

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis**

**CARACTERIZAÇÃO DE ATUADORES BASEADOS EM  
MÚSCULOS ARTIFICIAIS POLIMÉRICOS POR EFEITO  
CAPACITIVO**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2007



**Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis**

**CARACTERIZAÇÃO DE ATUADORES BASEADOS EM  
MÚSCULOS ARTIFICIAIS POLIMÉRICOS POR EFEITO  
CAPACITIVO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Marco Antonio Meggiolaro**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Luciano Luporini Menegaldo**

Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais - IME

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro  
11 de Setembro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis**

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação (Pontifícia Universidade Católica) em 2005. Trabalhou por dois anos na área de desenvolvimento de *softwares* para sistemas de controle e automação antes de começar mestrado na área de Mecânica Aplicada na Pós-Graduação da PUC-Rio. Participa desde 2006 de projetos de robóticas no Laboratório de Engenharia de Controle e Automação (LECA). Suas áreas de interesse abrangem robótica, controle e modelagem de sistemas, automação de processos, bioengenharia e inteligência artificial.

### Ficha Catalográfica

Assis, Pedro Ferreira da Costa Blois de

Caracterização de atuadores baseados em músculos artificiais poliméricos por efeito capacitivo / Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2007.

104 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Músculos artificiais. 3. Polímeros dielétricos. 4. Controle. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

aos meus pais, Angela Cristina e José Roberto e ao meu irmão Bruno

## Agradecimentos

- Ao CNPq, pelo apoio financeiro;
- À PUC-Rio pelo seu excelente corpo acadêmico que me deu as bases para este estudo;
- Ao orientador Marco Antonio Meggiolaro, pelas oportunidades, orientação e ensinamentos no âmbito da robótica;
- Ao professor Mauro Speranza Neto, pelo apoio a minha escolha pela carreira na pesquisa;
- Ao professor Raul Queiroz Feitosa, pela primeira e vital oportunidade na área de pesquisa;
- Ao professor Mauro Schwanke da Silva, pelo apoio no laboratório;
- À minha família, que me deu educação, valores morais e éticos essenciais para o sucesso da minha vida profissional e emotiva;
- Aos alunos de graduação e pós-graduação que diariamente trabalham no laboratório e me ajudaram tanto para a conclusão desse trabalho;
- À minha namorada Renata Marcello Lamarca que tanto me confortou e me acalmou durante os momentos mais difíceis desse trabalho;
- Aos amigos de escalada, windsurf, volei e outros esportes que me ajudaram a aliviar o stress durante mais essa etapa da minha vida.

## Resumo

Blois, Pedro F. C. A., Meggiolaro, Marco A. **CARACTERIZAÇÃO DE ATUADORES BASEADOS EM MÚSCULOS ARTIFICIAIS POLIMÉRICO POR EFEITO CAPACITIVO**. Rio de Janeiro 2007, 104p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É notória a necessidade de encontrar novas tecnologias para atuação de sistemas robóticos tão eficazes quanto a do músculo natural. Os atuadores tradicionais possuem grande agilidade e força quando comparados aos músculos naturais, mas suas dimensões e peso são elevados em relação à força que são capazes de exercer, e demandam muita energia para cumprirem suas tarefas. Manipuladores robóticos menores e mais baratos poderiam existir se pudessem utilizar músculos naturais para impulsioná-los. Ao mesmo tempo, as indústrias gastariam menos com os custos envolvidos em energia e compra desses manipuladores. Este trabalho estuda o comportamento de músculos artificiais baseados no polímero acrílico VHB4905, através da construção de uma bancada de teste com sensor de força, incluindo especificação de todos os equipamentos e o desenvolvimento de circuitos de alta tensão (até 10kV) para acioná-los. Durante o desenvolvimento e implementação do circuito foram encontrados problemas intrínsecos à manipulação de tensões da ordem de vários kV. Esses problemas foram apontados e soluções satisfatórias foram implementadas, de forma a tornar os experimentos possíveis. Modelos matemáticos de algumas das principais configurações possíveis para atuadores foram desenvolvidos. Os modelos desenvolvidos para uma das configurações típicas foram comparados com resultados experimentais com um erro máximo absoluto de 1% (26,7mN) do valor real. Experimentos em atuadores de molduras fixas foram feitos com resultados de 223% de deformação da região ativa, com desempenho muito superior ao dos músculos naturais. A partir de um dos modelos desenvolvidos, implementou-se um controlador PID compensado que gerou melhores resultados a entradas em degrau que o PID padrão, o qual não leva em consideração a não-linearidade e a alta sensibilidade do atuador quando submetido a tensões próximas da tensão de quebra do dielétrico. A eficácia da técnica de controle proposta foi comprovada experimentalmente.

