

Bruno Messer

**Realimentação de Força em um
Manipulador de Dois Graus de
Liberdade para Uso em Ambientes**

Projeto de Graduação

Departamento de Engenharia de
Controle e Automação

Rio de Janeiro
julho de 07

Resumo

Esse projeto tem como objetivo construir um ambiente virtual e fazer a interação entre esse ambiente virtual e um manipulador. Para isso foi modelado um padrão para os objetos que podem ser adicionados ao ambiente virtual assim como um criador de objetos. O sistema usa controle de força de malha aberta para reproduzir as forças do ambiente virtual no manipulador. Foi testado o sistema simulando interações entre objetos virtuais com resultados satisfatórios para uma primeira aproximação e interações realista para contato e atrito com o manipulador virtual.

Sumário

Resumo	2
Introdução	5
Proposta	5
Funcionamento Básico	6
Sistema Físico	7
O manipulador	7
A interface de potência	10
A placa de IO	12
Programa de simulação e controle	13
Modelagem	13
Sistema	13
Objeto	13
Forças	15
Haptic	15
Funções e Equações	16
Colisão	16
Atrito de Colisão	17
Atrito com o solo	17
Atrito com o meio	17
Gravidade para baixo	18
Gravidade entre objetos	18
Reestruturação dos objetos	18
Importação de imagem	19
Captura e exportação de dados	19
Criador de objetos	20
Simulações	21
Colisão simples	21
Rotação	23
Atrito com o solo	26
Atrito viscoso	28
Gravidade para baixo	30
Sistema experimental	33

Fiação	33
Softwares	34
Simulador	34
Programa completo.....	37
Jogo.....	39
Experimental.....	41
Calibragens	41
Atração para um alvo.....	42
Conclusão	46
Lista de Figuras	47
Lista de Gráficos.....	48
Bibliografia.....	49

Introdução

Sistemas que fazem a interface de força entre o computador e um usuário, também conhecidos como haptics, têm sido amplamente estudados. Impulsionado pelos avanços nos computadores, que tornaram possível se fazer ambientes virtuais complexos e renderizados em tempo real, pôde-se fazer ambientes virtuais industrialmente úteis que combinados com haptics alcançam diversas utilidades como simulação e tele operação.

O principal objetivo de um haptic é criar uma sensação de posição e força o mais compatível possível com o ambiente virtual. Para se medir quão realista é a sensação de força oferecida pela haptic usa-se de dois parâmetros. A precisão reflete a capacidade do haptic de reproduzir as forças desejadas. A resolução reflete os níveis de força que podem ser reproduzidos.

Existem algumas limitações ao se tentar reproduzir forças de um simulador ou de um dispositivo tele operado. As principais limitações são que o haptic tem uma dinâmica própria, modificando a força sentida pelo usuário ao somar a sua dinâmica as forças desejadas e que existe um delay na resposta dos motores dificultando a resposta a mudanças abruptas de forças.

Existem diversas técnicas para se tentar anular a dinâmica do haptic como fazê-lo ter mecanicamente suas variáveis desassociadas, usar-se de controle por software que prevejam e anulem os efeitos da sua dinâmica como o controle adaptativo ou ainda se usar de sistemas em malha fechada com sensores de força no haptic.

Para se fazer o controle dos torques dos motores do haptic existem duas técnicas básicas: o controle de força e o controle de posição. Embora ambas as técnicas possam vir a ficar mais complexas anexando-se feedback ou outras variáveis de entrada suas características básicas se mantêm constantes.

Um problema encontrado na técnica de controle de força é que caso a resistência do haptic seja muito pequena (o operador não esteja segurando a extremidade) ao se aplicar uma força grande o haptic será lançado e pode vir a se tornar instável. Já ao se usar o controle de posição o sistema piora quanto maior for a resistência oferecida ao haptic (o operador segurar muito forte o haptic).

Proposta

Este trabalho propõe fazer um sistema que possa ser utilizado como um simulador genérico em duas dimensões onde é possível para o usuário criar o ambiente virtual como certa liberdade e depois ver seu comportamento ou interagir com ele. Outra utilidade é somar a saída do sistema virtual com a de um sistema mestre escravo, onde que por auxílio de imagens pode-se sobrepor um ambiente virtual sobre o real e se fazer áreas repulsivas e atrativas.

Para tal é proposto se fazer um haptic e seu ambiente virtual em duas dimensões. O objetivo é usar um manipulador horizontal de dois graus de liberdade como haptic e usar o LabVIEW para gerar o simulador, o ambiente virtual e controle do manipulador. A técnica de controle a ser utilizada será a de controle de força, assumindo que os motores trabalharão em stall e o usuário causa resistência infinita sobre o manipulador, garantindo, assim, a estabilidade.

Funcionamento Básico

O sistema físico do manipulador consiste em um manipulador com dois motores iguais presos a base e o segundo elo é movido por meio de uma correia. Cada motor tem um encoder e um tacômetro. Os motores são controlados por uma interface de potencia que é controlada por uma placa IO, que recebe os dois encoders e os dois tacômetros. Nenhum sensor de força é utilizado no sistema.

O software de simulação e controle é construído de modo a dar o maior número de opções para o usuário e melhorar o controle.

O simulador pode funcionar como um simulador estático onde as forças calculadas para o manipulador virtual apenas são transmitidas para os motores do haptic. Pode-se escolher quais forças estarão atuando no sistema tais como força de contato entre objetos, força de contato com uma parede, força de atrito em dois corpos, atrito com solo e atrito viscoso.

O simulador em modo completo, dinâmico, tem as mesmas opções que em modo estático mais as forças calculadas da interação entre objetos também são usadas para mover os objetos virtuais. Tem-se a opção de cancelar as forças ou os torques de cada objeto individualmente podendo fazer um objeto apenas girar, outro apenas transladar e um terceiro funcionar como estático. Também existe a opção de se desativar o sinal enviado para o haptic para poder se comparar a eficiência do sistema com e sem a sensação de força.

Sistema Físico

Para o sistema físico foi utilizado o mesmo sistema que no trabalho de Silva, Filipe Sacchi Desenvolvimento e controle de um manipulador robótico de alta potência com dois graus de liberdade 2006. O sistema consiste em quatro partes principais: o manipulador, o controlador de potência, a placa de IO e o computador.

O manipulador

O manipulador é um manipulador de dois graus de liberdade com duas juntas rotativas. Os dois elos são acionados por motores de corrente contínua e os motores são presos à base. Um motor está diretamente conectado ao elo um do manipulador enquanto o outro está conectado ao elo dois por meio de uma correia e um jogo de polias um pra um. O esquema do manipulador está na Figura 1.

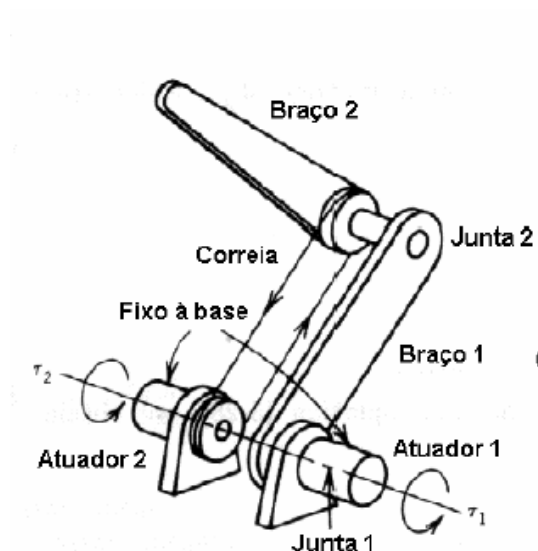


Figura 1 - Manipulador com correia

Para essa configuração as equações da cinemática direta do manipulador são dadas por:

$$\theta_1, \theta_2 \rightarrow x, y, \Phi$$

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2)$$

$$\Phi = \theta_2$$

$$\dot{x} = -l_1 \sin(\theta_1)\dot{\theta}_1 - l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_2$$

$$\dot{y} = l_1 \cos(\theta_1)\dot{\theta}_1 + l_2 \cos(\theta_2)\dot{\theta}_2$$

$$\dot{\Phi} = \dot{\theta}_2$$

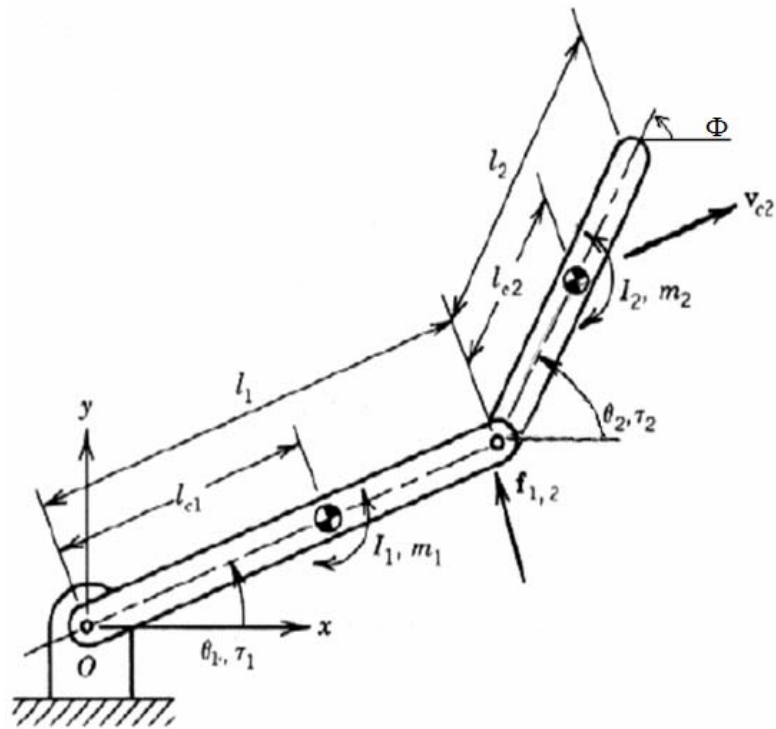


Figura 2 - Modelo de manipulador de dois graus de liberdade

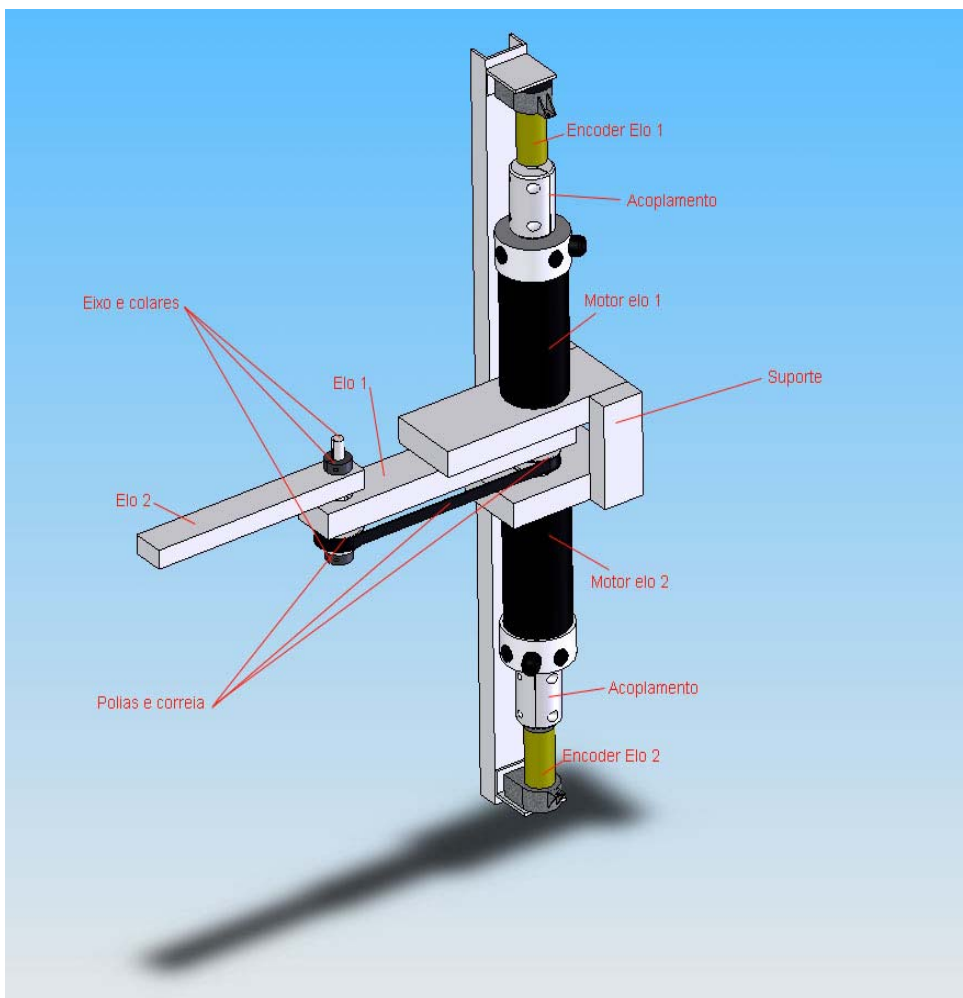


Figura 3 - Modelo do manipulador utilizado

O manipulador montado utiliza barras solidas de alumínio como elos, um par de polias do mesmo tamanho, uma correia, dois motores de corrente contínua de alta potencia, dois encoders e dois tacômetros arrumados de acordo com a Figura 3.

Os componentes presentes no manipulador são:

- Elo 1: barra de alumínio de 350mm x 2" x 1"
- distância entre os centros das polias: 244 mm
- Elo2: barra de alumínio de 255mm x 1 1/2" x 1"
- distância entre o centro da polia e sua extremidade 234 mm
- 2 x Polias: 28XL 037, $D_{\text{primitivo}}$: 44,6mm e 28 dentes com chaveta
- 1 x correia Schineider 248 XL
- 3 x rolamento: D_i : 7/8" D_e : 1 1/8"
- 1 x eixo de 1/2" com chaveta
- 2 x colares de 1/2"
- 2 x motores ativos Magmotors S28 – BP – 400X
- 2 x motores passivos usados como encoders com definição de 2048 pulsos/volta e tacômetro.
- 2 x acoplamentos para os motores e encoders
- Espaçadores de diversos tamanhos

E o manipular preso à bancada:

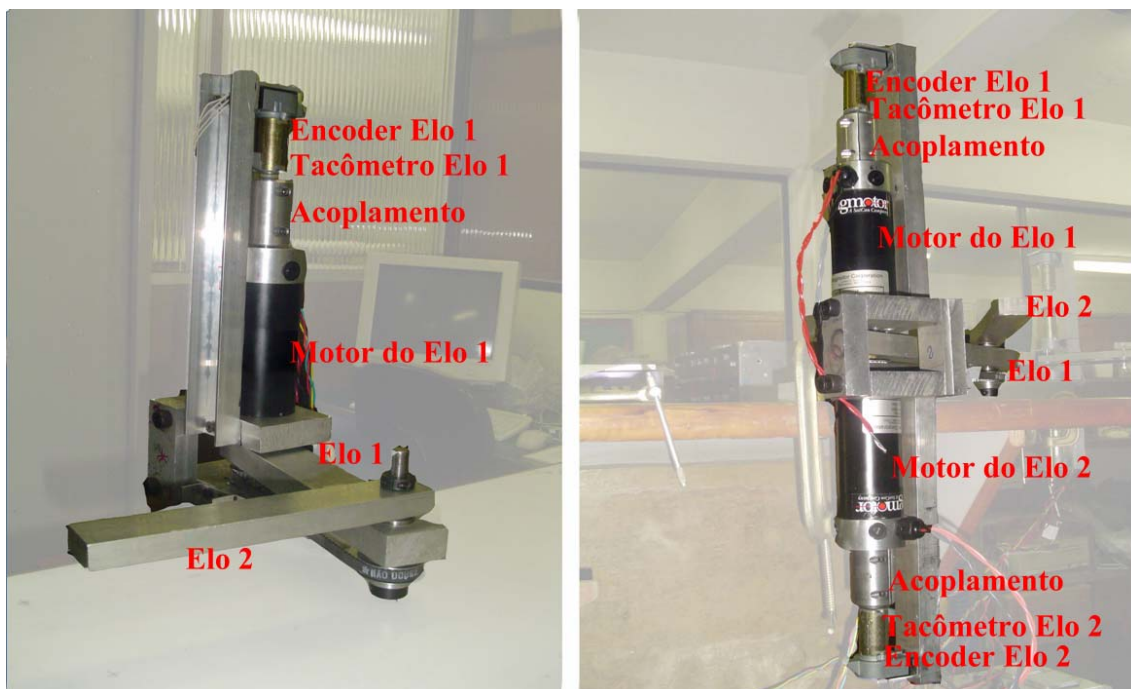


Figura 4 - Manipular utilizado

A interface de potência

A interface de potência utilizada é o amplificador de potência RoboteQ. Esse equipamento tem a capacidade de alimentar os dois motores DC (um em cada canal) com tensões de até 24V. Como entrada usa-se um sinal analógico variando de 0V a 5V e a saída é um sinal proporcional à entrada variando de -24V a 24V por PWM, de 0V a 2,5V são tensões negativas e de 2,5V a 5V tensões positivas, onde 2,5V na entrada equivale a zero volts na saída. O RoboteQ possui um sistema de proteção que só permite que ele seja ativado uma vez a entrada estando em 2,5V.

