

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**SYLVIO CESAR LAGIOIA DOS SANTOS BRITTO**

**DISPOSITIVO MECATRÔNICO PARA SUSTENTAÇÃO DE CARGAS**

São Paulo

2012

SYLVIO CESAR LAGIOIA DOS SANTOS BRITTO

## **DISPOSITIVO MECATRÔNICO PARA SUSTENTAÇÃO DE CARGAS**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo como requisito para a obtenção do título de mestre em automação e controle de processos.

Professor Orientador: Dr. Ricardo Naoki Mori

São Paulo

2012



SYLVIO CESAR LAGIOIA DOS SANTOS BRITTO

## DISPOSITIVO MECATRÔNICO PARA SUSTENTAÇÃO DE CARGAS

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo como requisito para a obtenção do título de mestre em automação e controle de processos.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

### BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ricardo N. Mori  
Instituto Federal de Educação de São Paulo – IFSP-SP

---

Prof. Dr.

---

Prof. Dr.

*À minha mãe Ângela  
e à minha esposa Sebastiana*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, o criador do universo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Naoki Mori a quem aprendi a admirar ao longo deste trabalho por seu conhecimento e competência.

Aos professores, funcionários e colegas do Instituto Federal de São Paulo que muito contribuíram para esta realização.

À ETEC Sylvio de Mattos Carvalho que através da direção, coordenação e professores muito me apoiaram, compreendendo minhas ausências, permitindo o uso de laboratórios e instalações, assim como, auxiliando-me diretamente na confecção do protótipo, conferindo textos e realizando desenhos.

Ao CEETEPS pela liberação de parte de meu horário de trabalho permitindo assim meu comparecimento às atividades necessárias.

Ao Prof. Dr. Baker Jefferson Mass, da EESC-USP pelo incentivo recebido e pelos valiosos esclarecimentos concedidos na área de sistemas de controle.

Ao Roberto Giácomo Bussola pelo apoio material na forma de componentes e serviços, além da utilização de equipamentos, instrumentos e suas instalações industriais.

Ao Eng<sup>o</sup> Jean François Drozak pela sua inestimável e valiosa cooperação na discussão sobre os aspectos eletromecânicos do projeto e suas simulações, através de incontáveis e-mails e telefonemas.

À Bambozzi Alternadores e a Indústria Mecânica Panegossi por franquearem suas instalações fabris e permitirem a análise de seus processos produtivos.

## RESUMO

A presente dissertação de mestrado examina do ponto de vista de sua efetividade e aplicação prática, um sistema operacional constituído de viga com carga e contrapeso, onde o equilíbrio obtido com a movimentação do contrapeso em função da movimentação da carga, pelo fato de anular os momentos existentes no ponto de apoio, torna possível utilizá-lo como meio de sustentação de cargas. A dissertação propõe a utilização deste princípio em equipamentos industriais para manipulação, como: ferramentas, máquinas, dispositivos ou componentes de manufatura, manuseados por um operador, como alternativa de baixo custo a empresas de pequeno porte em relação a um robô ou outros dispositivos robóticos, obtendo considerável economia de custos. O projeto aqui examinado consiste em desenvolver um sistema de braços que compõem a viga, onde um dos braços, articulado, sustenta a carga e a movimenta em uma área no plano horizontal e um pequeno ângulo na vertical, conduzido manualmente pelo operador até o ponto desejado com esforço físico minimizado, uma vez que o equipamento é responsável pela sustentação da carga e por sua manutenção em balanço. O outro braço do sistema, fixo, agrega um sistema eletromecânico que posiciona o contrapeso em um ponto que equilibra o sistema, anulando-se com isto momentos no eixo de apoio. O sistema é constituído de controles com sensores acoplados aos braços, que medem dinamicamente os momentos gerados pela movimentação e alterações da carga, constituindo-se em um sistema realimentado.

Palavras-chave: Contrapeso. Braço articulado. Contrapeso móvel. Dispositivo inteligente de auxílio. Dispositivo para movimentação de cargas.

## **ABSTRACT**

This dissertation examines, from the point of view of its effectiveness and practical application, an operating system consisting of beam with load and counterweight, where the balance obtained by moving the counterweight depending on load, drive by the fact negate the existing moments at the point of support, makes it possible to use it as a means of support. The thesis proposes the use of this principle in industrial equipment for cargo handling, such as: tools, machinery, manufacturing components or devices, handled by an operator, such as low-cost alternative to small firms in relation to a robot or other robotic devices, achieving considerable cost savings. The project examined here is to develop a system of arms, where one of the arms, articulated, sustains and moves it inside an area in the horizontal plane and a small vertical angle, conducted manually by the operator to the desired point with physical effort minimized, since the equipment is responsible for support of the load and its maintenance in the balance sheet. The other arm of the system, fixed, adds an electromechanical system that positions the balance at a point that balances the system, aborting moments in support axle. The system consists of controls with sensors attached to the arms, which are dynamically measured by moving moments and load changes, constituting a feedback system.

Keywords: Counterweight. Articulating arm. Mobile counterweight. Intelligent assist device. Device for cargo handling.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C = Carga

C.G. = Centro de gravidade

C.M. = Centro de massa

CP = Contrapeso

DMSC = Dispositivo mecatrônico para sustentação de cargas

f.c.e.m. = Força contra eletromotriz

FEIMAFE = Feira internacional de máquinas ferramentas e sistemas integrados de manufatura

IAD = Dispositivo Auxiliar inteligente (Intelligent Assist Device)

JIRA = Japanese Industrial Robot Association

## LISTA DE SÍMBOLOS

B = Coeficiente de atrito viscoso total do sistema	$\left[ \frac{N.m}{\frac{rad}{s}} \right]$
$B_v$ = Coeficiente de atrito viscoso do motor	$\left[ \frac{N.m}{\frac{rad}{s}} \right]$
$B_{vf}$ = Coeficiente de atrito viscoso entre fuso, porca e mancais	$\left[ \frac{N.m}{\frac{rad}{s}} \right]$
$B_{vm}$ = Coeficiente de atrito viscoso do motorreductor	$\left[ \frac{N.m}{\frac{rad}{s}} \right]$
$B_{vr}$ = Coeficiente de atrito viscoso do reductor	$\left[ \frac{N.m}{\frac{rad}{s}} \right]$
CI = Circuito integrado	
CM = Centro de massa	$[m]$
$CM_{bc}$ = Centro de massa do braço da carga	$[m]$
$CM_{bcp}$ = Centro de massa do braço do contrapeso	$[m]$
$CM_{bf}$ = Centro de massa do semibraço fixo	$[m]$
$CM_{bm}$ = Centro de massa do semibraço móvel	$[m]$
$CM_{cp}$ = Centro de massa do contrapeso	$[m]$
D = diâmetro do tarugo do contrapeso fixo	$[m]$
$d_c$ = Distância entre o eixo secundário e a carga	$[m]$
$d_{cm\ bc}$ = Distância do CM do braço da carga	$[m]$
$d_{cm\ bcp}$ = Distância do CM da estrutura do braço	$[m]$
$d_{cm\ cp}$ = Distância do CM do contrapeso	$[m]$
$D_e$ = Diâmetro externo do contrapeso	$[m]$
$D_i$ = Diâmetro do furo do contrapeso para introdução do fuso	$[m]$
$d_s$ = Distância entre o eixo secundário e o sensor	$[m]$
e = Sinal de erro	$[V]$
E = Tensão aplicada ao motor	$[V]$
$E_g$ = Força contra eletromotriz do motor	$[V]$
$E_r$ = Tensão limiar do movimento do sistema	$[V]$
$E_m$ = Tensão limiar do movimento do motor	$[V]$

$E_{mr}$	= Tensão limiar do movimento do motorreductor	[V]
$F'_c$	= Força atuante sobre o braço da carga	[N]
$F'_{cp}$	= Força atuante sobre o braço do contrapeso	[N]
$F$	= Força genérica aplicada á um corpo	[N]
$F_{bc}$	= Força aplicada pela estrutura do braço da carga	[N]
$F_{bcp}$	= Força exercida pela massa da estrutura do braço	[N]
$F_c$	= Força aplicada pela carga ao braço	[N]
FCD	= Chave fim de curso do lado direito do contrapeso	
FCE	= Chave fim de curso do lado esquerdo do contrapeso	
$F_{cp}$	= Força exercida pela massa do contrapeso	[N]
$F_s$	= Força aplicada ao sensor	[N]
$F_c$	= Força aplicada pela carga ao braço	[N]
$g$	= Aceleração da gravidade	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$G_{bc}$	= Função de transferência do braço da carga	
$G_{bcp}$	= Função de transferência do braço do contrapeso	
$G_{scp}$	= Coeficiente de conversão curso tensão do sensor	
$i$	= Corrente do rotor no domínio do tempo	[A]
$I$	= Corrente do rotor no domínio da frequência	[A]
$J$	= Momento de inércia total do sistema	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_{cp}$	= Momento de inércia do contrapeso	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_f$	= Momento de inércia do fuso	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_m$	= Momento de inércia do motorreductor	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_{mt}$	= Momento de inércia do motor	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_r$	= Momento de inércia do reductor	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$K_g$	= Constante de força contra eletromotriz do motorreductor	$\left[\frac{V}{\frac{rad}{s}}\right]$
$K_{gm}$	= Constante de força contraeletromotriz do motor	$\left[\frac{V}{\frac{rad}{s}}\right]$
$K_t$	= Constante de torque do motorreductor	$\left[\frac{N.m}{A}\right]$
$K_{tm}$	= Constante de torque do motor	$\left[\frac{N.m}{A}\right]$
$\ell'_4$	= Posição do CM do braço expandido relativa ao eixo principal	[m]

$\ell$ = Comprimento do semibraço fixo	[m]
$\ell'$ = Comprimento do semibraço móvel	[m]
$\ell'_1$ = Posição do CM do semibraço móvel	[m]
$\ell'_2$ = Posição relativa do CM do braço móvel expandido	[m]
$\ell'_3$ = Posição do CM do braço expandido	[m]
L= Indutância do rotor	[H]
$\ell_1$ = Posição do CM do semibraço fixo	[m]
$\ell_2$ = Posição relativa do CM do braço móvel retraído	[m]
$\ell_3$ = Posição do CM do braço retraído	[m]
$\ell_4$ = Posição do CM do braço retraído relativa ao eixo principal	[m]
$\ell_5$ = Posição do CM do motor em relação ao eixo principal	[m]
$\ell_6$ = Centro de massa da estrutura do contrapeso	[m]
$\ell_7$ = posição do CM do contrapeso fixo	[m]
$\ell_8$ = Comprimento do tarugo do contrapeso fixo	[m]
$\ell_c$ = Posição da carga em relação ao eixo principal	[m]
$\ell_{CM_{max}}$ = Posição máxima do CM do contrapeso	[m]
$\ell_{CM_{min}}$ = Posição mínima do CM do contrapeso	[m]
$\ell_{CM_{cp}}$ = Posição do CM do contrapeso	[m]
$\ell_{cp}$ = comprimento do tarugo do contrapeso	[m]
$\ell_{mc}$ = Distância da massa da carga ao eixo de apoio	[m]
$\ell_{mcp}$ = Distância da massa do contrapeso ao eixo de apoio	[m]
M = Massa genérica	[Kg]
$m_1$ = Massa do semibraço fixo	[Kg]
$m_2$ = Massa do semibraço móvel	[Kg]
$m_b$ = Massa total do braço da carga	[Kg]
$m_c$ = Massa da carga	[Kg]
$m_{cp}$ = massa do contrapeso	[Kg]
$m_{cpf}$ = massa do contrapeso fixo	[Kg]
$m_{ecp}$ = massa da estrutura do contrapeso	[Kg]
$m_{ecp}$ = massa da estrutura do contrapeso	[Kg]
$m_m$ = Massa do motorreductor	[Kg]

$n$ = freqüência do fuso	$[rpm]$
$p$ = passo do fuso	$\left[\frac{m}{rev}\right]$
$P$ = Potência total consumida pelo motorreductor e carga	$[W]$
$p_1$ = Peso específico do tubo do semibraço fixo	$\left[\frac{Kg}{m}\right]$
$p_2$ = Peso específico do tubo do semibraço móvel	$\left[\frac{Kg}{m}\right]$
$p_3$ = Peso específico do aço 1020	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
$P_m$ = Potência total consumida pelo motorreductor em vazio	$[W]$
$P_r$ = Potência consumida pelo motor em perdas por atrito	$[W]$
$R$ = Resistência do rotor	$[\Omega]$
$R_{sc}$ = Resistência do sensor de carga	$[\Omega]$
$R_{scp}$ = Resistência do sensor do contrapeso	$[\Omega]$
$s$ = Operador de Laplace	
$T$ = Torque genérico	
$T_1$ = Torque devido ao motorreductor	$[Kg.m]$
$T_2$ = Torque devido a carga máxima	$[Kg.m]$
$T_3$ = Torque devido a estrutura do braço da carga	$[Kg.m]$
$T_4$ = Torque devido a carga mínima	$[Kg.m]$
$T_5$ = Torque gerado pelo contrapeso fixo	$[Kg.m]$
$T_{bc}$ = Torque total aplicado pelo lado da carga ao eixo principal	$[Kg.m]$
$T_{bcp}$ = Torque total do braço do contrapeso	$[Kg.m]$
$T_c$ = Torque provocado pela carga no eixo de apoio	$[Kg.m]$
$T_{cp}$ = Torque devido a massa do contrapeso	$[Kg.m]$
$T_{cp}$ = Torque provocado pelo contrapeso no eixo de apoio	$[Kg.m]$
$T_{cp\ max}$ = Torque máximo devido a massa do contrapeso	$[Kg.m]$
$T_{cp\ min}$ = Torque mínimo devido a massa do contrapeso	$[Kg.m]$
$T_{ecp,}$ = Torque devido a massa da estrutura do contrapeso	$[Kg.m]$
$T_f$ = Torque total no fuso	$[Kg.m]$
$T_{fr}$ = Torque necessário para frear o sistema	$[Kg.m]$
$T_m$ = Torque total fornecido pelo motorreductor	$[Kg.m]$
$T_r$ = Torque referente ao atrito estático do sistema	$[Kg.m]$

$T_{rf}$ = Torque referente ao atrito estático entre: fuso, contrapeso	[Kg.m]
$T_{rm}$ = Torque de atrito estático do motor	[Kg.m]
$T_{mr}$ = Torque de atrito estático do motorreductor	[Kg.m]
$T_{rr}$ = Torque referente ao atrito estático do reductor	[Kg.m]
$T_t$ = Torque total do motorreductor em vazio	[Kg.m]
$T_{tm}$ = Torque desenvolvido pelo motor sem carga	[Kg.m]
$T_{vf}$ = Torque referente ao atrito viscoso do fuso	[Kg.m]
$v$ = velocidade linear de deslocamento do contrapeso	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$V_c$ = Tensão referente á carga	[V]
$V_{cp}$ = Tensão referente ao contrapeso	[V]
$V_l$ = Tensão na indutância da armadura	[V]
$V_r$ = Tensão na resistência da armadura	[V]
$V_{sc}$ = Tensão no sensor da carga	[V]
$V_{scp}$ = Tensão no sensor do contra peso	[V]
$X$ = Posição linear do contrapeso	[m]
$\alpha$ = Ângulo entre um dos braços ou a viga e o plano horizontal	[rad]
$\sigma$ = Constante de tempo	[s]
$\omega$ = Velocidade angular da transmissão	$\left[\frac{rad}{s}\right]$
$\omega_m$ = Velocidade angular do motor	$\left[\frac{rad}{s}\right]$
$P$ = Peso	[Kg]

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Tensões no motor atuando como gerador .....	87
Tabela 4.2 - Valores de medidas da resistência do rotor .....	88
Tabela 4.3 - Tensões e correntes no motorreductor sem carga .....	88
Tabela 4.4 - Tensões, correntes e potências no motorreductor com carga .....	89
Tabela 4.5 - Parâmetros do sistema .....	90
Tabela 4.6 - Tensões obtidas para posições do contrapeso .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Utilização de grampeador pneumático .....	24
Figura 1.2 – Parafusadeira pneumática com contrapeso .....	25
Figura 1.3 – Movimentação de um rotor.....	27
Figura 1.4 – Montagem do rotor .....	27
Figura 1.5 – Posicionador mecânico de rodas .....	28
Figura 1.6 – Posicionadores para dispositivos de soldagem.....	29
Figura 1.7 - Balancim suporte de parafusadeira.....	30
Figura 1.8 - Braço articulado suporte de rosqueadeira .....	31
Figura 1.9 – IAD para movimentação de produtos .....	32
Figura 1.10 – Robô colaborativo .....	33
Figura 1.11 – Ilustração de robô cooperativo .....	34
Figura 1.12 - Teleoperador Panasonic .....	35
Figura 1.13 – Exoesqueleto aplicado em manufatura .....	36
Figura 1.14 – Equipamento mecatrônico para sustentação de cargas.....	37
Figura 1.15 - Braço fixo em guincho agrícola.....	41
Figura 1.16 - Braço articulado com ângulo constante .....	42
Figura 2.1 – Viga simétrica em balanço .....	46
Figura 2.2 - Forças atuantes em uma viga .....	47
Figura 2.3 – Posição final de uma viga desbalanceada .....	47
Figura 2.4 - Circuito elétrico equivalente do motor .....	49
Figura 2.5 - Sistema de transmissão do contrapeso .....	52
Figura 2.6 - Diagrama de blocos do sistema eletromecânico.....	56
Figura 2.7 - Forças atuantes no sensor do braço da carga.....	57
Figura 2.8 - Forças atuantes no sensor do braço do contrapeso .....	58
Figura 2.9 - Curva força versus resistência do sensor FSR 406 .....	59
Figura 2.10 - Divisor de tensão para o sensor do contrapeso .....	60
Figura 2.11 - Circuito amplificador do braço do contrapeso .....	61
Figura 2.12 - Diagrama de blocos final do braço do contrapeso .....	62
Figura 2.13 - Circuito amplificador do braço da carga.....	62
Figura 2.14 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.....	63