## Palavras-chave

Músculos Artificiais, Polímeros Dielétricos, Controle

## Abstract

Blois, Pedro F. C. A., Meggiolaro, Marco A. **CHARACTERIZATION OF ACTUATORS BASED ON POLYMERIC ARTIFICIAL MUSCLES WITH CAPACITIVE EFFECT.** Rio de Janeiro 2007. 104p. MSc Dissertation – Mechanical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

It is well known the needs of finding new technologies for robotic systems actuations, with the same efficiency of the natural muscles. The common actuators have better agility and force when compared to natural muscles, but the dimensions and weight are bigger and for that the demand of energy necessary for the actuation is higher. Smaller and cheaper robot manipulators could exist if they were able to use natural muscles to drive them. At the same time, industries would spend less money with energy and manipulators. This work studies the behavior of artificial muscles based on dielectric elastomers (VHB4905) through the development of a test bench with force transducer, including the specification of all the equipments and the development of a high voltage circuit (10kV maximum). During the development and implementation of the circuit, problems inherent to high voltage manipulation were found. Those problems were shown and tolerable solutions were taken, so that the experiments were feasible. Mathematic models of some of the main configurations for actuators were developed. One of those models (from a typical configuration) was compared with experimental results with a maximum absolute error of 1% (26.7mN) of the real value. Experiments with fixed frame actuators were made with 223% of strain, showing a much higher performance compared to natural muscles. With one of the mathematic models, a PID controller with adjustable gains was developed and presented better results, for a step response, when compared to a standard PID controller. This last one do not take into account the non-linearities and for that it behaviors with great sensibility when subjected to high voltages (close to dielectric breakdown). The effectiveness of the proposed control technique was proved experimentally.