O RoboteQ exige uma alimentação por meio de bateria e a bateria utilizada é de Ni-Cd de 24V. A bateria e os motores são conectados de acordo com o diagrama na Figura 8.

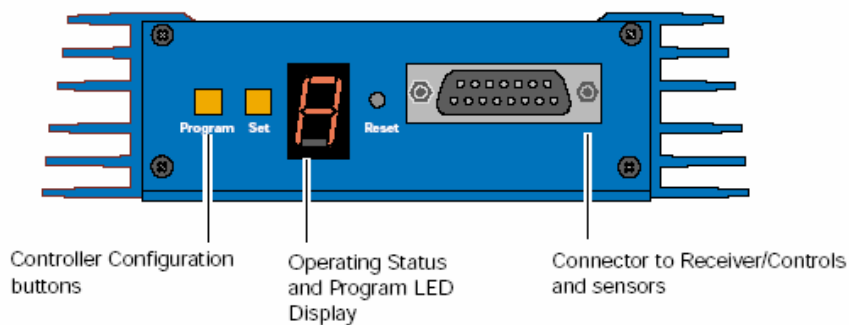


Figura 5 - Vista frontal RoboteQ

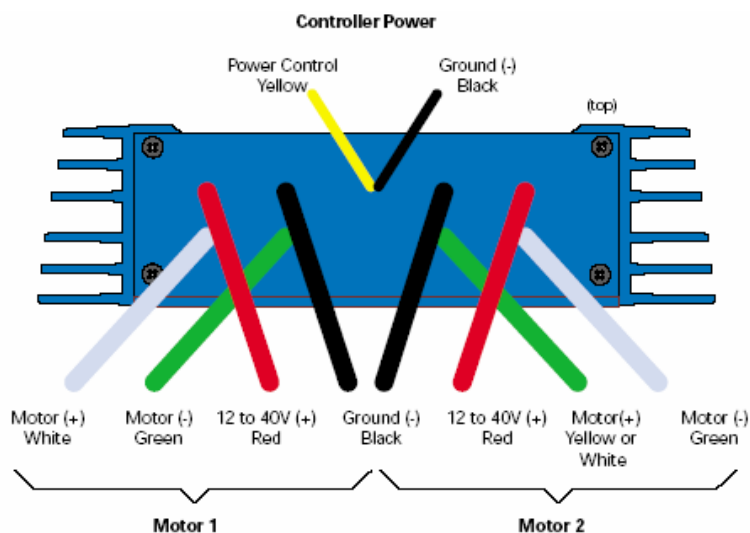


Figura 6 - Vista traseira do RoboteQ

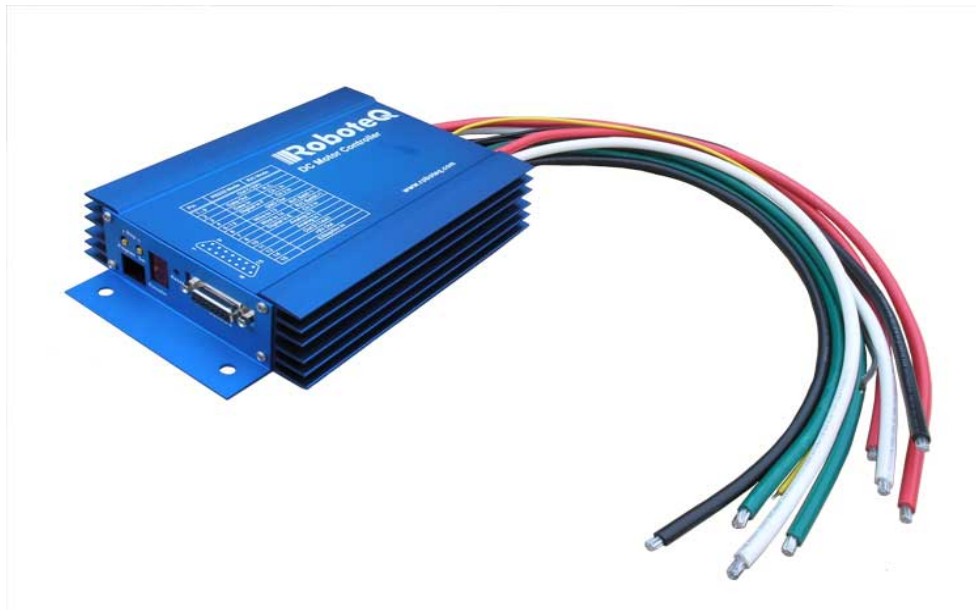


Figura 8 - Imagem do RoboteQ

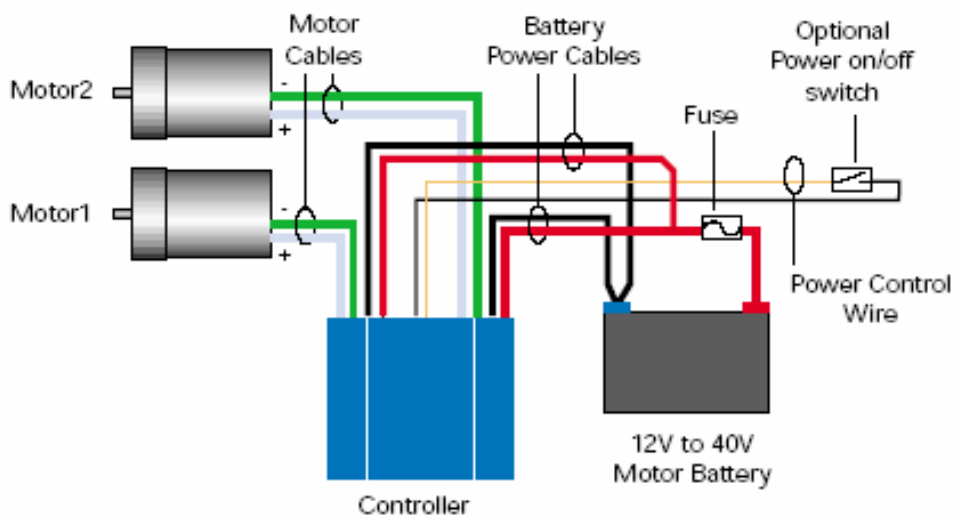


Figura 7 - Esquema de conexão do sistema de potência

A placa de IO

Para se fazer a comunicação entre os sensores e computador e o computador com a interface de potência foi utilizada uma placa de IO da ServoToGo que possui oito canais de entrada analógica, oito canais de saída analógica, oito canais de entrada para encoders e trinta e dois bits de entrada ou saída digital. A saída analógica da placa ServoToGo trabalha de -10V a 10V.

Para esse projeto foram utilizadas duas entradas analógicas para a entrada dos tacômetros, duas saídas analógicas para comunicação com interface de potência e duas entradas para encoders. A placa de IO da ServoToGo é espetada no computador que se comunica com a placa por meio de um driver que roda em LabVIEW em versões de Windows até o Windows 2000.



Figura 9 - Placa ServoToGo

Programa de simulação e controle

Modelagem

Sistema

Para se retratar o mundo real no computador existem duas grandes escolhas a serem feitas, como tratar o fato do mundo real ser contínuo e o simulador ser discreto e como fazer para que um objeto transmita energia para outro.

Esse modelo se funciona com base em objetos, cada corpo é um objeto contendo suas características físicas, geométricas, cinemáticas e padrões extras para o simulador. Os corpos têm uma força associada a eles a todo tempo e essas forças são transmitidas de acordo com a terceira lei de Nilton. Sendo assim o sistema não tem memória. A cada interação ele usa as forças atuais atuando nos objetos, ajusta as velocidades de acordo com as forças e as posições de acordo com a velocidade.

Está previsto para o simulador responder à forças geradas pela seguintes fontes: contato, atrito durante o contato, atrito linear, atrito viscoso, gravidade para baixo e gravidade para outro objeto.

Algumas medidas foram tomadas para melhorar o desempenho e a estabilidade do sistema. Para evitar vibrações foi implementado um corretivo que ao mudar uma velocidade de sentido ela é zerada, se a força persistir na próxima interação a velocidade termina sua mudança de sinal. Isso evita a vibração por atrito que aplicaria uma força contrária ao movimento um estante de tempo positiva e depois negativa. Também foi implantado outro corretivo para eliminar velocidades e forças residuais que estabelece que caso a velocidade ou a força seja menor que um certo limite, considera-se ela como zero.

Objeto

O objeto foi assumido como sendo um retângulo com as pontas arredondadas. Essa escolha se baseia, em parte, na interface gráfica usada no LabVIEW que possibilita o desenho de uma forma com altura, comprimento e ângulo variável. A forma arredondada das pontas do retângulo são meio círculos. Os parâmetros geométricos do objeto são L para o lado maior e r para metade do lado menor (que é o raio dos semicírculos do objeto).

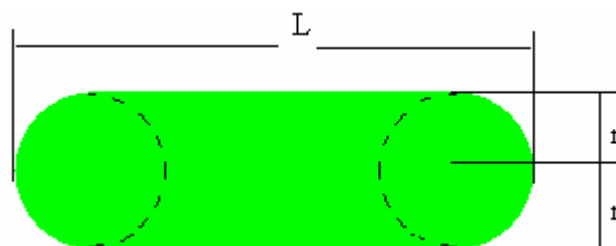


Figura 10 - Objeto virtual

Assim, um objeto concite em um ponto x,y que define o centro do objeto e um ângulo teta que vai da horizontal até a o eixo do lado maior.

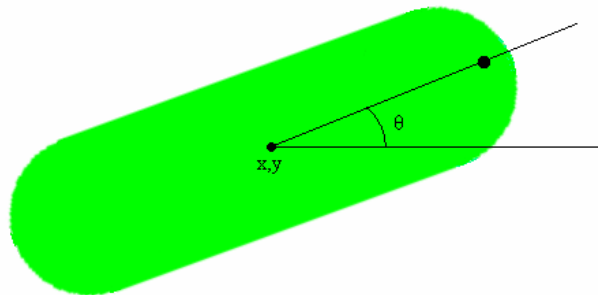


Figura 11 - Objeto virtual

Sendo assumido que todos os objetos seguem o mesmo padrão de forma, cada objeto é dividido em quatro partes para ser avaliado: o círculo esquerdo, o círculo direito, a superfície superior e superfície inferior.

Os objetos são definidos como um massa mola.

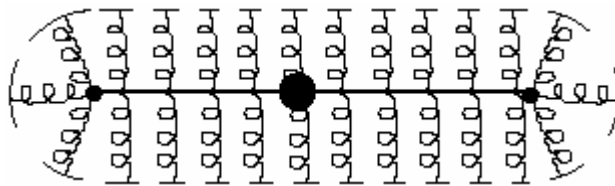


Figura 12 - Modelo do objeto virtual

Esse modelo possibilita a criação de barras compridas e discos com um bom desempenho porem, ele é falho na hora de se representar um bloco de forma quadrada ou qualquer outra forma diferente de quadrilátero regular. Para descrever outras formas é possível fazer a associação de objetos virtuais para se representar um único corpo.

Cada objeto possui alem de suas coordenadas x , y e θ e suas derivadas \dot{x} , \dot{y} e $\dot{\theta}$ o algumas características do material que o compõem e se o simulador deve aplicar forças ou torques neste objeto ou não.

Composição de um objeto:

0	-	x	Posição do centro do objeto no eixo X em metros
1	-	y	Posição do centro do objeto no eixo Y em metros
2	-	θ	Posição angular do objeto em radianos
3	-	\dot{x}	Velocidade do centro do objeto no eixo X em metros/segundo
4	-	\dot{y}	Velocidade do centro do objeto no eixo Y em metros/segundo
5	-	$\dot{\theta}$	Velocidade angular em relação ao centro do objeto em radianos/segundo
6	-	m	Massa do objeto em Kg
7	-	I_{zz}	Inércia de rotação do objeto em relação ao eixo Z
8	-	r	Raio do objeto em metros

9	-	k	Constante elástica do objeto em Newton/metro
10	-	μ_c	Coefficiente de atrito entre o objeto e outro objeto
11	-	μ_s	Coefficiente de atrito entre o objeto e o solo
12	-	b	Coefficiente de atrito entre o objeto e o meio
13	-	L	Lado maior do objeto em metros
14	-	Trans	Indica se o objeto sofre forças de translação, binário
15	-	Rot	Indica se o objeto sofre forças de rotação, binário

Forças

A força mais facilmente percebível e mais importante para um haptic é a força de colisão entre dois corpos, sendo importante a direção e sentido da força e a proporção entre as diferentes forças, não sendo tão importante o valor absoluto da mesma.

No caso de se usar as forças para se mover objetos virtuais sua magnitude se torna importante pois é ela que vai determinar a velocidade que o objeto recebendo a força terá.

Assim é importante para o sistema calcular corretamente as forças e que o manipulador exerça uma força proporcional a calculada independentemente de sua configuração atual.

Haptic

A comunicação de entrada e saída é feita com o manipulador usado-se das seguintes transformações:

Entrada:

l_1	-	Comprimento do elo 1 do manipulador
l_2	-	Comprimento do elo 2 do manipulador
r_2	-	Raio do elo 2 do manipulador

$$\theta_1 = - \text{Encoder1} \cdot \text{PI}/2 / 509$$

$$\theta_2 = - \text{Encoder2} \cdot \text{PI}/2 / 509$$

$$X_e = 0,1 + l_1 \cdot \cos \theta_1 + (l_2 - r_2) \cdot \cos \theta_2$$

$$Y_e = 0,1 + l_1 \cdot \sin \theta_1 + (l_2 - r_2) \cdot \sin \theta_2$$

$$Xl_1 = 0,1 + l_1/2 \cdot \cos \theta_1$$

$$Yl_1 = 0,1 + l_1/2 \cdot \sin \theta_1$$

$$Xl_2 = 0,1 + l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2/2 \cdot \cos \theta_2$$

$$Yl_2 = 0,1 + l_1 \cdot \sin \theta_1 + l_2/2 \cdot \sin \theta_2$$

$$\dot{\theta}_1 = (\text{Tacômetro1} + 1) / 8$$

$$\dot{\theta}_2 = (\text{Tacômetro2} + 1) / 8$$

$$\dot{X}_e = -l_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - l_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_e &= -l_1 \cdot \text{sen } \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - l_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 \\ \dot{X}l_1 &= -l_1/2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \\ \dot{Y}l_1 &= -l_1/2 \cdot \text{sen } \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \\ \dot{X}l_2 &= -l_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - l_2/2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 \\ \dot{Y}l_2 &= -l_1 \cdot \text{sen } \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - l_2/2 \cdot \text{sen } \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

Saída:

V_1	-	Voltagem desejada na saída 1
V_2	-	Voltagem desejada na saída 2
V_{s1}	-	Valor enviado para saída 1
V_{s2}	-	Valor enviado para saída 2
F_{\max}	-	Força máxima, 100% em Niltons

$$\begin{aligned} V_1 &= (l_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot F_y + l_2 \cdot \text{sen } \theta_1 \cdot F_x) \cdot 2,5/F_{\max} + 2,5 \\ V_2 &= (l_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot F_y + l_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \cdot F_x) \cdot 2,5/F_{\max} + 2,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{s1} &= V_1 \cdot 414,8 + 10 \\ V_{s2} &= V_2 \cdot 414,8 \end{aligned}$$

Funções e Equações

Colisão

A primeira função a ser analisada é colisão entre dois objetos. Inicialmente detecta-se se existe sobreposição dos objetos, caso exista calcula-se o modulo da força, o ângulo de aplicação e o torque no centro de massa.

