na aplicação de torques ou forças no sistema mestre. Esta implementação em particular dispensa o uso de sensores de força acoplados ao escravo, contribuindo drasticamente para a redução dos custos finais do sistema, além de sempre apresentar estabilidade.

A motivação deste trabalho embasa-se no fato de grande parte dos sistemas robóticos teleoperados em uso no país serem desenvolvidos no exterior, em especial no campo de intervenções submarinas referentes à exploração de petróleo. Tais sistemas apresentam arquiteturas fechadas, impossibilitando sua adaptação a determinadas tarefas, o que inspira o desenvolvimento de tecnologias nacionais.

Objetivos

O objetivo deste projeto pode ser descrito com o desenvolvimento de um sistema de controle servo-bilateral com realimentação de força que será implementado em dois manipuladores robóticos utilizando a arquitetura mestre-escravo. Mais especificamente será desenvolvido o software de controle em plataforma *LabVIEW* e serão projetados e construídos ambos os manipuladores.

Metodologia

Inicialmente foram estudados os conceitos básicos associados a manipuladores robóticos e à teleoperação, incluindo as principais técnicas de controle associadas. Em seguida foram projetados em CAD dois manipuladores robóticos de dois graus de liberdade, que foram desenvolvidos posteriormente nos laboratórios da PUC, formando a base do sistema teleoperado. Ambos os manipuladores são formados por dois motores de corrente contínua com seus respectivos transdutores de posição (*encoders*) e de velocidade (tacômetros), sendo diferenciados basicamente por sua escala e potência. Mais adiante foi desenvolvido um software de controle baseado em *LabVIEW*. Este *software* foi responsável pelo processamento dos sinais dos sensores acoplados aos manipuladores e pela interface usuário-computador. Para a integração do *software* desenvolvido com os sensores e motores de ambos os manipuladores utilizou-se uma placa conversora analógico-digital e digital-analógico(A/D, D/A). Esta placa foi responsável pela aquisição dos sinais dos quatro *encoders* e 2 tacômetros, além da geração do sinal referente aos respectivos motores. Em virtude da potência dos motores utilizados, particularmente no manipulador escravo, utilizou-se um amplificador PWM de alta corrente para converter o sinal de saída da placa de aquisição, e melhor suprir a necessidade dos motores. O sistema descrito viabilizou a execução de tarefas bidimensionais por teleoperação com controle servo-bilateral e realimentação de força. Isso permitiu que o operador do manipulador mestre tivesse sensação tátil do ambiente no qual o manipulador escravo estava inserido, aumentando a eficiência e confiabilidade do sistema.

Em função da natureza das tarefas em questão optou-se pela utilização do controle PID oferecendo como vantagens sua facilidade de implementação, calibração e seus bons resultados observados em baixas velocidades.[5]

Manipuladores

Para este projeto fez-se necessário o desenvolvimento de dois manipuladores robóticos de 2 graus de liberdade cada. Cada manipulador deveria conter dois motores de corrente contínua (um para cada elo), sistemas de transmissão e *encoders*, posteriormente utilizou-se também tacômetros que foram incorporados ao sistema de controle. Ambos os manipuladores foram desenvolvidos inicialmente em CAD de modo a otimizar o posicionamento dos componentes e prever as dimensões de seus respectivos componentes estruturais. Como um dos manipuladores serviria como *joystick* para um operador humano (manipulador mestre) e o outro reproduziria os movimentos (manipulador escravo) optou-se por desenvolver o mestre em escala e potência reduzidas privilegiando a ergonomia do operador e reduzindo os custos.

As estruturas de ambos os manipuladores foram construídas em alumínio naval em função de sua alta rigidez e baixa densidade, reduzindo os efeitos dinâmicos sem comprometer, contudo, a precisão do sistema.

Por praticidade optou-se por utilizar motores com *encoders* acoplados como transdutores de posição, o que viria por possibilitar a utilização destes motores posteriormente também como tacômetros. Em função desta escolha, foi necessário acoplar os motores que iriam gerar o movimento dos elos aos motores com *encoders* o que foi conseguido através de colares apropriados.

É importante ressaltar que este acoplamento deve ser feito de modo a eliminar qualquer escorregamento entre os eixos pois isto geraria grandes erros de posição durante o controle que seria posteriormente implementado. Esta observação pode ser igualmente aplicada às correias e chavetas em ambos os manipuladores, já que estes elementos também são fontes potenciais de folga, implicando no mesmo problema.