## Key Words

Artificial Muscles, Dielectric Polymers, Control

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 MÚSCULOS NATURAIS E ARTIFICIAIS .....</b>	<b>17</b>
2.1 MÚSCULOS NATURAIS .....	17
2.2 MÚSCULOS ARTIFICIAIS .....	22
2.3 POLÍMEROS ATIVADOS POR ESTÍMULOS NÃO ELÉTRICOS.....	23
2.4 POLÍMEROS ELETROATIVOS (EAP) ELETRÔNICOS .....	28
2.5 POLÍMEROS ELETROATIVOS (EAP) IÔNICOS.....	30
<b>3 POLÍMEROS DIELETRICOS.....</b>	<b>33</b>
3.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS .....	33
3.2 MODELAGEM DE ATUADORES BASEADOS EM POLÍMEROS DIELETRICOS .....	38
3.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS NO CONTROLE DO SISTEMA .....	46
<b>4 SISTEMA ELÉTRICO DE ACIONAMENTO .....</b>	<b>50</b>
4.1 IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DO EQUIPAMENTO DE LEITURA DA TENSÃO.....	52
4.2 RUÍDO NA LEITURA DA TENSÃO APLICADA .....	53
4.3 SINAL DE COMANDO INTOLERANTE A VARIAÇÕES DE GRANDES AMPLITUDES.....	54
4.4 TENSÕES APLICADAS NO POLÍMERO ABAIXO DAS ESPERADAS.....	55
<b>5 SISTEMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>58</b>
5.1 DETALHES DO MATERIAL.....	58
5.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	58
5.3 EQUIPAMENTOS .....	65
5.4 SENSORES .....	67
5.5 MONTAGEM DO ATUADOR .....	68
5.6 SOFTWARE DE CONTROLE .....	71
<b>6 RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
6.1 TESTE DE DEFORMAÇÃO.....	73
6.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE FORÇA POR DEFORMAÇÃO.....	75
6.3 TESTE DE FORÇA BLOCANTE .....	77
6.4 CONTROLADOR PID COM GANHOS VARIÁVEIS .....	80
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>84</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1: ORGANIZAÇÃO DO MÚSCULO ESQUELÉTICO, DESDE O NÍVEL MACROSCÓPICO ATÉ O MOLECULAR: F, G, H E I SÃO CORTES TRANSVERSOS NOS PLANOS INDICADOS [GUYTON, 1993]	18
FIGURA 2: ILUSTRAÇÃO MOSTRANDO A CONTRAÇÃO MUSCULAR ATRAVÉS DO DESLIZAMENTO ENTRE OS FILAMENTOS FINOS E GROSSOS [NELSON E COX, 2000].	20
FIGURA 3: MECANISMO MOLECULAR DA CONTRAÇÃO MUSCULAR [NELSON E COX, 2000].	20
FIGURA 4: CONTROLE DE FORMA UTILIZANDO ESTRUTURAS “INTELIGENTES” [BAR-COHEM, 2004].	23
FIGURA 5: UM ELEMENTO GERADOR DE FORÇA, UM ESFÍNCTER URETRAL ARTIFICIAL E UMA GARRA ROBÓTICA SÃO ALGUNS DOS DISPOSITIVOS MECÂNICOS CONSTRUÍDOS A PARTIR DO GEL POLIMÉRICO CONTRÁCTIL [WOOJIN, 1996].	24
FIGURA 6: PROCESSO DE MUDANÇA NO FORMATO PARA POLÍMEROS DE MEMÓRIA DE FORMA [SOKOLOWSKI, 1999].	25
FIGURA 7: ÓRTESE PARA BRAÇO UTILIZANDO MÚSCULOS DE MCKIBBEN [KOBAYASHI ET AL., 2006].	25
FIGURA 8: IMAGEM DE UM GEL <i>POLY(N-ISOPROPILACRILAMIDA)</i> (PNIPAM) EM D <sub>2</sub> O ANTES (A) E DEPOIS (B) DA ILUMINAÇÃO DE UM LASER DE 0,75W DE POTÊNCIA COM UM COMPRIMENTO DE ONDA DE $\lambda = 1064\text{nm}$ [BAR-COHEM, 2004].	26
FIGURA 9: MUDANÇA NO FORMATO DE UM FERROGEL INDUZIDO POR UM CAMPO MAGNÉTICO NÃO-UNIFORME DE UM ÍMÃ PERMANENTE ONDE (NA IMAGEM DA ESQUERDA) O FERROGEL ESTÁ A 15CM DO ÍMÃ E (NA IMAGEM DA DIREITA) LOGO ACIMA DO ÍMÃ [BAR-COHEM, 2004].	27