Para tal o objeto é dividido em quatro partes e suas partes são testadas individualmente com todas as partes de todos os outros objetos do sistema. Por esse motivo as paredes do sistema são tratadas diferentemente, não como um objeto mas apenas como uma das quatro partes.

Ao se testar um objeto contra a parede testa-se somente os dois círculos laterais, pois qualquer inserção de um objeto em outro se dá pelas pontas. Fazendo isso se economiza comparações.

O modulo da força de colisão no objeto 1 é calculada de acordo com a forma:

Entre duas partes circulares, a força é a série das molas vezes a incursão de um circulo no outro.

$$|F| = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} (\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} - (r_1 + r_2))$$

Entre um circulo e um lado de uma barra ou uma parede, a força a série das molas vezes a projecção da incursão no eixo perpendicular ao lado da barra ou parede.

$$|F| = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} (|\sin(\theta_1) \cdot (x_2 - x_1) + \cos(\theta_1) \cdot (y_2 - y_1)| - (r_1 + r_2)) \cdot \text{sign}(\sin(\theta_1) \cdot (x_2 - x_1) + \cos(\theta_1) \cdot (y_2 - y_1))$$

onde o raio da parede é zero

O torque gerado pela colisão é o torque gerado pelo braço de alavanca entre o ponto onde o objeto está colidindo e centro de gravidade que é o módulo da força vezes a projeção da distancia entre o ponto de contato e o centro de massa do objeto 1 paralelamente ao objeto 1. Sabendo-se que apenas círculos colidem com superfícies e seu centro sempre está perpendicular ao ponto do impacto faz-se a projeção da distância até o centro do objeto 2 e não até o ponto de colisão.

$$\tau = |F| \cdot (\cos(\theta_1) \cdot (x_2 - x_1) - \sin(\theta_1) \cdot (y_2 - y_1))$$

Atrito de Colisão

Ao se chocarem objetos podem gerar atrito, isso possibilita que se possa girar um disco ou sentir a força gerada pelo contato com o disco girando. Ou ainda mesmo fazer um disco girar e se deslocar sobre um outro objeto.

O modulo do atrito de colisão é dado pela força normal à superfície de impacto multiplicada pelo menor μ_c dentre os dois objetos colidindo.

$$|Fat_c| = |F| \cdot \mu_c$$

O torque gerado pelo atrito de colisão é dado pela força de atrito multiplicada pelo braço de alavanca. r_1 para o corpo 1 sendo uma lateral e $L-r$ para os outros casos.

$$\tau = |Fat_c| \cdot r_1$$

$$\tau = |Fat_c| \cdot (L - r)$$

Atrito com o solo

Ao se mover o objeto tem um atrito proporcional ao seu peso e uma constante com direção igual a da velocidade e sentido oposto.

$$|Fat_s| = 10 \cdot m \cdot \mu_s$$

Atrito com o meio

Ao se mover um objeto sofre um atrito viscoso aplicado pelo meio. Esta força é uma constante vezes a velocidade do objeto. Essa constante depende tanto do meio (b) quanto das propriedades de interação do próprio objeto com o meio (μ_b).

$$\vec{F}at_b = \vec{X} \cdot b \cdot \mu_b$$

Gravidade para baixo

Normalmente o sistema é considerado estar na horizontal, assim como o haptic sendo utilizado. Caso não se use o haptic pode-se gerar uma gravidade para baixo onde a força é dada por uma constante de gravidade vezes a massa do objeto. É aconselhável se zerar o valor do atrito com o solo nesse caso, não havendo mais solo.

$$F = m.g$$

Gravidade entre objetos

Ao se usar um sistema com um haptic é comum se ter tarefas de se pegar um objeto ou ficar a uma distancia determinada dele e muitas vezes (como em um ROV) o alvo ou a base do atuador se move. Para auxiliar esse tipo de operação pode-se criar um objeto com gravidade, funcionando de modo que quão mais perto de seu perímetro externo maior é a força de atração em relação ao seu centro. Considerando apenas a extremidade do haptic como um disco e o alvo como outro disco e sendo F_{max_g} a força de atração na superfície do alvo, caso o haptic esteja fora do alvo a força de atração é a força máxima vezes a soma dos raios ao quadrado sobre a distancia entre os centros de massa ao quadrado. Caso o haptic esteja dentro do alvo a força de atração é dada pela força máxima vezes a distância entre os centros de massa dividido pela soma dos raios.

$$F_g = \frac{F_{max_g} \cdot (r_1 + r_2)^2}{|X_2 - X_1|^2}$$

$$F_g = \frac{F_{max_g} \cdot |X_2 - X_1|}{r_1 + r_2}$$

Reestruturação dos objetos

A cada interação do programa as forças são calculadas de acordo com as equações acima. Com o valor dessas forças atualiza-se as velocidades e com as velocidades se atualiza a posição dos objetos. Então os sensores são medidos e é atualizada a posição e velocidade dos objetos que representam o haptic no sistema e as forças que foram calculadas para os objetos que representam o haptic no sistema são passadas para os atuadores.

Antes de esse processo ocorrer as medidas para se melhorar a estabilidade do sistema descritas na modelagem são aplicadas assim como a eliminação das forças e torques dos objetos com o campo Trans (translada) e Rot (gira) desativados (com valor 0).

O período da interação é escolhido pelo usuário, mas nem sempre é possível para o sistema rodar no tempo desejado. Para isso existe um contador de períodos passados desde a última interação que é multiplicado pelo período escolhido pelo usuário resultando no tempo real que levou da ultima interação até o presente momento.

Manter essa relação com o tempo real é importante quando se está com uma interface com o mundo real, seja recebendo informações dele ou enviando informações. Isso porque ao se interagir com o mundo real um objeto que recebe uma força por determinado período de tempo desenvolve uma velocidade proporcional ao período de tempo em que a força foi aplicada, resultando em uma velocidade diferente da desejada. O inverso também ocorre, ao se entrar com a posição do manipulador e movê-lo com uma velocidade desejada ela não seria retratada corretamente no mundo virtual e poderia estar se movendo mais rápido que um objeto virtual com menor velocidade, outro grande problema seria a interação de um objeto em outro pois sua velocidade estará diferente da desejada, gerando resultados diferentes dos esperados.

Ao não se usar o haptic, no entanto, é possível reduzir o período de interação para qualquer valor desejado, onde a única coisa a ser afetada será que a simulação não estará sendo representada em tempo real, mas os valores obtidos ao se capturar as velocidades e forças do sistema estarão corretas.

A atualização das velocidades em x , y e θ são feitas de maneira semelhante ao como exemplo em x :

$$\dot{x} = \dot{x} + \frac{F_x}{m} T$$

Para atualizar as posições é usada a média entre a velocidade no instante anterior e as calculadas como exemplo em x :

$$x = x + \frac{\dot{x} + \dot{x}_{-1}}{2} T$$

PS. Os sinais das forças e dos torques variam de acordo com a combinação de quais partes estão sendo comparadas.

Importação de imagem

Para se facilitar o posicionamento de objetos no ambiente virtual ou se melhorar o desempenho que uma simulação é possível se importar uma imagem .bmp que ficará no fundo da área de display. Assim é possível se posicionar objetos reproduzindo certos aspectos de onde foi tirada a imagem ou ainda, para uma tele-operação pode-se usar desse recurso para se isolar áreas onde não se deseja entrar ou encostar assim como uma ajuda para se posicionar um objeto com gravidade.

Captura e exportação de dados

É possível se capturar a posição, velocidade e força dos objetos durante uma operação ou simulação para se fazer uma análise posterior nos dados e determinar o desempenho da operação.

Criador de objetos

Cada objeto é definido por dezesseis parâmetros e podem ser criados manualmente no programa principal. Porém, existem restrições do programa (r tem que ser menor que L) e físicas (relação entre I_{zz} e m) que devem ser respeitadas além de ser difícil se posicionar um objeto no local desejado.

O criador de objetos possibilita o fácil posicionamento de objetos assim como escolha de cor ângulo e tamanho. Também é possível se escolher entre três configurações que alteram a massa, a inércia e a elasticidade do objeto.

Nesse criador de objetos existem dois tipos de objetos os retângulos e os círculos. O fato de se diferenciar os dois tipos, mesmo na verdade só exista um tipo, é que quando o objeto é um círculo perfeito ele é tratado de modo diferente pelo programa, como ao invés de ser dividido em quatro corpos ele é apenas um.

Simulações

Usando-se do simulador alguns experimentos foram feitos testando as funcionalidades do programa e comparados com o resultado esperado.

Colisão simples

Dois corpos circulares iguais são adicionados ao sistema, objeto 1 em verde e objeto 2 em azul. Eles são dispostos de modo que estejam no mesmo y. Apenas a força de colisão é acionada, não havendo perda de energia no sistema. O objeto 1 é lançado com uma velocidade de 1 m/s em direção ao objeto 2 que está inicialmente em repouso.

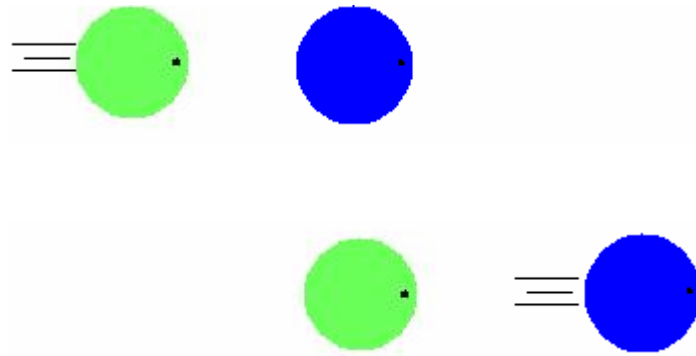


Figura 13 - Colisão antes e depois

De acordo com a teoria de conservação de momentos, sendo o choque totalmente elástico (são dois sistemas massa-mola sem atrito nem amortecedor) tem-se que:

$$m_1 \cdot \dot{x}_{1a} + m_2 \cdot \dot{x}_{2a} = m_1 \cdot \dot{x}_{1d} + m_2 \cdot \dot{x}_{2d}$$

sendo $m_1 = m_2 = m$

$$\dot{x}_{1a} + \dot{x}_{2a} = \dot{x}_{1d} + \dot{x}_{2d}$$

aplicando para $\dot{x}_{1a} = 1$ e $\dot{x}_{2a} = 0$

$$\dot{x}_{1d} + \dot{x}_{2d} = 1$$

para choque totalmente elástico tem-se máxima transferência de energia, então:

$$\dot{x}_{1d} = 0$$

$$\dot{x}_{2d} = 1$$

O resultado da simulação não só apresenta os valores iniciais e finais como descreve o impacto. Foi usado objetos moles, com $k=500\text{N/m}$ massa = 1,28Kg e período de 0,1ms.

