

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**CT – CENTRO TECNOLÓGICO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**IVAM PRETTI**

**PROTOTIPAGEM DIGITAL DE UM ATUADOR ELÉTRICO LINEAR  
COM ELEMENTO ELÁSTICO SERIAL**

**VITÓRIA**

**2013**

IVAM PRETTI

**PROTOTIPAGEM DIGITAL DE UM ATUADOR ELÉTRICO LINEAR  
COM ELEMENTO ELÁSTICO SERIAL**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Bento Filho

VITÓRIA

2013

IVAM PRETTI

# **PROTOTIPAGEM DIGITAL DE UM ATUADOR ELÉTRICO LINEAR**

## **COM ELEMENTO ELÁSTICO SERIAL**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

### **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Antônio Bento Filho**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Prof.**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof.**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

A nossos pais, amigos e professores.

“A jornada é a recompensa.”

Steve Jobs

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a Prototipagem Digital de um Atuador Elétrico Linear com Elemento Elástico Serial (Serial Elastic Actuator –SEA), para o acionamento de robôs manipuladores que operam em ambientes pouco estruturados e para aplicação em exoesqueletos e próteses mecatrônicas, utilizando a ferramenta de prototipagem digital *Solid Edge ST4*.

**Palavras Chaves:** prototipagem digital, SEA, Solid Edge, robótica a pernas, simulação dinâmica, exoesqueletos, próteses mecatrônicas.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: SEA elétrico: (1) motor com redutor elétrico; (2) conjunto de deslocamento; (3) placa de apoio; (4) fuso de esferas recirculantes; (5) haste guia; (6) placa de fixação; (7) terminal de conexão à carga; (8) haste móvel; (9) molas e (10) flange de fixação do motor e hastes.</i>	10
<i>Figura 2: SEA hidráulico: (1) cilindro hidráulico de dupla ação; (2) conjunto de deslocamento; (3) placa de apoio; (4) hastes fixas; (5) hastes móveis; (6) terminal de conexão à carga; (7) placa de apoio das hastes fixas; (8) molas e (9) flange de fixação do cilindro hidráulico e das hastes guia.</i>	11
<i>Figura 3: SEA rotativo.</i>	13
<i>Figura 4: Modelo de referência[2] reproduzido no Solid Edge ST4[4].</i>	134
<i>Figura 5: Fase conceitual do modelo.</i>	135
<i>Figura 6: Modelo com fuso e porcas padronizados.</i>	16
<i>Figura 7: Modelo atual do SEA.</i>	167
<i>Figura 8: Vista explodida do conjunto de acionamento.</i>	18
<i>Figura 9: Conjunto de acionamento - montagem final.</i>	19
<i>Figura 10: Vista explodida do conjunto de acionamento(Figura 9) com o braço retrátil.</i>	19
<i>Figura 11: Detalhe de montagem dos parafusos Allen sem cabeça para a fixação dos flanges chanfrados no braço retrátil(10).</i>	20
<i>Figura 12: Montagem do braço retrátil(10) com o conjunto de acionamento Figura 9.</i>	21
<i>Figura 13: Vista explodida de montagem do fuso(21), rolamento(22) 606zz, flange livre(23) e do terminal(25) no conjunto da Figura 12.</i>	22
<i>Figura 14: Montagem final do conjunto da Figura 13.</i>	22
<i>Figura 15: Vista explodida da montagem do conjunto da Figura 14, com a camisa externa(29), o conjunto motor-redutor(26) .</i>	23
<i>Figura 16: 3º Caso de funcionamento, limitação no movimento de avanço do atuador.</i>	214
<i>Figura 17: Experimento realizado para o levantamento do circuito do sensor de contagem para determinação da deformação das molas.</i>	26

## **LISTA DE TABELAS**

<i>Tabela 1: Planilha de simulação de parâmetros construtivos de molas, de acordo com as dimensões disponíveis no atuador.</i> .....	25
--	----

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	Objetivos	9
1.2	Considerações Iniciais	9
1.2.1	Motivação.....	10
1.3	Desenvolvimento de um Atuador Elástico Serial (SEA)	10
1.3.1	Atuador Elástico Serial (SEA) Linear Elétrico .....	10
1.3.2	Atuador Elástico Serial (SEA) Linear Hidráulico .....	11
1.3.3	Atuador Elástico Serial (SEA) Rotativo Elétrico .....	12
<b>2</b>	<b>DESIGN EM AMBIENTE DE PROTOTIPAGEM DIGITAL .....</b>	<b>13</b>
2.1	Concepção 1 – Reprodução do Modelo de Referência	13
2.1	Concepção 2 – Desenho Conceitual	14
2.2	Concepção 3 – Correção de Elementos Adotados	16
<b>3</b>	<b>CONCEPÇÃO ATUAL DO ATUADOR ELÁSTICO SERIAL (SEA).....</b>	<b>17</b>
3.1	Descrição Geral	17
3.2	Arranjo dos elementos construtivos	18
3.3	Funcionamento do atuador	23
3.4	Características do Atuador Elástico Serial (SEA)	24
3.4.1	Dimensionamento das Molas .....	24
3.4.2	Capacidade de carga .....	25
3.4.3	Escolha do motor .....	25
3.4.4	Sensores .....	26
3.4.5	Propriedades Inerciais.....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>29</b>
A.	PROPRIEDADES INERCIAIS.....	30

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Objetivos**

O Objetivo do presente trabalho é o projeto mecânico de um atuador linear com um elemento elástico inserido em série com a carga, mais comumente referenciado como Serial Elastic Actuator (SEA).

Um motor elétrico DC acionará um fuso de esferas recirculantes, sendo propositadamente inseridas molas entre a saída do atuador e a carga acionada. Estes atuadores são indicados para aplicação em acionamentos com precisão de posicionamento e de aplicação de força.

## **1.2 Considerações Iniciais**

De maneira geral, os atuadores dos sistemas mecânicos são sempre conectados rigidamente à carga a ser movimentada. Isso pode ser observado nos sistemas hidráulicos de máquinas e implementos para aplicações agrícolas, rodoviárias e mineração, nos equipamentos de elevação e transporte de cargas, dentre outros.

Apesar disso, reduzir a rigidez da interface atuador-carga pode oferecer uma série de vantagens. Um dos efeitos da elasticidade introduzida pela inserção de uma mola em série entre o atuador e a carga é que resulta em um filtro passa baixa que filtra as cargas de choque, reduzindo significativamente as forças de pico no sistema. Também ocorre uma menor reflexão da inércia associada ao acionamento, a qual permite o controle mais preciso e estável da força aplicada pelo atuador, e acrescenta a capacidade de armazenamento de energia ao conjunto.

Como desvantagem, a redução da rigidez da interface atuador-carga também reduz a largura de banda de pequenos movimentos da carga. Entretanto, de maneira geral, a inserção da elasticidade adequada na interface atuador–carga pode aumentar substancialmente a tolerância a choques, mantendo a largura de banda necessária para os pequenos movimentos.

### 1.2.1 Motivação

Criar um modelo de atuador elástico serial elétrico que reduza as perdas por atrito das as guias lineares cilíndricas utilizadas nos modelos existentes e também que tenha menores dimensões e peso para aplicações em exoesqueletos e próteses mecatrônicas.

É estudada e desenvolvida a respectiva prototipagem digital de uma concepção tubular externa a qual encapsula os componentes mecânicos internos, os sensores e as esferas e porca do fuso de esferas recirculantes..