FIGURA 10: VÁLVULA AUTOMÁTICA FEITA DE GEL POROSO PVME [ICHIO ET AL., 1995].	27
FIGURA 11: ATUADOR PIEZOELÉTRICO COM DUAS CAMADAS ATIVAS SEM TENSÃO APLICADA (ESQUERDA) E COM TENSÃO APLICADA (DIREITA) [CHANG ET AL., 2000].	28
FIGURA 12: A IMAGEM (A) MOSTRA O DESENHO CONCEITUAL DO NANOATUADOR. UM ROTOR (PLACA DE METAL) É PRESO A UM NANOTUBO DE CARBONO REFORÇADO (MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE - MWNT) QUE AGE COMO EIXO E É A FONTE DE ROTAÇÃO. CONTATOS ELÉTRICOS COM O ROTOR SÃO FEITOS ATRAVÉS DO MWNT E OS BLOCOS ANCORADOS (A1, A2). TRÊS ELETRODOS (DO ESTATOR), DOIS NA SUPERFÍCIE DE SiO <sub>2</sub> (S1, S2) E UM ENTERRADO NA SUPERFÍCIE S3 FORNECEM ELEMENTOS DE CONTROLE DE TENSÃO ADICIONAIS. A MONTAGEM INTEIRA DO ATUADOR ESTÁ INTEGRADA EM UM CHIP DE SILÍCIO. A IMAGEM (B) MOSTRA A IMAGEM DO NANOATUADOR ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA. A BARRA BRANCA NO CANTO INFERIOR ESQUERDO POSSUI 300HM [FENNIMORE ET AL., 2003].	31
FIGURA 13: FLUIDO ELETRO-REOLÓGICO DESATIVADO (ESQUERDA) E ATIVADO (DIREITA) [BAR-COHEM, 2004].	32
FIGURA 14: PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE ATUADORES COM POLÍMEROS DIELÉTRICOS [BAR-COHEM, 2004].	34
FIGURA 15: NA PARTE ESQUERDA DA FIGURA, SÃO MOSTRADAS AS DEFORMAÇÕES CIRCULAR (EM CIMA) E LINEAR (EM BAIXO) DO POLÍMERO ANTES E DEPOIS DA SUA ATIVAÇÃO. A ÁREA ESCURA CORRESPONDE AOS ELETRODOS. O ELASTÔMERO É TRANSPARENTE. NA PARTE DIREITA ENCONTRA-SE TÍPICAMENTE A ESPESSURA OU DEFORMAÇÃO PLANAR EM RESPOSTA A UM CAMPO ELÉTRICO APLICADO PARA UM POLÍMERO SEM CARGAS EXTERNAS [BAR-COHEM, 2004].	35
FIGURA 16: ATUADOR EM FORMA DE DIAMANTE [WINGERT, 2000].	35
FIGURA 17: ATUADOR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE FEITO DO POLÍMERO, COM 9 REGIÕES ATIVADAS, ENROLADO NUMA MOLA, DOBRANDO PARA A ESQUERDA EM RESPOSTA À ATIVAÇÃO DE ALGUMAS DAS REGIÕES DO POLÍMERO [BAR-COHEM, 2004].	36
FIGURA 18: ESBOÇO DO POLÍMERO NA CONFIGURAÇÃO DE CAPACITOR LIVRE.	39
FIGURA 19: ESBOÇO DO POLÍMERO NA CONFIGURAÇÃO DE CAPACITOR COM ELETRODOS RÍGIDOS.	40
FIGURA 20: ESBOÇO DO POLÍMERO NA CONFIGURAÇÃO DE ATUADOR RETANGULAR.	42
FIGURA 21: ESBOÇO DA MONTAGEM DO EXPERIMENTO DE TESTE DA FORÇA DE BLOCAGEM DO ATUADOR [KOFOD, 2001].	44
FIGURA 22: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE DE FORÇA DO ATUADOR POLIMÉRICO.	46
FIGURA 23: MALHA DE CONTROLE DO SISTEMA COM A UTILIZAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID COM GANHOS VARIÁVEIS.	48
FIGURA 24: “CAIXA PRETA” DESENVOLVIDA CONTENDO O CIRCUITO DE ALTA TENSÃO DESENVOLVIDO. A SAÍDA DE ALTA TENSÃO ENCONTRA-SE NA PARTE DE TRÁS.	51
FIGURA 25: DIAGRAMA DA LEITURA DE ALTA TENSÃO APLICADA NO SISTEMA.	53
FIGURA 26: CIRCUITO DA ENTRADA ANALÓGICA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO USB-6009.	53