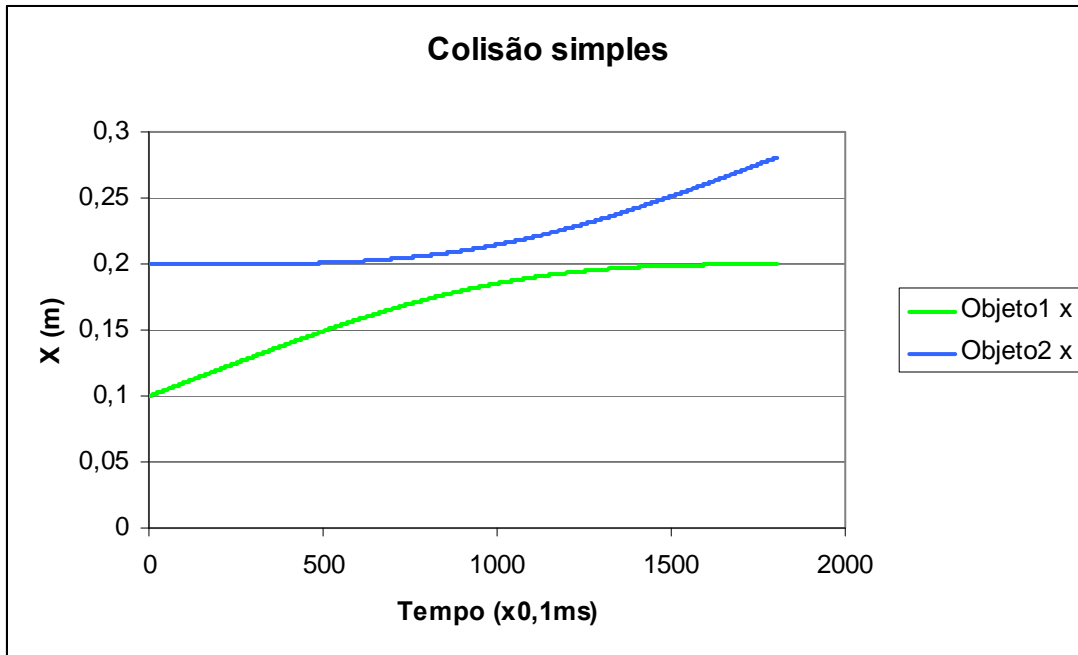


Gráfico 1- Colisão linear

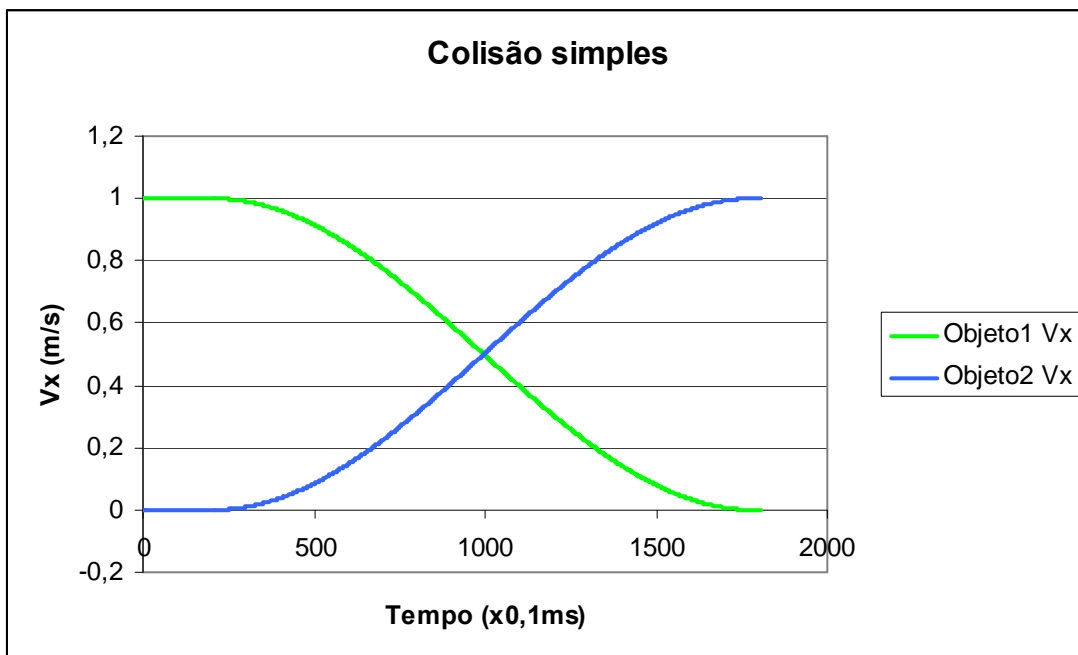


Gráfico 2 - Colisão linear

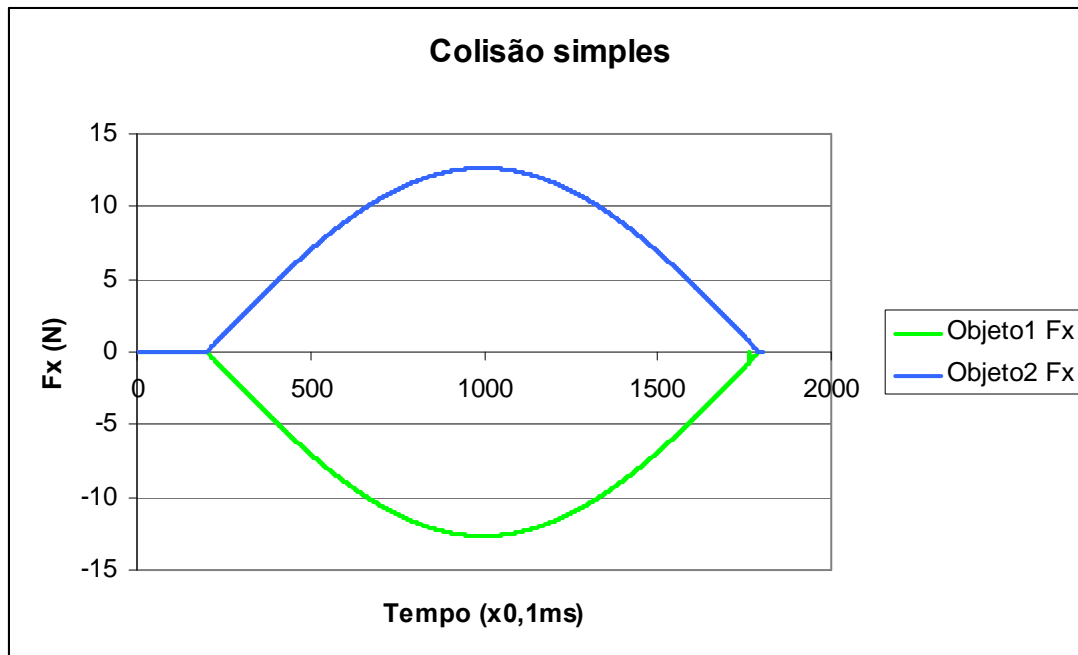


Gráfico 3 - Colisão linear

As velocidades de saída encontradas trazem um erro de discretização, onde ao terminar a colisão a força ainda é aplicada até o termino do período.

$$\dot{x}_{1d} = -0,00077$$

$$\dot{x}_{2d} = 1,00077$$

O somatório de momentos lineares ainda é verdadeiro apesar dos valores das velocidades não serem o esperado. Ao se aplicar atrito ao sistema esse erro passa a não ser mais importante devido ao seu pequeno módulo. O maior problema de haver um erro na colisão para um modelo com haptic é que o objeto deveria estar parado e nesse caso estará se movendo e ao longo do tempo pode vir a prejudicar uma simulação. O atrito faria com que esse objeto obtivesse velocidade zero, resolvendo esse problema. O uso de um período menor ou velocidades menores reduzem linearmente o valor desse erro.

Do gráfico de força, como era de se esperar a força aumenta conforme um objeto se aproxima do outro, atinge um máximo no mesmo instante que as velocidades se igualam e diminui seguindo o mesmo padrão se subida, sendo o máximo no ponto central do impacto.

A velocidade é claramente transferida do objeto 1 para o objeto 2 como mostra o gráfico da velocidade.

Rotação

Dois corpos circulares iguais foram adicionados ao sistema. Os objetos foram posicionados de modo a terem uma pequena interface de contato e foram presos de modo que não transladam. Apenas a força de atrito entre objetos foi ativada, não havendo perda de energia. O objeto 2 está inicialmente girando com velocidade de 1 rad/s.

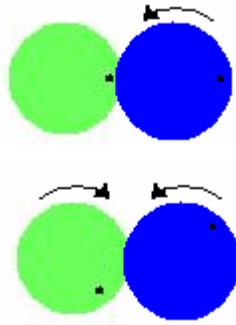


Figura 14 - Rotação inicial e final

De acordo com a teoria, se não for considerado perdas de energia durante o atrito entre os dois corpos, apenas a transferência de energia de um para o outro a velocidade final deve ser igual para os dois objetos com sentidos opostos. Sendo o objeto 1 igual ao objeto 2, ou seja o mesmo raio e momento de inércia. Com isso tem-se a velocidade final de ambos iguais e obedecendo a conservação de momento angular:

$$I_1 \cdot \dot{\theta}_{1a} + I_2 \cdot \dot{\theta}_{2a} = I_1 \cdot \dot{\theta}_{1d} + I_2 \cdot \dot{\theta}_{2d}$$

sendo $I_1 = I_2 = I$

$$\dot{\theta}_{1a} + \dot{\theta}_{2a} = \dot{\theta}_{1d} + \dot{\theta}_{2d}$$

aplicando para $\dot{\theta}_{1a} = 0$ e $\dot{\theta}_{2a} = 1$

$$\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_{2d} = -1$$

para choque totalmente elástico tem-se máxima transferência de energia, então:

$$\dot{\theta}_{1d} = -0,5$$

$$\dot{\theta}_{2d} = 0,5$$

O resultado da simulação usando-se $I_{zz} = 0.001024$ distância entre os centros de 0,06m e raios de 0,04m e o coeficiente de atrito entre objetos de 0,5.

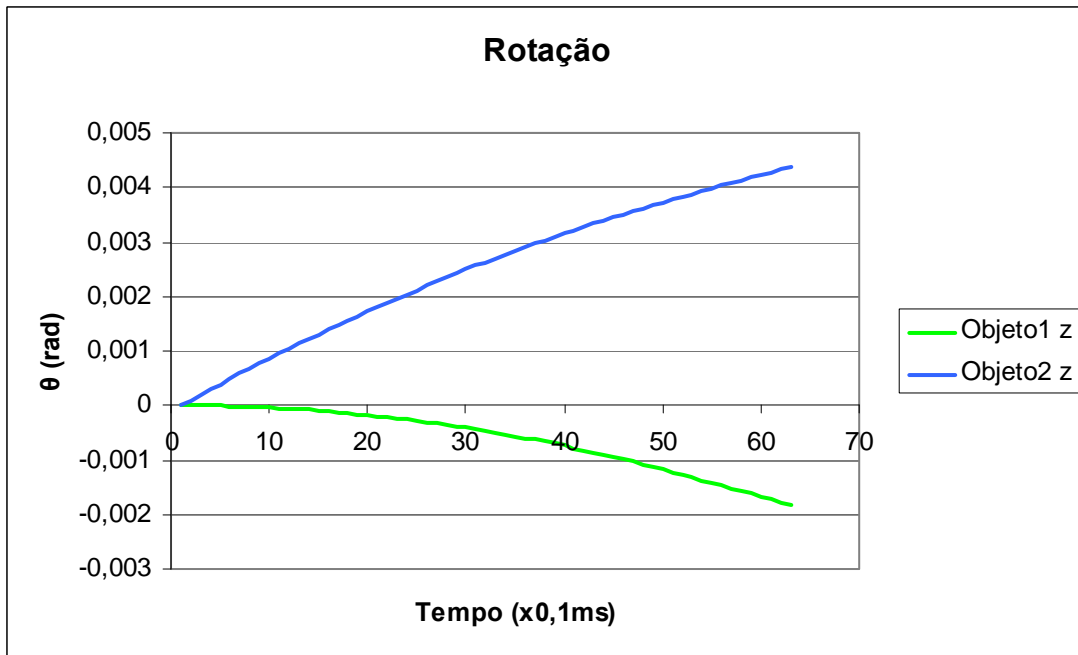


Gráfico 4 - Rotação

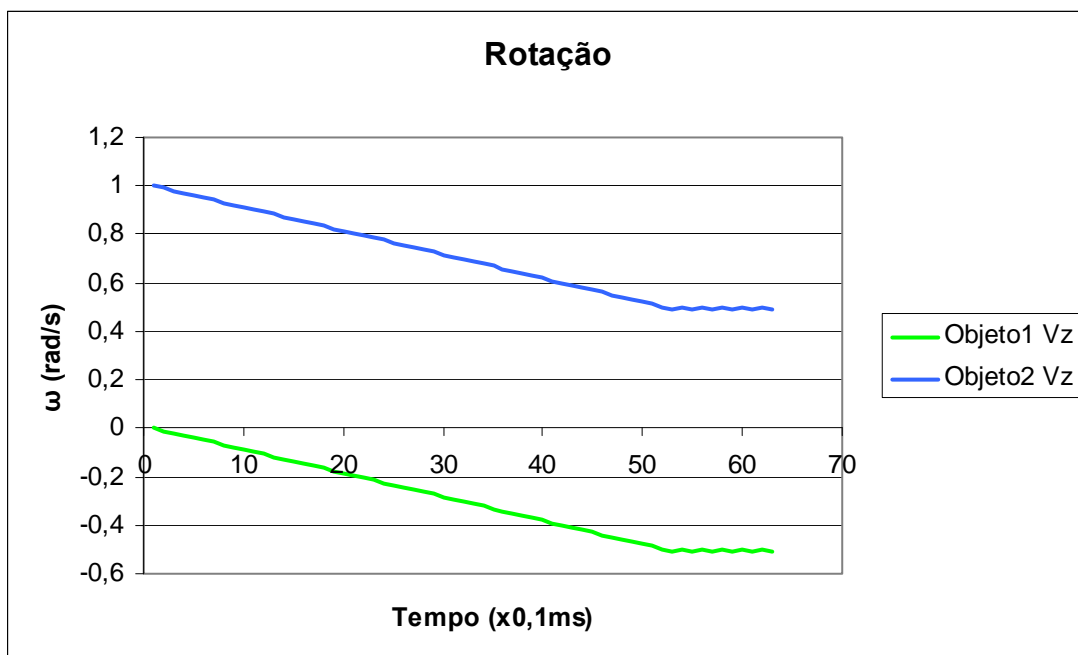


Gráfico 5 - Rotação

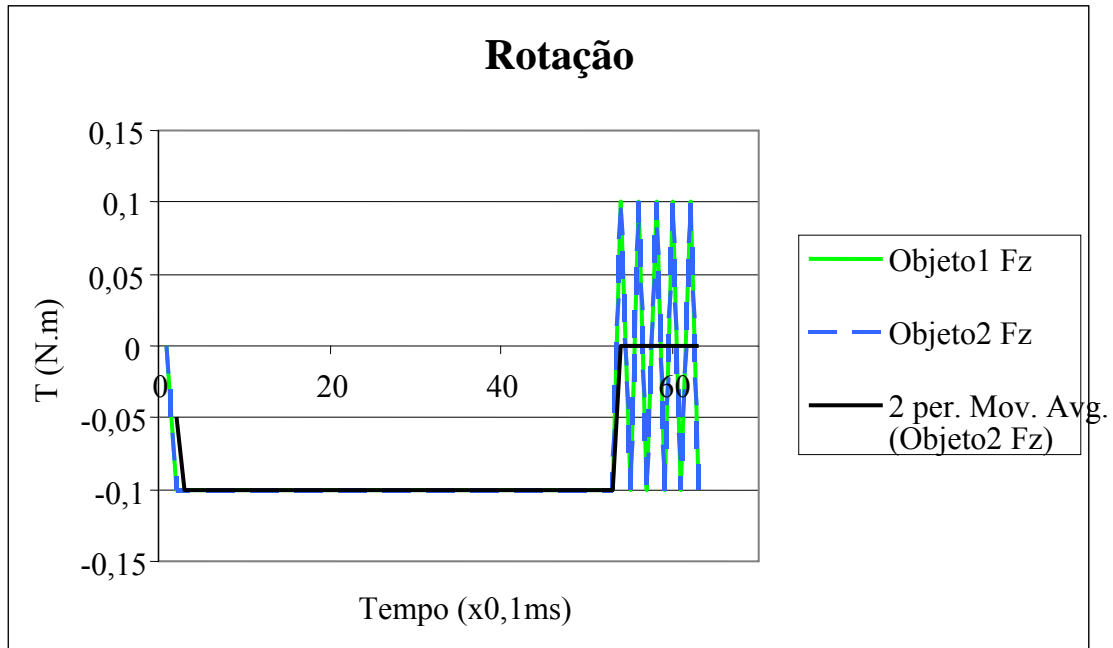


Gráfico 6 - Rotação

Ao se simular o sistema foi percebido que existe um ruído ao se alcançar a velocidade esperada. Isso ocorre devido à discretização. Quando a velocidade do objeto 1 é maior que a do objeto 2 é gerado um torque positivo de valor da força de contato multiplicado pela constante de atrito, que é constante. Próximo ao valor estável ele passa do valor da velocidade, no próximo instante de tempo ele inverte o sinal do torque volta para uma velocidade menor, gerando uma oscilação na força e na velocidade. Sendo na posição aplicada a media da velocidade calculada com a velocidade anterior a posição não está sofrendo oscilação. Ao se fazer um filtro passa baixa na força com um media móvel do MS Excel com janela de 2 observa-se que, na media a força é nula quando ambos objetos tem a mesma velocidade.

Os valores em que a velocidade está oscilando entorno são:

$$\dot{\theta}_{1d} = -0,49805 \text{ e } -0,50781$$

$$\dot{\theta}_{2d} = 0,501953 \text{ e } 0,492188$$

onde, na média

$$\dot{\theta}_{1d} = -0,50293$$

$$\dot{\theta}_{2d} = 0,49707$$

onde a soma é 1, mantendo a conservação de momento angular.

Atrito com o solo

Um objeto é adicionado ao sistema. O atrito gerado por um atrito com o solo, do tipo normal vezes constante é ativado. O objeto é impulsionado inicialmente por uma velocidade 1 m/s e possui um coeficiente de atrito com o solo de 0,3.

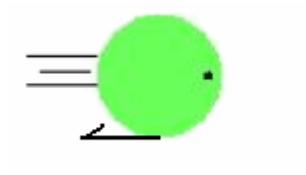


Figura 15 - Atrito com o solo

Pela teoria:

$$Fat = N \cdot \mu_s$$

$$Fat = m \cdot g \cdot \mu_s$$

Assumindo a gravidade normal de 10m/s^2

$$Fat = 3,84\text{N}$$

A resposta do simulador:



Gráfico 7 - Atrito com o solo



Gráfico 8 - Atrito com o solo



Gráfico 9 - Atrito com o solo

Os resultados ocorreram como esperado. Foi aplicada uma força no sentido contrario ao movimento de $3,84\text{N}$ e objeto perde velocidade até parar. Pode ser observado que nesse caso não ocorreu a oscilação em torno do ponto de equilíbrio como ocorrido na rotação. Isso se deve ao fato de um corretivo extra para reduzir oscilações que sempre que um objeto muda alguma velocidade de sentido a velocidade é forçada a ser zero e a força associada a ela também é zerada. Caso contrario o objeto teria sempre uma vibração e nunca pararia.

Atrito viscoso

Um objeto é adicionado ao sistema. O atrito gerado por um atrito com o meio, do tipo viscoso, velocidade vezes constante é ativado. O objeto é impulsionado inicialmente por uma velocidade 1 m/s e possui um coeficiente de atrito com o meio de 5 e o meio tem um fator de 1 .