Figura 2.15 - Limites impostos para a faixa morta do controlador.....	65
Figura 2.16 - Circuito controlador on-off.....	66
Figura 2.17 - Circuito de interligação.....	66
Figura 2.18 - Diagrama elétrico do sistema.....	67
Figura 3.1 - Diagrama funcional dos braços, sensores e freio .....	70
Figura 3.2 - Motorreductor .....	71
Figura 3.3 - Freio eletromagnético Ciacopla.....	72
Figura 3.4 - Sensor modelo 406 .....	73
Figura 3.5 - Braço do contrapeso .....	75
Figura 3.6 - Medida de $E_g$ .....	76
Figura 3.7 - Esquema de ligações dos motores em teste .....	76
Figura 3.8 - Montagem utilizada para medida de $E, i, \omega$ e cálculo de $R$ .....	78
Figura 3.9 - Circuito para medição de $E, i$ com o motorreductor sem carga .....	78
Figura 3.10 - Circuito para determinação da indutância $L$ .....	79
Figura 3.11 - Medição da constante de tempo elétrica do motor.....	79
Figura 3.12 - Oscilograma para medida de $\sigma_{mec}$ .....	81
Figura 3.13 - Medida da constante de tempo mecânica.....	82
Figura 3.14 - Diagrama de blocos utilizado na simulação .....	84
Figura 3.15 - Comparação entre forças de sustentação .....	84
Figura 3.16 - Posicionamento inicial do DMSC .....	85
Figura 3.17 - Movimentação da peça em balanço.....	85
Figura 3.18 - Equipamento em balanço .....	86
Figura 3.19 - Posicionamento final do DMSC.....	86
Figura 4.1 - Gráfico torque ( $T$ ) X velocidade angular ( $\omega$ ) do sistema .....	89
Figura 4.2 - Gráfico $V_{scp}$ X curso do contrapeso ( $X$ ) .....	91
Figura 4.3 - Circuito amplificador do braço do contrapeso .....	92
Figura 4.4 - Circuito amplificador do braço da carga.....	93
Figura 4.5 - Circuito controlador on-off.....	94
Figura 4.6 - Comportamento do sistema sem faixa morta.....	95
Figura 4.7 - Comportamento do sistema com faixa morta.....	96

## SUMÁRIO

1 Introdução .....	19
1.1 Contextualização .....	20
1.2 Equipamentos para manipulação de cargas .....	21
1.3 Aspectos construtivos dos equipamentos .....	38
1.4 Revisão bibliográfica .....	42
2 Fundamentos teóricos e conceituais .....	45
2.1 Viga simétrica balanceada .....	45
2.2 Viga simétrica desbalanceada.....	46
2.3 Motor de corrente contínua com ímã permanente .....	48
2.3.1 Características e parâmetros fundamentais .....	48
2.3.2 Redutor.....	50
2.3.3 Sistema de transmissão .....	51
2.4 Sensor de força .....	56
2.4.1 Medida de força.....	56
2.4.2 Características do sensor .....	58
2.4.3 Tensão do sensor do braço do contrapeso ( $V_{scp}$ ).....	59
2.5 Função de transferência do braço do contrapeso .....	61
2.6 Função de transferência do braço da carga .....	62
2.7 Sistema em malha fechada .....	63
2.8 Estratégia de controle.....	63
2.8.1 Controlador on-off .....	63
2.8.2 Faixa morta .....	64
2.8.3 Funcionamento do circuito comparador com faixa morta .....	65
2.8.4 Circuito de inversão do sentido de rotação do motor .....	67
2.9 Simulação do controlador on-off.....	67
3 Materiais e métodos .....	69
3.1 Descrição do dispositivo .....	69
3.2 Parâmetros principais do projeto .....	70
3.3 Principais componentes .....	71
3.3.1 Motorreductor .....	71
3.3.2 Fuso .....	72

3.3.3 Freio eletromagnético.....	72
3.3.4 Sensor de força .....	73
3.4 Dimensionamento do sistema .....	73
3.4.1 Braço da carga .....	74
3.4.2 Braço do contrapeso .....	74
3.4.2.1 Mecanismo de movimentação do contrapeso .....	75
3.5 Parâmetros elétricos do motorreductor .....	75
3.5.1 Tensão de f.c.e.m. ( $E_g$ ) e constante de f.c.e.m. ( $K_g$ ) .....	76
3.5.2 Resistência da armadura (R).....	77
3.5.3 Indutância da armadura (L) .....	78
3.6 Parâmetros elétricos e mecânicos da transmissão .....	79
3.6.1 Torques de: atrito estático ( $T_r$ ) e atrito viscoso ( $B_v$ ).....	80
3.6.2 Momento de inércia (J).....	80
3.6.3 Tensão limiar do movimento ( $E_r$ ).....	82
3.7 Ensaio dos sensores .....	82
3.8 Avaliações de desempenho do protótipo.....	83
3.8.1 Comportamento dinâmico do sistema .....	83
3.8.2 Força imposta ao operador para manuseio da carga.....	84
3.8.3 Balanceamento automático .....	84
4 Resultados .....	87
4.1 Ensaio do motorreductor .....	87
4.1.1 Tensão de f.c.e.m. ( $E_g$ ) e constante de f.c.e.m. ( $K_g$ ) .....	87
4.1.2 Resistência do rotor .....	87
4.2 Transmissão.....	88
4.2.1 Torque de atrito estático ( $T_r$ ) e coeficiente de atrito viscoso (B).....	88
4.2.2 Momento de inércia (J).....	89
4.3 Tensão limiar do movimento ( $E_r$ ).....	90
4.4 Características gerais do sistema .....	90
4.5 Braço do contrapeso .....	90
4.5.1 Coeficiente de conversão do sensor do contrapeso ( $G_{scp}$ ).....	92
4.5.2 Função de transferência do circuito amplificador do sensor do braço do contrapeso ( $G_{bcp}$ ).....	92

4.5.3 Função de transferência do braço do contrapeso .....	92
4.6 Braço da carga .....	93
4.6.1 Função de transferência do braço da carga .....	93
4.7 Comportamento dinâmico do sistema .....	94
4.7.1 Circuito do controlador on-off .....	94
4.7.2 Simulação do sistema .....	95
5 Discussão dos resultados.....	97
5.1 Dimensionamento dos braços .....	97
5.2 Modelagem do sistema .....	97
5.3 Sistema de movimentação do contrapeso.....	97
5.4 Ensaios.....	98
5.4.1 Tensão $E_g$ e constante $K_g$ .....	98
5.4.2 Medida da resistência da armadura .....	98
5.4.3 Indutância da armadura.....	98
5.4.4 Torque de atrito estático ( $T_r$ ) e atrito viscoso ( $B_v$ ).....	98
5.4.5 Momento de inércia (J).....	99
5.4.6 Tensão limiar do movimento ( $E_r$ ).....	99
5.4.7 Sensores de força .....	99
5.4.8 Comportamento dinâmico do sistema .....	99
6 Conclusões.....	101
6.1 Sugestões para futuros desenvolvimentos.....	101
6.1.1 Aspecto construtivo .....	101
6.1.2 Aspecto operacional.....	102
Referências .....	103
Apêndice A - DIMENSIONAMENTO DO BRAÇOS.....	107
Apêndice B - MONTAGEM DO CIRCUITO ELÉTRICO .....	125

## 1 Introdução

A crescente necessidade humana de produzir cada vez mais e em tempos menores tem conduzido a tecnologia ao desenvolvimento de equipamentos com o propósito de substituir tarefas humanas nos meios produtivos (SILVEIRA; SANTOS, 1998).

Apesar dos inquestionáveis ganhos introduzidos pela mecanização e robotização de processos produtivos, algumas características inerentes ao ser humano são de difícil substituição.

Baseado nesta premissa o presente trabalho analisará equipamentos voltados ao manuseio de cargas com o propósito de proporcionar alívio e segurança ao operador em atividades que requeiram além de seu esforço físico, habilidades manuais específicas e poder de decisão.

Inicialmente observaram-se alguns processos produtivos que envolvem o posicionamento de cargas que utilizam para este fim desde ações puramente manuais até recursos mecânicos e robóticos de movimentação.

O contato com empresas de pequeno porte com problemas de movimentação e posicionamento de cargas em processos industriais motivou a elaboração de um equipamento que atendesse tais requisitos. Uma vez que empresas deste tipo possuem restrições orçamentárias para a introdução de equipamentos robotizados propôs-se a implementação de uma solução de baixo custo, porém eficaz quanto a seus propósitos operacionais.

A solução mecatrônica adotada, utilizando-se um sistema de contrapeso móvel, forma um equipamento com características de baixo consumo de energia, baixo custo e operacionalidade satisfatória no auxílio a um operador em atividades que requeiram a sustentação e movimentação de uma carga utilizando-se das habilidades do homem e a força do dispositivo.

O capítulo 1 analisa os diversos equipamentos e tecnologias utilizadas na movimentação e sustentação de cargas expondo o estado da arte do tema.

Apresentam-se no capítulo 2 as bases teóricas necessárias ao desenvolvimento de um sistema com contrapeso móvel para balancear um braço articulado que sustenta uma carga com variações de massa e posição.

O capítulo 3 detalha as etapas de desenvolvimento do projeto, notadamente no que diz respeito à construção de um protótipo para estudo e confirmação dos aspectos teóricos estudados bem como as proposições efetuadas.

Os resultados de testes e ensaios realizados para obtenção de dados e validação de proposições são apresentados no capítulo 4 sendo posteriormente discutidos no capítulo 5.

As conclusões relativas aos ensaios realizados, desempenho do protótipo e aplicações do mesmo são apresentadas no capítulo 6 em conjunto com algumas sugestões para desenvolvimentos futuros e aperfeiçoamento do sistema.

Um apêndice mostra um roteiro detalhado de cálculo dos braços e elementos agregados a este, juntamente com algumas figuras que esclarecem detalhes de montagem.

## **1.1 Contextualização**

A movimentação de cargas desafia o homem desde tempos remotos, mostrando uma contínua evolução e a incorporação dos avanços tecnológicos de cada época (DECKER, 2010).

Inicialmente a utilização de força humana individual ou coletiva agregada a dispositivos rudimentares que movimentavam as cargas necessárias a obtenção dos mais variados propósitos construtivos (DECKER, 2010).

Utilizando-se combustíveis fósseis em máquinas para obter-se movimento, inicialmente com o motor a vapor, posteriormente com o motor à explosão, os equipamentos destinados a movimentação de cargas experimentaram um grande avanço, marcando uma linha divisória entre a utilização da força humana e de máquinas. Com este avanço o homem passou a dirigir as operações de levantamento e deslocamento de cargas, no lugar de efetuá-las diretamente através de seus esforços musculares (DECKER, 2010).

Com a utilização da eletricidade e dos motores elétricos, outro grande impulso foi aplicado à tecnologia de equipamentos para movimentação de cargas, possibilitando características avançadas em relação aos métodos anteriores (DECKER, 2010).

Mas foi com o advento do robô que a tecnologia de movimentação de cargas conquistou avanços significativos, passando a agregar os desenvolvimentos desta

área, como sensores e atuadores de elevado desempenho, em seus propósitos, assim como a conhecemos nos dias atuais (COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003).

A despeito do desenvolvimento nos vários setores tecnológicos algumas características humanas são difíceis de serem substituídas por máquinas. Atividades que requerem habilidades humanas quando associadas a movimentação de cargas nem sempre encontram soluções satisfatórias no campo da robótica, quando existem, geralmente possuem um custo elevado em função da aplicação (COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003).

Ao realizar tarefas sem equipamentos de auxílio envolvendo posicionamento e sustentação de cargas o trabalhador submete-se a esforços físicos e posições ergonômicas inadequadas, causando cansaço, lesões e improdutividade (COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003).

Uma recente classe de equipamentos denominados de IAD (*Intelligent Assist Devices*) efetua um elo entre as soluções robóticas e as mecanizadas, constituindo-se em uma atraente opção. Os IAD são produtos desenvolvidos com o propósito de deslocar cargas em conjunto com o homem, cabendo a este último participar com sua habilidade e ao equipamento suprir os esforços necessários (COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003).

## **1.2 Equipamentos para manipulação de cargas**

O principal desafio dos dispositivos dedicados ao manuseio de cargas consiste em vencer os atritos e a força gravitacional, aliviando desta forma o esforço físico necessário. Diversos tipos de equipamentos propõem-se a cumprir esta missão, utilizando-se dos mais variados recursos tecnológicos. No presente estudo serão enfatizados os equipamentos de apoio humano em atividades industriais de manufatura, onde todos os elementos envolvidos compartilham o mesmo espaço, ressaltando-se a importância de assegurar um perfeito posicionamento ergonômico e sustentação da carga permitindo que esta seja dirigida diretamente por mãos humanas, que impõem sentido, direção, velocidade e posição, possibilitando assim que estas características de difícil substituição sejam associadas ao processo de movimentação.

A movimentação de cargas implica por parte do operador em dispêndio de energia, movimentações e posturas corpóreas, além do uso de suas habilidades como: acuidade visual, destreza, poder de decisão.

Quando o envolvimento humano em tais operações envolve riscos de acidente, lesões devido a posturas inadequadas, cansaço ou limitações físicas para executar a tarefa, torna-se necessário um equipamento que auxilie o homem em suas limitações, aumente sua produtividade e isente-o dos fatores anteriormente descritos, contribuindo assim para uma maior segurança e lucratividade do processo industrial.

Sob esta visão desenvolveram-se nos últimos anos, vários equipamentos, alguns dos quais foram analisados neste estudo quanto às suas características operacionais e construtivas, apresentando-se assim um relato dos pontos mais significativos deste segmento.

O desenvolvimento deste estudo surgiu da constatação que processos de manufatura em pequenas empresas ou de pequenos volumes produtivos onde os equipamentos existentes para suprir a deficiência descrita, não atendem as exigências operacionais ou são excessivamente caros, inviabilizando-se sua utilização. A partir desta constatação, efetuou-se uma pesquisa em algumas empresas visando-se o conhecimento dos principais aspectos em operações de manufatura que necessitam da habilidade humana aliada a utilização de equipamentos e dispositivos.

Alguns exemplos de processos industriais que requerem equipamentos de auxílio à sustentação e utilização conjunta de habilidades humanas:

- a) Furação, parafusamento, rebitagem, rosqueamento, lixamento;
- b) Movimentação de peças em linhas de montagem;
- c) Dosagem de líquidos, pós, granulados e outros materiais parcelados.

Na maior parte destas atividades o principal objetivo do dispositivo consiste em sustentar a carga para o operador, restando a este somente dirigi-la de modo adequado as necessidades operacionais.

A obtenção de dados e informações a respeito das características operativas de diversos processos de manufatura e equipamentos, técnicas de projeto e abordagens, foram efetuadas através de visitas a empresas, a FEIMAFE 2011 (Feira Internacional de Máquinas, Ferramentas e Sistemas Integrados de Manufatura),

revistas técnicas de produtos industriais, consultas a especialistas, bem como livros especializados.

O principal desafio consiste em idealizar-se um equipamento de custo mais baixo que robôs ou outras soluções mecatrônicas, além de adequar-se a realidade das pequenas empresas brasileiras, como: infraestrutura deficiente; recursos humanos pouco qualificados; ambiente agressivo quanto a intempéries; sujeira; entre outros.

Desta forma a solução adotada foi um equipamento cujo sistema de movimentação da carga é baseado em um contrapeso móvel, que acionado por um motor elétrico, mantém a carga em balanço.

Frente às várias opções de implementação o sistema com contrapeso destacou-se pela sua simplicidade, robustez, baixo consumo de energia e capacidade de manipular cargas entre 0,5 e 30 Kg.

Uma vez definido o sistema realizou-se uma pesquisa de patentes e artigos técnicos envolvendo sistemas com contrapesos móveis para balanceamento de cargas, onde inicialmente confirmou-se a sua viabilidade de utilização, bem como, princípios de funcionamento e características operacionais.