FIGURA 27: FOTO MOSTRANDO A PERDA DE ENERGIA POR EFEITO CORONA NAS IMPERFEIÇÕES DA SUPERFÍCIE DE UM TORÓIDE [HTTP://WWW.SKY-CHASER.COM/TCPART7.HTM, ACESSADO EM 22/08/2007].	56
FIGURA 28: SUPORTE SEPARADOR ONDE SÃO PRESOS OS ATUADORES.	59
FIGURA 29: SUPORTE ELEVADOR ONDE É PRESO O SENSOR DE FORÇA (NO ALTO À ESQUERDA).	60
FIGURA 30: BANCADA DE TESTE SEM O ATUADOR.	61
FIGURA 31: DETALHE DA BANCADA COM O ATUADOR MONTADO.	61
FIGURA 32: ESBOÇO DO EXPERIMENTO DE DEFORMAÇÃO MOSTRANDO AS REGIÕES ATIVA E PASSIVA, ANTES E DEPOIS DE APLICAR A TENSÃO ELÉTRICA [WISSLER E MAZZA, 2006].	62
FIGURA 33: ESBOÇO MOSTRANDO A MONTAGEM DO ATUADOR UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS.	63
FIGURA 34: ESBOÇO DA MONTAGEM DOS TESTES DE FORÇA COM MOLDURAS DE FENOLITE [KOFOD, 2001].	64
FIGURA 35: MÓDULO COMPACTDAQ COM APENAS DOIS MÓDULOS PARA LEITURA DO SENSOR DE FORÇA E ATUAÇÃO SOBRE O SISTEMA.	66
FIGURA 36: MÓDULO USB-6009 COM O CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO PARA LEITURA DO SENSOR DE ALTA TENSÃO.	67
FIGURA 37: DETALHE DO SENSOR DE FORÇA MONTADO NA BANCADA DE TESTE.	68
FIGURA 38: ARMAÇÃO DE ALUMÍNIO UTILIZADO PARA ESTICAR O POLÍMERO.	69
FIGURA 39: SEQÜÊNCIA PARA ESTICAR O POLÍMERO NAS DEFORMAÇÕES DESEJADAS [PLANTE E DUBOWSKY, 2006].	70
FIGURA 40: TELA DO SOFTWARE DE CONTROLE DA BANCADA DE TESTE DESENVOLVIDA.	72
FIGURA 41: MONTAGEM DO TESTE DE DEFORMAÇÃO.	73
FIGURA 42: À ESQUERDA: REGIÃO ATIVA SEM EXCITAÇÃO COM 201MM <sup>2</sup> . À DIREITA: A MESMA REGIÃO ATIVA MAS COM UMA EXCITAÇÃO DE 4,1KV PROVOCANDO UMA DEFORMAÇÃO DA ÁREA DE 223%.	74
FIGURA 43: RESPOSTA DE FORÇA DO POLÍMERO PARA DEFORMAÇÕES DE ATÉ 1000%.	75
FIGURA 44: CURVAS EXPERIMENTAL E TEÓRICA DE TENSÃO MECÂNICA DE ENGENHARIA PELA DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA SEM ESTÍMULO ELÉTRICO.	76
FIGURA 45: CURVAS EXPERIMENTAL E TEÓRICA DE TENSÃO MECÂNICA REAL PELA DEFORMAÇÃO REAL SEM ESTÍMULO ELÉTRICO.	76
FIGURA 46: COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS EXPERIMENTAL E TEÓRICA DA VARIAÇÃO DA FORÇA EM FUNÇÃO DA TENSÃO APLICADA NO MÚSCULO ARTIFICIAL.	78
FIGURA 47: CURVAS DE TENSÃO MECÂNICA DE ENGENHARIA PELA DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA PARA DIFERENTES ESTÍMULOS ELÉTRICOS.	79
FIGURA 48: CURVAS DE TENSÃO MECÂNICA REAL PELA DEFORMAÇÃO REAL PARA DIFERENTES ESTÍMULOS ELÉTRICOS.	79
FIGURA 49: RESPOSTA A DIVERSOS DEGRAUS DO SISTEMA CONTROLADO PELO PID PADRÃO, MEDIDA EXPERIMENTALMENTE, COM GANHOS AJUSTADOS PARA OTIMIZAR A RESPOSTA AO DEGRAU DE 4000mN. NOTE O COMPORTAMENTO OSCILATÓRIO PARA DEGRAUS MAIS BAIXOS	82
FIGURA 50: RESPOSTA A DIVERSOS DEGRAUS DO SISTEMA CONTROLADO PELO PID COMPENSADO.	82
FIGURA 51: CURVA DE TENSÃO APLICADA NO ATUADOR DURANTE O CONTROLE DE FORÇA UTILIZANDO PID PADRÃO.	83
FIGURA 52: CURVA DE TENSÃO APLICADA NO ATUADOR DURANTE O CONTROLE DE FORÇA UTILIZANDO PID COMPENSADO. NOTE A SUAVE VARIAÇÃO DE TENSÃO EXIGIDA PARA MANTER O POLÍMERO EM CADA PATAMAR DE FORÇA, COMPENSANDO-SE ASSIM OS EFEITOS VISCOELÁSTICOS.	83