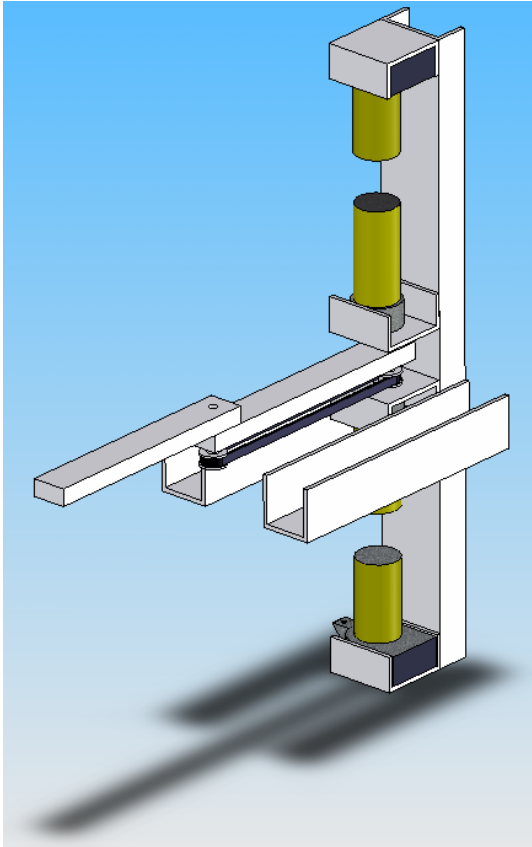


Figura 1: CAD do manipulador mestre

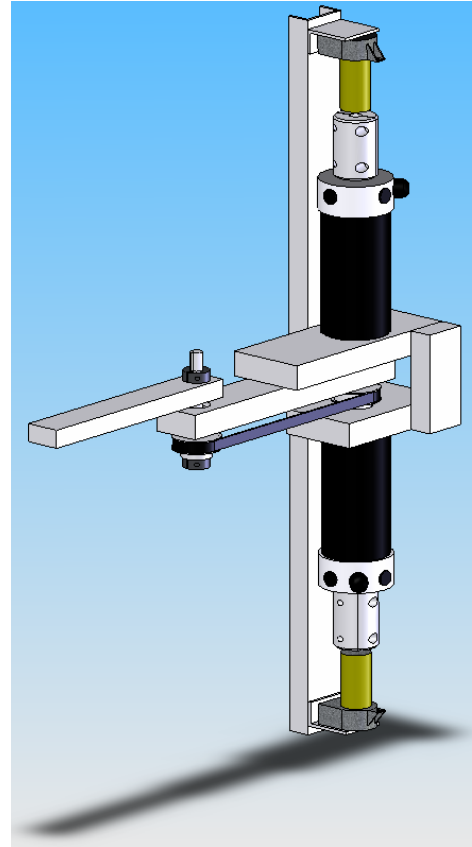


Figura 2: CAD do manipulador escravo



Figura 3: Foto dos dois manipuladores montados em suas posições finais

PID

O controle Proporcional Integral Derivativo (PID) é uma das técnicas mais utilizadas em função de sua facilidade de implementação e calibração[1,5,7]. Isto se deve à não necessidade de se conhecer os efeitos que regem a dinâmica do sistema que se deseja controlar. Esta técnica pode ser descrita como um sistema mono-variável cujas variáveis de entrada e saída são respectivamente o erro entre a grandeza lida e a desejada, e um valor de saída que de alguma forma altera o erro lido. No estudo em questão a variável de entrada é o erro angular entre os elos dos manipuladores mestre e escravo, e a variável de saída é a tensão a ser aplicada nos motores de modo reduzir este erro.

O controle PID recebe esta nomenclatura por poder ser separado em três termos distintos que geram o seu nome. A parte proporcional do controle é um modelo de uma mola linear cuja distensão é dada pelo erro em questão. Deste modo, este termo é o responsável direto pela redução do erro entres os ângulos dos elos. A parte derivativa do controle é responsável por diminuir a oscilação do sistema em torno do valor desejado, ou ponto de equilíbrio. Este termo pode ser descrito como um amortecedor, sendo, portanto, dependente da taxa de variação do erro, ou velocidade dos elos. Finalmente, a parte integral do controle é responsável pela eliminação de erros residuais, relacionados principalmente a atritos inerentes ao sistema físico controlado. Diferentemente dos termos anteriores, o integral não possui equivalente físico, podendo, contudo, ser explicado como um fator que aumenta com uma integral no tempo do erro existente.

No entanto, devido ao enorme número de possíveis sistemas a serem controlados, suas respectivas particularidades e respostas, é necessário ponderar a atuação de cada um destes fatores para cada sistema individualmente. Para tanto, são implementadas constantes multiplicativas de modo a resolver este problema. São utilizadas, pois, três constantes sendo uma para cada etapa citada, são elas: K_p, K_D, K_I

Com isso, as três partes do controle podem ser apresentadas matematicamente como:

$$\tau_p = K_p \cdot (q_{des} - q_{real}) \quad \tau_D = K_D \cdot (\dot{q}_{des} - \dot{q}_{real}) \quad \tau_I = K_I \cdot \int_0^t (q_{des} - q_{real}) dT$$

Sendo q_{des} a posição desejada, ou a posição do mestre, q_{real} a posição do escravo, e t o tempo de integração que vai se acumulando no decorrer das iterações do software de controle.

Somando-se as três componentes, obtém-se a fórmula completa do controle PID por junta em função do erro de entrada e da tensão de saída:

$$V = K'_p \cdot (q_{des} - q_{real}) + \tau_D = K'_D \cdot (\dot{q}_{des} - \dot{q}_{real}) + K'_I \cdot \int_0^t (q_{des} - q_{real}) dT$$

Neste caso vale ressaltar que, por utilizarmos motores de corrente contínua, o torque nas juntas dos manipuladores será proporcional à tensão de alimentação dos motores. Isto é, a fórmula completa acima em função da tensão utiliza constantes diferentes das mostradas nas fórmulas individuais. De fato isso não influencia na calibração, mas constitui um detalhe a ser considerado na transição entre a teoria de controle e sua efetiva implementação.

Calibração

Como dito anteriormente, as constantes K_p, K_d, K_i têm grande papel no controle PID, sendo um dos fatores que mais influenciam no desempenho final do sistema controlado.[4] Portanto, segue uma explicação mais detalhada sobre o assunto.

O tópico que aborda este tema é conhecido como calibração e seu papel é aprimorar a exatidão do manipulador através de modificações no software de controle ao invés de

alterações no projeto mecânico do mesmo. [6] No caso específico deste projeto a calibração foi realizada em duas etapas: calibração dos transdutores de posição das juntas (*encoders*) e calibração das constantes do controle PID.

Primeiramente realizou-se a calibração dos *encoders*, isto é: garantiu-se da melhor forma possível que os sinais gerados representavam de forma fidedigna os ângulos das juntas. Para tanto, utilizou-se um transferidor para medição dos ângulos reais dos elos em relação a uma referência arbitrária. Concomitantemente, registrou-se os sinais provenientes dos *encoders* para posterior comparação. Desta forma foi possível gerar uma relação funcional entre a grandeza real e a medida, melhorando a exatidão do sistema.

Mais adiante realizou-se a calibração das constantes do controle PID. Há referências na literatura sobre métodos de cálculo das constantes em função do tipo de resposta do sistema a uma entrada em degrau e do seu tempo de assentamento[8,4]. No entanto, pelo sistema ser composto apenas por dois manipuladores com dois elos cada, a calibração de todo o sistema estaria restrita a quatro grupos de constantes, o que não justificaria a implementação de métodos complexos de calibração. Diante desta particularidade, optou-se por efetuar a calibração empiricamente tomando por base o erro final em relação ao valor desejado e o tempo de resposta do sistema.

Mais especificamente, a calibração foi feita de maneira independente em cada manipulador e em cada um de seus elos. Como regra geral adota-se o procedimento de calibrar as constantes na seguinte ordem: primeiro a proporcional, seguida da derivativa, e por fim a integral. Este procedimento pode ser entendido intuitivamente a partir da compreensão de suas respectivas funções, além de reduzir a possibilidade de instabilidade dos manipuladores.

É interessante destacar que os efeitos de reação dos elos adjacentes podem influenciar na calibração de todos os elos com exceção do elo 1, pois está fixado na base. Contudo, este fenômeno pode ser anulado fixando-se os elos anteriores à base de alguma forma, desta forma seu movimento é impossibilitado e suas influências no deslocamento do elo em calibração são reduzidas.

Apesar de ter sido discutido anteriormente o controle PID para aos manipuladores, optou-se por implementar um controle PD no manipulador mestre. A adição do termo integral no controle teria pouca influência na teleoperação pretendida, já que esta atuaria somente na correção de erros residuais, praticamente imperceptíveis para o operador em razão de folgas inerentes à construção do manipulador mestre.