### **Movimentação de cargas em processos de manufatura**

A associação de aspectos ergonômicos inadequados pode causar sérias e irreversíveis lesões. Como exemplo pode ser observado na figura 1.1 onde o operador além de sustentar o peso da ferramenta apresenta uma postura inadequada para a execução da tarefa.



Figura 1.1 – Utilização de grampeador pneumático  
Fonte: Autor

Com o aumento da utilização de robôs em atividades humanas, principalmente em tarefas repetitivas e de risco à saúde, solucionou-se grande parte dos problemas existentes neste sentido, obtendo-se também uma elevação significativa de produtividade, entretanto características humanas como: habilidade; destreza e poder de decisão nem sempre encontram soluções robóticas satisfatórias ou um custo aceitável de implantação.

Estes fatores tornam-se ainda mais relevantes em empresas de pequeno porte e processos de manufatura de pequeno volume produtivo como o da figura 1.2, onde o operador utiliza uma parafusadeira com recurso de auxílio improvisado, de modo a aliviar parte de seu peso ao manuseá-la.



Figura 1.2 – Parafusadeira pneumática com contrapeso  
Fonte: Autor

Os equipamentos de baixo custo existentes, como balancins, talhas, guinchos entre outros, solucionam uma grande parte dos problemas anteriormente descritos, mas não apresentam bom desempenho quando se requer a mudança constante da posição da carga, posicionamento preciso ou a massa desta carga é variável. Constata-se que o grande desafio destes equipamentos, consiste em aliviar o esforço humano de sustentação de ferramentas e outros dispositivos ao movimentá-los para as atividades requeridas.

Desta forma, o equipamento ideal para estas aplicações deve permitir o livre manuseio da ferramenta e outro dispositivo qualquer, como se fosse algo levemente conectado às mãos do operador, e o deslocamento em toda a área de trabalho, independentemente de seu peso. Assim, o operador concentra-se unicamente na utilização de suas habilidades mais importantes, aumentando sua eficiência e preserva-se de aspectos negativos, como cansaço e lesões por posturas incorretas entre outros riscos.

## **Equipamentos para sustentação de cargas**

A força da gravidade é um fator limitante à movimentação de cargas no plano vertical, sendo sua ação objeto deste estudo.

Quando a carga deve ser sustentada por um ser humano em algum ponto de um plano vertical, utilizando-a em processos produtivos ou outra finalidade, a força necessária para mantê-la suspensa na posição desejada ocasiona fadiga e frequentemente lesões por esforços repetitivos.

Geralmente os esforços necessários para movimentar-se uma carga suspensa no plano horizontal são consideravelmente menores que a solicitação de sustentação, entendendo-se que vencer a ação da gravidade é o principal desafio neste tipo de sistema.

A força necessária ao deslocamento horizontal, considerando-se velocidades baixas, destina-se basicamente a vencer o atrito entre o dispositivo e o plano de apoio, o que pode ser bastante reduzido utilizando-se componentes como guias lineares.

A partir da maior dificuldade no movimento vertical, desenvolveram-se dispositivos que acumulam energia mecânica, provinda da ação da gravidade, durante o movimento descendente do equipamento, liberando-o quando o movimento ocorre no sentido ascendente.

O princípio utilizado é o de manter-se uma força de valor igual com sentido contrário continuamente aplicada à carga, contrapondo-se desta forma a ação da gravidade.

A figura 1.3 mostra um processo produtivo onde o operador necessita sustentar um rotor e movimentá-lo até o ponto onde o mesmo deve ser introduzido na carcaça como pode ser visto na figura 1.4. O processo de manufatura visto necessita de um equipamento de sustentação e movimentação como forma de aliviar os esforços físicos do operador, eliminar aspectos ergonômicos inadequados e aumentar a produtividade considerando-se um custo compatível com o preço do produto e sua escala de produção.



Figura 1.3 – Movimentação de um rotor  
Fonte: Autor



Figura 1.4 – Montagem do rotor  
Fonte: Autor

## Principais tipos de equipamentos

Os equipamentos disponíveis no mercado para utilização em movimentação e sustentação de cargas serão analisados a seguir segundo seu grau de complexidade e inovações.

### Equipamentos mecânicos

Macacos hidráulicos e mecânicos (CATÁLOGOS..., 2004), talhas e outros dispositivos mecânicos, (CATÁLOGO..., 1989; CATÁLOGO..., 2005), possibilitam a movimentação vertical com baixo esforço, porém apresentam restrições quanto ao deslocamento e posicionamento da carga.

A figura 1.5 mostra um posicionador que sustenta rodas de veículos de grande porte que necessitam ser substituídas restando ao operador a tarefa de movimentar o equipamento e direcioná-lo ao ponto de utilização, fatos estes que ainda requerem esforços e posturas inadequadas.



Figura 1.5 – Posicionador mecânico de rodas  
Fonte: Autotec (2012)

Movimentos horizontais e verticais precisos podem ser obtidos dos dispositivos apresentados na figura 1.6 que mantém a tocha de soldagem na posição adequada sem interferência do operador.



Figura 1.6 – Posicionadores para dispositivos de soldagem  
Fonte: CATÁLOGO... (1989)

## Balancim

Dispositivo bastante versátil, não possuindo atuador, obtém a sustentação através do uso de uma mola de força constante que acumula energia nos movimentos descendentes e libera-a nos ascendentes, permitindo a movimentação da carga na vertical, praticamente sem esforço físico do operador. Utilizado em conjunto com um braço horizontal móvel, possibilita o posicionamento de uma carga em um ponto espacial qualquer, como inconveniente: requer ajustes para alterações do valor da carga. Ideal para manter em suspensão equipamentos ou ferramentas, utilizados em uma única posição, como: máquinas de solda a ponto; esmerilhadeiras (CATÁLOGO..., 2011b); ou parafusadeiras (CATÁLOGO..., 2011d).

A figura 1.7 mostra uma parafusadeira conectada a um balancim, mantendo-se numa posição de repouso e dirigida pelo operador para baixo quando necessário, retornando posteriormente a sua posição inicial. O dispositivo mostra ainda uma barra horizontal para impedir a movimentação neste sentido.



Figura 1.7 - Balancim suporte de parafusadeira  
Fonte: Autor

### Braços articulados

O braço funciona de forma similar ao balancim, diferenciando-se em alguns casos quanto ao elemento de força constante. Nos produtos mais modernos tal elemento é uma mola a gás. O dispositivo ao ter o braço fixo movimentado na vertical acumula energia e pode também posicionar uma carga no espaço. Preferencialmente utilizados na condição de suporte de ferramentas como: furadeiras (CATÁLOGO..., 2011a; CATÁLOGO..., 2011e) e rosqueadeiras (CATÁLOGO..., 2011g), conforme ilustrado na figura 1.8 onde observa-se que a ferramenta pode ser dirigida precisamente ao ponto desejado e mantido nesta posição. Tal qual o balancim, estes dispositivos também requerem ajustes quando ocorre alteração do valor da carga e comprimento do braço.



Figura 1.8 - Braço articulado suporte de rosqueadeira  
Fonte: Autor

### **Manipuladores manuais**

O termo abrange uma infinidade de dispositivos para os mais variados fins (CAMPOS, 1985), neste estudo serão tratados como dispositivos com o propósito de preservar o operador de um ambiente hostil, por exemplo, no manuseio de produtos radioativos, estando suas funções sensoriais, de potência e controle concentradas no operador humano.

Constam de braços e articulações que permitem efetuar uma operação manual em cargas leves à distância, geralmente sem utilização de atuadores (CORLISS, 1972).

### **Robôs**

O robô é um manipulador reprogramável e multifuncional, designado para movimentar materiais, peças, ferramentas ou sistemas especializados, com variedade de movimentos programáveis e com capacidade de efetuar tarefas variadas (COIFFET; CHIROUZE, 1983).

## **IAD (*Intelligent Assist Devices*) – Dispositivos inteligentes de auxílio**

Pela classificação JIRA (Japanese Industrial Robot Association) estes equipamentos enquadram-se na classe 1 de robôs ou equipamentos robóticos (COIFFET; CHIROUZE, 1983).

Um IAD é uma classe de equipamentos controlados por computador que interagem com um operador humano para auxiliar no movimento de cargas. A figura 1.9 apresenta um exemplo de IAD movimentando um produto sem esforço e com posicionamento preciso.

Um equipamento deste tipo provê ao operador humano uma variedade de auxílios, incluindo: sustentação da carga, superação de forças de atrito guia e direcionamento do movimento (COLGATE et al., 2004).

Desenvolvidos basicamente para atender linhas de montagem de indústrias automobilísticas como GM; Toyota; Honda; Ford; Nissan, nas quais obtiveram-se ótimos resultados de produtividade e segurança pessoal (COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003).

Os IAD's estabelecem um elo entre as limitações dos equipamentos convencionais de movimentação de materiais e o elevado custo dos robôs em um meio produtivo. (COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003).



Figura 1.9 – IAD para movimentação de produtos  
Fonte: Intelligent Devices for Handling (2007)

## Robôs colaborativos (COBOT)

O termo COBOT é uma simplificação da expressão “*collaborative robot*”, adotado pela Northwestern University designando um dispositivo robótico que auxilia na manipulação de objetos em colaboração com um operador humano, guiando a carga por caminhos virtuais com o propósito de restringir movimentos inadequados evitando-se assim, acidentes e colisões.

Uma importante diferença entre o COBOT e outros equipamentos robóticos constitui-se no fato do mesmo não possuir atuador para efetuar a sustentação ou movimentação da carga (BERNDET; TEO; BOY, 2002).

Observa-se na figura 1.10 um exemplo de COBOT utilizado para transportar uma porta de veículo percorrendo um trajeto programado de modo a conduzir a mesma até o ponto de fixação, ficando o operador responsável por sua movimentação. Este dispositivo utiliza atuadores somente para direcionar as rodas.



Figura 1.10 – Robô colaborativo  
Fonte: Northwestern University (2011)

## Robôs cooperativos

Esta classe de robôs interage com o operador humano ou outros robôs, auxiliando em tarefas de sustentação e movimentação de cargas, cabendo ao homem somente a orientação dos movimentos.

São adequados para mover e posicionar componentes pesados em uma linha de montagem, como por exemplo: um banco de automóvel, que requer habilidade humana para o correto posicionamento e a força do dispositivo para sustentá-la (CAO; FUKUNAGA; KHANG, 1997).

Algumas tarefas são próprias do robô, como: medir o peso da carga; avaliar seu formato; sentir a direção imposta pelo operador. Cabe exclusivamente ao operador impor direção, sentido e velocidade ao deslocamento.

Uma vez que homem e robô devem compartilhar o mesmo espaço, medidas de segurança devem ser previstas para evitar acidentes. A figura 1.11 ilustra uma possibilidade de utilização onde o operador realiza uma operação de movimentação auxiliado pelo robô (EDSINGER; KEMP, 2007).

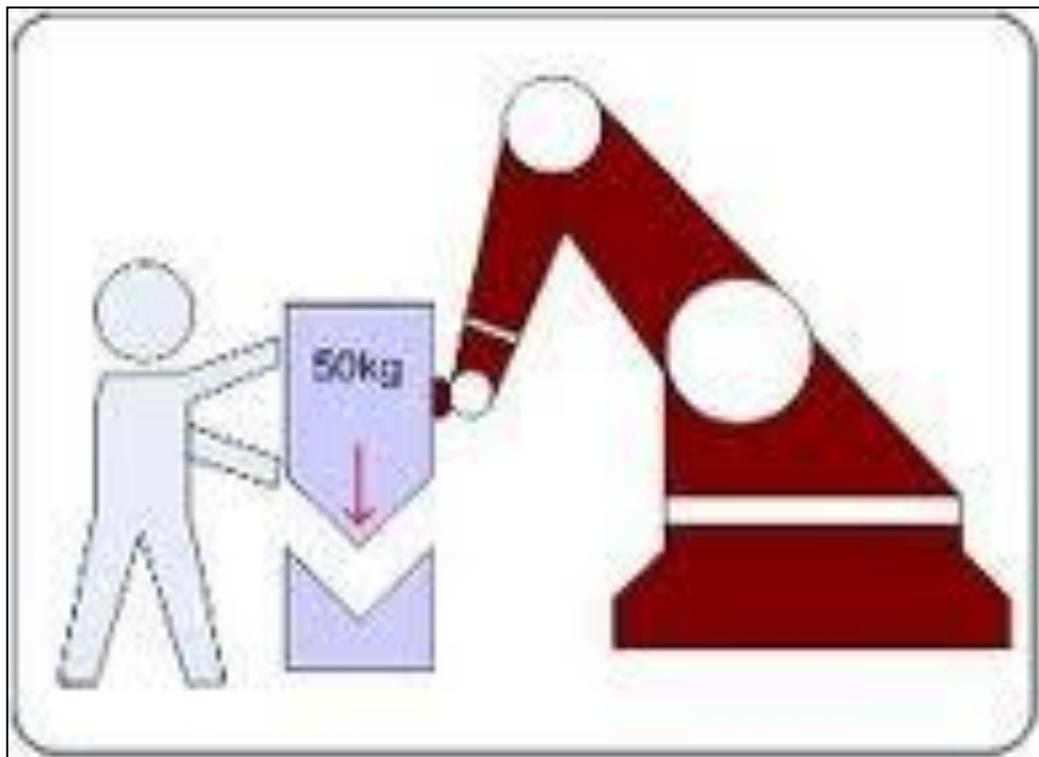


Figura 1.11 – Ilustração de robô cooperativo  
Fonte: IWB (2011)

## Extensores de potência

Também chamados de teleoperadores, são dispositivos que visam incrementar algumas características humanas, efetuar tarefas à distância e assim, por exemplo, substituir o homem em ambientes hostis (CORLISS, 1972). A figura 1.12 ilustra um tipo de teleoperador agindo como uma extensão das mãos.

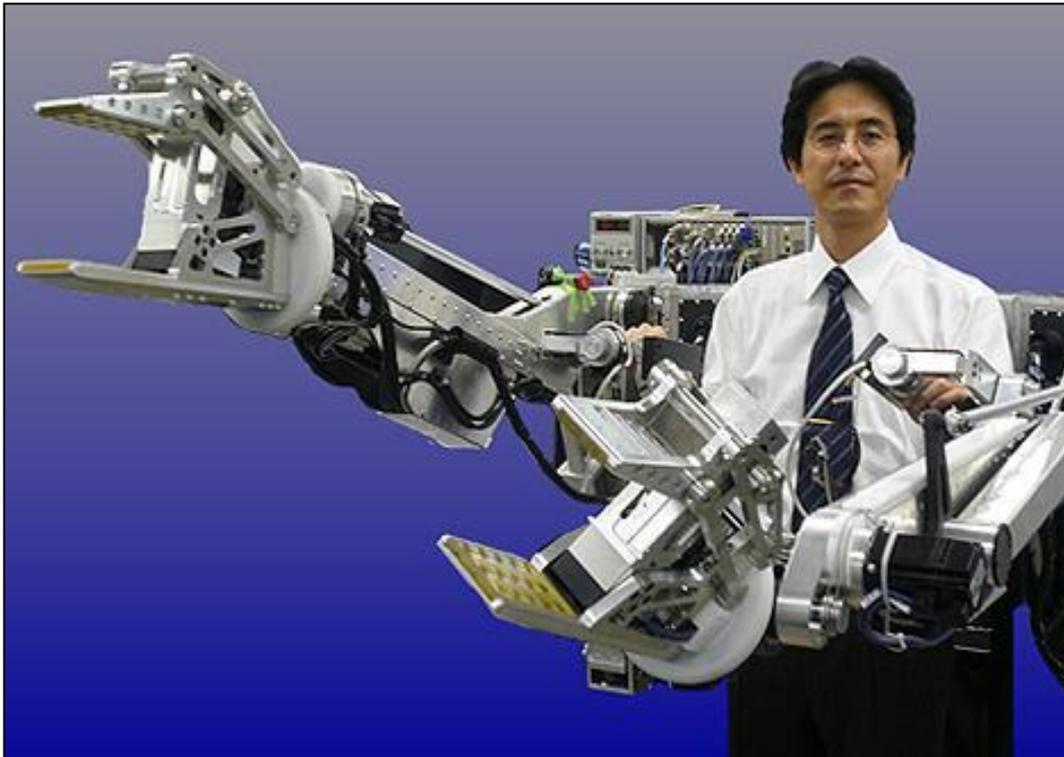


Figura 1.12 - Teleoperador Panasonic  
Fonte: Usstar Informática (2012)

## Exoesqueletos

Muito similares aos extensores de potência, distinguem-se destes pelo fato de envolver o corpo humano agregando-se a ele como uma extensão de potência de seus membros, seguindo fielmente seus movimentos através de atuadores e sistemas de controle (CORLISS,1972).