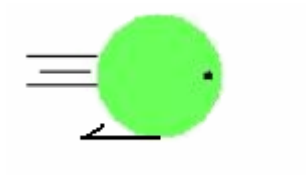


Figura 16 - Atrito viscoso

Pela teoria:

$$F_{at} = V \cdot \mu_b \cdot b$$

Como a velocidade varia com o tempo o valor da F_{at} não é constante mas seu valor inicial é:

$$F_{at_i} = 5N$$

Para a resposta do simulador abaixo foi usado um período diferente, nesse caso foi usado um período de 10ms:

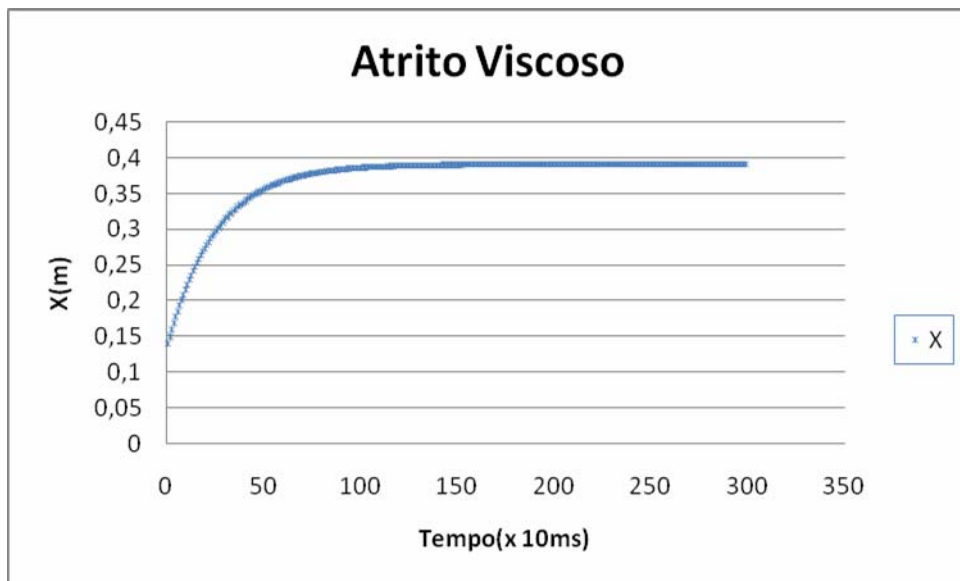


Gráfico 10 - Atrito Viscoso

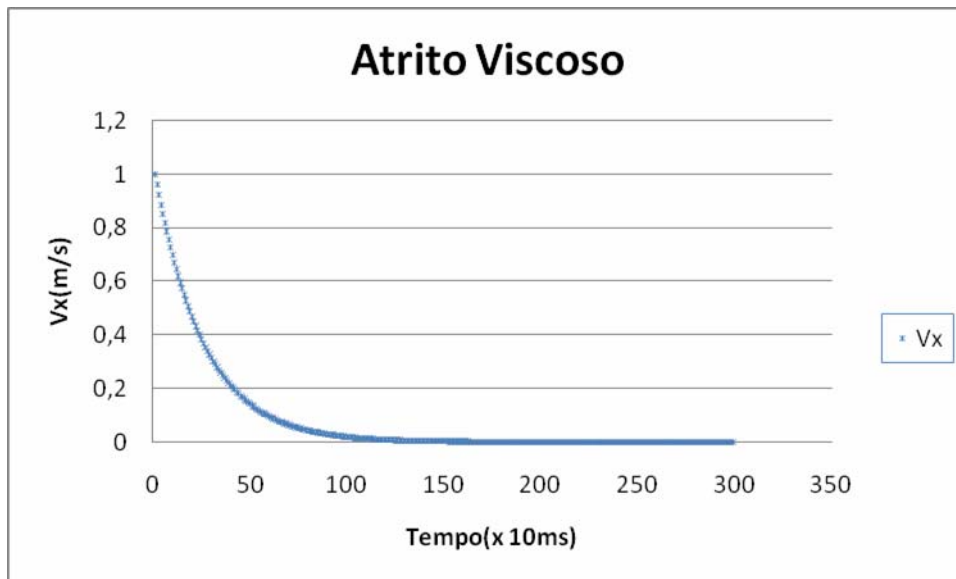


Gráfico 12 - Atrito viscoso

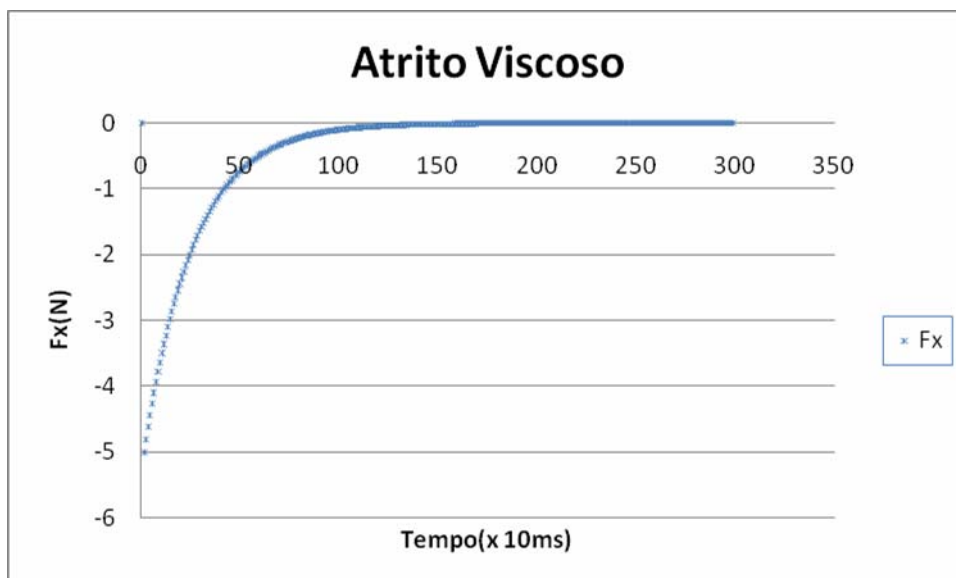


Gráfico 11- Atrito viscoso

Como esperado a velocidade diminui exponencialmente e nunca atinge o zero. O valor inicial da força é de 5N no sentido oposto ao movimento.

Gravidade para baixo

Um objeto é adicionado ao sistema. Para se considerar a gravidade apontando para baixo, na direção de Y, é preciso se mudar o referencial, normalmente se considera como se o plano X, Y fosse um plano horizontal. Essa mudança faz com que o atrito com o solo não faça mais sentido físico, sendo aconselhado desativar esta grandeza quando usar a gravidade. O objeto é inicialmente solto com velocidade igual a zero, a gravidade aplicada é 10m/s^2 .



Figura 17 - Gravidade para baixo

Pela teoria:

$$F = m.g$$

$$F = 12,8N$$

A simulação é feita com um período de 1ms:

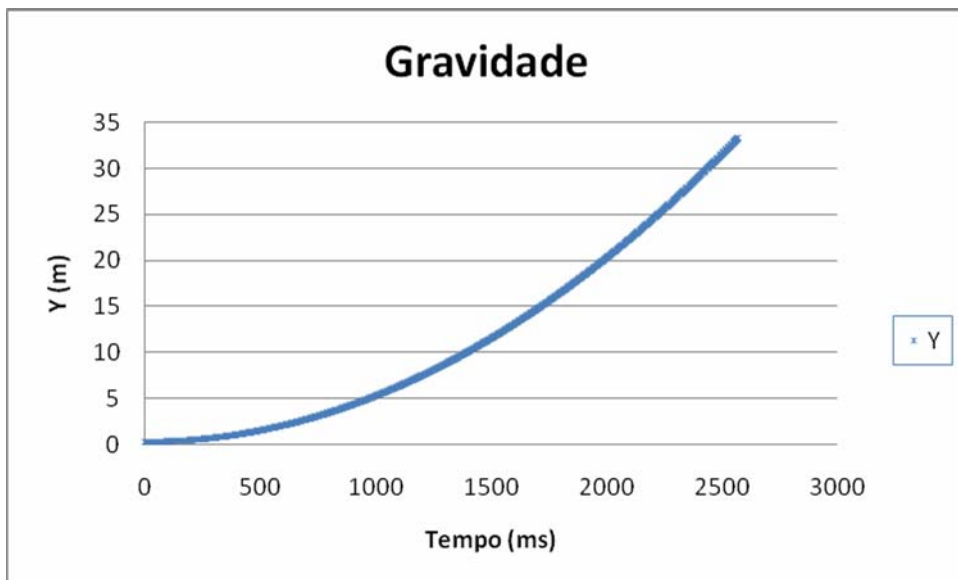


Gráfico 13 - Gravidade

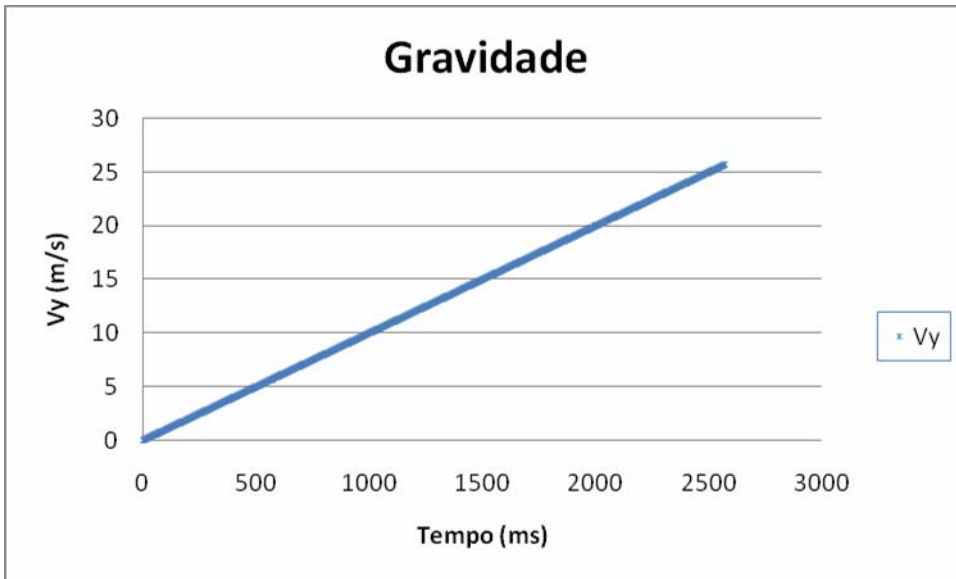


Gráfico 14 - Gravidade

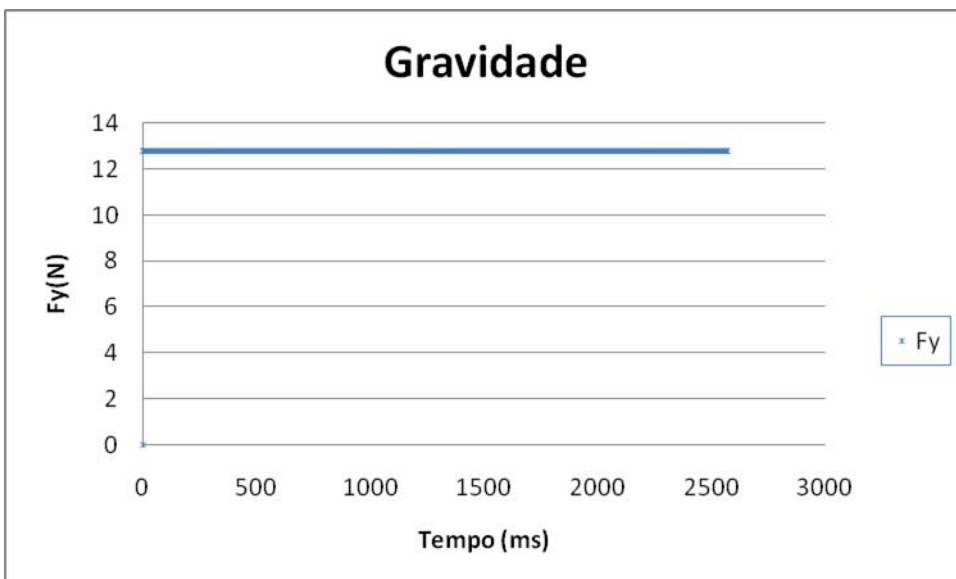


Gráfico 15 - Gravidade

O resultado segue as expectativas, tendo a força constante o objeto ganha velocidade linearmente. O valor encontrado para a força é 12,8N.

Sistema experimental

Este capítulo contém um guia passo a passo de como usar o sistema, incluindo fisicamente onde conectar cada equipamento e como usar cada um dos recursos dos softwares.

Fiação

As conexões que devem ser feitas são as dos motores, encoders, tacômetros e do RoboteQ.

Com o computador desligado e o RoboteQ sem bateria inicia-se o procedimento pela conexão dos motores. O motor do elo 1 deve ser conectado no par verde / branco do motor um do RoboteQ mostrado na Figura 6 o vermelho do motor deve ser ligado ao verde do RoboteQ e o preto do motor ao branco do RoboteQ. O motor do elo 2 deve ser conectado no par verde / branco do motor dois do RoboteQ, o vermelho do motor deve ser ligado ao branco do RoboteQ e o preto do motor ao branco do RoboteQ. Os motores são conectados de modo invertidos pois os motores estão posicionados de modo invertido, conectando dessa maneira tem-se a simplificação do toque positivo dos dois motores aplicarem força no mesmo sentido.

Em seguida conecta-se o RoboteQ à ServoToGo que deve estar conectada a uma placa de fenolite 4 – 7. o pino 1 da placa de fenolite deve ser conectada ao pino 5 do RoboteQ que é o terra, o pino 5 deve ser conectado ao pino 11 do RoboteQ sendo o sinal do elo 1 e o pino 8 deve ser conectado ao pino 10 do RoboteQ sendo o sinal do elo 2.

Conecta-se os encoders de modo que o do elo 1 deve ser conectado aos pinos 13, 14, 17 e 49. As cores dos fios do encoder usado foram respectivamente marrom, azul, amarelo e vermelho. O encoder do elo 2 deve ser conectado aos pinos 23, 25, 26, 50. As cores dos fios do encoder usado foram respectivamente azul, marrom, amarelo e vermelho.

Conecta-se os tacômetros na entrada analógica da ServoToGo de modo que o tacômetro do elo 1 é conectado nos pinos 1 e 2 e os do elo dois nos pinos 3 e 4. As cores dos fios usados no laboratório são respectivamente vermelho e azul.

Após conectar os fios conecta-se uma bateria de 24V de grande capacidade de corrente ao RoboteQ.

O procedimento para se usar o sistema é primeiro ligar o computador, executar o software da ServoToGo, iniciar algum programa que use o manipulador e aí sim, ligar o RoboteQ. Quando terminar de usar o sistema é muito importante se desligar o RoboteQ antes de se desligar o computador. Uma vez desligado o computador sua tensão de saída é de 0V, e para o RoboteQ isso significa 100% de força para o lado negativo podendo causar danos ao RoboteQ, ao manipulador ou a qualquer objeto próximo.

Softwares

Foram criadas três versões de software usando-se da mesma base de simulação. O primeiro é um simulador onde é possível inserir objetos e fazê-los interagir entre si. O segundo programa é o programa completo onde se inclui o haptic no sistema. O terceiro programa é um programa para demonstração onde foi implementada uma versão simplificada do jogo de air hockey sem opção de edição ou criação de objetos novos.

Simulador

O simulador é um arquivo chamado simulador.vi. Em sua tela inicial se tem 4 partes principais, a tab de valores na parte superior da tela, os ativadores das forças do lado esquerdo, a janela de visualização no centro e os botões de ações e chamadas do lado direito.