## 1.3 Desenvolvimento de um Atuador Elástico Serial (SEA)

### 1.3.1 Atuador Elástico Serial (SEA) Linear Elétrico

A Figura 1 mostra um atuador elástico serial (SEA) linear com acionamento elétrico [1]

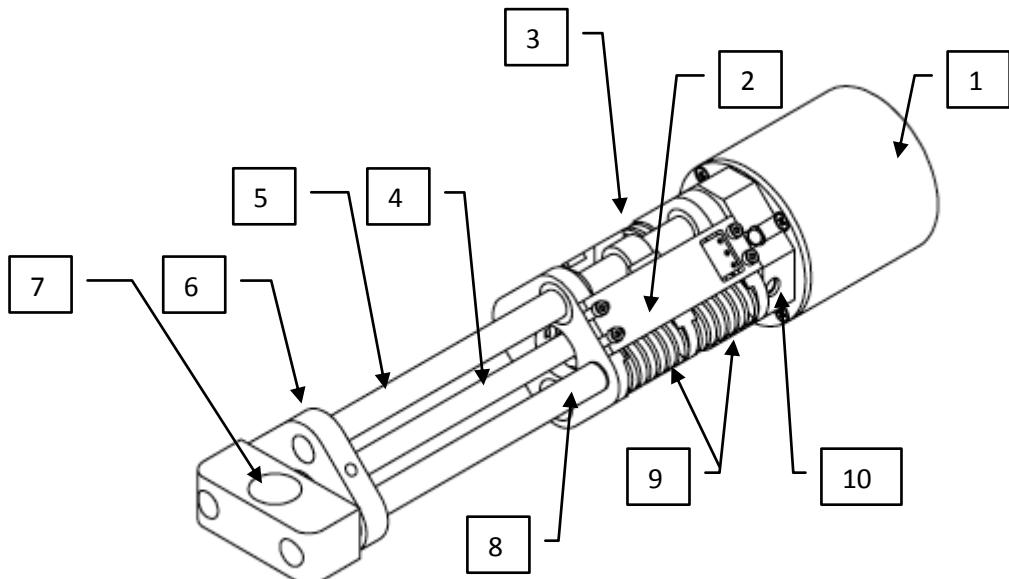


Figura 1: SEA elétrico: (1) motor com redutor elétrico; (2) conjunto de deslocamento; (3) placa de apoio; (4) fuso de esferas recirculantes; (5) haste guia; (6) placa de fixação; (7) terminal de conexão à carga; (8) haste móvel; (9) molas e (10) flange de fixação do motor e hastes.

O motor com redutor (1) aciona o fuso de esferas recirculantes (4) movendo a placa de apoio (3) através da porca fixa à mesma. A placa de apoio (3) então move as molas (9) contra o conjunto de deslocamento (2) ao qual estão fixas as hastes móveis (8), provocando assim o deslocamento do terminal de conexão à carga (7) e então o movimento da carga.

As hastes guia (5) são fixas no flange de fixação do motor (10) e à placa de fixação (6), a qual contém mancais de deslizamento para o fuso de esferas recirculantes e

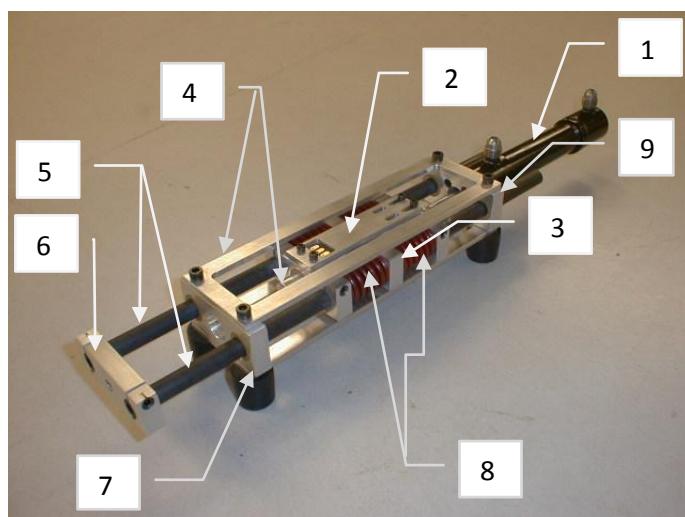
para o deslocamento das hastes móveis (8). Elas se movem juntamente com o conjunto de deslocamento (2) no qual estão fixadas. O comprimento das hastes guia define a amplitude de movimento que o atuador será capaz de executar.

Este arranjo resulta que toda a força exercida pelo conjunto motor e fuso sobre a carga é suportado diretamente pelas molas, elemento elástico inserido propositadamente o qual reduza rigidez do atuador no acionamento da carga.

Ao conjunto de deslocamento (2) é acoplado um *encoder* linear, para medição do deslocamento relativo entre este e a haste de apoio (3), o qual permite inferir o valor da força aplicada pelo atuador na carga. Um *encoder* rotativo é acoplado ao motor elétrico e permite inferir a posição do conjunto de acionamento (2) em relação à amplitude de movimento que o atuador é capaz de executar.

### 1.3.2 Atuador Elástico Serial (SEA) Linear Hidráulico

A Figura 2 mostra um atuador elástico serial (SEA) linear hidráulico [2], cujo arranjo é semelhante ao do SEA elétrico, substituindo-se o conjunto motor-fuso de esferas recirculantes por um cilindro hidráulico de dupla ação.



**Figura 2: SEA hidráulico:** (1) cilindro hidráulico de dupla ação; (2) conjunto de deslocamento; (3) placa de apoio; (4) hastes fixas; (5) hastes móveis; (6) terminal de conexão à carga; (7) placa de apoio das hastes fixas; (8) molas e (9) flange de fixação do cilindro hidráulico e das hastes guia.

O êmbolo do cilindro hidráulico de dupla ação (1) move a placa de apoio (3) a qual está fixa ao mesmo. A placa de apoio (3) então move as molas (8) contra o conjunto de deslocamento (2) ao qual estão fixas as hastes móveis (5), provocando assim o deslocamento do terminal de conexão à carga (6) e então o movimento da carga.

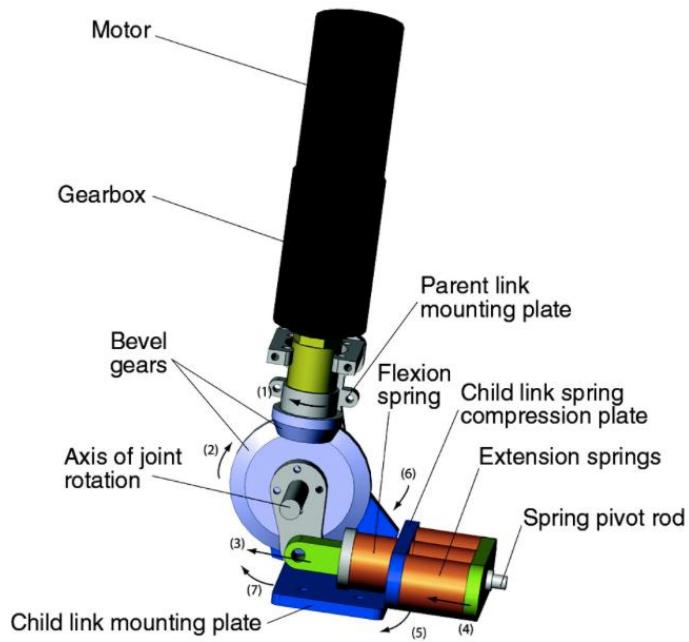
As hastes fixas (5) são parafusadas no flange de fixação do cilindro hidráulico (9) e na placa de fixação (7), a qual contém mancais de deslizamento para o deslocamento das hastes móveis (5). Os comprimentos das hastes fixas e guia definem a amplitude de movimento que o atuador será capaz de executar.