Obtiveram grande impulso quanto ao desenvolvimento no programa espacial americano, encontrando também aplicações na área médica substituindo membros humanos lesados, inoperantes ou amputados, mais recentemente utilizou-se esta tecnologia em equipamentos de auxílio humano em manufatura, onde o operador convive com posições ergonômicas inconvenientes devido à substituição de ações

de membros humanos pelas do equipamento. A figura 1.13 mostra um tipo de exoesqueleto utilizado para apoiar o operador quando este necessita abaixar-se, evitando-se assim esforços repetitivos de sustentação do corpo pela musculatura das pernas.



Figura 1.13 – Exoesqueleto aplicado em manufatura  
Fonte: Hype Science (2009)

### **Equipamentos mecatrônicos de movimentação e sustentação**

Alguns dispositivos mecatrônicos embora muito similares aos IAD's diferenciam-se por não possuírem recursos de programação de tarefas ou sensores avançados de visão, tato e direção, por exemplo, restringindo-se a efetuar a sustentação de cargas com baixíssimo esforço e eventualmente limitar sua ação em áreas consideradas seguras.

Compostos por diferentes tipos de atuadores e sistema eletrônico de controle atuam somente com o propósito de obter o balanceamento da carga em função de variações no comprimento do braço, peso da carga e altura.

Diferentemente dos IAD's a movimentação da carga é efetuada de forma direta pelo operador em contato com a mesma, sem a utilização de sensores para

detectar tendências de movimento, utilizando sensores somente para avaliação da carga quanto ao balanceamento.

A movimentação pelo operador requer a força necessária para vencer os atritos do sistema e acelerar a carga, limitando-se assim a utilização destes dispositivos a massas não muito elevadas ou baixas velocidades de movimentação.

Trata-se de uma versão simplificada de IAD, encontrando aplicações em processos de manufatura de pequenos lotes, cargas médias (Máximo de 30 Kg. aproximadamente) e evidentemente em atividades de risco ergonômico (YAMAMOTO, 2010). Um exemplo de equipamento mecatrônico para sustentação de cargas e movimentação manual da mesma é mostrado na figura 1.14 onde um sistema de motor elétrico e cabo juntamente com sensores mantém a carga em suspensão.



Figura 1.14 – Equipamento mecatrônico para sustentação de cargas  
Fonte: Gorbel (2012)

### 1.3 Aspectos construtivos dos equipamentos

#### IAD

Os IAD incorporaram importantes avanços tecnológicos nos últimos dez anos, cada vez mais perceptivos devido à incorporação de sensores como: visão; tato; peso; direção, detectando as intenções humanas relativas a movimentação de cargas em um espaço confinado (CAMERON, 2008; COLGATE et al., 2007; COLGATE; PESHKIN; KLOSTERMEYER, 2003; Mc GEE et al., 2001; STOCKMASTER et al., 2009; VAN DYKE et al., 2010).

O avanço tecnológico incorporado a estes equipamentos está intimamente relacionado com o avanço na área de sensores e técnicas de processamento de informações.

#### Sensores de direção e intensidade de força

Vários tipos de sensores são adaptados aos sistemas de deslocamento de cargas com o propósito de detectar direção de movimentação e a força aplicada pela carga ao sistema, desde simples chaves a componentes mais sofisticados. Alguns desenvolvimentos recentes são destacados a seguir.

- a) Um método para obter o movimento desejado de uma carga consiste na utilização de vários sensores de força que detectam a tendência de movimento do operador e enviam sinais a um microprocessador que por sua vez aciona o atuador convenientemente. O sistema ainda permite programar limites para a trajetória da carga através de um caminho virtual (McGEE, 2001).
- b) Uma luva desenvolvida por Kazerooni aloja em seu interior sensores de pressão que detectam a tendência de movimento e velocidade desejada pelo operador, através do leve contato de seus dedos com os sensores. (KAZEROONI et al., 2003).
- c) Um sistema de sensores detecta a direção imposta pelo operador, em dispositivos onde a carga é sustentada por cabos, bem como o ângulo formado com a vertical, de modo a impor sentido e velocidade de

deslocamento, permitindo assim guiá-la seguramente (COLGATE et al., 2004, 2007).

### **Sistemas de processamento de informações**

Um dos componentes de fundamental importância na concepção e funcionalidade de equipamentos de sustentação e movimentação de cargas é o processador de informações oriundas dos sensores que definem o instante e intensidade do atuador operar. A seguir relatam-se alguns avanços neste segmento:

- a) Um dispositivo inteligente recentemente desenvolvido consiste basicamente em obter-se um sistema controlador mais simples que os complexos “softwares” de interpretação vetorial e células de carga. Um sensor mede o ângulo da carga informando a um controlador lógico programável que aciona adequadamente o atuador. O posicionamento é realizado através de joysticks resultando em uma manutenção simples e programação não especializada (GATTA et al., 2008).
- b) Um atuador elétrico para manipular cargas através de um cabo que enrola e desenrola, foi aperfeiçoado a partir de um sistema de sensores especiais em conjunto com um manipulador de comando detectando o sentido e velocidade imposta pelo operador permitindo assim um controle preciso do movimento vertical de uma carga, sem esforço para o operador (STOCKMASTER et al., 2009).
- c) Um sistema intuitivo forma um controlador para dispositivos inteligentes de elevação de cargas permitindo um controle fino para movimentar verticalmente uma carga pesada a uma velocidade razoavelmente elevada. Possibilita também manipular cargas variáveis e uma transição suave entre a condição com carga e sem carga (VAN DYKE, 2010).

### **Equipamentos mecatrônicos**

Os equipamentos mecatrônicos concentram suas soluções no sistema de balanceamento da carga em função da ação da gravidade de forma a permitir que o próprio operador, de forma direta efetue as movimentações desejadas com esforço

físico reduzido, uma vez que o atuador do dispositivo o realiza, comandado por um sistema de controle adequado e “software” específico.

As soluções mecatrônicas para movimentação de cargas levam em consideração os seguintes fatores:

- a) Massa da carga: Fixa ou variável;
- b) Conexão da carga ao dispositivo: permanente ou temporária;
- c) Distância de atuação da carga: Fixa ou variável;
- d) Plano de atuação do dispositivo: Horizontal, vertical ou ambos.

### **Sistemas de contrapesos**

Este sistema de movimentação de cargas consiste em um dispositivo mecatrônico que utiliza uma viga apoiada formada por dois braços, fixando-se a um deles a carga e ao outro uma massa móvel denominada de contrapeso que ajusta-se automaticamente para equilibrar o conjunto e permitir a movimentação com um esforço físico reduzido.

Exemplos de dispositivos deste tipo são descritos por Montgon (1989) e Silva e Cal (2010).

Conectados a atuadores como motores elétricos, pistões hidráulicos ou pneumáticos, um sistema de contrapesos pode movimentar uma carga oferecendo algumas características interessantes, como: consumo de energia somente para conduzir o sistema até a posição de balanceamento, a partir da qual, a carga pode ser movimentada livremente e com o atuador inoperante. Apesar de um sistema deste tipo ser mais pesado e ocupar um volume maior, torna-se uma opção interessante em função de sua robustez e menor consumo de energia, principalmente em atividades de elevado número de operações. Além da movimentação da carga especificamente, trata-se de um recurso eficaz para minimizar a potência dos acionamentos de braços mecânicos, compensando o peso do braço ou outros componentes agregados ao sistema (HOLZBOCK, 1986).

## Sistemas de Braços

Em alguns sistemas de movimentação de cargas o braço é um item fundamental, uma vez que é através dele que a carga é levada a posição desejada no espaço, bem como provê a sustentação da mesma (HOLZBOCK, 1986).

Os principais tipos utilizados são:

- a) Fixos;
- b) Articulados;
- c) Pantográficos;
- d) Telescópicos.

A figura 1.15 ilustra um braço fixo utilizado em atividades agrícolas onde se observa um pistão hidráulico como atuador para o movimento vertical.

A figura 1.16 ilustra um braço articulado que mantém e sustenta uma parafusadeira em um ângulo constante de 90°.



Figura 1.15 - Braço fixo em guincho agrícola  
Fonte: Matão Equipamentos Ltda. (2011)

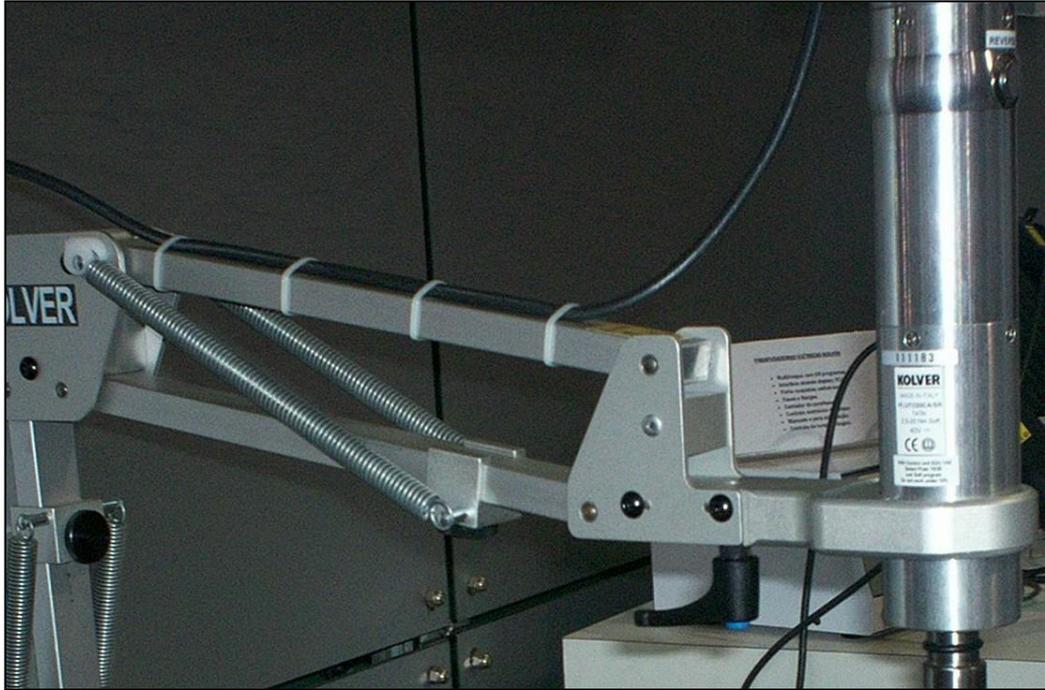


Figura 1.16 - Braço articulado com ângulo constante  
Fonte: Autor

#### 1.4 Revisão Bibliográfica

O estudo e proposta de desenvolvimento de um dispositivo direcionado a sustentação de cargas baseou-se na análise do estado da arte neste segmento e de conceitos tecnológicos aplicados a construção dos mesmos.

A abordagem cronológica do desenvolvimento de equipamentos para movimentação de cargas efetuada por Decker (2010) mostra claramente a incorporação dos avanços tecnológicos de outras áreas com o propósito de aumentar o desempenho e superar limitações. Silveira (1998) efetua um comentário relativo ao desenvolvimento da automação e robótica, sua importância na economia e aplicações industriais.

Dentre as inúmeras modalidades de equipamentos concentrou-se em um segmento específico que pode ser denominado como sustentação de cargas ou ainda de “gravidade zero”.

Uma verificação da constituição dos principais elementos destes dispositivos conduz a considerações a respeito de braços mecânicos Coiffet e Chirouze (2012), seus aspectos construtivos Mason (2001), e outros componentes destinados à movimentação de cargas, encontrando-se detalhes e informações valiosas em Miller (1988) e Oliveira (2010). A Observação de produtos e equipamentos disponíveis no

mercado mostra a evolução conceitual e construtiva deste segmento, como pode ser constatado nos catálogos e materiais de divulgação das empresas: MATÃO Equipamentos Agrícolas, MACCO, MARCON, KOLFIX, FESMO e DAUER entre outras.

Com o desenvolvimento da robótica, bem descrito por Campos (1985) observa-se a introdução destes conceitos na construção de equipamentos para movimentação de cargas, iniciando-se assim uma nova etapa tecnológica. Um dos principais destaques deste panorama, sem dúvida, é a utilização de recursos computacionais, responsáveis por avanços crescentes.

A opção de desenvolver um sistema de sustentação por contrapesos direcionou a busca por informações sobre o comportamento, tecnologia construtiva e operacional de sistemas balanceados automaticamente pela ação do movimento de um contrapeso. Um exemplo deste tipo de aplicação é mostrado por Silva e Cal (2010) que descreve um sistema de compensação dos momentos em uma torre de grua utilizando um braço com contrapeso móvel em oposição ao braço da carga. Um controlador avalia as informações de sensores e posiciona corretamente o contrapeso de modo a balancear o sistema.

Montgon (1989) patenteou um guindaste que utiliza um contrapeso para auxiliar na movimentação de cargas. O equipamento consiste em um braço móvel para a carga e um braço em oposição com um contrapeso acionado por um pistão hidráulico que direciona o contrapeso para a obtenção do balanceamento. O arranjo minimiza a potência de acionamento uma vez que o atuador é utilizado somente para movimentar a carga ficando o braço compensado pelo contrapeso, exigindo-se um esforço mínimo para movimentá-lo.

Yamamoto (2010) mostra uma versão de dispositivo para sustentação de cargas utilizando-se uma mola a gás como elemento de acúmulo de energia e assim balancear um sistema composto por um braço que suporta a carga e em uma curta extensão deste está fixado o elemento de força constante (mola a gás) apoiado em uma base móvel acionada por um motorreductor que recebe comando de um controlador avaliando a indicação de um sensor, obtendo assim equilíbrio no sistema e permitindo a sustentação da carga com esforço reduzido.

A modelagem do sistema baseou-se nas considerações eletromecânicas sobre um motor de corrente contínua, efetuadas por Oliveira, Aguiar e Vargas (2004), comentários relativos à soma algébrica de momentos de inércia por Bulliet

(1967). Chestnut e Mayer (1955) descrevem o efeito “*backlash*”, sua relevância em sistemas controlados devido a não linearidade introduzida e condição em que pode ser desprezado. Davis e Ledgerwood (1961) aborda a tensão mínima necessária para movimentar um motor elétrico, dando origem ao efeito “*backlash*”.

## 2 Fundamentos teóricos e conceituais

Este capítulo apresenta os principais aspectos teóricos e conceituais utilizados na concepção do projeto, situando o dispositivo no contexto geral de equipamentos para movimentação de cargas e direcionando o tema para sustentação de cargas com o propósito de auxílio ao homem em processos de manufatura.

Os parágrafos a seguir descrevem os itens de maior relevância quanto à construção de um equipamento baseado em uma viga simétrica composta por um braço destinado à sustentação e movimentação da carga (braço da carga) e outro braço no qual se encontra um contrapeso móvel (braço do contrapeso), com sua posição ajustada por um motorreductor de modo a equilibrar a viga cancelando os torques no eixo de apoio desta, permitindo assim que a carga após compensação da ação da força gravitacional seja deslocada por um operador com um esforço físico reduzido.

Analisa-se a seguir: o motor elétrico e o sistema mecânico utilizado para a movimentação do contrapeso, o sistema analógico para controle de balanceamento do contrapeso, envolvendo os sensores utilizados, circuitos e tipo de controlador adotado.

### 2.1 Viga simétrica balanceada

A figura 2.1 mostra um sistema de viga simétrica balanceada na posição horizontal onde as distâncias da massa da carga ( $l_{mc}$ ) e da massa do contrapeso ( $l_{mcp}$ ) ao ponto de apoio são iguais ( $l_{mc} = l_{mcp}$ ) e massas do contrapeso ( $m_{cp}$ ) e carga ( $m_c$ ) são também iguais ( $m_c = m_{cp}$ ), assim os torques do contrapeso ( $T_{cp}$ ) e carga ( $T_c$ ) resultam iguais ( $T_c = T_{cp}$ ), situação esta que permite o equilíbrio em infinitas posições e condução a qualquer uma delas com a aplicação de uma força mínima em qualquer dos braços. Observa-se que nesta situação o centro de massa do sistema coincide com o ponto de apoio.