Abaixo serão apresentados alguns gráficos que ilustram a grande influência das constantes do PID no comportamento do sistema. Para melhor entendimento, optou-se pela geração de gráficos de respostas a entradas no formato de degraus sucessivos com valores diferentes. Para melhor precisão nos degraus, estes foram gerados exclusivamente por software, isto é: sem a leitura de posição do manipulador mestre como é feito usualmente.

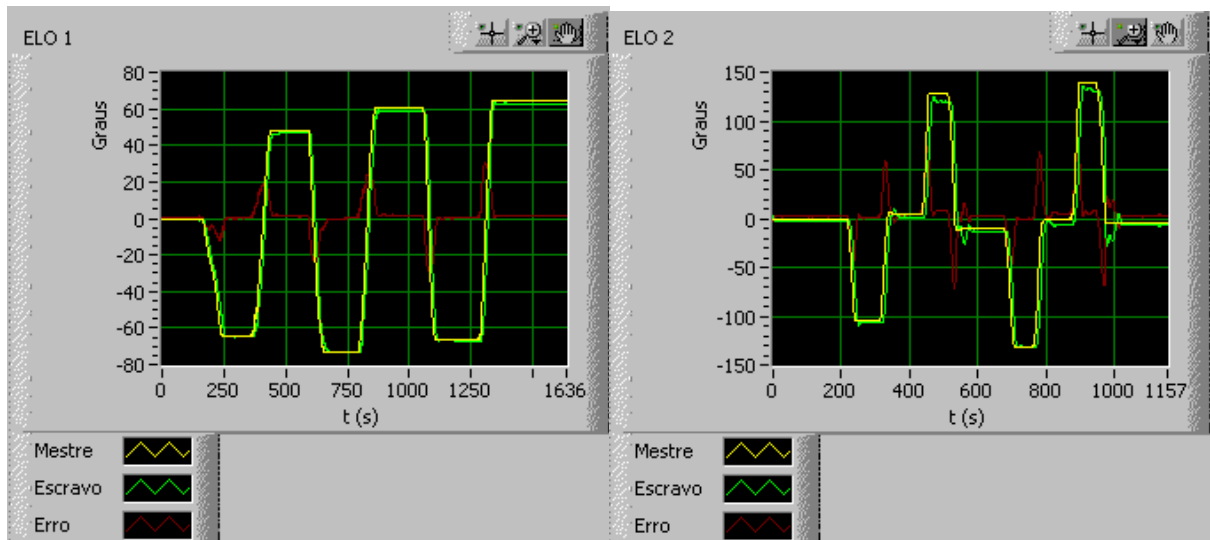


Figura 4: Gráficos de resposta ao controle servo-bilateal com calibragem correta

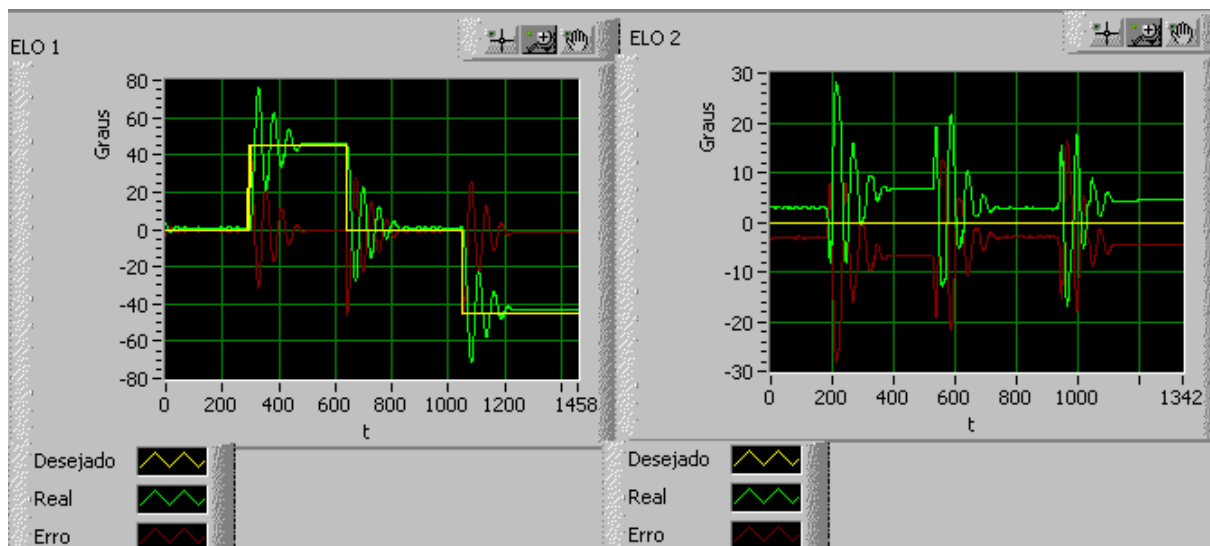


Figura 5: Gráficos de resposta a degraus de entrada com constante derivativa reduzida

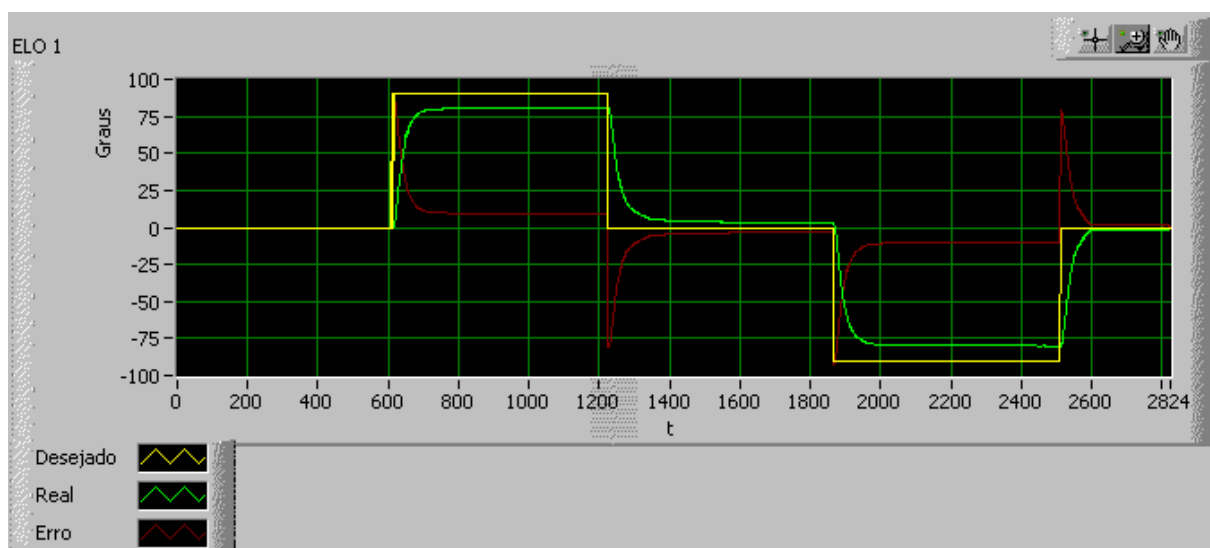


Figura 6: Gráfico de resposta a degraus de entrada com constante proporcional reduzida