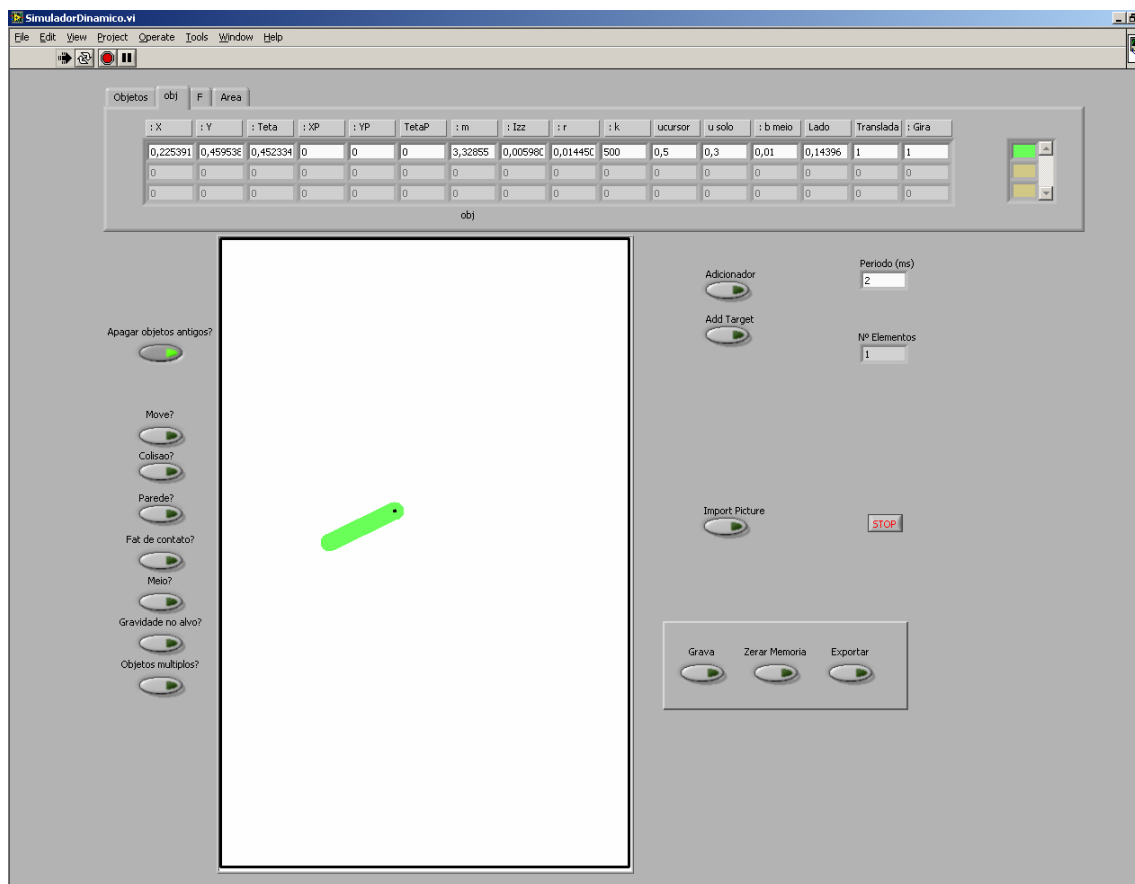


Figura 18 - Tela do simulador

Na tab de valores tem-se quatro opções. A primeira é um modo se adicionar um objeto novo ao sistema manualmente. A segunda é um modo onde se pode acompanhar e modificar todos os parâmetros dos objetos do sistema. A terceira indica as forças sofridas pelos objetos do sistema. A quarta contém informações sobre o ambiente em que a simulação está ocorrendo.

Para se usar o simulador deve-se inicialmente adicionar objetos. Isso pode ser feito de duas maneiras, pela tab da pagina principal ou se clicando do lado direito em adicionar objetos.

Clicando em adicionar objetos uma nova janela é aberta onde é possível se posicionar o objeto no sistema movendo as barras acima e ao lado da janela de visualização. Pode-se escolher em incluir um objeto retângulo ou circular. Se for um objeto retangular ajusta-se o tamanho deste por barras acima e ao lado das barras de posicionamento do objeto. Se for um objeto circular escreve-se o tamanho do raio do objeto na caixa de texto do lado direito, um valor típico é 0,05 e este valor está em metros. Para escolher o ângulo do objeto, que é o ângulo entre a horizontal e a reta que passa pelo centro do objeto até o ponto preto em uma de suas extremidades, move-se o cursor circular, lembrando que este valor está em radianos. Pode-se também escolher o material que o objeto será feito, modificando sua massa, momento de inércia e constante elástica. Uma vez escolhida as configurações e posição do objeto clica-se no botão OK. O objeto recém criado é adicionado a lista de objetos e aparece mais um objeto para se posicionar. Uma vez incluídos todos os objetos desejados clica-se no botão Fechar e o programa retorna para a tela inicial.

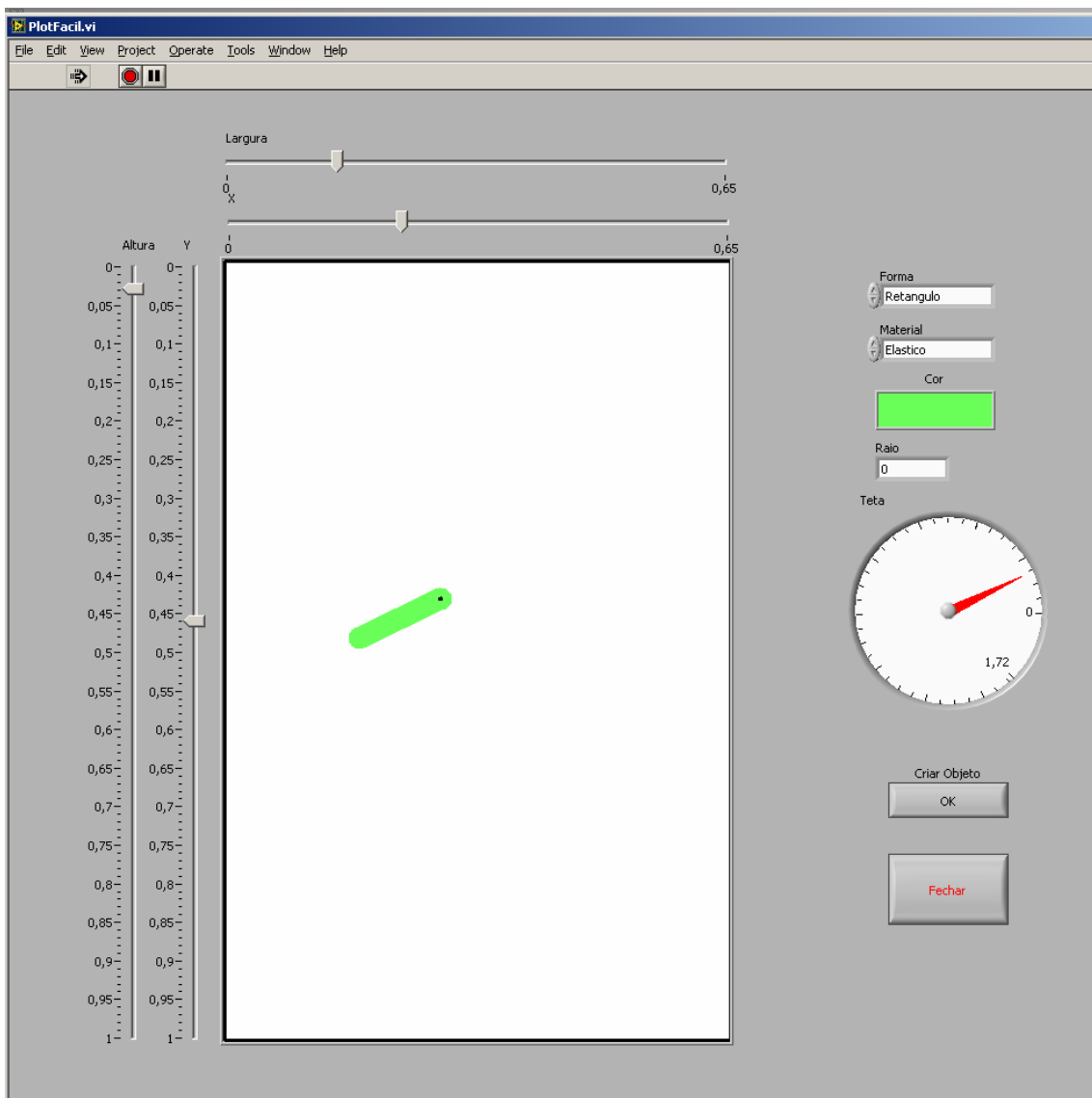


Figura 19 - Tela adicionador de objetos

Depois de adicionados os objetos escolhe-se os valores das configurações da área na tab superior, onde pode ser escolhida a gravidade, o meio e tamanho da arena. Escolhe-se também o período em ms da simulação.

Após os valores serem escolhidos escolhe-se as forças que atuarão no sistema do lado esquerdo da tela, normalmente marca-se parede, colisão, Fat na colisão e meio.

Antes de inicializar a simulação pode-se ainda na tab editar os objetos para impedir que alguns objetos sofram torques ou forças ou gerar velocidades iniciais. Caso se deseje salvar a simulação deve-se zerar a memória e gravar, ambos os botões no canto inferior direito.

Uma vez acertado todas as opções clica-se em mover a simulação começa. Não é necessário que os objetos se movam para se calcular as forças, então uma vez os objetos no local desejado pode-se desmarcar o botão mover e se verificar as forças.

Uma vez terminada a simulação ou o momento de interesse e se estiver gravando, desmarca-se gravando e clica-se em exporta onde pode-se exportar os dados salvos da simulação. Aconselha-se zerar a memória uma vez salvo os dados.

Para se fazer uma nova simulação pode-se editar a posição, forma e características dos objetos já presentes no sistema ou se para o programa e iniciar novamente com o botão Apagar objetos selecionado.

Existe a opção de se carregar uma foto ou imagem para o fundo da janela de simulação clicando em importar figura. Essa figura deve estar no formato .bmp e a imagem não será comprimida nem esticada para caber na área de simulação, sendo importante se tê-la já no tamanho desejado, a área completa de exibição é de 460 por 700 pixels.

Para prevenir respostas indesejadas é ideal que o botão de mover esteja sempre desativado quando não se estiver simulando algo dinâmico.

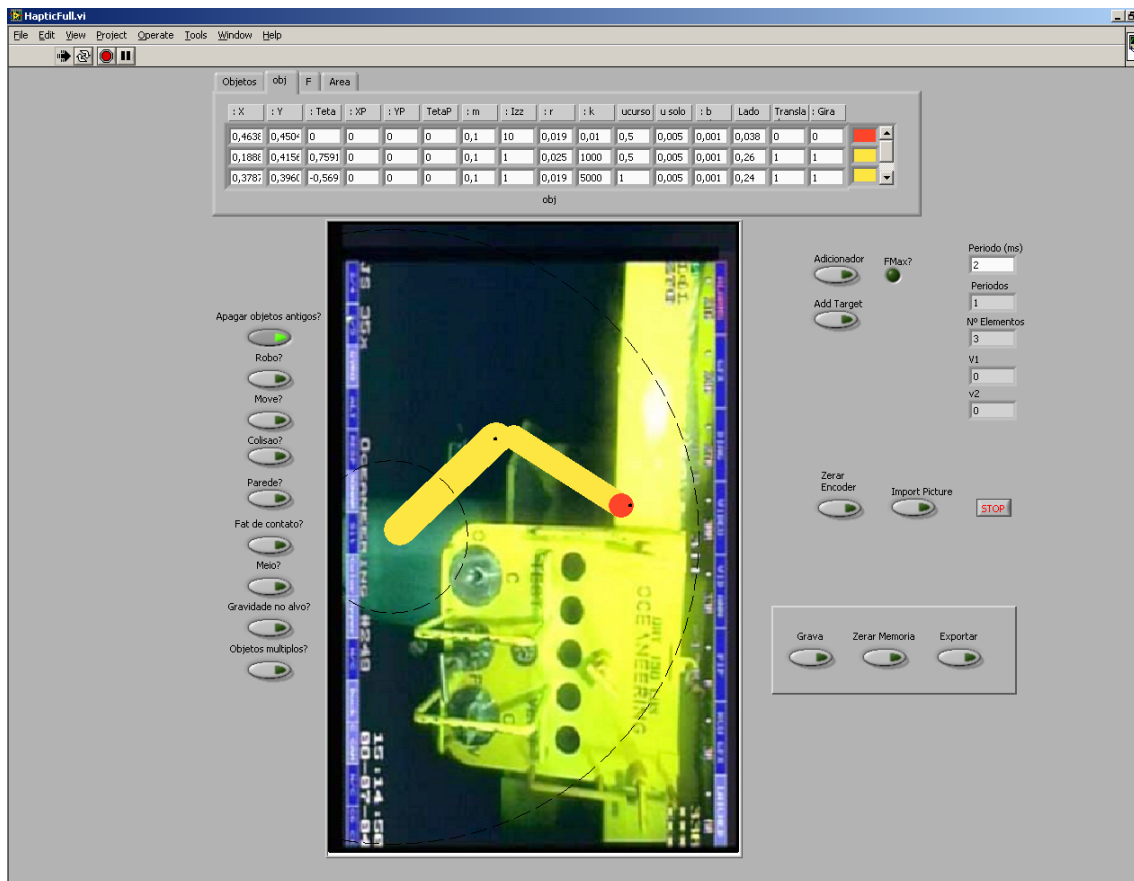


Figura 20 - Tela com figura importada

Programa completo

O programa completo é o arquivo chamado de HapticFull.vi. Esse programa incorpora novas funções ao simulador e retira algumas funcionalidades. Suas reduções em relação ao simulador é que não é possível se colocar a gravidade para baixo sendo incompatível fisicamente pois tendo um haptic horizontal na tela não se pode mudar o referencial e como o programa completo é mais complexo ele também é mais lento. Além de ser mais lento o fato de se estar interagindo com o ambiente real obriga que um segundo para o simulador seja um segundo para o mundo real, não é possível se passar um minuto para se processar um segundo de simulação como pode ser feito no simulador.

Assim as modificações na tela inicial do programa completo é a inclusão do botão robô do lado esquerdo da tela que aciona o torque do haptic, o botão zerar encoder do lado direito que faz com que a posição atual do haptic seja considerada ele totalmente esticado para frente, o botão adicionar target na direita que adiciona um alvo móvel na tela, um botão gravidade no alvo do lado esquerdo que aciona a força de atração entre a extremidade do haptic e o objeto adicionado pelo adicionar target e um contador de períodos do lado direito que indica quantos períodos estão sendo necessários para se fazer uma simulação.

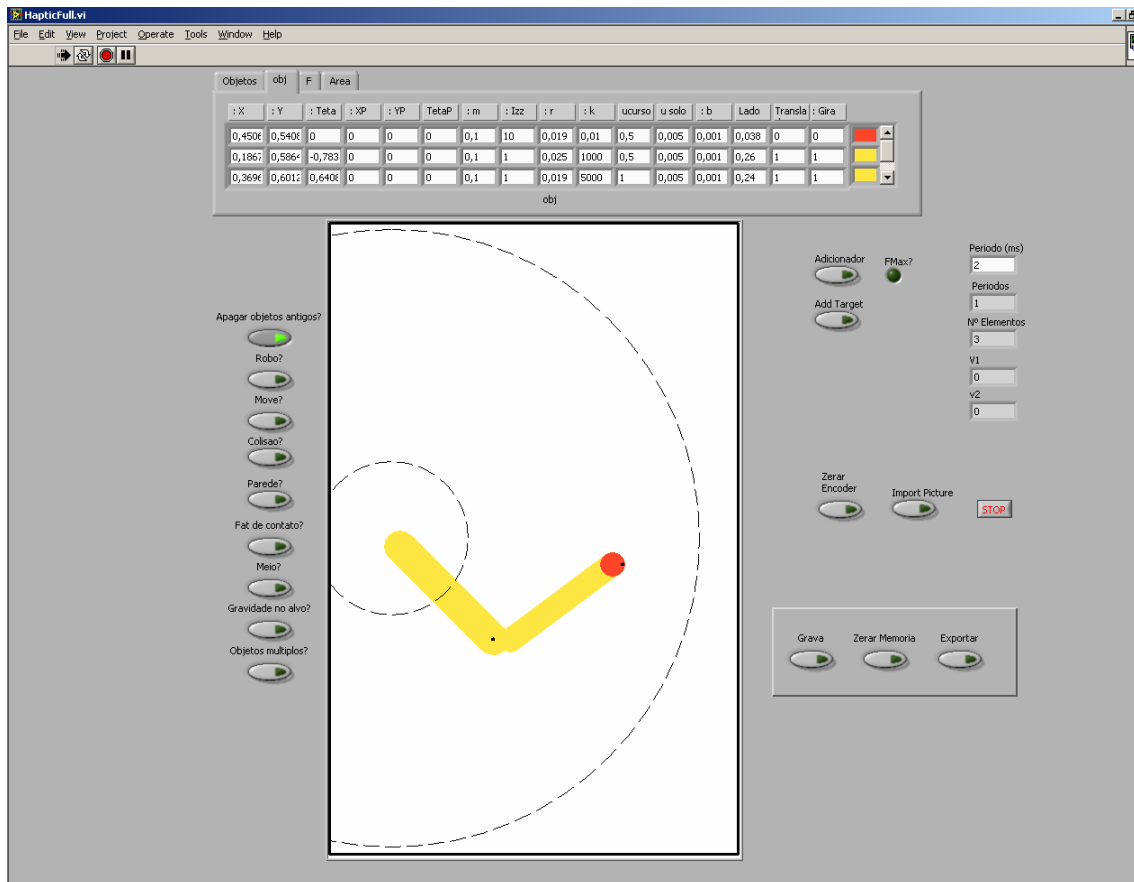


Figura 21 - Tela do programa completo

Ao se iniciar o programa completo o manipulador será automaticamente adicionado a lista de objetos e a tela caso o botão apagar objetos esteja acionado. Se o manipulador virtual não estiver na mesma posição que o haptic deve-se colocar o haptic na posição inicial (totalmente esticado) e clicar em zerar encoder.