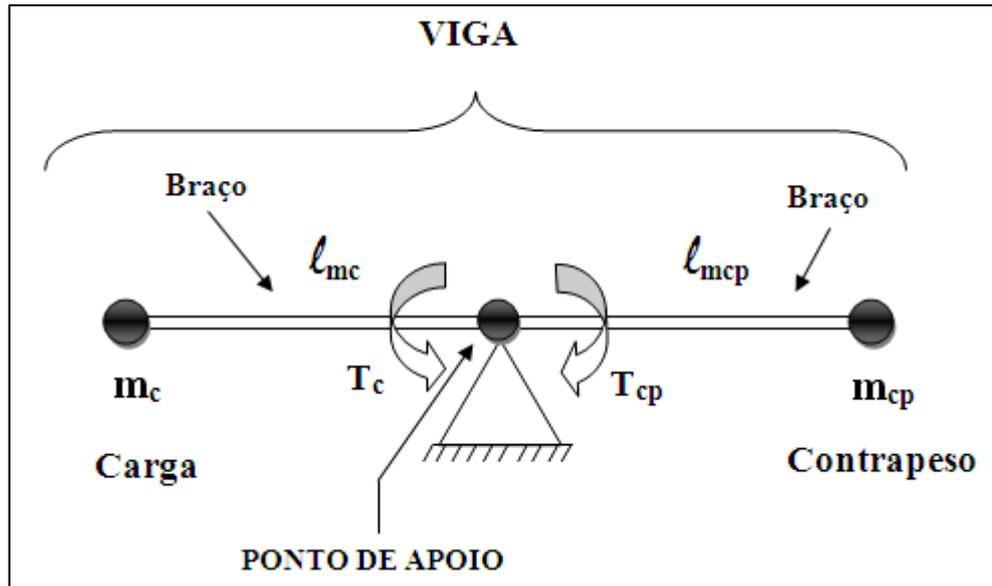


Figura 2.1 – Viga simétrica em balanço  
Fonte: Autor

## 2.2 Viga simétrica desbalanceada

Em um sistema de viga onde as distâncias das massas ao ponto de apoio são iguais ( $l_{mcp} = l_{mc}$ ), mas as massas apresentam valores diferentes ( $m_c \neq m_{cp}$ ), tem-se no ponto de apoio torques diferentes ( $T_c \neq T_{cp}$ ). A viga apresentada na figura 2.2, mostra a ação das forças da carga ( $F_c$ ) e contrapeso ( $F_{cp}$ ) devido a ação da gravidade e suas decomposições  $F'_c$  e  $F'_{cp}$  em função do ângulo  $\alpha$ . Através de um movimento determinado pelo momento  $(F_c \cdot l_{mc} - F_{cp} \cdot l_{mcp}) \cdot \cos\alpha$ , o sistema comporta-se como um pêndulo, encontrando equilíbrio estável no eixo vertical como mostra a figura 2.3. Pode-se constatar que nesta situação o centro de massa do sistema encontra-se deslocado do ponto de apoio, vindo a situar-se abaixo do mesmo ao dirigir-se para o ponto de equilíbrio estável.

Assim:

$$F_c = m_c \cdot g \quad (2.1)$$

$$F_{cp} = m_{cp} \cdot g \quad (2.2)$$

$$F'_c = m_c \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (2.3)$$

$$F'_{cp} = m_{cp} \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (2.4)$$

$\alpha$  = ângulo formado entre o braço e o plano horizontal

$g$  = aceleração da gravidade

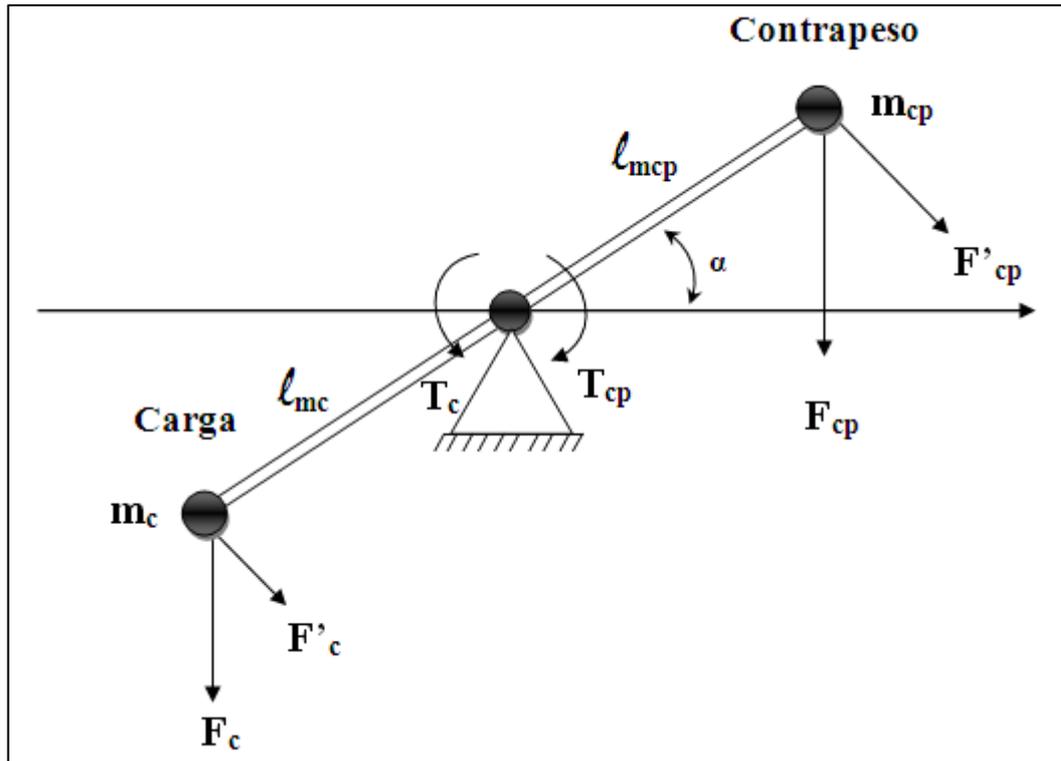


Figura 2.2 - Forças atuantes em uma viga  
Fonte: Autor

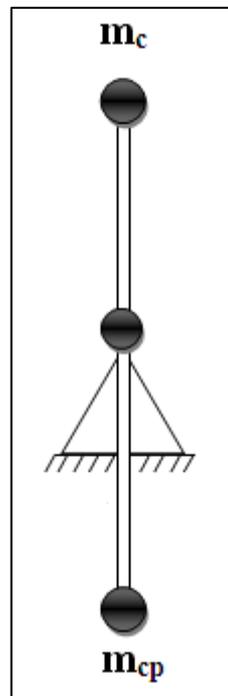


Figura 2.3 – Posição final de uma viga desbalanceada  
Fonte: Autor

## **2.3 Motor de corrente contínua com imã permanente**

O motor de corrente contínua com imã permanente diferencia-se dos demais pelo fato de obter o fluxo magnético destinado à movimentação a partir de estruturas magnéticas permanentes, ou seja: não necessita de energia elétrica para tal.

O eixo ao qual é incorporada uma bobina denominada de armadura gira à medida que uma tensão é aplicada a esta, através de um comutador de espiras e um par de escovas.

O componente em questão é bastante versátil para aplicações em automatizações devido à sua simplicidade e uma relação linear entre tensão aplicada e rotação obtida (KENJO; NAGAMORI, 1985).

### **2.3.1 Características e parâmetros fundamentais**

O motor pode ser representado por um modelo elétrico onde a resistência da armadura ( $R$ ) associa-se em série com a indutância da mesma ( $L$ ) e com o autogerador constituído pelo próprio sistema, que apresenta uma tensão ( $E_g$ ) proporcional à rotação  $\omega$ , alimentado pela tensão ( $E$ ), como pode ser visto na figura 2.4.

Os principais parâmetros do motor com imã permanente são tratados por (KENJO; NAGAMORI, 1985) ao passo que a conexão de um redutor é abordada por Bulliet (1967) e Davis e Ledgerwood (1961) comenta sobre o torque necessário para retirar o motor da imobilidade. A modelagem efetuada é baseada na obra de Oliveira (2010).

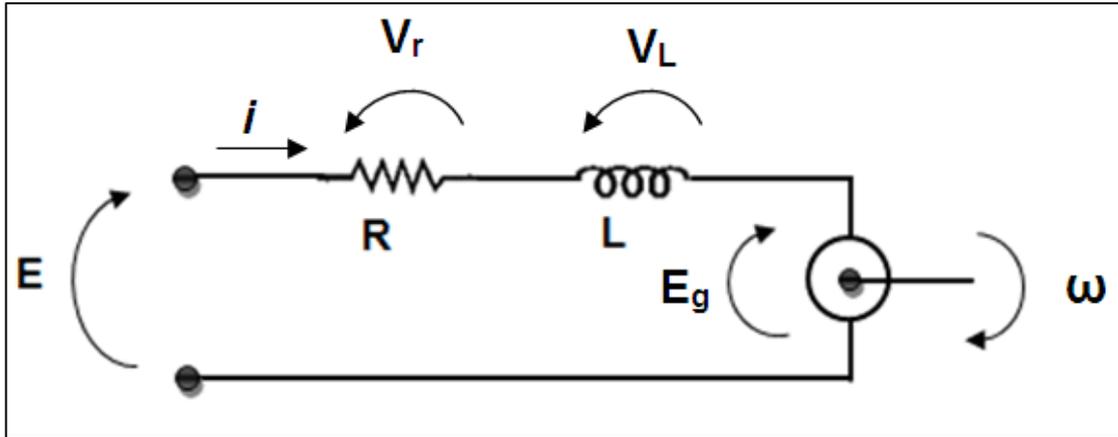


Figura 2.4 - Circuito elétrico equivalente do motor

Fonte: Autor

Aplicando-se a lei de Kirchhoff à malha, encontra-se a equação:

$$E = V_r + V_L + E_g \quad (2.5)$$

Onde:

$V_r$  = Tensão na resistência da armadura

$V_L$  = Tensão na indutância da armadura

$E$  = Tensão aplicada ao motor

$E_g$  = Tensão de força contraeletromotriz

Considerando-se uma corrente  $i$  circulante na armadura, determina-se uma nova relação em função desta corrente, de tal forma que:

$$E_{(t)} = R \cdot i_{(t)} + L \frac{di_{(t)}}{dt} + E_{g(t)} \quad (2.6)$$

Como a tensão  $E_g$  é função da rotação, importa relacioná-la em função desta, para tanto se estabelece a constante  $K_{gm}$ , denominada de constante de força contra eletromotriz que é expressa por:

$$K_{gm} = \frac{E_g}{\omega_m} \quad (2.7)$$

Deste modo a expressão 2.6 pode ser rearranjada para:

$$E_{(t)} = R \cdot i_{(t)} + L \frac{di_{(t)}}{dt} + K_{gm} \cdot \omega_{m(t)} \quad (2.8)$$

O torque desenvolvido pelo motor sem carga ( $T_{tm}$ ) é diretamente proporcional a corrente da armadura e expresso pela relação:

$$T_{tm} = K_{tm} \cdot i_{(t)} \quad (2.9)$$

Onde:

$K_{tm}$  é denominada de constante de torque do motor

Devido ao fato de  $K_{tm}$  e  $K_{gm}$  dependerem dos mesmos fatores, seus valores numéricos são idênticos (KENJO; NAGAMORI, 1985).

Uma análise do aspecto mecânico do motor mostra a massa da armadura movimentando-se circularmente para a qual se define: o momento de inércia ( $J_{mt}$ ), um atrito viscoso ( $B_v$ ) e o atrito estático, cujo torque necessário para vencê-lo é denominado de  $T_{rm}$ . Assim, pode-se estabelecer uma equação relativa aos torques do sistema:

$$T_{tm} = B_v \cdot \omega_m + J_{mt} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + T_{rm} \quad (2.10)$$

O atrito estático exige uma tensão mínima aplicada à armadura de modo a retirar o motor da imobilidade (DAVIS; LEDGERWOOD, 1961), tal tensão, denominada de  $E_{rm}$  ou tensão limiar do movimento, pode ser expressa pela relação:

$$E_{rm} = R \cdot \frac{T_{rm}}{K_{tm}} \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Redutor

O redutor consiste em um conjunto de engrenagens conectadas entre si de forma a reduzir a rotação própria do motor, de modo que apresenta os mesmos efeitos mecânicos que este, como; momento de inércia ( $J_r$ ), atrito estático ( $T_{rr}$ ) e atrito viscoso ( $B_{vr}$ ). Uma vez que o motor e o redutor em estudo estão acoplados, os

parâmetros citados podem ser algebricamente somados devido estarem referenciados a velocidade de saída do conjunto ( $\omega$ ) (BULLIET, 1967) formando um bloco único, assim, define-se para o motorreductor:

$$J_{mr} = J_r + J_{mt} \quad (2.12) \text{ (Momento de inércia do motorreductor)}$$

$$T_{rnr} = T_{rr} + T_{rm} \quad (2.13) \text{ (Torque de atrito estático do motorreductor)}$$

$$B_{vmr} = B_{vr} + B_v \quad (2.14) \text{ (Coeficiente de atrito viscoso do motorreductor)}$$

Onde:

$K_g$  = constante de força contraeletromotriz, referenciada a velocidade  $\omega$

$K_t$  = constante de torque do motorreductor, referenciada a velocidade  $\omega$

$E_{rnr}$  = Tensão de limiar de movimento do motorreductor referenciada a velocidade  $\omega$

A partir deste ponto o motorreductor pode ser representado pelas seguintes equações:

$$E_{(t)} = R \cdot i_{(t)} + L \frac{di_{(t)}}{dt} + K_g \cdot \omega_{(t)} \quad (2.15)$$

$$T_t = B_{vmr} \cdot \omega + J_{mr} \cdot \frac{d\omega}{dt} + T_{rnr} \quad (2.16)$$

$$E_{rnr} = R \cdot \frac{T_{rnr}}{K_t} \quad (2.17)$$

### 2.3.3 Sistema de transmissão

Um fuso acoplado ao motorreductor que por sua vez aciona um contrapeso, conduzido através de um sistema de guia movimentando-o linearmente com ângulo  $\alpha = 0$  compõe o sistema em questão, como pode ser visto na figura 2.5.

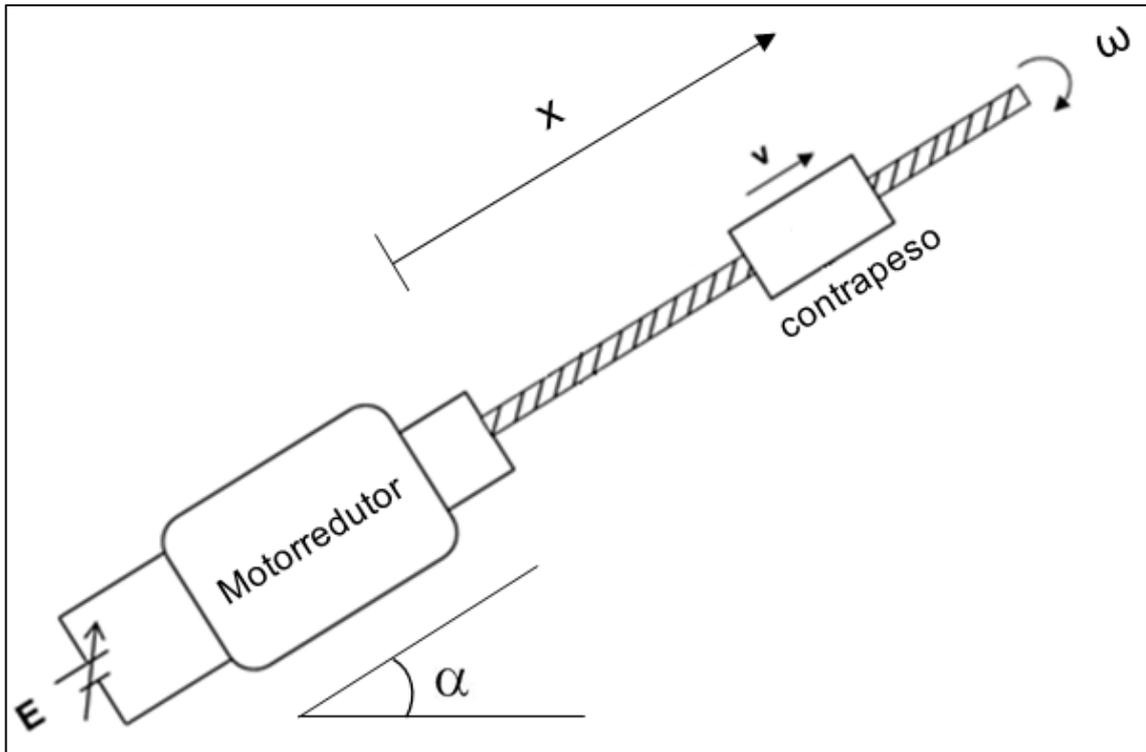


Figura 2.5 - Sistema de transmissão do contrapeso  
Fonte: Autor

Este sistema mecânico da mesma forma que os anteriores apresentam como efeitos principais: atrito estático, atrito viscoso e momento de inércia do fuso e do contrapeso (CATÁLOGO..., 1993). Os atritos e momentos de inércia referentes ao fuso e ao contrapeso, isoladamente, são assim definidos:

$B_{vf}$  = Coeficiente de atrito viscoso entre fuso, contrapeso, mancais, guia

$T_{rf}$  = Torque relativo ao atrito estático entre fuso, contrapeso, mancais, guia

$J_f$  = Momento de inércia do fuso

$J_{cp}$  = Momento de inércia do contrapeso

O torque necessário para movimentar o fuso e contrapeso ( $T_f$ ) é dado pela relação:

$$T_f = B_{vf} \cdot \omega + J_f \cdot \frac{d\omega}{dt} + J_{cp} \cdot \frac{d\omega}{dt} + T_{rf} \quad (2.18)$$