Os primeiros gráficos apresentam o comportamento dos elos para um conjunto de constantes corretamente calibradas. Nota-se claramente a tendência dos elos do escravo (em verde) a igualarem-se aos valores de entrada (em amarelo).

No gráfico seguinte, optou-se por apresentar a influência da constante derivativa. Para tanto foram mantidas as constantes do primeiro gráfico, reduzindo-se, porém, o valor de K_D do elo 1 do escravo a 10%. Claramente é possível notar a oscilação resultante desta modificação, o que explicita o papel do termo derivativo do controle PID.

No último gráfico, utilizou-se o mesmo conjunto inicial de constantes com a exceção das proporcionais do escravo que foram reduzidas à metade. Essa modificação causa grande impacto no sistema aumentando drasticamente seu tempo de resposta e gerando um erro final superior ao obtido anteriormente, explicitando um dos possíveis problemas associados a uma calibração deficiente.

Teleoperação e Controle Servo-Bilateral

A teleoperação é uma área da robótica que compreende o controle de sistemas a distância fazendo uso de um canal de comunicação qualquer. Utilizando essa técnica é possível automatizar tarefas nos mais diversos segmentos industriais, como aeroespacial, submarino, militar, entre outros. Contudo, dependendo do canal de comunicação utilizado pode ser que ocorra uma grande defasagem de tempo entre movimento do operador e a efetiva reprodução do movimento pelo escravo. Essa adversidade pode ser reduzida através da instalação de uma câmera que monitore as atividades do escravo, e que transmita as imagens para o operador do sistema.

Ademais, pode-se identificar um outro problema relacionado à teleoperação: a sensação de realidade. Por estar em um ambiente frequentemente diferente do escravo, o operador pode sentir dificuldades em realizar determinadas tarefas por não ter uma sensação de realidade suficientemente acurada do ambiente no qual o escravo está inserido. Uma das medidas para reduzir essa deficiência é de alguma forma expor o operador às forças realizadas pelo escravo. Tradicionalmente utiliza-se sensores de força no escravo para implementar esta solução, desta forma é possível gerar torques nos motores do mestre que reproduzam, normalmente em escala, as forças que atuam nestes sensores. Apesar de apresentar bons resultados, a instalação de sensores é muito dispendiosa, podendo inclusive superar os custos de todo o sistema. Como alternativa optou-se por implementar a técnica de controle servo-bilateral explicada a seguir.

O controle servo-bilateral é uma técnica de controle baseada na arquitetura mestre-escravo que se utiliza da diferença de posição entre os elos para gerar os torques em ambos os manipuladores. No escravo, o torque atuará aproximando os elos da posição desejada (posição do mestre), já no mestre o torque atuará como realimentação de força em relação aos esforços sentidos pelo escravo. A grande vantagem desta técnica é a redução de custos já que os sensores utilizados neste processo são os mesmos que servem de entrada para o controle PID, ou seja os *encoders*.

A figura a seguir ilustra o funcionamento do controle servo-bilateral para um manipulador de 1 grau de liberdade, explicitando a utilização do erro angular como variável de entrada do sistema.

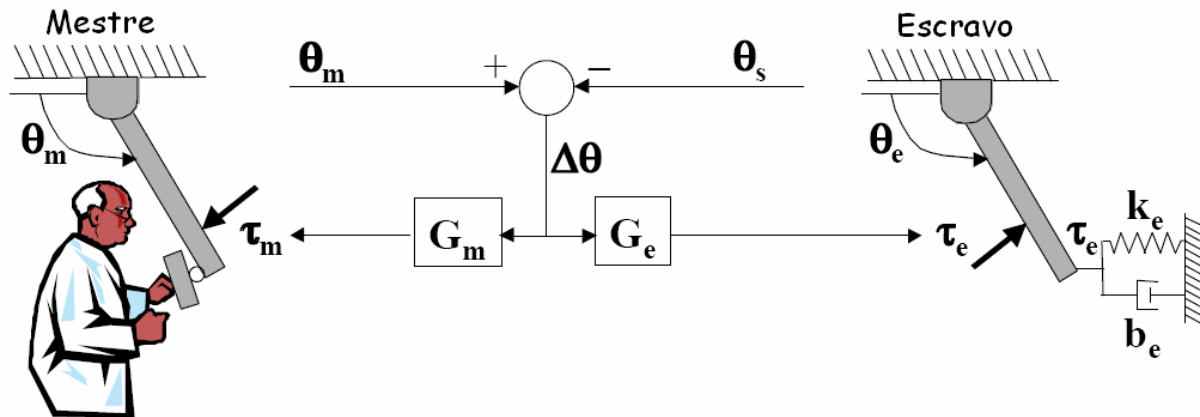


Figura 7: Diagrama de funcionamento do controle servo-bilateral

Cabe ressaltar que, devido à semelhança geométrica proposital dos manipuladores, o cálculo dos torques a serem aplicados em cada junta foi trivial, o que deixaria de ocorrer em manipuladores com configurações distintas. Essa ressalva mostra-se importante pois, dependendo da complexidade dos cálculos dos torques em cada junta, pode ser que o controle em tempo real fique prejudicado.

Interface Computador-Manipuladores

Como dito anteriormente, o software de controle descrito tem como entradas os sinais dos sensores e como saída a tensão para os motores. Portanto, para implementar o sistema real seria necessária uma interface responsável por adquirir os sinais dos *encoders* e tacômetros e gerar o sinal referente à tensão de saída. Para suprir tal necessidade foi utilizada uma placa *ServoToGo* com entradas A/D e saídas D/A. Com isso bastava conectar os sensores à placa para ler seus respectivos sinais já que estes já estavam dentro dos parâmetros requeridos. No total foram utilizados quatro *encoders* e dois tacômetros ocupando portanto seis entradas.