Este arranjo resulta que toda a força exercida pelo conjunto motor e fuso sobre a carga é suportado diretamente pelas molas, elemento elástico inserido propositadamente o qual reduza rigidez do atuador no acionamento da carga.

Ao conjunto de deslocamento (2) é acoplado um *encoder* linear, para medição do deslocamento relativo entre este e a haste de apoio (3), o qual permite inferir o valor da força aplicada pelo atuador na carga. Uma fita *encoder* linear é acoplado à estrutura e um sensor ótico fixado ao conjunto de deslocamento (2) e permite inferir a posição deste em relação à amplitude de movimento que o atuador é capaz de executar.

### 1.3.3 Atuador Elástico Serial (SEA) Rotativo Elétrico

A Figura 3 apresenta o projeto mecânico de um atuador elástico serial (SEA) rotativo[3], aplicado ao movimento de um tornozelo humano. O movimento de rotação no tornozelo é denominado flexão (*Flexion*) se ocorrer no sentido horário e de extensão (*Extension*), em caso contrário. O torque do motorreductor (*Motor & Gearbox*) é transmitido através da caixa de velocidades (*Gearbox*) e do pinhão e coroa cônicos (1) (*Bevel gears*) até o eixo de rotação (*Axis of joint rotation*). A rotação e o torque são então convertidos em movimento linear e força respectivamente, através da articulação (3). No movimento de extensão (*Extension*) a força é transmitida através da haste da mola (*Spring pivot rod*) comprimindo as molas de extensão (*Extension springs*), que empurra a estrutura que gira no sentido horário. No movimento de flexão, a rotação do motor é invertida, e a força é transmitida através da haste da mola (*Spring pivot rod*) comprimindo a mola de flexão (*Flexion spring*), empurrando estrutura que gira no sentido anti-horário.



**Figura 3: SEA rotativo.**

## 2 DESIGN EM AMBIENTE DE PROTOTIPAGEM DIGITAL

### 2.1 Concepção 1 – Reprodução do Modelo de Referência

Nesta fase inicial do projeto o objetivo principal foi de estudar o funcionamento de cada componente de um atuador elástico serial elétrico. E para isso foi reproduzido, a partir de fotos, um modelo tridimensional com medidas aproximadas ao modelo de referência adotado. Isso foi feito devido à falta de documentação fornecida sobre o atuador, como desenhos de fabricação e montagem. Se for analisado com cuidado, é possível notar que há algumas incoerências no modelo. Algumas peças que não se encaixam, fuso fora de padrão, motor sem fixação, etc.. Nessa fase do projeto esses pontos não são importantes.



Figura 4: Modelo de referência[2] reproduzido no Solid Edge ST4[4].

Depois de concluída a análise, iniciou-se a procura de uma alternativa com as seguintes características:

- Design mais fechado sem exposição dos componentes internos, para evitarem-se os riscos de contaminação e acidentes;
- Menor tamanho para aplicações em robôs vestíveis, exoesqueletos e próteses, emulando músculos naturais;
- Design esteticamente mais adequado a aplicações em robôs vestíveis, exoesqueletos e próteses.

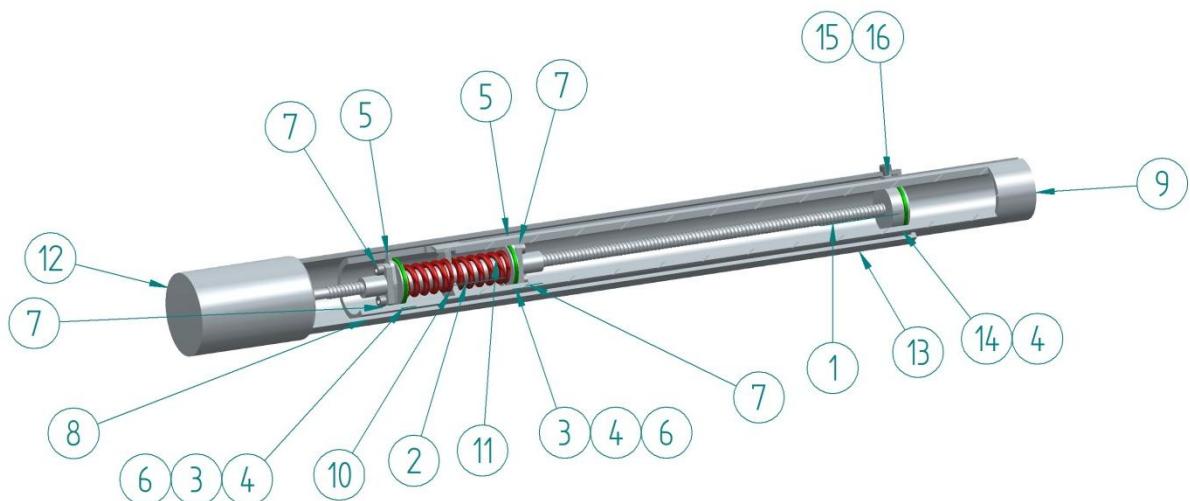
## 2.1 Concepção 2 – Desenho Conceitual

Com o funcionamento do modelo de referência compreendido, já descrito em tópicos anteriores, é feito o primeiro rascunho rumo à ideia final.

Foi adotada uma única estrutura tubular oca, externa e centrada, escolhida como solução adequada que permitiu substituir a pesada estrutura de tubos maciços de aço do modelo de referência. Foram escolhidos um fuso e porca com o diâmetro adequado à ideia inicial e anéis o'ring auto lubrificados como forma de apoio e minimização de atrito.

A Figura 5 mostra o design da *Concepção 2*. Há duas porcas de esferas recirculantes (6); elas estão aparafusadas em chapas com "orelha" guia(5) e flanges sulcados(3). Nestes sulcos são colocados os anéis o'ring auto lubrificados(4).

Os flanges(3) tem um furo central rosqueado para a interligação destes por meio do extensor(2), que é um tubo com rosca macho externa nas duas extremidades. As molas (10 e 11) deslizam em torno do extensor(2) e pressionam em ambos os lados uma chapa que é soldada no tubo base(8) do braço retrátil(9). Essa base é rosqueada no tubo principal do braço retrátil(9) e ambos possuem as guias fêmeas para as "orelhas" das em chapas guia(5). Essas guias garantiriam que as porcas não girariam em relação ao fuso, fazendo com que o movimento de giro do fuso se transformasse em movimento linear ao logo do eixo do fuso.



**Figura 5: Fase conceitual do modelo.**

Como é um modelo de computador ele aparentemente funciona, mas na prática resultaria em impossível de ser feita tal montagem corretamente. A interligação de duas porcas padrão(6) por meio de duas roscas é praticamente impossível de ser garantida, devido à necessidade de o passo do fuso ser complacente com o rosqueamento do tubo nos dois flanges e ainda assim bater a furação dos parafusos das porcas com o flange. O rosqueamento entre o extensor(2) e o tubo principal do braço retrátil(9) é um ponto de concentração de tensões e de difícil fabricação.