Os mesmos procedimentos usados no simulador são usados no programa completo. Deve-se tomar cuidado quando o botão robô estiver ativado pois como o controle do haptic é feito por controle de força ele tende a ficar instável caso ele seja ativado não se esteja segurando sua extremidade. Para melhorar o problema da instabilidade com o haptic solto pode-se adicionar aos objetos que representam o haptic um auto valor de atrito com o meio, isso fará que caso o haptic tenda a atingir velocidades altas que o atrito o freie evitando machucar alguém.

Para se usar a função do target com gravidade negativa deve-se primeiro adicionar o target. Uma vez feito isso o manipulador deixa de ser considerado como um corpo inteiro e apenas sua extremidade é considerada. Significa que a opção translada e gira dos objetos que representam o braço do manipulador são zerados e os que serão ativados os do objeto que representa a extremidade do manipulador. Após adicionado o target ativa-se a gravidade para o target e a força de gravidade entre dois objetos é calculada entre os dois.

Um erro que pode ocorrer é o RoboteQ não estar recebendo exatamente $2,5V \pm 0,05V$, caso isso ocorra o RoboteQ ficara piscando e não transmitirá o torque aos motores. Caso isso ocorra deve-se abrir o programa Força.vi e modificar os valores padrões e as contas de conversão torque-número de bit ativados que determina a tensão de saída do computador. Essa re-calibragem pode ser necessária caso haja grande mudança de temperatura ou re-arranjo da fiação.

Jogo

O Jogo é executado pelo arquivo Jogo.vi. Com o objetivo de demonstração este programa simula uma mesa de air hockey onde o haptic representa um jogador e computador controla o oponente. As funções de colisão entre os objetos, atrito durante a colisão, com o solo e com o meio e colisão com a parede são usadas nesse programa. O jogo dá um motivo a ser alcançado durante uma simulação tornando mais evidente a necessidade e a funcionalidade de cada opção.

Na tela inicial do jogo existe uma área de simulação no centro, um placar indicando os gols do usuário e do computador no lado direito, o botão Novo jogo para se iniciar ou reiniciar uma partida e as mesmas opções de funcionalidade do lado esquerdo que o simulador. O período é pré definido para 2ms assim como as características dos objetos.

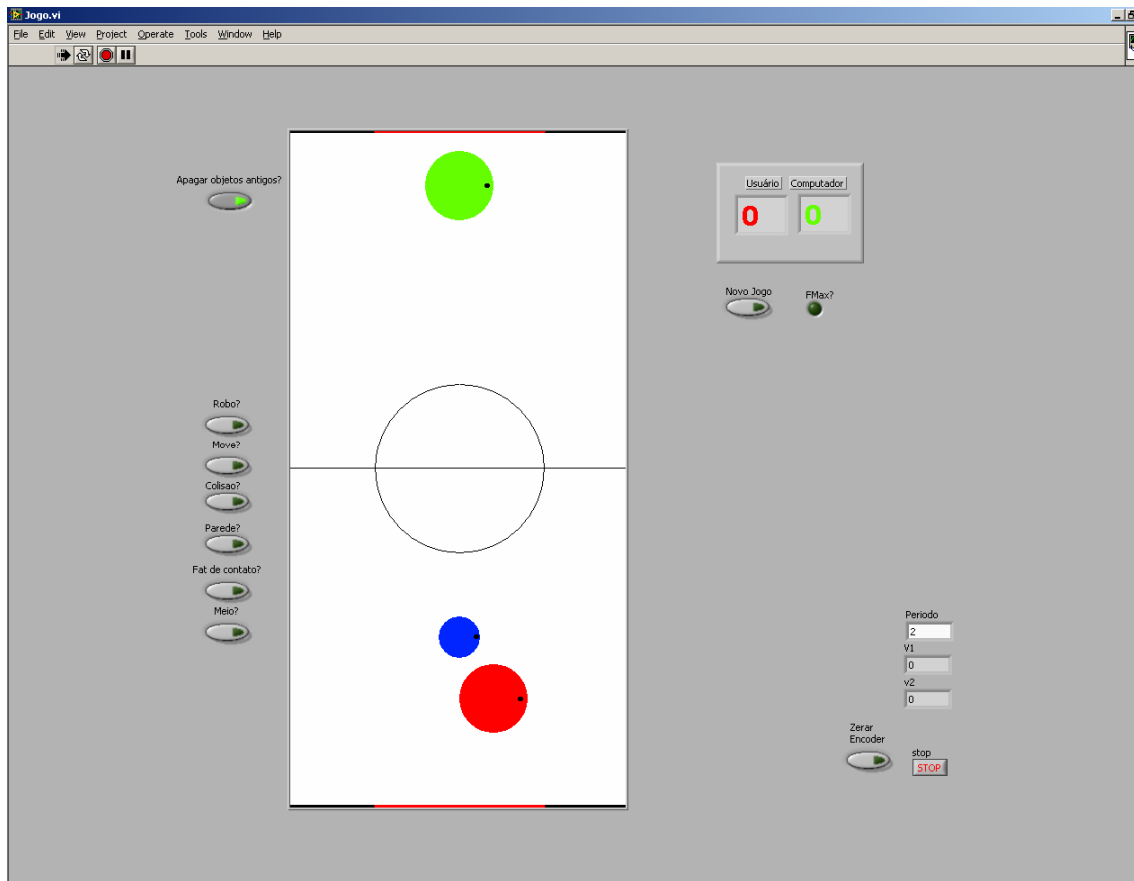


Figura 22 - Tela do Jogo

Para se usar o jogo clica-se em novo jogo, ativa-se as funcionalidades desejadas do lado direito, ativa-se o robô e por ultimo se ativa o botão move.

A bola inicialmente é do usuário que tem como opção desativar cada uma das forças individualmente para se testar a sua influencia no jogo. Esse também é um bom teste para se mostrar como a eficiência de uma operação melhora quando se tem um feedback de força, testando o jogo com o botão robô ativado e desativado.

Para o controle do oponente foi implementado simplesmente um PD onde o P vale 50 e D é o próprio atrito viscoso do objeto e o erro é a distancia no eixo X entre a bola e oponente. O oponente só se move em um eixo e durante o jogo caso se deixe a bola ficar lenta de mais ela pode vir a parar, nesse caso, deve-se desativar os botões robô e move e se iniciar um novo jogo.

Experimental

Calibrações

Inicialmente teve que ser levantada uma curva de tensão de saída na ServoToGo em relação aos bits de entradas. Nessa curva é muito importante que 2,5V esteja extremamente preciso para que o sistema funcione, então a calibração foi feita em torno desse ponto.

Como o sistema de controle de força é em malha aberta e o manipulador não possui sensores de força foi medido a corrente em diferentes valores de tensão e a partir dessa corrente medida multiplicada pela constante de torque K_t do motor estima-se o torque do motor.

Para se realizar o procedimento de medidas de corrente deve-se ter cuidado pois a corrente é medida em stall e trabalhar com o motor em stall esquenta o motor e pode danificá-lo.

O levantamento da corrente por tensão foi feito aos poucos usando-se de um ventilador para ajudar a resfriar o motor e os cabos. Foi percebido que controle de potência tem uma limitação de 120A limitando o torque máximo do motor.

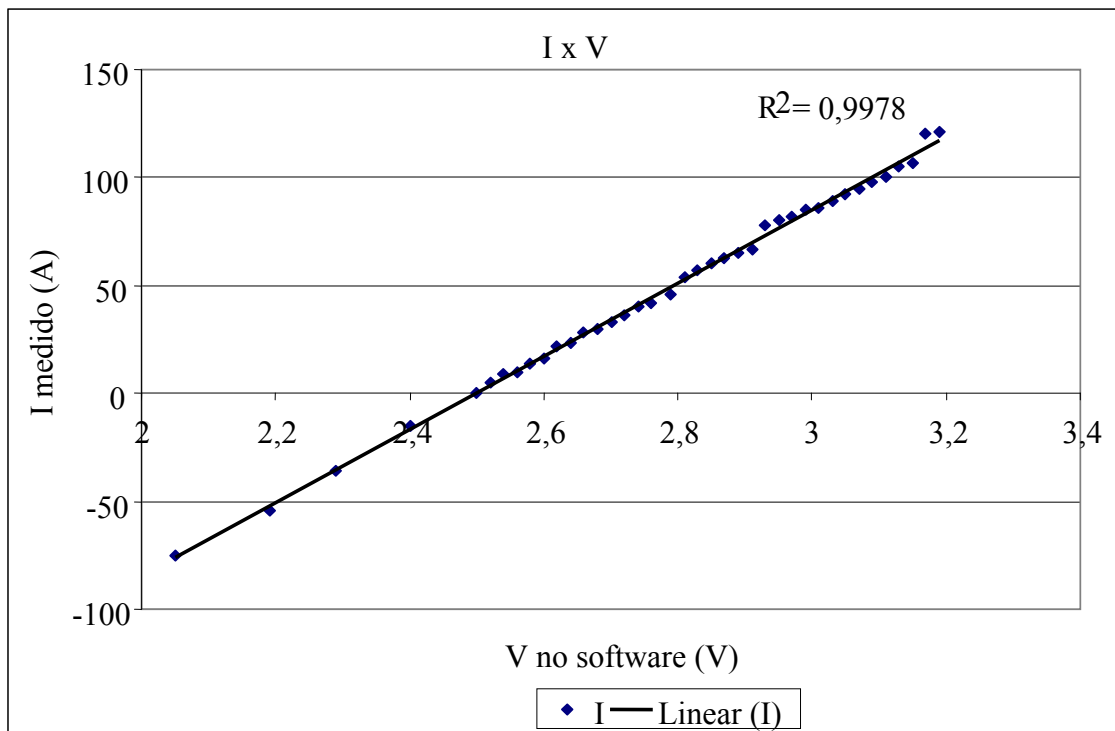


Gráfico 16 - Calibração

Pelo gráfico de I x V é possível se perceber a relação linear entre a tensão de saída dada pelo software e a corrente gerada pelo RoboteQ.

Com essa relação linear é seguro se fazer a equação que transforma torque em voltagem como uma equação linear.

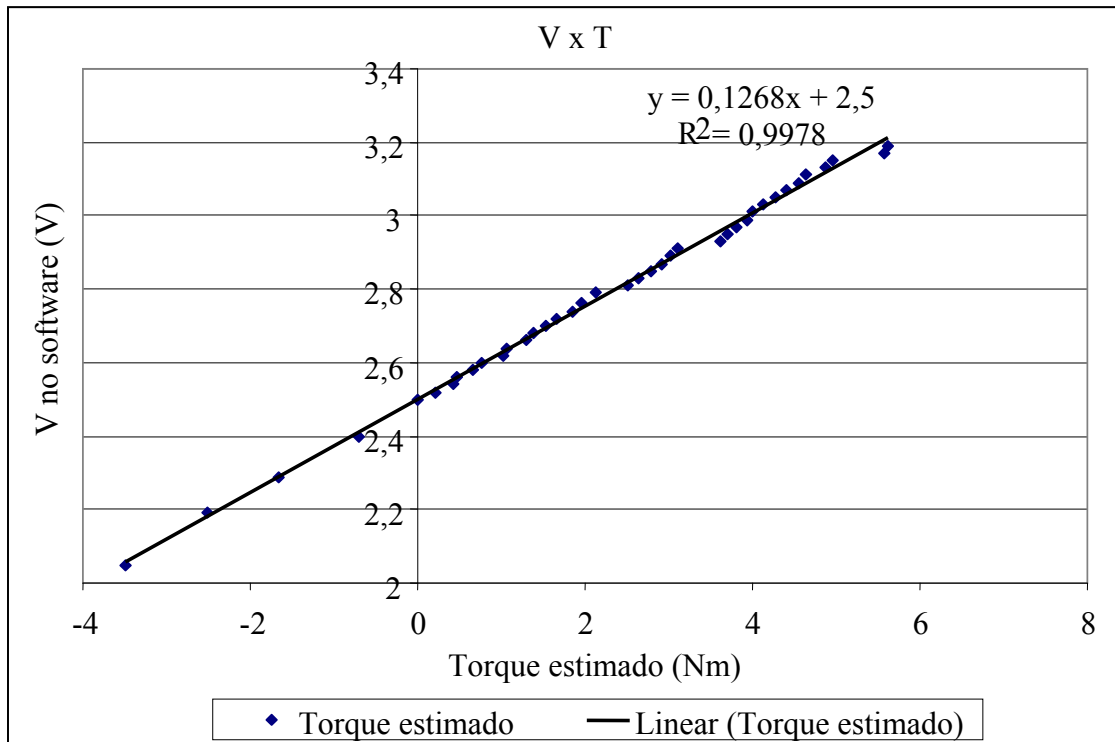


Gráfico 17 - Calibração

Forçando a reta a passar pelo ponto onde para torque igual a zero a tensão vale 2,5V tem-se a equação que relaciona torque por volt.

$$V = 0,1268 \cdot \tau + 2,5$$

Atração para um alvo

Um sistema de simulação de forças pode ser útil quando adicionado a um sistema tele operado. Nesse experimento será retratada a idéia de se desejar mover a extremidade do manipulador para um ponto específico, será considerado que esse ponto ou a base do manipulador não é fixa, ou seja, o ponto que se está tentando alcançar está se movendo.

Essa situação retrata, por exemplo, um ROV tendo que alcançar um ponto no espaço com uma ferramenta de corte ou uma garra. Para isso se usaria um sistema de captura de vídeo que é capaz de identificar o alvo e estimar sua posição.

Essa informação já processada é a posição do alvo simulado no programa HapticFull.vi. Para acionar essa simulação adiciona-se o target e em seguida se ativa a gravidade para o alvo.