Ao acoplar-se motorreductor, fuso e contrapeso, o torque total do sistema ( $T_m$ ) passa a ser:

$$T_m = T_f + T_t \quad (2.19)$$

Substituindo-se 2.16 e 2.18 em 2.19, obtém-se:

$$T_m = (B_{vf} + B_{vmr}) \cdot \omega + (J_{mr} + J_f + J_{cp}) \cdot \frac{d\omega}{dt} + (T_{rf} + T_{rmr}) \quad (2.20)$$

Resumindo-se:

$$B = B_{vf} + B_{vmr} \quad (2.21)$$

$$J = J_{mr} + J_f + J_{cp} \quad (2.22)$$

$$T_r = T_{rf} + T_{rmr} \quad (2.23)$$

Reescreve-se a equação 2.20:

$$T_m = B \cdot \omega + J \frac{d\omega}{dt} + T_r \quad (2.24)$$

A tensão limiar do movimento, em função dos atritos adicionados altera seu valor e passa a ser denominada  $E_r$ , de modo que:

$$E_r = R \cdot \frac{T_r}{K_t} \quad (2.25)$$

Relações entre grandezas:

Efetuada-se a transformada de Laplace das equações 2.15 e 2.24, obtém-se:

$$E_{(s)} = R \cdot I_{(s)} + s \cdot L \cdot I_{(s)} + K_g \cdot \omega_{(s)} \quad (2.26)$$

$$T_{m(s)} = B \cdot \omega_{(s)} + s \cdot J \cdot \omega_{(s)} + T_{r(s)} \quad (2.27)$$

Onde:

$I_{(s)}$  = Corrente no domínio da frequência

$\omega_{(s)}$  = Velocidade angular no domínio da frequência

$T_{m(s)}$  = Torque total do sistema no domínio da frequência

$s$  = Operador Laplaceano

Analisando-se 2.27 e obtendo-se uma função de transferência para o sistema mecânico, tem-se:

$$\frac{\omega_{(s)}}{(T_m - T_r)_{(s)}} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{J}{B}s + 1} \quad (2.28)$$

Onde:

$$\frac{J}{B} = \sigma_{\text{mec}} \text{ (constante de tempo mecânica)} \quad (2.29)$$

Como o vínculo entre o sistema mecânico e o elétrico se dá pela relação:

$$T_{m(s)} = K_t \cdot I_{(s)} \quad (2.30)$$

A partir de 2.26 obtém-se uma expressão para a corrente no motor:

$$I_{(s)} = \frac{E_{(s)} - K_g \cdot \omega_{(s)}}{R + s \cdot L} \quad (2.31)$$

Substituindo-se 2.31 em 2.30, encontra-se uma relação entre o sistema elétrico e o mecânico, de forma que:

$$T_{m(s)} = K_t \cdot \left[ \frac{E_{(s)} - K_g \cdot \omega_{(s)}}{R + s \cdot L} \right] \quad (2.32)$$

Aplicando-se equação 2.32 em 2.27, tem-se:

$$K_t \cdot \left[ \frac{E_{(s)} - K_g \cdot \omega_{(s)}}{R + s \cdot L} \right] = B \cdot \omega_{(s)} + s \cdot J \cdot \omega_{(s)} + T_{r(s)} \quad (2.33)$$

Isolando-se a tensão  $E_{(s)}$  em 2.33 encontra-se a seguinte equação:

$$E_{(s)} = \frac{\omega(s)}{K_t} \cdot [s^2 \cdot L \cdot J + s \cdot (J \cdot R + L \cdot B) + (K_t \cdot K_g + R \cdot B)] + \frac{T_r(s)}{K_t} \cdot (s \cdot L + R) \quad (2.34)$$

Rearranjando-se 2.34 de modo a separar a tensão  $E_{(s)}$  em dois fatores denominando-os de A e Q, sendo A dependente de  $\omega$  e Q independente, assim:

$$E_{(s)} = A + Q \quad (2.35)$$

Onde:

$$A = \frac{\omega(s)}{K_t} \cdot [s^2 \cdot L \cdot J + s \cdot (J \cdot R + L \cdot B) + (K_t \cdot K_g + R \cdot B)] \quad (2.36)$$

$$Q = \frac{T_r(s)}{K_t} \cdot (s \cdot L + R) \quad (2.37)$$

$E_{(s)}$  = Tensão de alimentação do motor no domínio da frequência

O propósito desta separação é obter uma função dependente de  $\omega$ , uma vez que o fator Q pode ser considerado desprezível, pois seu valor é tipicamente baixo em relação à tensão  $E_{(s)}$ . Analisando-se o termo Q, verifica-se que este corresponde a tensão limiar do movimento ( $E_r$ ), podendo ser calculada pela expressão 2.25 e uma vez que seu valor seja inferior a um valor estipulado de 5% da tensão nominal do motor pode ser desconsiderada, conforme (DAVIS; LEDGERWOOD, 1961), principalmente pelo fato do motor operar sempre na tensão máxima.

Desta forma, anulando-se o fator Q, obtém-se a partir da equação 2.34 a função de transferência seguinte:

$$G_{(s)} = \frac{\omega(s)}{E_{(s)}} = \frac{\frac{K_t}{L \cdot J}}{s^2 + s \left( \frac{R \cdot J + L \cdot B}{L \cdot J} \right) + \frac{R \cdot B + K_t \cdot K_g}{L \cdot J}} \quad (2.38)$$

Com o propósito de obter-se uma função de transferência para o sistema relacionando a tensão  $E_{(s)}$  com a posição do contrapeso (x), procura-se em seguida, vincular a velocidade angular  $\omega$  com a velocidade linear (v) e esta última com a posição (x):

Como:  $v = \frac{dX}{dt}$ ,  $X = \int_0^t v \cdot dt$ , cuja transformada de Laplace é  $X(s) = \frac{v(s)}{s}$ , uma vez que  $v(s) = \frac{\omega(s) \cdot p}{2\pi}$ , então  $X(s) = \frac{\omega(s) \cdot p}{2\pi \cdot s}$ , resultando em:

$$\omega(s) = \frac{X(s) \cdot 2\pi \cdot s}{p} \quad (2.39)$$

Onde:

$p$  = passo do fuso.

$X(s)$  = posição no domínio da frequência.

$V(s)$  = velocidade no domínio da frequência.

Substituindo-se 2.39 em 2.38 obtém-se:

$$\frac{X(s)}{E(s)} = \frac{\frac{p \cdot K_t}{2\pi \cdot L \cdot J}}{\left[ s^3 + s^2 \cdot \left( \frac{R \cdot J + L \cdot B}{L \cdot J} \right) + s \cdot \left( \frac{R \cdot B + K_t \cdot K_g}{L \cdot J} \right) \right]} \quad (2.40)$$

Desta maneira, estabelece-se uma função de transferência para o sistema eletromecânico, relacionando-se a tensão aplicada ao motorreductor com a posição do contrapeso, que pode ser representada pelo diagrama de blocos da figura 2.6.

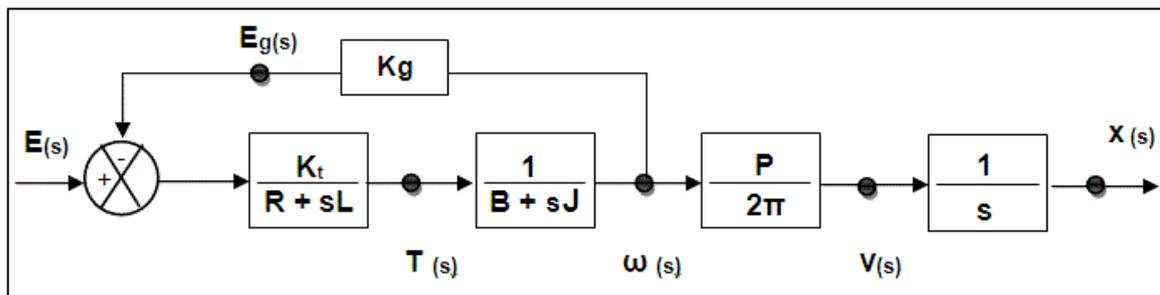


Figura 2.6 - Diagrama de blocos do sistema eletromecânico

Fonte: Autor

## 2.4 Sensor de força

### 2.4.1 Medida de força

Como o objetivo do sistema proposto é manter os braços em equilíbrio, ou seja: a somatória dos torques em seu ponto de apoio deve ser nula, impõe-se a

medição dos torques gerados em cada braço, para posteriores ações corretivas. A medição efetuada é indireta, ou seja: mede-se a força aplicada pelo braço em uma determinada posição através de um sensor e relaciona-se esta força diretamente com o torque.

A figura 2.7 mostra um diagrama das forças atuantes no braço da carga com o mesmo totalmente expandido, e a expressão 2.30 define a força máxima aplicada ao sensor.

As forças exercidas pela carga ( $F_c$ ) e pela estrutura do braço ( $F_{bc}$ ) são multiplicadas segundo a relação entre a distância do ponto de aplicação da carga ( $d_c$ ) e a distância da posição do sensor ( $d_s$ ) e a relação entre a distância do centro de massa do braço ( $d_{cm\ bc}$ ) e  $d_s$ , respectivamente. A força resultante ( $F_s$ ) é medida pelo sensor e utilizada como referência de torque do braço da carga.

$$F_s = F_c \cdot \frac{d_c}{d_s} + F_{bc} \cdot \frac{d_{cm\ bc}}{d_s} \quad (2.41)$$

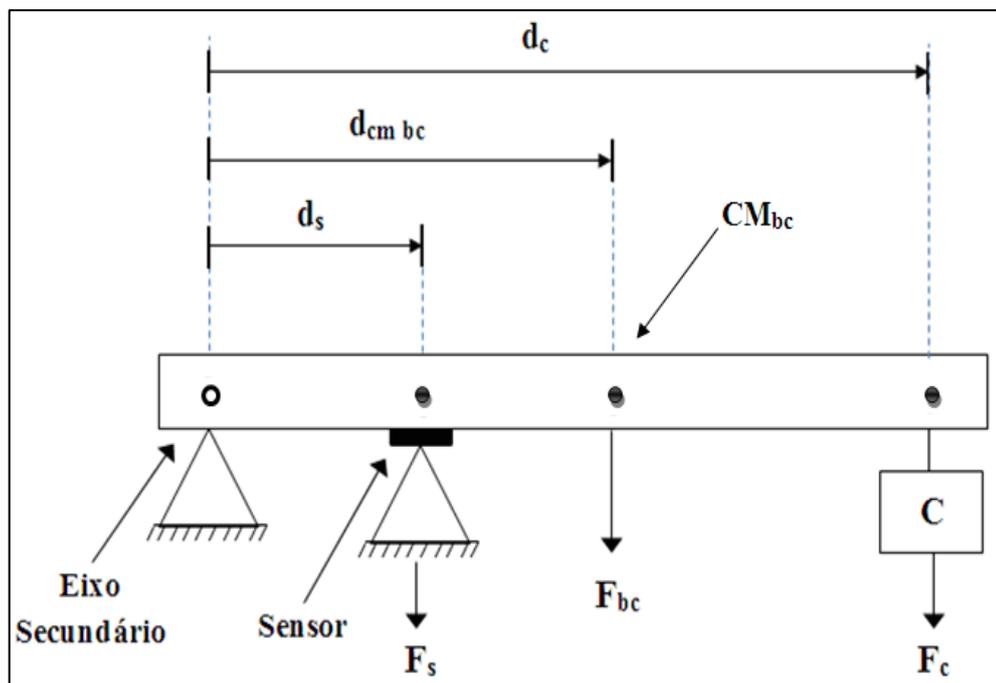


Figura 2.7 - Forças atuantes no sensor do braço da carga  
Fonte: Autor

As forças atuantes no braço do contrapeso, em sua condição de torque máximo são mostradas no diagrama da figura 2.8 resultando na expressão 2.42:

$$F_s = F_{cp} \cdot \frac{d_{cp}}{d_s} + F_{bcp} \cdot \frac{d_{cm\ bcp}}{d_s} \quad (2.42)$$

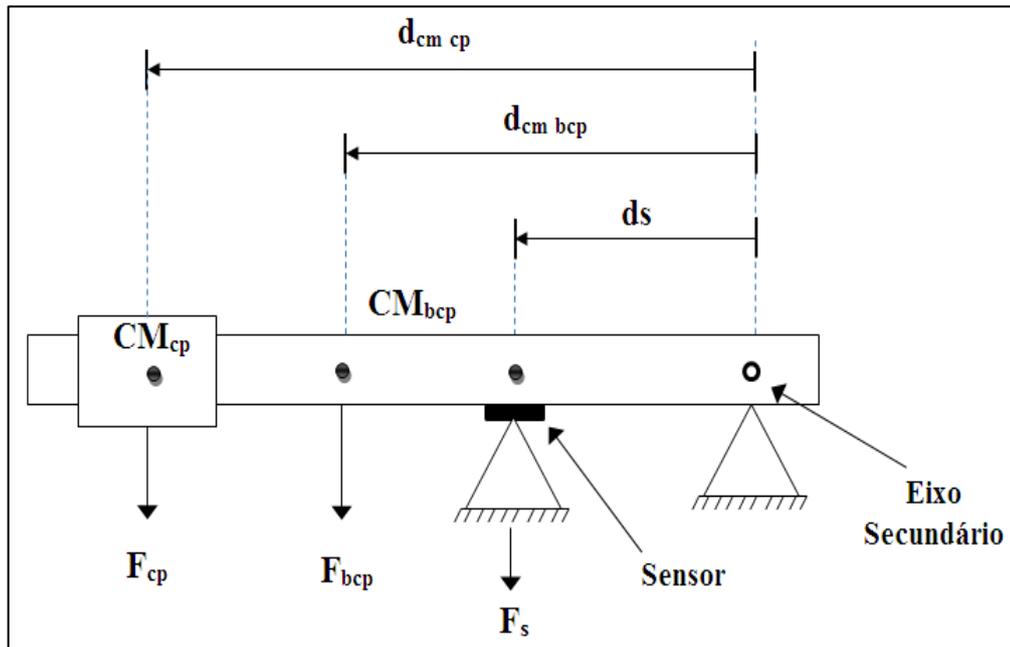


Figura 2.8 - Forças atuantes no sensor do braço do contrapeso  
Fonte: Autor

Onde:

$F_{cp}$  = Força exercida pela massa do contrapeso.

$d_{cm\ cp}$  = Distância do CM do contrapeso.

$F_{bcp}$  = Força exercida pela massa da estrutura do braço.

$d_{cm\ bcp}$  = Distância do CM da estrutura do braço.

$CM_{bcp}$  = Centro de massa do braço do contrapeso.

$CM_{cp}$  = Centro de massa do contrapeso.

### 2.4.2 Características do sensor

O dispositivo Interlink FSR modelo 406 consta de uma película que uma vez pressionada tem seu valor resistivo alterado estabelecendo uma relação entre a resistência obtida e a força aplicada.

A curva que mostra a relação entre força aplicada ao sensor e resistência obtida não apresenta linearidade em sua totalidade, porém uma considerável parte desta é praticamente linear, como pode ser visto na figura 2.9. O fabricante fornece a curva baseada em um atuador padrão que pode ser alterado de acordo com a

necessidade de modificação da curva de referência (INTERLINK ELECTRONICS, 2012).

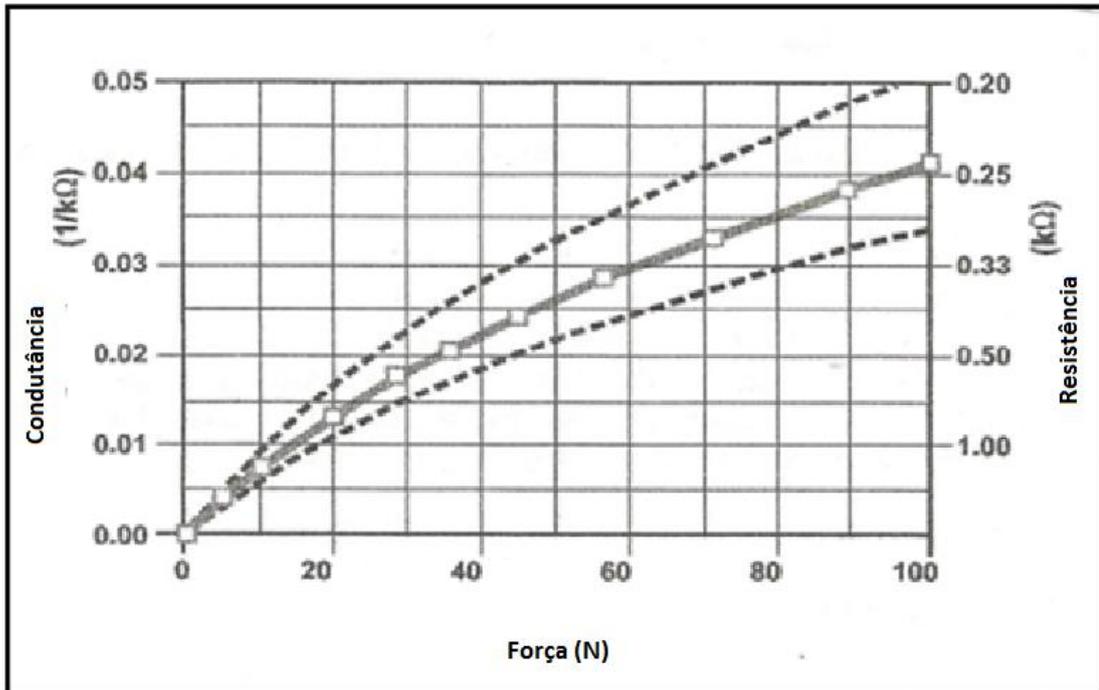


Figura 2.9 - Curva força versus resistência do sensor FSR 406  
Fonte: Adaptado de Interlink Electronics (2012)

#### 2.4.3 Tensão do sensor do braço do contrapeso ( $V_{scp}$ )

Devido à necessidade de relacionar-se a força aplicada ao sensor com uma tensão, associa-se em série com a resistência do dispositivo sensor ( $R_{scp}$ ), um resistor de forma tal a constituir-se em um divisor, o que pode ser observado na figura 2.10 através de  $R_1$  e  $R_{scp}$ .