Figura 8: Placa A/D D/A utilizada como interface sensores-software

No entanto, a saída de tensão da placa era inadequada à tensão e à potência requisitadas pelos motores. Para a solução desta incompatibilidade foi utilizado um amplificador *por PWM* responsável por ler o sinal de saída da placa (0V a 5V em baixa potência) e gerar uma saída adequada para os motores (-24V a 24V em alta potência). Por ter sido desenvolvido para outras finalidades o amplificador apresenta algumas particularidades que devem ser observadas para sua correta utilização. Ele necessita de sua própria fonte de alimentação independente do sistema de controle, além de dispor de proteções de segurança, como por exemplo nunca iniciar um ciclo de controle com os manipuladores em movimento além outras funcionalidades que não são do escopo deste texto.

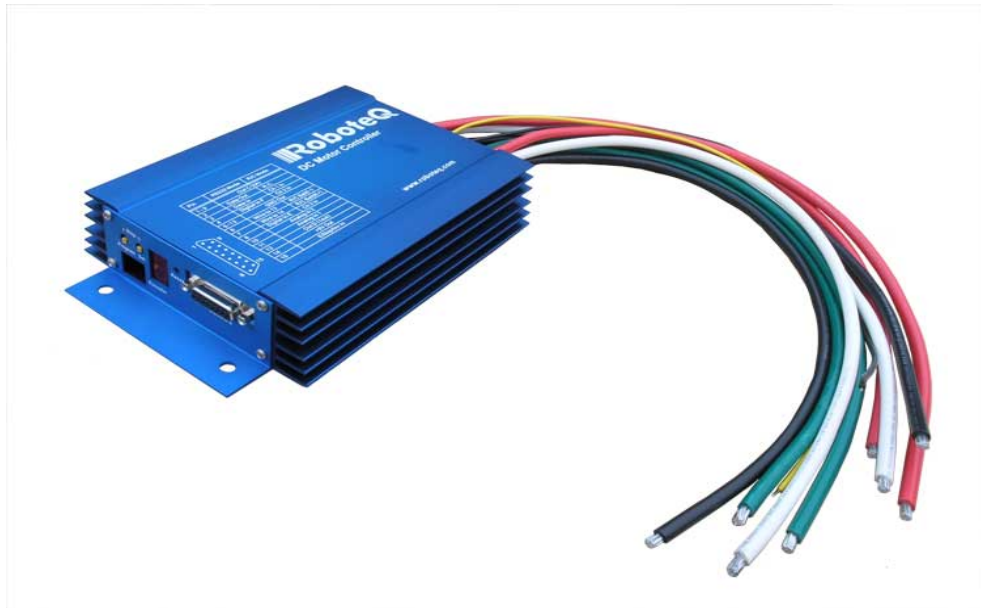


Figura 9: Amplificador RoboteQ utilizado na interface placa SevoToGo-manipuladores

No entanto, uma de suas funções demandou especial atenção: a *deadband*. Tal função foi concebida visando aplicações por controle remoto nas quais é virtualmente impossível gerar um sinal exatamente neutro (com o *joystick* do controle exatamente na posição central). Desta forma seria impossível manter um sistema móvel em repouso utilizando controles remotos. A função atua de forma a desprezar sinais cuja diferença em relação ao valor neutro seja inferior a um parâmetro configurável. No entanto para a aplicação em questão isto constitui um grande problema pois os sinais de baixa intensidade (pequena diferença em relação ao ponto de equilíbrio) seriam desprezados, impossibilitando o controle de precisão dos manipuladores. Naturalmente essa precisão será tão pior quanto maior for o valor de *deadband*. Logo, para atingir-se a maior precisão possível deve-se configurar este parâmetro com valor zero. Por outro lado, esta medida tem um contraponto interessante: com o *deadband* eliminado qualquer variação no sinal de entrada, por menor que seja, será amplificada propagando os eventuais ruídos do sistema. Este fenômeno pôde ser observado claramente no manipulador escravo quando este aproximava-se da posição de equilíbrio, nestes casos era possível notar pequenas vibrações resultantes de oscilações mínimas inerentes ao sinal de saída da placa de aquisição.

Sensores

Como dito anteriormente os sinais dos sensores foram utilizados como entrada para o sistema de controle, cabe portanto uma breve explicação sobre seu funcionamento. Foram utilizados dois tipos de sensores neste projeto, sendo eles *encoders* e tacômetros.

Os *encoders* interpretam deslocamentos angulares gerando um sinal característico indicativo deste movimento. Os *encoders* utilizados são do tipo óptico, significando que fazem uso de um disco acoplado ao eixo a ser medido. O disco em questão apresenta diversos orifícios em sua periferia (no caso, 2048) responsáveis por permitir ou impedir a passagem de luz advinda de um sensor óptico fixo em sua periferia. Como os furos são regularmente espaçados, é possível calcular a velocidade de rotação do eixo a partir da frequência de passagem dos orifícios pelo feixe luminoso.



Figura 10: Disco ótico dos *encoders* utilizados

Um detalhe interessante acerca dos *encoders* utilizados é sua ausência de pontos de referência. Por medirem variações angulares relativas, e não absolutas a um ponto arbitrário, é necessário estipular um ponto de referência qualquer ao inicializar o software de controle. Essa medida não seria estritamente necessário do ponto de vista do sistema, mas provou-se eficaz nas etapas iniciais do projeto quando a calibração ainda estava em andamento, garantindo uma relação funcional mais clara entre a posição real dos manipuladores e suas posições indicadas pelo software. Esta rotina foi denominada “zerar *encoders*”.

Os tacômetros podem ser explicados como motores de corrente contínua trabalhando em funcionamento inverso, isto é: como geradores. Quando o eixo a ser medido é girado o eixo do tacômetro a ele acoplado também gira gerando uma tensão em seus terminais. Analisando o modelo de um motor de corrente contínua fica claro que a tensão gerada é função da velocidade, permitindo, pois, que esta seja usada como sinal do tacômetro.

Software de Controle

Para a implementação das técnicas de controle descritas acima foi desenvolvido um software responsável pelo processamento dos sinais dos sensores, e geração do sinal de saída para os motores. Para tanto, seria necessária uma linguagem de programação intuitiva, facilidades de criação de interfaces com o usuário, compatibilidade com a placa de aquisição e fácil atualização do código. Com base em todos esses requisitos optou-se por desenvolver o software em plataforma *LabVIEW*.

A versão final do software mostrou-se bastante prática possibilitando a rápida modificação do código, caso necessário, e alteração de parâmetros como as constantes do PID em tempo real, o que foi imprescindível nas etapas de calibração.