## Lista de Símbolos

$P$	pressão efetiva responsável pela deformação do polímero	[Pa]
$V$	tensão elétrica aplicada no polímero	[V]
$z$	espessura do polímero	[m]
$E_{max}$	Campo elétrico máximo antes da quebra do dielétrico ou ponto de saturação	[V/m]
$\sigma_x$	tensão mecânica atuante sobre o polímero em uma das direções do plano de atuação	[Pa]
$\sigma_y$	tensão mecânica atuante sobre o polímero na outra direção do plano de atuação	[Pa]
$\sigma_z$	tensão mecânica atuante sobre polímero na direção relativa a sua espessura	[Pa]
$\varepsilon_i$	deformação do polímero na direção correspondente a $\sigma_i$	
$x_0$	comprimento inicial do polímero em uma das direções do plano de atuação	[m]
$y_0$	comprimento inicial do polímero na outra direção do plano de atuação	[m]
$z_0$	espessura inicial do polímero	[m]
$x$	comprimento final do polímero em uma das direções do plano de atuação	[m]
$y$	comprimento final do polímero na outra direção do plano de atuação	[m]
$z$	espessura final do polímero	[m]
$F_y$	força peso exercida por uma massa pendurada, atuando em uma das direções passivas do atuador	[N]
$S_p$	valor desejado ( <i>SetPoint</i> ) para a força na malha de controle	[V]
$V_{sig}$	signal de controle produzido pelo controlador	[V]
$V_{kV}$	signal amplificado proporcional a $V_{sig}$ para atuação no polímero	[V]
$F$	força produzida pelo polímero	[N]
$V_f$	valor de força lido pelo sensor de força	[V]
$e$	diferença entre o $S_p$ e o $V_f$	[V]
$K_p$	ganho proporcional do controlador	
$K_d$	ganho derivativo do controlador	[Hz]
$K_i$	ganho integral do controlador	[s]
$C_{10}$	coeficiente angular da função linear proposta para modelar o gerador de tensão	
$C_{11}$	termo independente da função linear proposta para modelar o gerador de tensão	[V]
$C_2$	coeficiente angular da função linear proposta para modelar o sensor de força	
$V_L$	valor de tensão lido pelo sensor de força	[V]

$V_C$	valor de tensão enviado pelo computador para o módulo de atuação do sistema	[V]
$\epsilon_r$	permissividade relativa do polímero (constante dielétrica)	
$\epsilon_0$	permissividade do vácuo	[F/m]
$\nu$	coeficiente de Poisson	
E	módulo de Young	[Pa]
$\lambda_{1,pre}$	deformação imposta ao polímero durante a sua confecção na sua largura	
$\lambda_{2,pre}$	deformação imposta ao polímero durante a sua confecção no seu comprimento	
L	largura inicial da região do polímero entre os suportes utilizados para a pré-deformação	[m]
W	comprimento inicial do polímero	[m]
l	largura final do polímero	[m]
$w_a$	comprimento do polímero depois de aplicada a deformação	[m]
	$\lambda_{1,pre}$	
$w_b$	comprimento da região do polímero entre os suportes utilizados para a pré-deformação	[m]
w	Comprimento final do polímero	[m]