O espaço livre no interior do braço retrátil(9) entre as porcas padrão(6), o qual seria utilizado para a instalação interna do sensor e da fita graduada é muito reduzido. O sensor e a fita graduada são necessários para a aquisição de dados da deformação das molas, utilizados para o controle de força do atuador.

## 2.2 Concepção 3 – Correção de Elementos Adotados

Com um conceito definido, é hora de partir para a padronização dos componentes tanto quanto for possível.



Figura 6: Modelo com fuso e porcas padronizados.

O fuso adotado foi de 10 mm de diâmetro. É um fuso laminado segundo o catálogo da NSK[5], e seu passo é igual a 3 mm. A porca para utilização desse fuso é a RNFTL1003A3.5[5]. Seu desenho foi todo reproduzido dentro do modelo computacional.

Com um novo diâmetro de fuso e porcas os tubos externos e que ligam os flanges das porcas sofreram mudanças, por consequência, as molas agora tem um diâmetro interno maior e o diâmetro externo do projeto aumentou de 36 mm para 56 mm.

Os problemas com fixação do motor, montagem das duas porcas com flange e tubo rosqueados, concentrações de tensão e outros ainda permanecem, mas são corrigidos na concepção atual.

### 3 CONCEPÇÃO ATUAL DO ATUADOR ELÁSTICO SERIAL (SEA)

#### 3.1 Descrição Geral

- Atuador elástico serial de *425 mm* de comprimento quando retraído, com *130 mm* de alcance.
- Diâmetro máximo de *60 mm*. Sensor óptico interno.
- Possibilidade de operação com molas de dimensões diversas sendo a carga máxima suportada dependente do conjunto de molas escolhido.
- Fuso de esferas recirculantes laminado de *10 mm* de diâmetro, passo de *3 mm*.



Figura 7: Modelo atual do SEA.

- Mancal para esforços mistos *WBK08-11* [5] em conjunto com rolamento *606 ZZ*.
- Utilização de apenas uma porca *RNFTL 1003A3.5*[5].
- Estrutura principal de tubos de aço carbono trefilados.
- Tubo externo de *60 mm* de diâmetro externo e *3 mm* de espessura. Tubo interno (braço) com *48 mm* de diâmetro externo e também *3 mm* de espessura.
- Mini roletes fazem a interface entre o braço móvel e a base fixa.
- Peso em torno de *3,5 Kg* sem o motor.

### 3.2 Arranjo dos elementos construtivos

A explicação será segmentada por partes de acordo com a montagem das peças em conjuntos lógicos para melhor compreensão de todos elementos envolvidos no projeto atual.

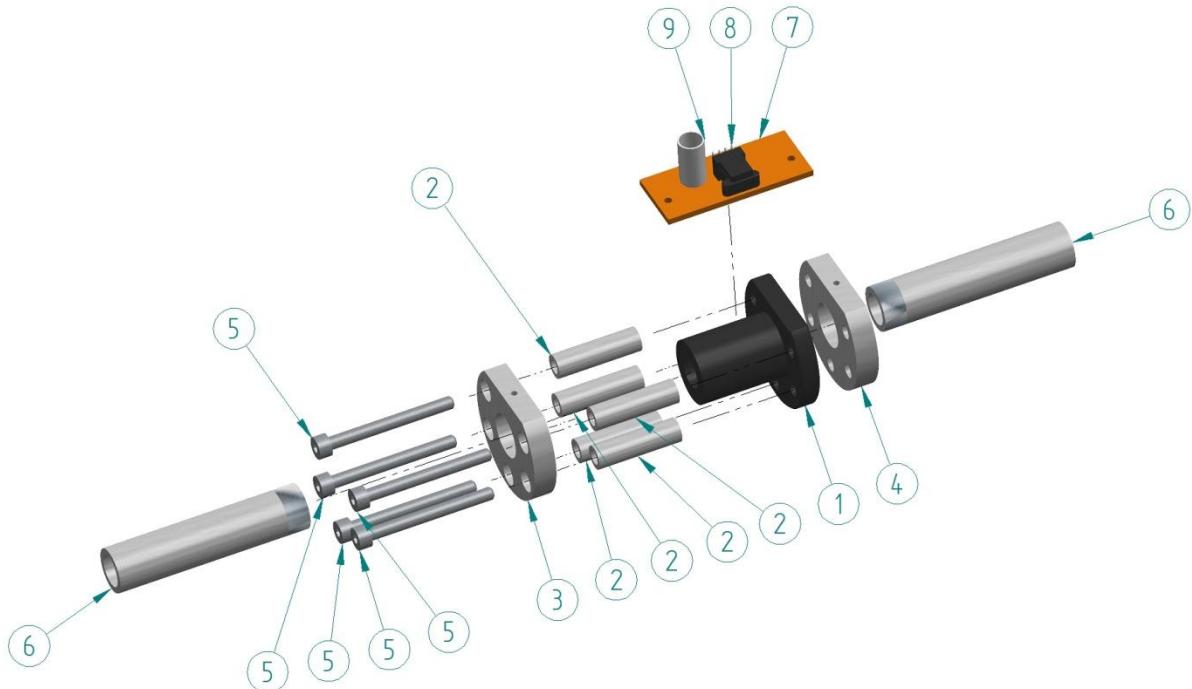


Figura 8: Vista explodida do conjunto de acionamento.

A Figura 8 mostra uma vista explodida do conjunto de acionamento, um conjunto de peças que se comportará como uma única peça após montado.

A porca padrão(1) é prensada por dois flanges aparafusados(4 e 3). Tubos(2) são utilizados como espaçadores para fazer o aperto de um dos flanges sobre a porca padrão(1). O flange(4) possui furos rosqueados para os parafusos Allen e o flange(3), furos rebaixados para a cabeça destes parafusos e passantes para a rosca. No furo central de cada flange é rosqueado um tubo guia(6), o qual sustentará a mola. Por cima dos flanges é aparafusada (parafusos de fixação da placa não mostrados nas figuras) uma placa de circuito(7) com o sensor(8) para medição da deformação da mola. Essa placa possui um tubo(9) metálico para proteger os cabos de saída de sinal e entrada de alimentação do circuito (cabos não mostrados nas imagens). O diagrama das trilhas desta placa ainda não foi definido, mas na região onde a placa toca os flanges, não deve existir passagem de corrente para evitar

curto-circuito, pois o material dos flanges é condutor. A montagem final deste conjunto pode ser visualizada na Figura 9.



Figura 9: Conjunto de acionamento - montagem final.

Provavelmente este conjunto terá um eixo provisório inserido na porca(1), utilizado para manter todas as esferas do mecanismo em seu lugar até que o fuso laminado seja corretamente inserido e substitua o provisório.