Contudo deve ser feita uma ressalva quanto aos cálculos referentes ao PID, mais especificamente sobre sua parte derivativa.

Computacionalmente é comum implementar derivadas como diferenciações visando menor tempo de processamento e para evitar a amplificação de ruídos de alta frequência. Esta abordagem pode constituir um fator particularmente importante em sistemas de controle nos quais o tempo de processamento é idealmente nulo. Optou-se, pois, por adotar este método para o cálculo da derivada do erro advindo dos *encoders*. No entanto, como o tempo de iteração do software era muito baixo, este cálculo ficava comprometido pois os *encoders* não

tinham tempo hábil de gerar amostras suficientes para um cálculo diferencial acurado. Uma solução seria aumentar o tempo de iteração do software para que fosse obtido um número superior de amostras do *encoder*, porém isto poderia causar uma discretização indesejada do controle.

Essa discretização poderia ocorrer caso o intervalo entre as atualizações dos valores de saída para os motores fosse muito grande, comprometendo a trajetória dos elos. O problema foi resolvido com a utilização de tacômetros para medição da velocidade dos eixos dos motores, em substituição aos *encoders*. Desta forma a diferenciação dos sinais dos *encoders* não seria mais necessária.

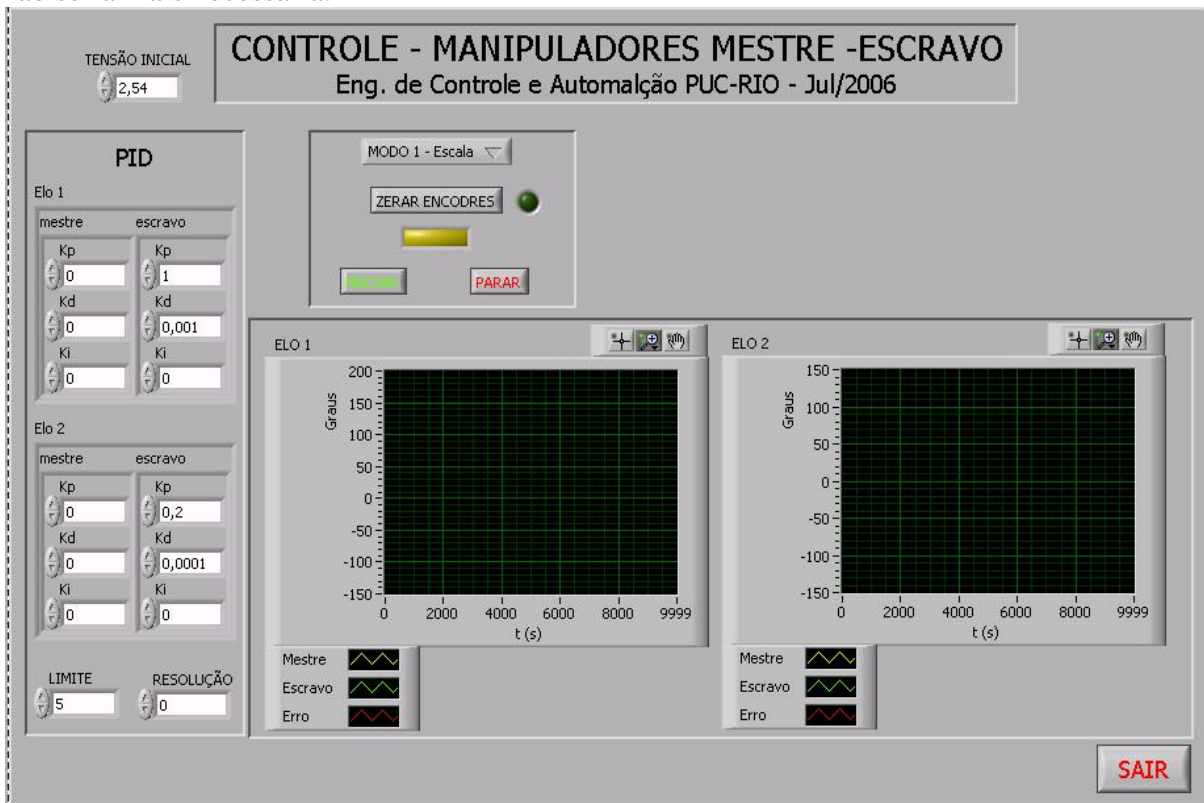


Figura 11: Painel de controle do software desenvolvido

Na figura acima é apresentado o painel de controle do sistema com seus respectivos comandos. À esquerda é possível notar os controles responsáveis pela calibração das constantes do PID para cada um dos elos de ambos os manipuladores. Ao centro encontram-se os gráficos referentes a cada elo, facilitando a análise comparativa da resposta de cada manipulador. Finalmente, acima é possível notar os controles de inicialização do sistema e da rotina “zerar *encoders*” citada anteriormente.

Nesse ponto é necessário creditar à engenheira Camilla Mello o bom desempenho do software de controle descrito acima. O software foi desenvolvido em conjunto com ela como parte de seu projeto de fim de curso, que abordava o controle servo-bilaterale e sua aplicação em tele-cirurgias.

Modos de Operação

Dentro do software descrito foram previstos dois modos de operação dos manipuladores: Modo em escala ou absoluto.

O modo de escala atuava de forma a igualar a posição angular dos elos em ambos os manipuladores. No entanto, já que os manipuladores tinham escalas diferentes, a posição das

extremidades seria sempre distinta, o que não constitui em hipótese alguma uma falha de controle ou incoerência já que o operador sempre terá visão dos movimentos do manipulador escravo, impedindo-o de realizar movimentos perigosamente amplos. Esta implementação pode ser utilizada na manipulação de grandes objetos como em construção civil ou na indústria aeroespacial usando um manipulador escravo com dimensões maiores que o mestre. Surpreendentemente a mesma implementação é usada na manipulação de objetos muito pequenos, até mesmo microscópios, a única diferença seria o uso de um manipulador escravo de dimensões inferiores ao mestre.

Por sua vez, o modo absoluto recebe essa denominação por reproduzir a posição absoluta da extremidade do manipulador mestre. Esta implementação teria aplicações em diversas áreas onde pretende-se que dois manipuladores de tamanhos, ou até mesmo configurações, diferentes realizem uma mesma tarefa. No entanto os cálculos envolvidos nesse modo são um pouco mais complexos e exigem uma explicação mais detalhada pois naturalmente dependem da geometria dos manipuladores. Este maior detalhamento é apresentado no apêndice.

Resultados

Após a realização de todas as etapas descritas anteriormente foram realizados diversos testes visando a avaliação do desempenho global do sistema de controle. Os testes foram realizados em dois níveis: excitando o sistema com entradas em degrau, e a partir dos valores dos transdutores do manipulador mestre, que constitui a efetiva teleoperação do sistema.