A tensão obtida é expressa por:

$$V_{scp} = V \cdot \frac{R_{scp}}{R_{scp} + R_1} \quad (2.43)$$

Onde:

$V$  = tensão de alimentação do circuito

$V_{scp}$  = tensão proporcional à força aplicada

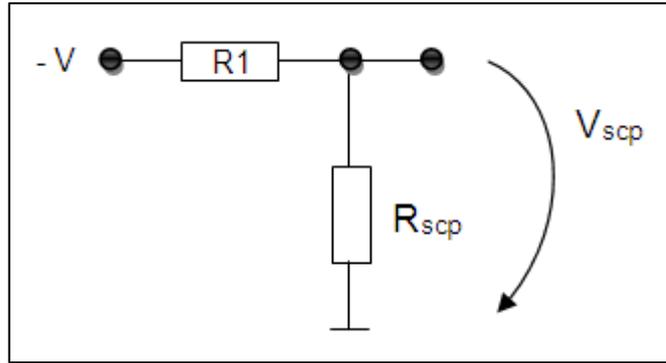


Figura 2.10 - Divisor de tensão para o sensor do contrapeso  
Fonte: Autor

Como a relação entre a força aplicada ( $F_s$ ) e a tensão obtida ( $V_{scp}$ ) depende do elemento resistivo sensível e também da geometria e detalhes mecânicos do atuador utilizado, um gráfico deve ser elaborado empiricamente relacionando a posição do contrapeso ( $x$ ), responsável pela geração da força  $F_s$ , com a tensão correspondente ( $V_{scp}$ ). A partir da curva estabelecida determina-se um coeficiente médio  $G_{scp}$ , definido pela relação abaixo em vários pontos da curva:

$$G_{scp} = \frac{V_{scp}}{x} \quad (2.44)$$

Tensão correspondente ao braço do contrapeso ( $V_{cp}$ )

Os braços devem fornecer uma tensão relativa ao torque exercido por estes no eixo de apoio, assim dispõe-se para cada braço um sensor e um circuito correspondente.

A tensão  $V_{scp}$  necessita ser adequada ao circuito de controle do sistema e filtrada com relação a distúrbios e impulsos de força de curta duração originados na movimentação do contrapeso, funções estas realizadas por um amplificador operacional como mostrado no circuito da figura 2.11. Neste circuito,  $V$  é a tensão de alimentação,  $R_1$  e  $R_s$  compõem o divisor anteriormente tratado,  $R_2, R_3, TP_1$  e  $C_1$  amplificam e filtram a tensão  $V_{scp}$ , resultando na tensão  $V_{cp}$ . O trimpot  $TP_1$  é utilizado para ajustar o ganho e assim corrigir eventuais diferenças de calibração entre os braços, proporcionando um ajuste de equalização. Os resistores  $R_4$  e  $R_5$  exercem funções secundárias ao sistema (JUNG, 1974).

Analisando-se o circuito da figura 2.11 no domínio da frequência obtém-se a função de transferência do circuito ( $G_{bcp}$ ) expressa pela seguinte relação:

$$G_{bcp(s)} = \frac{V_{cp(s)}}{V_{scp(s)}} = \frac{\frac{1}{R_2.C_1}}{s + \frac{1}{(R_3+TP1).C_1}} \quad (2.45)$$

Fazendo-se:  $b = \frac{1}{R_2.C_1}$  e  $a = \frac{1}{(R_3+TP1).C_1}$  e substituindo a e b em 2.45, obtém-se:

$$G_{bcp(s)} = \frac{b}{s+a} \quad (2.46)$$

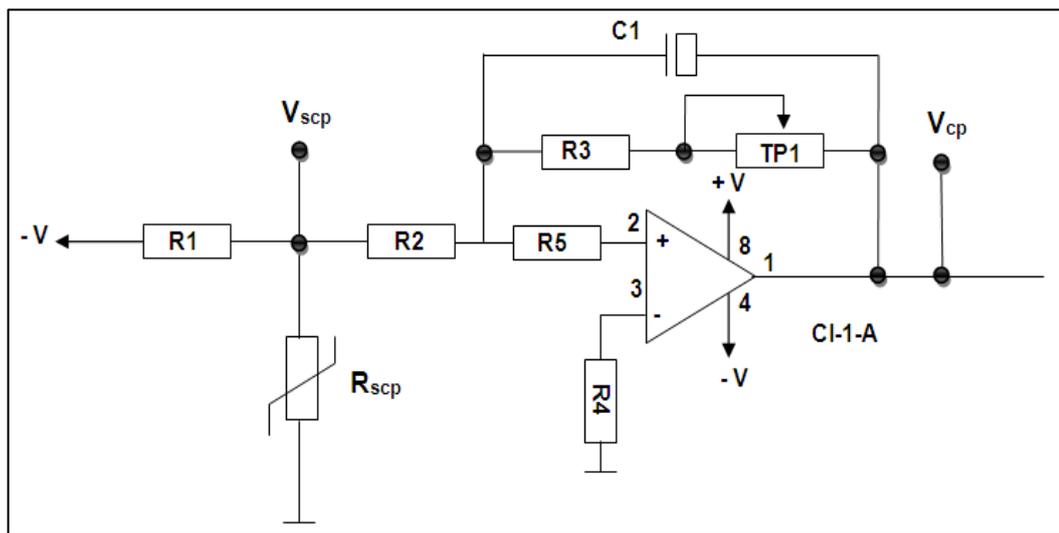


Figura 2.11 - Circuito amplificador do braço do contrapeso  
Fonte: Autor

## 2.5 Função de transferência do braço do contrapeso

Inserindo-se o sensor e respectivo circuito na função de transferência do sistema eletromecânico obtém-se a função de transferência do braço do contrapeso, e assim relaciona-se a tensão correspondente ao braço ( $V_{cp(s)}$ ) com a tensão aplicada ao motor ( $E(s)$ ):

$$\frac{V_{cp(s)}}{E(s)} = \frac{G_{scp} \cdot \frac{p.K_t \cdot b}{2.\pi.L.J.}}{\left\{ s^4 + s^3 \left[ a + \frac{(R.J+L.B)}{L.B} \right] + s^2 \left[ \left( \frac{R.J+L.B}{L.J} \right) . a + \frac{R.B + K_t.K_g}{L.J} \right] + s.a \left[ \frac{R.B + K_t.K_g}{L.J} \right] \right\}} \quad (2.47)$$

A figura 2.12 apresenta o diagrama de blocos correspondente à função de transferência 2.40.

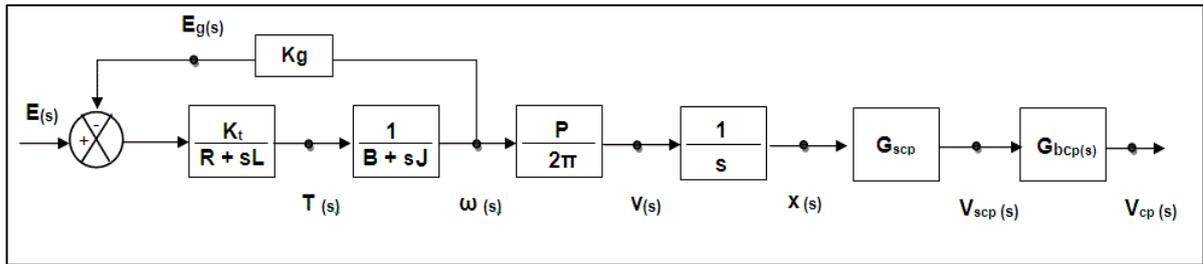


Figura 2.12 - Diagrama de blocos final do braço do contrapeso  
Fonte: Autor

## 2.6 Função de transferência do braço da carga

De forma idêntica ao sensor do contrapeso, o torque causado no braço pela carga é traduzido como uma tensão ( $V_{sc}$ ) que posteriormente será amplificada pelo CI-1-B e filtrada quanto a impulsos de curta duração causados pela movimentação do braço e carga, conforme figura 2.13, de modo idêntico ao CI-1-A, ressaltando-se que a tensão  $V_c$  constitui-se na referência do sistema.

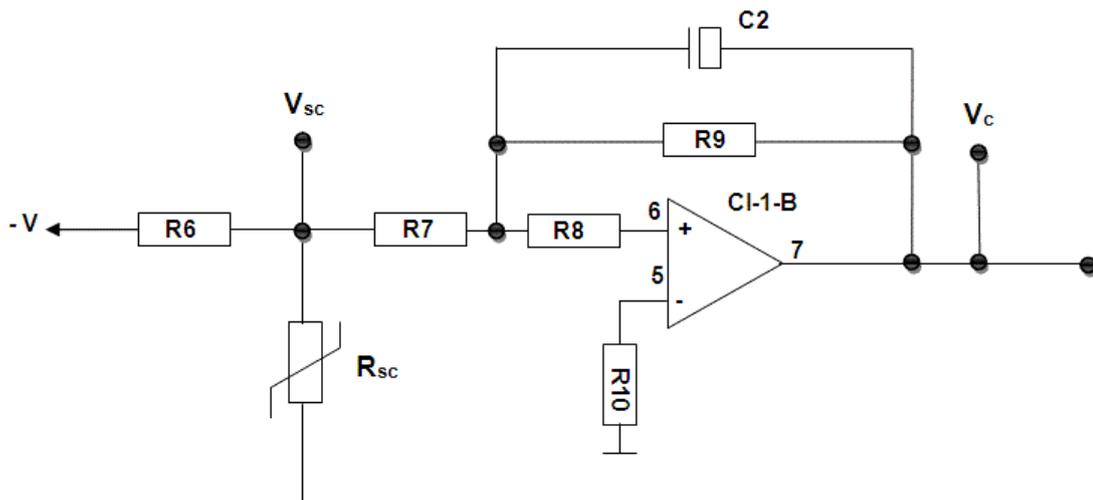


Figura 2.13 - Circuito amplificador do braço da carga  
Fonte: Autor

A tensão  $V_{sc}$  é o reflexo direto e imediato do torque causado pela carga em seu braço, portanto interessa obter uma função de transferência ( $G_{bc}$ ) entre esta e a tensão obtida após a filtragem ( $V_c$ ), assim:

$$G_{bc(s)} = \frac{V_c(s)}{V_{sc}(s)} = \frac{1}{s + \frac{1}{R_9 \cdot C_2}} \quad (2.48)$$

## 2.7 Sistema em malha fechada

O sistema responde a uma alteração no braço da carga com uma mudança na posição do contrapeso de modo a obter o equilíbrio dinâmico do equipamento, para tanto é necessário um sistema de controle que efetue as correções necessárias.

A referência do sistema é o sinal  $V_c$ , que corresponde ao torque introduzido pela carga no braço, de acordo com a função de transferência 2.38.

Uma vez que o tempo de correção é longo, devido à baixa velocidade linear do contrapeso obtida pelo motorreductor e fuso, considera-se as tensões  $V_c$  e  $V_{sc}$  como simultâneas, desprezando-se portanto o atraso introduzido pela filtragem.

A figura 2.14 mostra o diagrama do sistema em malha fechada, onde:

$e = V_c - V_{cp}$  (sinal de erro)

$E$  = Tensão aplicada ao motor

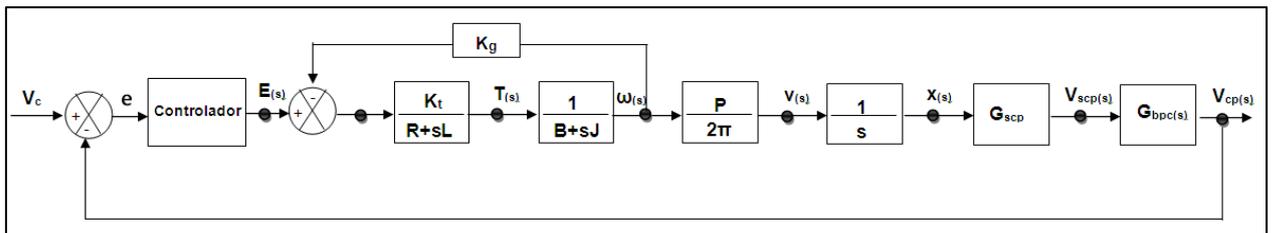


Figura 2.14 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada

Fonte: Autor

## 2.8 Estratégia de controle

A escolha do tipo de controlador considerou a opção de menor custo de implementação. Uma vez que fuso e motorreductor foram impostos ao projeto e sua velocidade angular é baixa resultando em um deslocamento lento do contrapeso, o controlador tipo on-off adequa-se perfeitamente ao sistema e as exigências de custo.

### 2.8.1 Controlador on-off

O sistema de controle compõe-se basicamente de um circuito analógico realizado com amplificadores operacionais que comparam as tensões correspondentes aos torques exercidos nos braços ( $V_c$  e  $V_{cp}$ ) com tensões de

referência previamente estabelecidas e quando apresentam valores diferentes das referências, respondem através de relés, acionando o motorreductor com sua tensão nominal de 42V no sentido adequado à correção.

### 2.8.2 Faixa morta

A comparação da tensão correspondente ao torque no braço do contrapeso com uma tensão de referência, correspondente ao torque no braço da carga, provoca uma ação imediata do controlador quando as tensões atingem valores idênticos. Devido ao fato da inércia inerente ao contrapeso impedir uma parada instantânea do mesmo, a utilização de um comparador deste tipo provocará oscilação em sua movimentação (CHESTNUT; MAYER, 1955).

Para impedir-se o movimento oscilatório do contrapeso em torno do ponto desejado, introduz-se uma faixa de comparação de modo a assimilar os movimentos pós-desligamento, permitindo assim a sua parada natural, além de torná-lo insensível a ocorrência de pequenas variações nos sensores, interferências e outras situações que introduziriam oscilações no sistema, desta forma o circuito garante uma boa estabilidade ao ajustar-se o contrapeso à carga.

Outra finalidade igualmente importante da faixa morta é evitar comutações muito rápidas do sistema de potência, fato este que provocaria correntes excessivamente elevadas na fonte do motor.

Os valores da faixa morta foram previamente assim estabelecidos:

- b) O valor de acionamento do comparador para um dos sentidos de rotação é ajustado para quando a tensão  $V_{cp}$  superar em 10% a referência ( $V_c$ ), logo:  
para  $V_{cp} \geq 1,1 V_c$ , o controlador deverá aplicar a tensão  $E$  ao motor;
- c) O acionamento no sentido contrário ao anterior deverá efetuar-se quando  $V_{cp}$  diminuir em 10% abaixo da referência ( $V_c$ ), assim:  
para  $V_{cp} \leq 0,9 V_c$ , o controlador deverá aplicar a tensão  $-E$  ao motor.

Observa-se no gráfico da figura 2.15 que entre os valores 0,9 e  $1,1V_c$  da tensão  $V_{cp}$  o motorreductor permanece imóvel, constituindo-se assim na faixa morta do circuito.