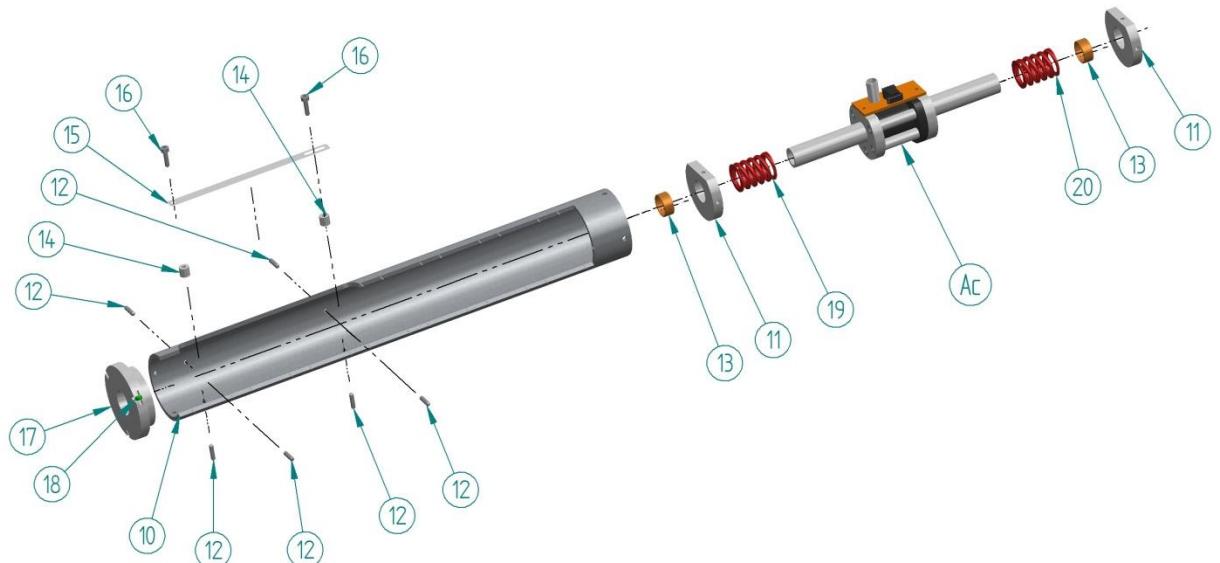


Figura 10: Vista explodida do conjunto de acionamento (Figura 9) com o braço retrátil.

Os flanges(11) são chanfrados e cada um recebe uma bucha(13) de bronze no furo principal. A montagem das molas(19 e 20) em torno dos tubos guia(6), no conjunto de acionamento (Ac), é feita pressionando as molas e os flanges(11) chanfrados

com as buchas(13). Estes flanges(11) devem ser então aparafusados no interior do braço retrátil(10) que possui dois jogos de três furos a espera destes flanges.

**Importante:** as molas em repouso tem um comprimento tal que os furos do braço retrátil(10) e os furos dos flanges(11) não coincidem a não ser que as molas sejam comprimidas. Isto é necessário para quando houver compressão de uma mola devido uma força externa no terminal do atuador, a outra tenha energia armazenada para se estender, preenchendo o espaço que ficaria vazio, mantendo assim o conjunto de acionamento(Ac) em constante suspensão. Dependendo do par de molas utilizados uma prensa se faz necessário para vencer essa força de montagem; peças de montagem provisórias devem ser utilizadas para transferir a força da prensa para os flanges. Uma análise mais detalhada das molas será feita no item 0.

São utilizados parafusos Allen(12) sem cabeça para a fixação dos flanges(11) chanfrados no tubo retrátil(10). O furo destes parafusos(12) tem profundidade tal que quando totalmente apertados, o comprimento restante ofereça interferência apenas ao movimento dos flanges em relação ao interior do tubo, mas não reste comprimento suficiente para causar interferência às peças externas ao tubo móvel, conforme detalhes destacados na Figura 11.

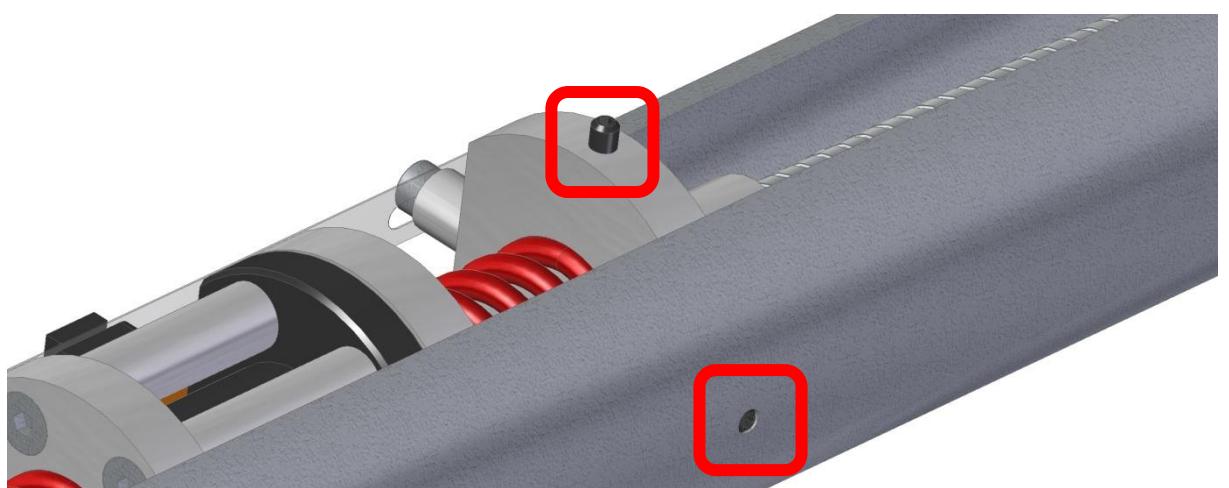


Figura 11: Detalhe de montagem dos parafusos Allen sem cabeça para a fixação dos flanges chanfrados no braço retrátil(10).

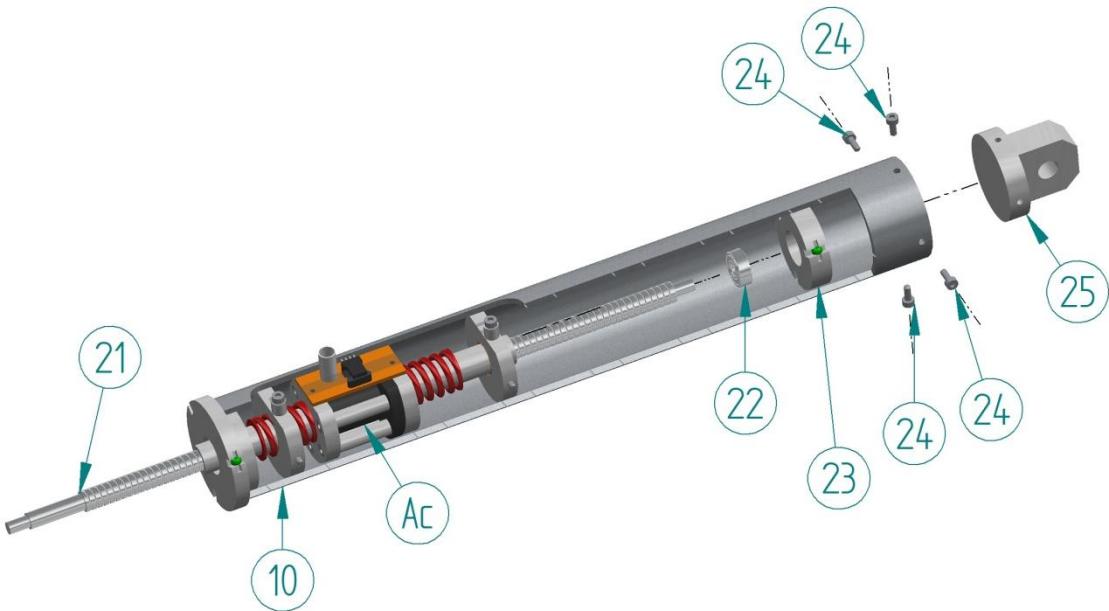
Feito isso um suporte(17) de roletes(18) é rosqueado no fundo do braço retrátil(10). Estes roletes(18) são responsáveis por centralizar o fundo do braço retrátil(10) no interior da camisa externa(29), permitindo o deslizamento do braço retrátil(10) e que a carga radial, que deve ser mantida pequena, não seja suportada pelo fuso laminado(21).