Os manipuladores apresentaram boa performance em ambos os casos, possibilitando inclusive a movimentação com razoável precisão de determinados objetos. Além disso foi possível notar com clareza o funcionamento da realimentação cinestésica de força como pretendido. Através da sensação de realidade virtual proporcionada ao operador por essa funcionalidade, a manipulação de objetos, em especial os mais pesados, foi aperfeiçoada contribuindo para o desempenho do sistema. Esse desempenho atua como evidência comprobatória que a técnica de controle servo-bilateral aplicada, sem o uso de sensores de força, é também viável mesmo dispondo recursos significativamente inferiores.

Abaixo serão apresentados alguns gráficos que ilustram o funcionamento dos manipuladores para os casos citados acima.

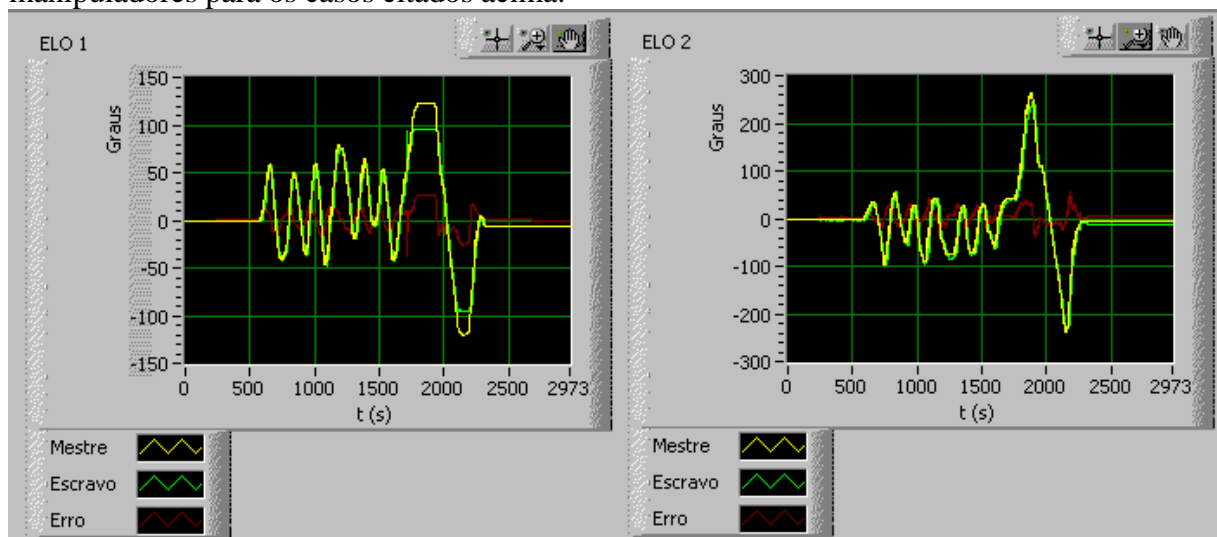


Figura 12: Gráficos de resposta ao controle servo-bilateral

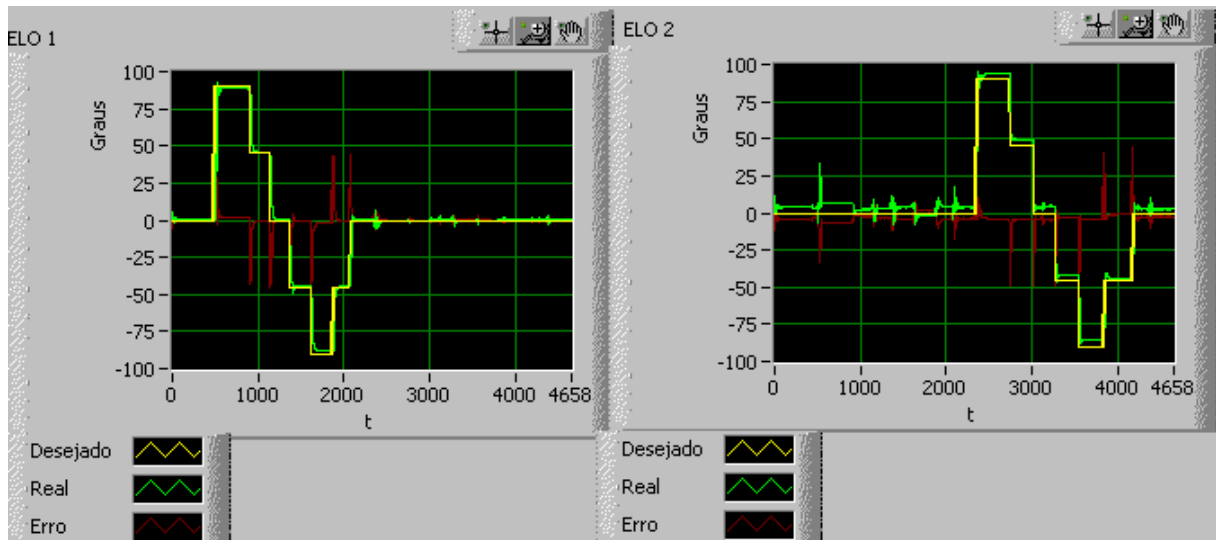


Figura 13: Gráficos de resposta a degraus e entrada em ambos os elos

Os primeiros gráficos ilustram as respostas do sistema ao controle servo-bilateral sob a atuação de um operador. É possível perceber claramente o bom desempenho do sistema devido ao baixo valor dos erros, em especial fora dos períodos de transiente. Os únicos instantes em que o valor do erro eleva-se acima do esperado são aqueles em que o manipulador mestre atinge o final de seu curso (-90° a 90°), que é claramente menor que o curso do mestre (aproximadamente -125° a 125°)

Nos dois gráficos seguintes estão ilustradas as respostas a sucessivos degraus de entrada com valores variando de 90° a -90° para ambos os elos. Neste caso também é possível notar o bom desempenho do sistema observando o baixo valor dos erros gerados. Um detalhe interessante a ser notado são as pequenas variações resultantes das influências dinâmicas de um elo sobre o outro. Devido ao movimento repentino gerado pela entrada em degrau os elos sofrem um pequeno movimento reacional, que é mais intenso no elo 2 já que o elo 1 está fixado à base, restringindo sensivelmente seu movimento

Conclusões

Após a análise dos resultados e do desempenho do sistema completo, é possível afirmar que os objetivos foram plenamente atingidos. O sistema de controle apresentou grande versatilidade facilitando a calibração e operação dos manipuladores. A opção pelo controle PID mostrou-se correta pois, mesmo sem modelar ou prever os efeitos dinâmicos atuantes, o sistema mostrou-se estável seguindo, como esperado, as trajetórias impostas. Os manipuladores também apresentaram desempenho satisfatório haja visto que foram fabricados quase em sua totalidade por alunos de graduação em oficinas mecânicas da universidade, sem o uso de máquinas CNC.