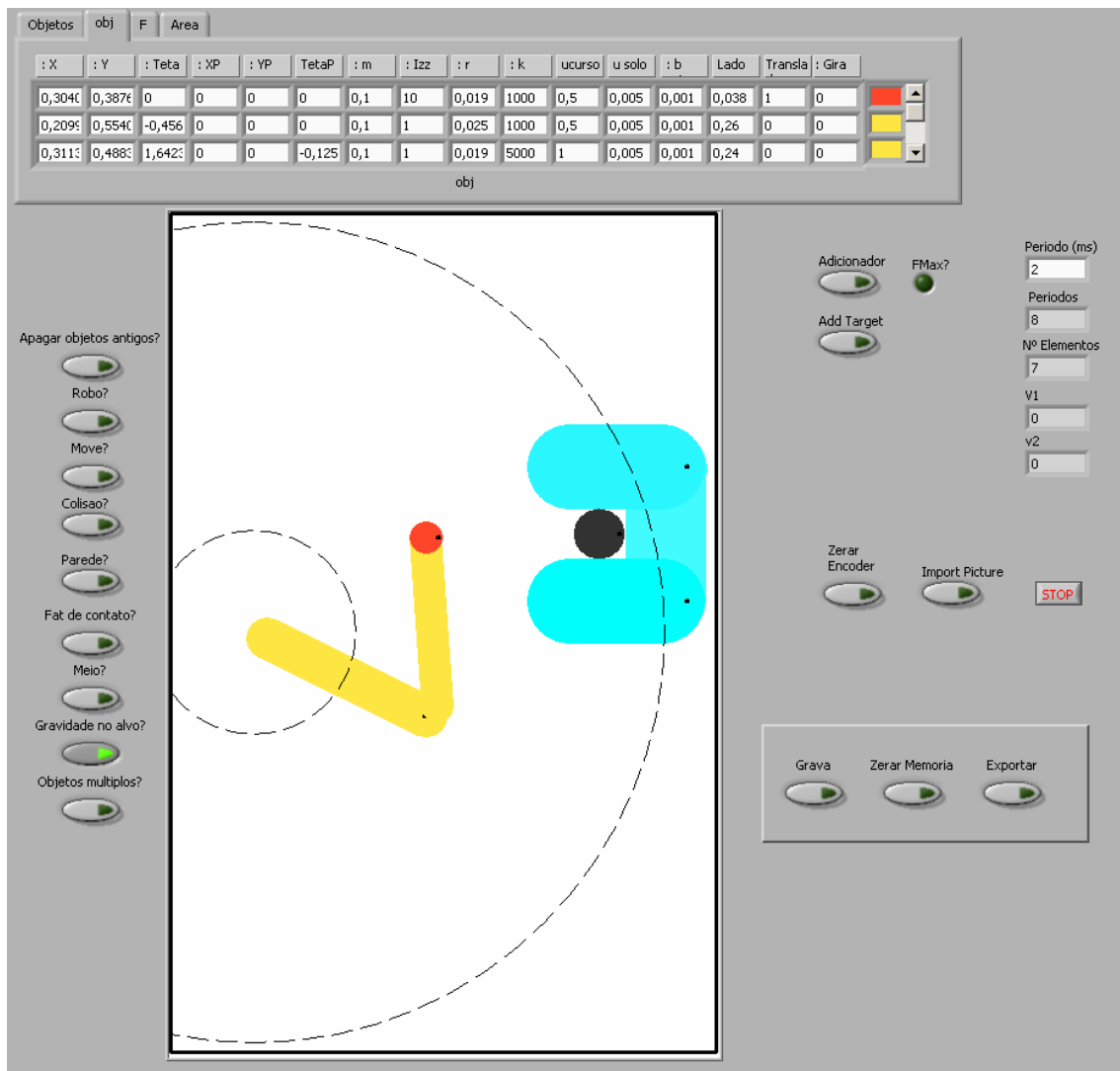


Figura 23 - Tela porgrama completo com alvo

O alvo é representado por um círculo e é cercado por paredes. As paredes são para ajudar o operador a não entrar em contato com o meio em torno do alvo o que pode vir a danificar a ferramenta ou o ambiente que se está interagindo.

Alem das paredes existe uma gravidade para o centro do alvo que funciona como uma força de gravidade. A força é sempre de atração em relação ao centro do alvo e aumenta conforme se aproxima de sua superfície. Esse torque ajuda a se chegar no ponto desejado e a se manter nele caso ele se mova, assim o operador não irá apenas ver o alvo se movendo mas também irá sentir que o alvo se moveu melhorando seu desempenho.

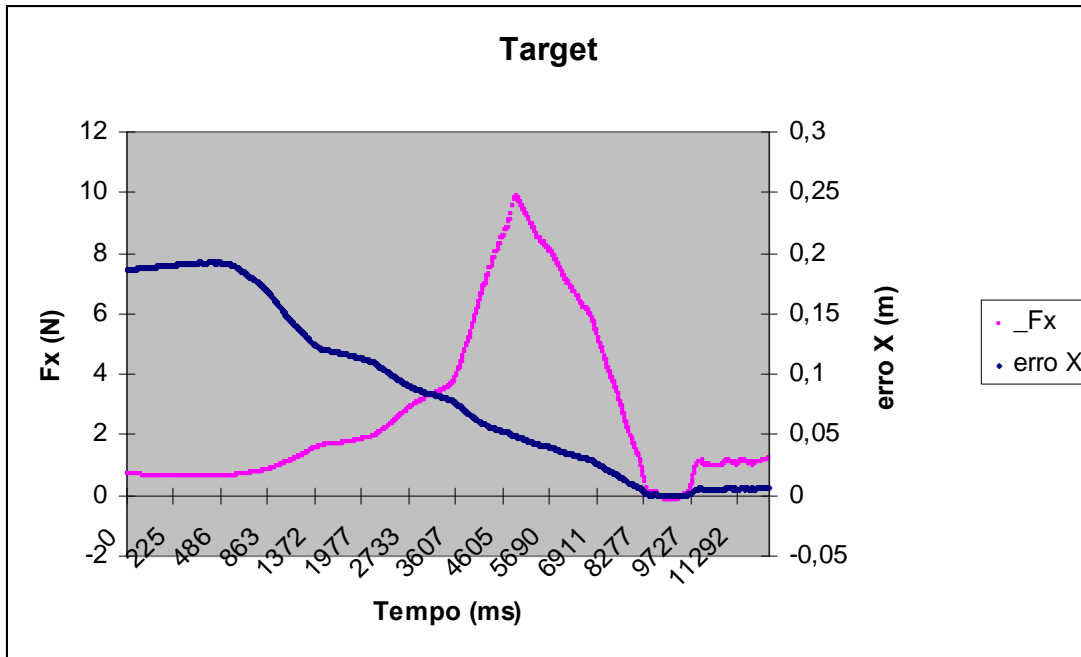


Gráfico 18 - Alvo

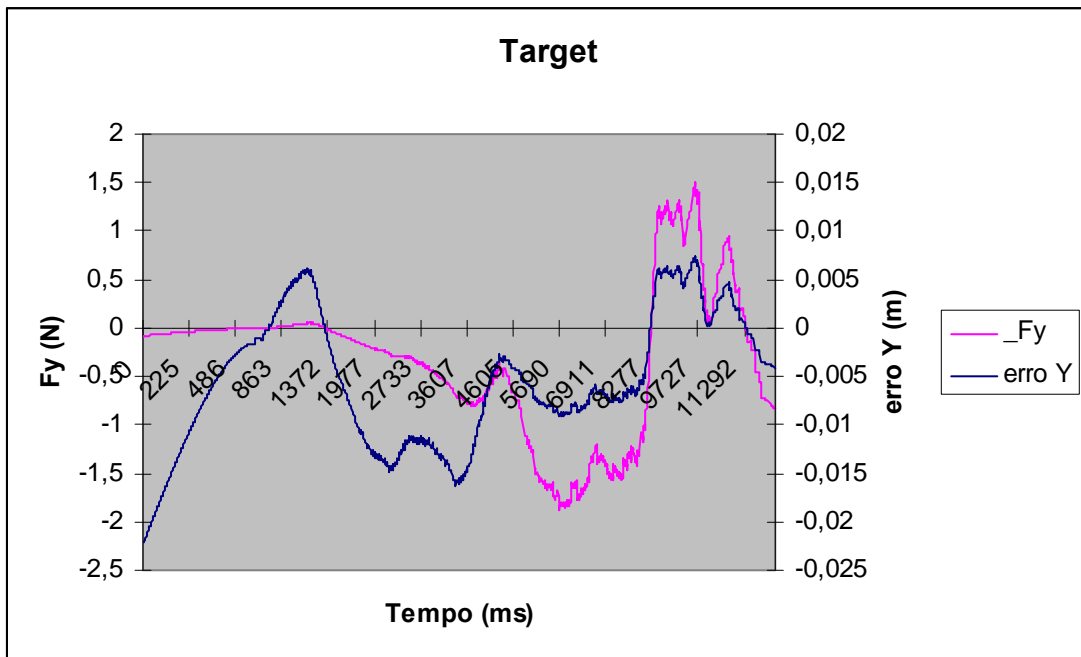


Gráfico 19 - Alvo

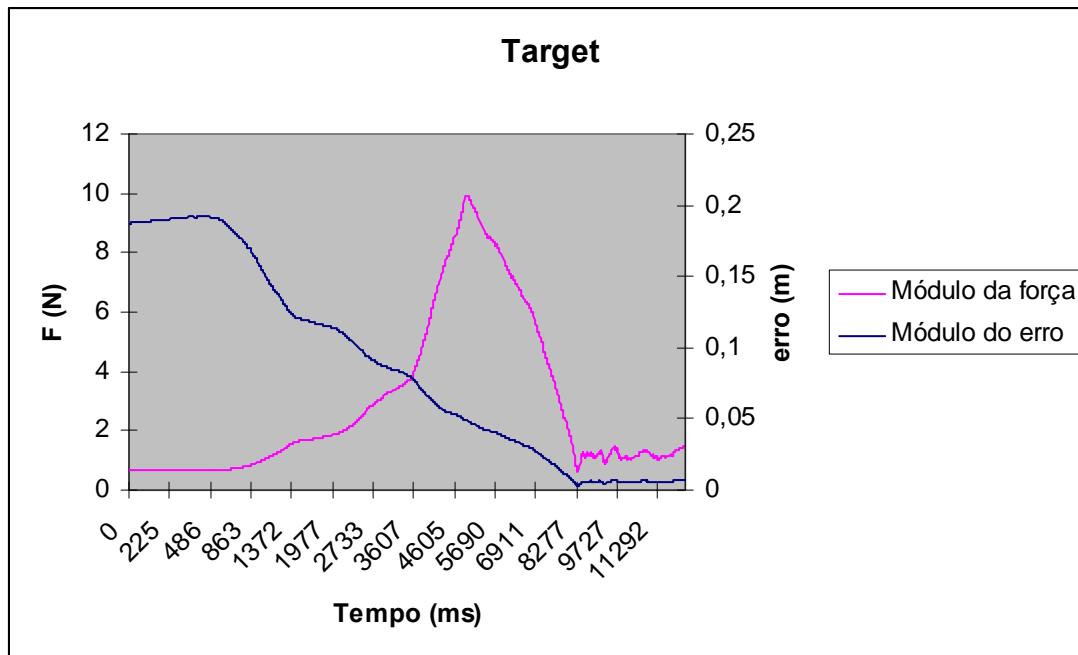


Gráfico 20 - Alvo

O gráfico do módulo da força pelo módulo do erro mostra como a força aplicada no haptic varia com a distância para o alvo. Pelos gráficos individuais de força por erro é possível se perceber a oscilação do erro mostrando a dificuldade de se acertar um alvo móvel.

O erro é calculado como valor desejado menos valor medido ou atual, por isso o sinal da força e do erro são iguais. O pico de força em erro igual a 0,05 é quando o manipulador atinge a parede do alvo que tem raio de 0,05m.

Conclusão

O sistema de simulação e atuação se mostrou eficiente dentro dos padrões esperados. Foi usada uma modelagem simples para o objeto e para o cálculo das forças tanto com o meio quanto de interação entre objetos. Cada um desses casos podem ser melhorados individualmente melhorando o desempenho do simulador dinâmico.

Foi possível se perceber com o haptic forças lineares com diferentes amplitudes. Também se mostrou viável se perceber rotações ao se encostar o haptic em um objeto girando e também foi possível se gerar rotações em objetos usando-se do haptic.

O sistema para diminuir a instabilidade do haptic também se mostrou possível e funcional. Adicionado-se um alto nível de atrito viscoso no haptic ele se torna incapaz, ou menos provável, de atingir altas velocidades. Usar esse recurso tem o problema de que esse atrito pode ser percebido pelo usuário durante uma operação mais rápida prejudicando a veracidade do haptic.

Nesse modelo foi usado um haptic que teve suas configurações copiadas para o simulador, gerando assim um objeto virtual equivalente ao haptic. Nesse caso, então, não foi necessário se desconsiderar a dinâmica do haptic sendo ela igual à dinâmica do manipulador virtual.

Como proposta para trabalhos futuros é interessante se modificar a modelagem de colisão para um massa mola amortecedor e fazer com que mais de uma mola interaja em cada colisão. Também como um objetivo para trabalhos futuros é tornar o programa mais rápido para que se possa usar o haptic com uma taxa de atualização mais rápida.

Lista de Figuras

Figura 1 - Manipulador com correia.....	1
Figura 2 - Modelo de manipulador de dois graus de liberdade	1
Figura 3 - Modelo do manipulador utilizado.....	1
Figura 4 - Manipular utilizado.....	1
Figura 5 - Vista frontal RoboteQ.....	1
Figura 6 - Vista traseira do RoboteQ.....	1
Figura 7 - Imagem do RoboteQ.....	1
Figura 8 - Esquema de conexão do sistema de potência	1
Figura 9 - Placa ServoToGo	1
Figura 10 - Objeto virtual	1
Figura 11 - Objeto virtual	1
Figura 12 - Modelo do objeto virtual	1
Figura 13 - Colisão antes e depois.....	1
Figura 14 - Rotação inicial e final	1
Figura 15 - Atrito com o solo	1
Figura 16 - Atrito viscoso.....	1
Figura 17 - Gravidade para baixo	1
Figura 18 - Tela do simulador	1
Figura 19 - Tela adicionador de objetos	1
Figura 20 - Tela com figura importada.....	37
Figura 21 - Tela do programa completo	1
Figura 22 - Tela do Jogo.....	40
Figura 23 - Tela porgrama completo com alvo	43

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Colisão linear	1
Gráfico 2 - Colisão linear	1
Gráfico 3 - Colisão linear	1
Gráfico 4 - Rotação.....	1
Gráfico 5 - Rotação.....	25
Gráfico 6 - Rotação.....	1
Gráfico 7 - Atrito com o solo.....	27
Gráfico 8 - Atrito com o solo.....	28
Gráfico 9 - Atrito com o solo.....	28
Gráfico 10 - Atrito Viscoso	1
Gráfico 11 - Atrito viscoso	1
Gráfico 12- Atrito viscoso	1
Gráfico 13 - Gravidade	1
Gráfico 14 - Gravidade	1
Gráfico 15 - Gravidade	1
Gráfico 16 - Calibração	1
Gráfico 17 - Calibração	1
Gráfico 18 - Alvo.....	1
Gráfico 19 - Alvo.....	1
Gráfico 20 - Alvo.....	1

Bibliografia

ADAMS, R. J. and HANNAFORD, B. (1999). Stable haptic interaction with virtual environments. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 15(3):465.474.

CRAIG R. CARIGNAN, KEVIN R. CLEARLY, Closed-Loop Force Control For Haptic Simulation of Virtual Environments on Haptics-e, Vol. 1, No. 2, 2000

LAWRENCE, D. (1988). Impedance control stability properties in common implementations. In *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pages 1185.1190.

SHIGLEY, JOSEPH E., MISCHKE, CHARLES R., BUDYNAS, RICHARD G., HILL, MC GRAW, *Mechanical Engineering Design*, 2004

SILVA, FILIPE SACCHI DA, *Desenvolvimento e controle de um manipulador robótico de alta potência com dois graus de liberdade, iniciação científica*, 2006

Hannaford, B. (1989). Stability and performance tradeoffs in bilateral telemanipulation. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1764.1767.

Lawrence, D. (1992). Stability and transparency in bilateral teleoperation. In *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*.

Lee, W.-S., Kim, J.-H., and Cho, J.-H. (1998). A driving simulator as a virtual reality tool. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 71.76.