A fita(15) graduada para o sensor(8) óptico, deve ser aparafusada sobre os flanges chanfrados(11) com espaçadores para que a altura fique correta em relação ao leitor do sensor(8).



Figura 12: Montagem do braço retrátil(10) com o conjunto de acionamento Figura 9.

A seguir o fuso, com as especificações de usinagem no catálogo da NSK[5] em anexo, é introduzido substituindo o fuso postiço. Na extremidade que fica no interior do braço, é acoplado o rolamento(22) 606 zz, também especificado pelo catálogo[5]. Este rolamento é sustentado por um flange livre com roletes(18). A fixação é toda feita por interferência que deverá ser calculada em fase futura do projeto. Agora com todos os componentes no interior do braço retrátil(10) já montados é possível ser instalado o terminal(25) onde pode ser acoplado o atuador à carga que se deseja movimentar. Essa peça não foi muito detalhada, pois a finalidade específica de movimentação de carga não é o enfoque deste projeto.

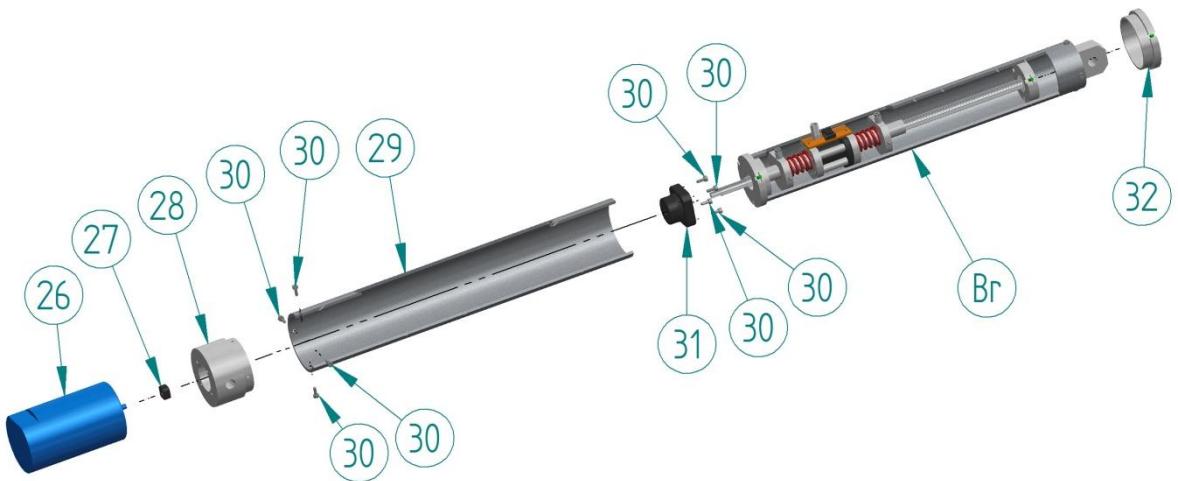


**Figura 13:** Vista explodida de montagem do fuso(21), rolamento(22) 606zz, flange livre(23) e do terminal(25) no conjunto da Figura 12.



**Figura 14:** Montagem final do conjunto da Figura 13.

Na Figura 15 pode-se observar que toda a montagem feita até o passo anterior(Br) é acoplado, pela extremidade do fuso laminado, no mancal(31) misto *WBK08-11*[5]. Esse acoplamento é garantido pela rosca previamente usinada no fuso e uma porca(27) travante *WBK08L-01*[5].



**Figura 15:** Vista explodida da montagem do conjunto da Figura 14, com a camisa externa(29), o conjunto motor-redutor(26) .

O mancal *WBK08-11[5]* é fixado na base cilíndrica do atuador por meio de quatro parafusos(30) Allen de cabeça cilíndrica. A camisa externa(29) é instalada na base(28), que sustenta o motor(26), por meio de quatro parafusos(30) Allen de cabeça cilíndrica alinhando-se o sulco com o tubo de saída de cabos. Na outra extremidade da camisa externa(29) é rosqueado outro suporte(32) de roletes para sustentar o deslizamento do braço retrátil(10). A base(28) possui furos laterais para encaixe de eixos para transmissão do movimento do atuador.

### 3.3 Funcionamento do atuador

O funcionamento do atuador é razoavelmente simples de ser compreendido quando segmentado em três casos particulares:

- 1º caso - Movimento sem carga: neste caso o atuador se movimenta livre, sem carga no terminal; assim ambas as molas estão o mais estendidas possível (exceto pela compressão de montagem). O sensor de deformação deverá apresentar valor de leitura zero o que indica deformação considerada nula nas molas e aplicação nula de força no terminal de carga do atuador.
- 2º caso - Movimento com carga dinâmica: agora, uma das molas terá uma compressão maior que a outra. Qual mola estará comprimida dependerá apenas se é uma carga de compressão ou de tração. Neste caso pode ser o

atuador instalado num braço robótico elevando uma carga. O sensor irá acusar um valor proporcional ao deslocamento do conjunto que contém a porca em relação ao tubo móvel. Este valor deve ser calibrado no controlador para que funcione corretamente. O controlador deverá controlar a velocidade do giro do motor para que a força lida indiretamente pelo sensor e a posição da carga sejam as desejadas.

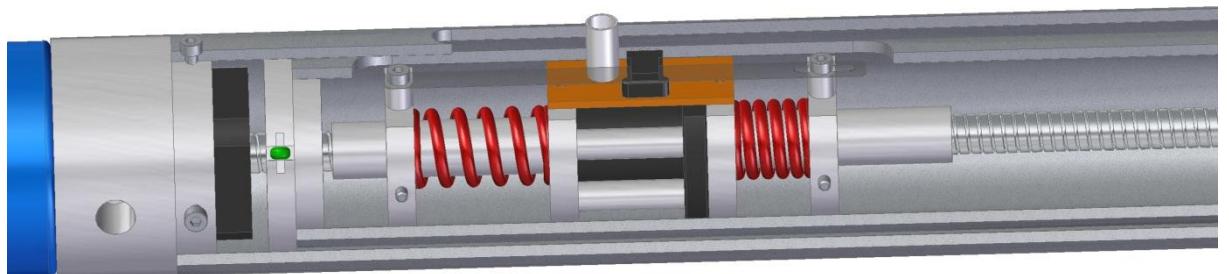


Figura 16: 3º Caso de funcionamento, limitação no movimento de avanço do atuador.

- 3º caso - O terminal do atuador atingiu um limite de posição. Agora o controlador tem papel fundamental no comportamento do atuador. Essa talvez seja a função mais importante deste projeto. Ao atingir um limite o controlador deve monitorar o valor da força exercida e ir reduzindo a velocidade de giro do motor gradualmente para que uma força limite não seja ultrapassada. Isso é muito útil para uma perna mecânica que avança em terreno acidentado. Não se pode ter um controle de posição preciso nesses ambientes, portanto com um controle de força pode-se obter uma variável muito importante para o controle do andar de um robô que se locomove por meio de pernas.