Além dos benefícios supracitados, vislumbra-se a possibilidade de utilização do sistema criado com instrumento de ensino para as disciplinas de controle na universidade. Alguns dos tópicos que podem ser estudados experimentalmente com o auxílio dos manipuladores são: efeitos dinâmicos em trajetórias de alta velocidade, compensação de gravidade, métodos de calibração por retro-alimentação, dentre outros.

Referências

1 - CRAIG, John .J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3.ed. Prentice Hall , out. 2003 575p. ISBN 0201543613

2 - MIYAZAKI, F.; et al. **A New Control Methodology Toward Advanced Teleoperation of Master-Slave Robot Systems.**

3 – NIGRI, Ilana. **Projeto e Controle de um Manipulador Robótico de Dois Graus de Liberdade**. Rio de Janeiro, 2005 17p.

4 – O’Dwyer, Aidan. **Handbook of Pi And Pid Controller Tuning Rules** 2ed. Imperial College Press; mar. 2006 564p. ISBN 1860946224

5 – OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, c1997 813 p. ISBN 8570540744

6 – ROTH, Zvi S.; MOORIN, Benjamim W.; RAVANI, Bahram. An Overview of Robot Calibration. **IEEE Journal of Robotics and Automation**, v.RA-3, n.05, p.377-385, out. 1987

7 – SPONG, Mark W.; Vidyasagar, M. **Robot Dynamics and Control**, Wiley, jan.1989 352p. ISBN 047161243X

8 – YU, Cheng-Ching. **Autotuning of PID Controllers: A Relay Feedback Approach** 2ed. Springer, dez.2005 261p. ISBN 1846280362

Apêndice

Os cálculos referentes ao modo de operação absoluto são provenientes de dois tópicos referentes ao estudo de manipuladores conhecidos como cinemática e cinemática inversa.

Neste caso a cinemática é responsável por calcular a posição absoluta da extremidade do mestre a partir dos ângulos de suas juntas. Já a cinemática inversa se propõe a calcular os ângulos das juntas do escravo a partir de um ponto qualquer no espaço. Como queremos que a posição da extremidade do escravo coincida com a do mestre, basta usar o resultado da cinemática do mestre como parâmetro para a cinemática inversa do escravo. Os cálculos que serão apresentados abordam o desenvolvimento deste tema e seu resultado final.

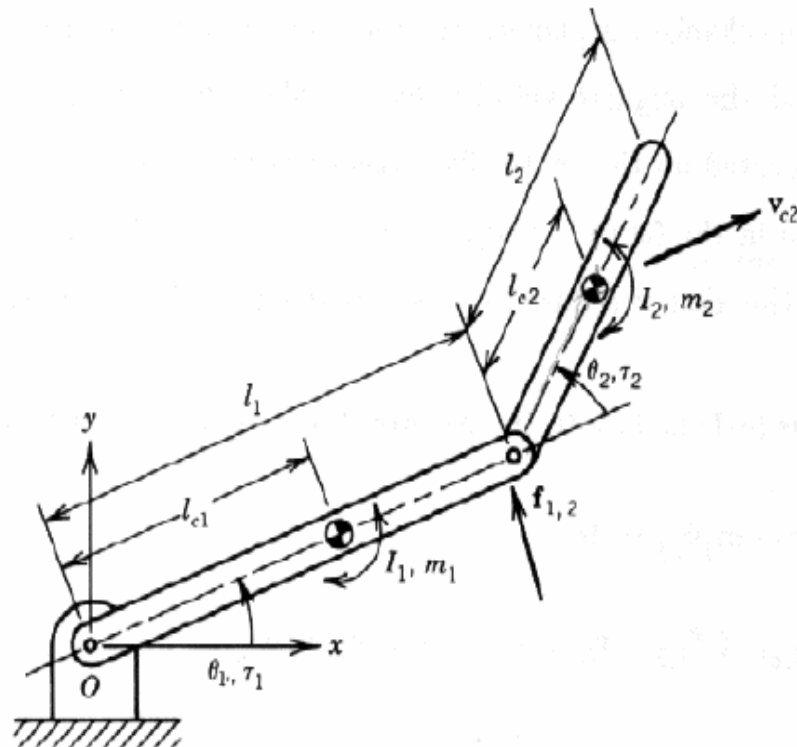


Figura 14: Diagrama de manipulador com dois graus de liberdade

Considerando o manipulador acima com dois elos de comprimentos l_1, l_2 , ângulos das juntas θ_1, θ_2 , e extremidade caracterizada por (X_{ext}, Y_{ext}, ϕ) sendo ϕ o ângulo com relação à horizontal, podemos calcular os dados de sua extremidade da seguinte forma:

Por simplicidade posicionaremos a origem do sistema na junta 1 (ou base). Em seguida calcularemos a posição da junta 2 e a posição da extremidade em relação a esta, finalmente restará somar estas duas posições, encontrando a posição da extremidade em relação à origem.

$$\begin{cases} J_1 \equiv (0,0) \\ J_2 = (l_1 \cdot \cos \theta_1, l_1 \cdot \text{sen} \theta_1) \\ J_{ext} = (l_2 \cdot \cos \theta_2, l_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)) \end{cases}$$

$$X_{ext} = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos \theta_2$$

$$Y_{ext} = l_1 \cdot \text{sen} \theta_1 + l_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2$$

Com esses dados já é possível calcular os ângulos correspondentes das juntas do escravo:

$$\begin{cases} \frac{Y_{ext}}{X_{ext}} = \tan \alpha \\ X_{ext}^2 + Y_{ext}^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(180 - \theta_2) = l_1^2 + l_2^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_2) \\ l_2^2 = l_1^2 + X_{ext}^2 + Y_{ext}^2 - 2 \cdot l_1 \cdot \sqrt{X_{ext}^2 + Y_{ext}^2} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$

$$\theta_2 = \pm a \cos \left(\frac{X_{ext}^2 + Y_{ext}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right)$$

$$\theta_1 = \alpha - \gamma = a \tan \left(\frac{Y_{ext}}{X_{ext}} \right) \mp a \cos \left(\frac{X_{ext}^2 + Y_{ext}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right)$$