### 3.4 Características do Atuador Elástico Serial (SEA)

#### 3.4.1 Dimensionamento das Molas

As relações matemáticas para o dimensionamento das molas molas de compressão foi inserida na planilha da Tabela 1 de acordo com Shigley [6].

O dimensionamento foi realizado a partir da faixa de valores de carga desejadas para esta concepção do atuador. A Tabela 1 permite um estudo empírico dos parâmetros da mola os quais orientarão a busca do modelo e tamanho de mola mais adequado existente no mercado. Uma opção de fornecedor e mola é também apresentada na planilha

Tabela 1: Planilha de simulação de parâmetros construtivos de molas, de acordo com as dimensões disponíveis no atuador.

Item	d[mm]	Birmingham	Di[min 14 mm]	De[max 29,2mm]	D[mm]	G[Gpa]	n	K[N/mm]	Ls[mm]	Lo[mm]	Fm[N]	Fmax[N]
1	3,76	9	21,5	29,0	25,3	79,3	6	24,6	20,7	39,3	327,2	458,1
2	3,40	9	19,9	26,7	23,3	79,3	6	20,9	18,7	36,2	214,0	366,2
3	3,40	10	24,5	31,3	27,9	79,3	6	12,2	18,7	42,3	199,6	288,6
4	3,05	11	22,1	28,2	25,2	79,3	6	10,7	16,8	38,2	130,2	229,1
5	2,77	12	20,6	26,1	23,4	79,3	6	9,1	15,2	35,3	85,0	183,4
6	2,41	13	17,8	22,6	20,2	79,3	7	6,8	15,7	37,3	76,7	146,7
7	2,11	14	17,3	21,5	19,4	79,3	8	3,8	15,8	42,0	61,1	100,0
Casa das molas		<a href="http://www.molas.com.br/Consulta_Compressao.asp?Intervalo=24,10%20a%2026,90">http://www.molas.com.br/Consulta_Compressao.asp?Intervalo=24,10%20a%2026,90</a>										
2403	3,00	zincado	18,2	24,2	21,2	79,3	8	12,0	22,5	57,3	376,8	418,9
2257	2,30	inox	19,9	24,5	22,2	79,3	6	5,1	12,7	55,0	147,0	214,7
1275	2,80	carbono	19,3	24,9	22,1	79,3	7	9,4	18,2	88,5	588,0	661,4

### 3.4.2 Capacidade de carga

A capacidade de carga foi definida a partir das forças desejadas para o atuador e as forças de operação do conjunto de molas. Como foi dito anteriormente, as molas trabalham com uma pré carga para manter o conjunto de acionamento da Figura 9 suspenso por uma força não nula entre os flanges(11). Posteriormente, a capacidade de carga deverá ser ajustada em testes de laboratório com o protótipo do atuador a ser construído. Este ajuste será necessário para obter-se uma largura de banda de frequência de aplicação de carga adequada.

### 3.4.3 Escolha do motor

#### 3.1.1

A escolha do motor foi definida a partir das forças desejadas para o atuador e as forças de operação do conjunto de molas, considerando a inclusão de um redutor planetário e a conversão de forças no fuso de esferas recirculantes[5][6] . Para atender as características de acionamento foi escolhido um motor e redutor Maxonmotor[7] EC 60 Ø60 mm, brushless, 400 Watt, conforme data sheet anexa..

### 3.4.4 Sensores

Os sensores necessários são dois, um para medir a deformação das molas e um para medir o deslocamento da porca do fuso de esferas recirculantes.

O sensor para medição da posição da porca, apesar de não desenhado, é um encoder instalado no eixo do motor. Com o passo do fuso laminado conhecido e se for usado um encoder absoluto é tudo que se precisa para conhecer a variável desejada.

Para o sensor de medição de deformação das molas, foi retirado um sensor óptico de uma antiga impressora. Este sensor possui no mesmo encapsulamento, um emissor e um receptor, uma fita graduada transparente passa entre o feixe luminoso (provavelmente um feixe infra-vermelho). A fita possui linhas pretas opacas muito finas que não permitem a passagem do feixe luminoso, como são intercaladas o movimento da fita produz um trem de pulsos que, conhecendo a distância entre as linhas pretas, pode-se determinar uma distância, essa distância no caso será a deformação das molas.

Como não foi encontrado um manual para o sensor, foi realizado um experimento para o levantamento do circuito necessário para o correto funcionamento do sensor. Os resultados o circuito pode ser visto na figura a seguir:



Figura 17: Experimento realizado para o levantamento do circuito do sensor de contagem para determinação da deformação das molas.

O experimento consiste de uma fonte controlada com proteção contra curto circuito, um *protoboard*, resistores diversos e fios *jumpers*. Basicamente foi assumido um

risco baixo de se danificar o sensor, ajustando a fonte para uma tensão baixa (5V), e um simples jogo de tentativa e erro para tentar descobrir a pinagem do sensor.

#### **3.4.5 Propriedades Inerciais**

No Apêndice A estão listadas as dimensões e propriedades inerciais do modelo, obtidas do ambiente de prototipagem digital, Solid Edge ST4[4], as quais serão utilizadas para simulação do comportamento dinâmico do modelo e ajustes de constantes de molas.

## **4 RESULTADOS**

- Foi realizada a prototipagem digital de um atuador elástico serial linear elétrico para aplicação em dispositivos mecatrônicos e robôs;
- O Projeto foi todo desenvolvido ao longo de aproximadamente 2 anos entre 2011 e 2013;
- Reuniões semanais entre o orientado Ivam Pretti e o professor orientador Antônio Bento ocorreram com duração entre uma e duas horas na UFES com o objetivo de delinear o andamento do projeto;
- Foi utilizado o ambiente de prototipagem digital Solid Edge ST4[4] para modelagem, montagem digital de todos os componentes, geração das imagens de vistas de corte em perspectiva e vista explodida para este documento;
- O sistema Dropbox foi utilizado para sincronização de todos os arquivos .par, .asm, .dft e outros, gerados entre os computadores do professor, na UFES, com o do orientado, em Jacaraípe, para que atualizações pudessem ser feitas em qualquer lugar e os arquivos gerados pudessem ser guardados num local seguro durante o processo.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este é um projeto em processo de desenvolvimento, neste tópico serão abordados pontos que necessitam de atenção para próximas etapas do projeto antes da fabricação e montagem do atuador.

Cálculo de tolerâncias para fabricação:

- Dos eixos dos mini roletes;

- Para todas as cavidades onde serão encaixados os eixos dos mini roletes;
- Para interface dos mini roletes com suas respectivas superfícies de rolamento;
- Para interface do rolamento
- Para usinagens da interface entre a base(28) e a camisa externa (29), essa interface não é rosqueada. Os parafusos garantem o alinhamento do sulco com os demais componentes.

Especificação mais apurada de acordo com pesquisa de mercado dos materiais base para as peças, especialmente os mini roletes.

A fixação do motor(26) à base(28) de transmissão de movimento deve ser desenvolvida.

Desenvolvimento de uma estrutura que dê suporte aos cabos de alimentação e sinal do sensor de deformação das molas para que este tenha um único ponto fixo de conexão elétrica ao invés de um cabo pendurado.

Definição do projeto da estrutura para ser aplicado o atuador, como um braço ou perna robóticos, para melhor desenvolvimento do terminal(25) e furos para eixo da base(28). Desenhos de detalhamento de cada peça do atuador.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] J. Pratt, B. Krupp, e C. Morse, "Series elastic actuators for high fidelity force control", *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 29, n° 3, p. 234–241, 2002.
- [2] J. E. Pratt e B. T. Krupp, "Series elastic actuators for legged robots", in *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004, vol. 5422, p. 135–144.
- [3] R. K. Aaron, H. M. Herr, D. M. Ciombor, L. R. Hochberg, J. P. Donoghue, C. L. Bryant, J. R. Morgan, e M. G. Ehrlich, "Horizons in prosthesis development for the restoration of limb function", *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, vol. 14, n° 10, p. S198–S204, 2006.
- [4] "Solid Edge ST4: Siemens PLM Software". [Online]. Available at:  
[http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/velocity/solidedge/st4/](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/velocity/solidedge/st4/). [Acessado: 01-jan-2012].
- [5] "Mechatronics | NSK". [Online]. Available at:  
[http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na\\_en/hs.xsl/mechatronics.html](http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/mechatronics.html). [Acessado: 06-jun-2012].
- [6] R. G. Budynas e J. K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill New York, 2008.
- [7] "DC motors and drive systems by maxon motor". [Online]. Available at:  
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/>. [Acessado: 06-jun-2012].

## A. PROPRIEDADES INERCIAIS

### Fuso

Physical Properties Report Part:  
Z:\Dropbox\ProjetoDePesquisa\PG\_Encoder\Atuador 4\Fuso.par  
4/10/2013 5:54 Pm

density= 0,000008 kg/mm<sup>3</sup>  
volume= 22597,516581 mm<sup>3</sup>  
mass= 0,181390 kg  
Surface Area= 10943,972569 mm<sup>2</sup>

With respect to the Global Coordinate System :

Center of Mass :

X= -0,002869 mm  
Y= 149,999035 mm  
Z= 0,000129 mm

Center of Volume :

X= -0,002869 mm  
Y= 149,999035 mm  
Z= 0,000129 mm

Mass Moments of Inertia :

Ixx= 5442,757166 kg-mm<sup>2</sup> Iyy= 2,184877 kg-mm<sup>2</sup>  
Izz= 5442,753412 kg-mm<sup>2</sup> Ixz= 0,026633 kg-mm<sup>2</sup>  
Ixy= -0,077449 kg-mm<sup>2</sup> Iyz= -0,009236 kg-mm<sup>2</sup>

Principal Axes Orientation :

X= 0,731552 -0,000007 -0,681786  
Y= 0,681786 0,000007 0,731552  
Z= -0,000000 -1,000000 0,000009

With respect to the Principal Axes :

Principal Moments of Inertia :

I1= 1361,553529 kg-mm<sup>2</sup> I2= 1361,500130  
kg-mm<sup>2</sup> I3= 2,184876 kg-mm<sup>2</sup>

Radii of Gyration :

Rx= 86,638390 mm  
Ry= 86,636691 mm  
Rz= 3,470615 mm

## Physical Properties Report

volume= 181767,875 mm<sup>3</sup>  
mass= 1,239 kg  
User Quantity Mass= 1,239 kg

With respect to the Global Coordinate System.

### Center of Mass:

X= -0,02 mm  
Y= 162,75 mm  
Z= -1,14 mm

### Center of Volume:

X= -0,01 mm  
Y= 144,48 mm  
Z= -1,05 mm

### Mass Moments of Inertia:

I<sub>xx</sub>= 47739,00 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>yy</sub>= 606,26 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>zz</sub>= 47766,56 kg-mm<sup>2</sup>

I<sub>xy</sub>= 0,72 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>xz</sub>= -0,13 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>yz</sub>= -101,68 kg-mm<sup>2</sup>

### Principal Axes Orientation:

1= 0,006	-0,009	1,000
2= 1,000	0,000	-0,006
3= 0,000	1,000	0,009

With respect to the Principal Axes

### Principal Moments of Inertia:

I<sub>1</sub>= 14953,75 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>2</sub>= 14923,42 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>3</sub>= 603,48 kg-mm<sup>2</sup>

### Radii of Gyration:

K<sub>1</sub>= 109,87 mm  
K<sub>2</sub>= 109,76 mm  
K<sub>3</sub>= 22,07 mm

## Molas

Physical Properties Report Part:  
\psf\Home\Dropbox\ProjetoDePesquisa\PG\_Encoder\Atuador 4\Mola.par  
4/12/2013 12:21 Am

density= 0,000008 kg/mm<sup>3</sup>  
volume= 2079,747622 mm<sup>3</sup>  
mass= 0,016291 kg  
Surface Area= 2975,385227 mm<sup>2</sup>

With respect to the Base :

Center of Mass :  
X= -0,000284 mm  
Y= 13,000020 mm  
Z= -0,300044 mm

Center of Volume :  
X= -0,000284 mm  
Y= 13,000020 mm  
Z= -0,300044 mm

Mass Moments of Inertia :  
Ix<sub>x</sub>= 4,418344 kg-mm<sup>2</sup> Iy<sub>y</sub>= 1,204907 kg-mm<sup>2</sup>  
Iz<sub>z</sub>= 4,422036 kg-mm<sup>2</sup> Ixz= 0,000018 kg-mm<sup>2</sup>  
Iyz= -0,063475 kg-mm<sup>2</sup>

Principal Axes Orientation :  
X= -0,003555 -0,000217 0,999994  
Y= 0,999790 0,020166 0,003558  
Z= -0,020167 0,999797 0,000145

With respect to the Principal Axes :

Principal Moments of Inertia :  
I<sub>1</sub>= 1,668906 kg-mm<sup>2</sup> I<sub>2</sub>= 1,663934 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>3</sub>= 1,203253 kg-mm<sup>2</sup>

Radii of Gyration :  
Rx= 10,121538 mm  
Ry= 10,106451 mm  
Rz= 8,594273 mm

## Physical Properties Report

volume= 41046,220 mm<sup>3</sup>  
mass= 0,191 kg  
User Quantity Mass= 0,191 kg

With respect to the Global Coordinate System.

### Center of Mass:

X= 1,12 mm  
Y= -11,35 mm  
Z= 0,00 mm

### Center of Volume:

X= 1,11 mm  
Y= -12,14 mm  
Z= 0,00 mm

### Mass Moments of Inertia:

I<sub>xx</sub>= 133,418 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>yy</sub>= 29,016 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>zz</sub>= 130,202 kg-mm<sup>2</sup>

I<sub>xy</sub>= -2,386 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>xz</sub>= 0,000 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>yz</sub>= 0,000 kg-mm<sup>2</sup>

### Principal Axes Orientation:

1= 1,000	-0,001	0,000
2= 0,000	0,000	1,000
3= -0,001	-1,000	0,000

With respect to the Principal Axes

### Principal Moments of Inertia:

I<sub>1</sub>= 108,783 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>2</sub>= 105,326 kg-mm<sup>2</sup>  
I<sub>3</sub>= 28,775 kg-mm<sup>2</sup>

### Radii of Gyration:

K<sub>1</sub>= 23,85 mm  
K<sub>2</sub>= 23,46 mm  
K<sub>3</sub>= 12,26 mm