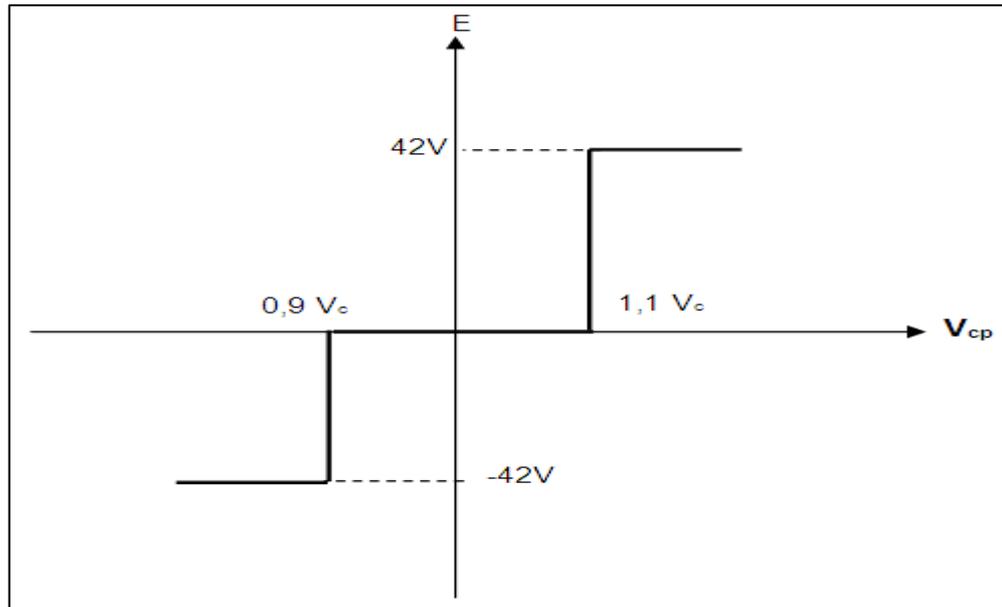


Figura 2.15 - Limites impostos para a faixa morta do controlador  
Fonte: Autor

### 2.8.3 Funcionamento do circuito comparador com faixa morta

O circuito apresentado na figura 2.16 é baseado em Jung (1974) e adaptado ao sistema em questão, possuindo duas referências: tensão de nível baixo e tensão de nível alto.

O CI-2-A é responsável por elevar o valor da tensão  $V_c$  (referência) no pino 7 do mesmo para:  $V_c \cdot \left[ \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right]$ , formando assim a referência de nível alto, ao passo que os resistores  $R_4$  e  $R_5$  reduzem a tensão  $V_c$  para:  $V_c \cdot \left[ \frac{R_5}{R_4 + R_5} \right]$  constituindo-se na referência de nível baixo.

A comparação de nível alto correspondente à condição de torque mais baixo ou posição (x) mais próxima, já o nível baixo corresponde à condição de torque mais elevado ou posição mais distante, considerando-se o início do deslocamento próximo ao eixo principal.

Ao deslocar-se o contrapeso, por exemplo, de um ponto de equilíbrio no início da trajetória para um ponto no centro desta, aciona-se RL-1 através do pino 1 de CI-1-A, que torna-se positivo, pois  $V_{cp}$  é mais elevado que a referência de nível alto.

Continuando a trajetória,  $V_{cp}$  diminui à medida avança em direção ao ponto de equilíbrio desejado, ao igualar-se à referência de nível alto com  $V_{cp}$ , o pino 1 de CI-1-

A torna-se negativo desligando RL-1 e através deste o motor, permitindo assim que o contrapeso estacione próximo ao ponto desejado. O CI-1-B através do

pino 7 esteve sempre negativo mantendo RL-2 desligado, pois  $V_{cp}$  durante a trajetória sempre foi maior que o valor de referência baixo. Caso o contrapeso ultrapasse em muito o ponto de referência almejado, a tensão  $V_{cp}$  tornar-se-á menor que a referência de nível baixo, assim o pino 7 de CI-1-B torna-se positivo e aciona RL-2, o qual ao acionar o motor, impõe-lhe um sentido contrário ao anterior de forma a buscar o ponto de referência ultrapassado, desligando-se quando  $V_{cp}$  elevar-se acima da referência de nível baixo.

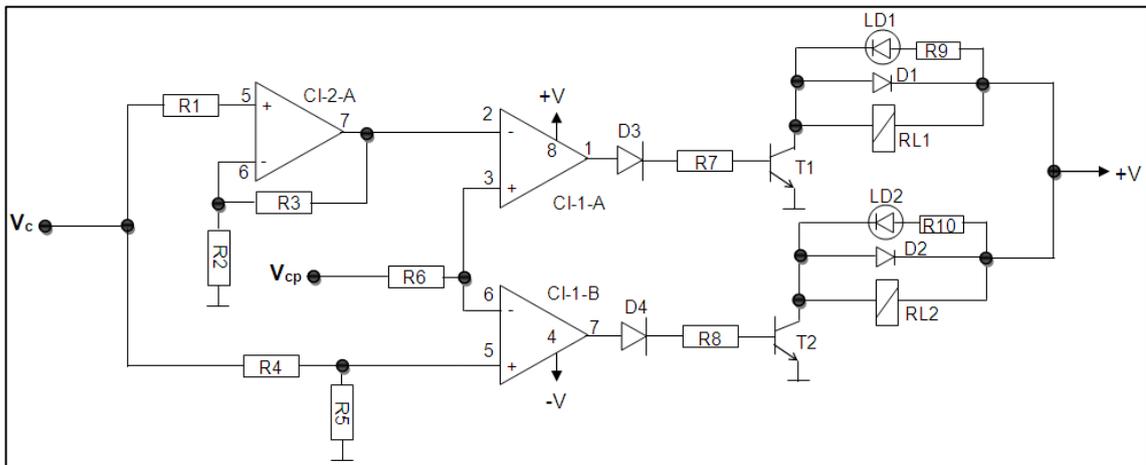


Figura 2.16 - Circuito controlador on-off  
Fonte: Autor

O circuito da figura 2.17 interliga o controlador on-off ao circuito de inversão do sentido de rotação.

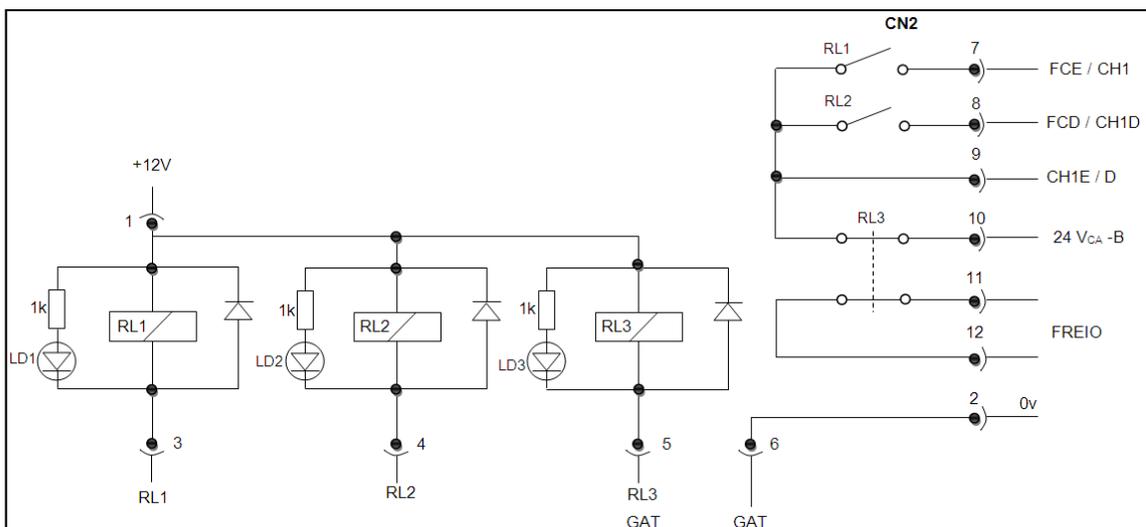


Figura 2.17 - Circuito de interligação  
Fonte: Autor

### 2.8.4 Circuito de inversão do sentido de rotação do motor

A inversão do sentido de rotação do motor deverá ser efetuada através dos contatores K1 e K2 conforme visto na figura 2.18 que são comandados pelos relés RL-1 e RL-2 localizados no circuito controlador on-off. O circuito de inversão incorpora também outras funções como limites de fim de curso, exercidos pelos sensores FCD e FCE, possibilidade de posicionamento manual do contrapeso através de CH1-E/D e proteção contra acionamento simultâneo nos dois sentidos. O relé RL-3 mantém o freio normalmente acionado, liberando-o somente quando o operador aciona o gatilho (GAT) com o propósito de movimentar a carga e nesta situação inibe o funcionamento do motor.

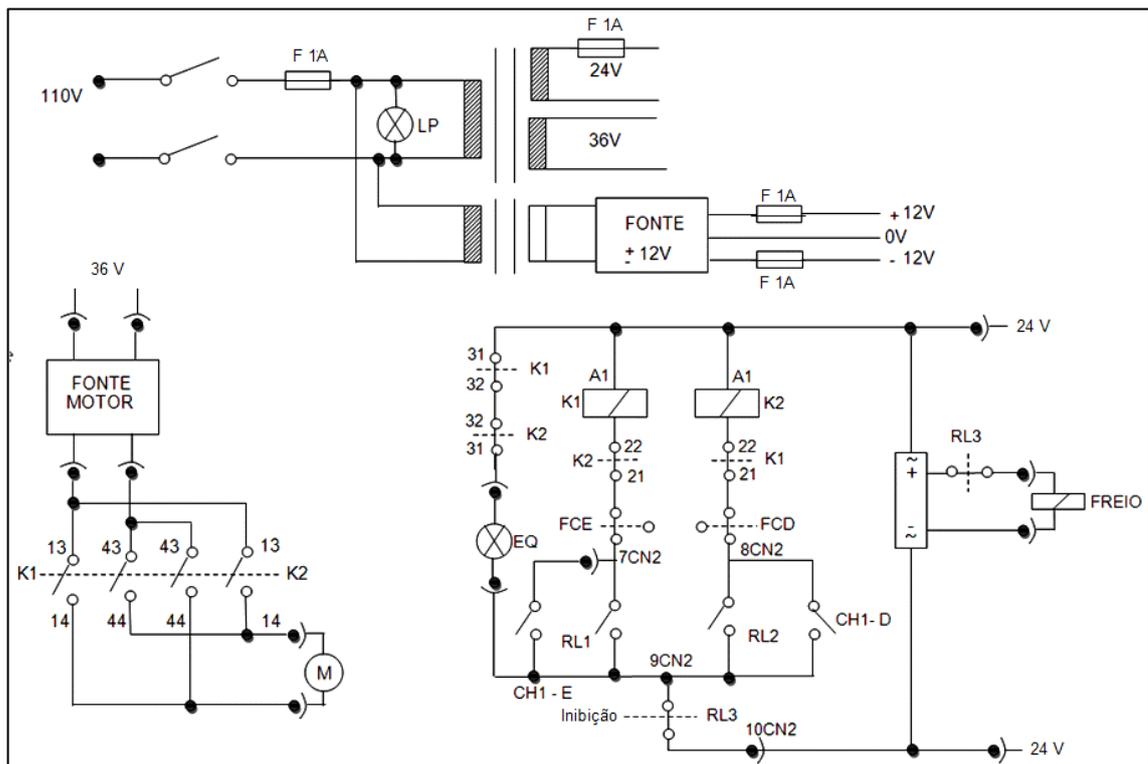


Figura 2.18 - Diagrama elétrico do sistema  
Fonte: Autor

### 2.9 Simulação do controlador on-off

Com o objetivo de certificar-se do correto funcionamento do controlador, verifica-se através de uma simulação o comportamento do posicionamento do contrapeso

em função da aplicação de um degrau de tensão  $V_c$ , deve-se observar a velocidade angular ( $\omega$ ) do fuso e a posição  $X$  do contrapeso de tal forma que:

- a) Utilizando-se um controlador sem faixa morta deverá ocorrer uma mudança no sentido de rotação e no valor da posição, indicativos de instabilidade no ponto de parada do contrapeso
- b) Utilizando-se um controlador com faixa morta, a velocidade angular deverá manter-se no mesmo sentido e tornar-se nula no ponto de parada com a posição inalterada.

### **3 Materiais e métodos**

Este capítulo propõe o estudo de um equipamento para solucionar algumas situações de movimentação de cargas efetuadas manualmente por operadores de processos de manufatura, anteriormente analisadas, onde os equipamentos utilizados para auxiliar são inadequados ou mesmo inexistentes devido ao custo elevado.

Por consequência, desenvolve-se o projeto de um protótipo de baixo custo com o propósito de permitir ao operador a movimentação de cargas com um esforço físico reduzido.

Ao longo do desenvolvimento descreve-se uma série de ensaios para obtenção dos parâmetros fundamentais de componentes do sistema adotado e os métodos adotados para uma avaliação final de funcionamento e desempenho.

#### **3.1 Descrição do dispositivo**

O equipamento é composto por dois braços fixados á uma base que por sua vez está vinculada á uma estrutura de fixação através de um eixo fixo, como pode ser visto na figura 3.1, permitindo desta forma que o conjunto de braços gire em torno deste eixo.

Em um dos braços dispõe-se um contrapeso móvel cuja posição ao longo deste braço é obtida através da rotação de um fuso acoplado através de uma junta universal a um motorreductor fixo a base do sistema, permitindo assim a livre movimentação do braço em pequeno ângulo, suficiente para acionar o sensor.

O outro braço, denominado braço da carga, é ajustável em seu comprimento e tem por finalidade sustentar e mover a carga.

A base de fixação dos braços, através de um freio eletromagnético, pode ser imobilizada em relação ao eixo fixo que a sustenta, impedindo-a de movimentar-se em relação ao eixo e girar.

Ao fixar-se uma carga ao braço através do operador, aciona-se o freio de modo a imobilizar os braços quanto a movimentos de rotação em relação ao eixo, nesta condição os sensores de carga dos braços avaliam as forças aplicadas e transmitem a informação ao circuito de controle que direciona o contrapeso á uma posição que permita o equilíbrio de torques no eixo, balanceando assim o sistema.

Nesta condição, o freio é liberado e possibilita a movimentação angular do braço da carga pelo operador com a aplicação por parte deste, de uma força mínima. Durante a movimentação da carga inibe-se a ação de controle, de modo a evitar-se a ocorrência de interferências indesejadas causadas por efeitos transitórios.

Sendo necessário alterar o comprimento do braço para alcançar uma nova posição para a carga, estando o sistema balanceado, aciona-se o freio e posteriormente movimenta-se manualmente o braço de forma a expandi-lo ou contraí-lo. Uma vez posicionado o braço no ponto desejado, após um espaço de tempo o sistema é balanceado novamente e habilita a liberação do freio pelo operador. Adotou-se uma configuração especial dos braços para detectar a diferença de torques no eixo causado por diferenças entre carga e contrapeso. Os braços são fixados à base através de um eixo secundário, próximo ao eixo fixo, permitindo assim uma pequena movimentação angular dos mesmos, pressionando um sensor fixado à base que indicará uma força proporcional à carga e ao comprimento do braço, resultando um valor diretamente proporcional ao torque gerado pelo braço no eixo fixo.

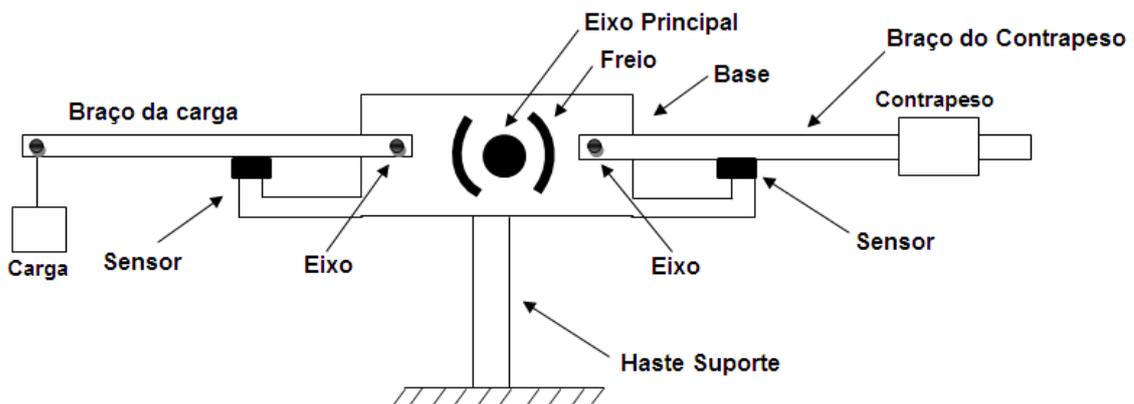


Figura 3.1 - Diagrama funcional dos braços, sensores e freio  
Fonte: Autor

### 3.2 Parâmetros principais do projeto

Os parâmetros adiante citados foram adotados em função dos materiais disponíveis e possibilidade construtiva.

Cargas admissíveis: 0,5 a 3,0 Kg

Comprimento mínimo do braço da carga: 340 mm

Comprimento máximo do braço da carga: 500 mm

### 3.3 Principais componentes

O desenvolvimento do projeto basear-se-á nos seguintes componentes previamente adotados em função de sua disponibilidade: motorreductor, fuso, freio e sensor de força, com suas características essenciais abaixo descritas:

#### 3.3.1 Motorreductor

O dispositivo como pode ser visto na figura 3.2, é um componente comercial utilizado principalmente em cabeçotes para soldagem MIG/MAG, apresentando em sua identificação as características abaixo:

Tensão de alimentação: 42 Vcc

Rotação máxima: 210 RPM

Potencia: 90 W

Tipo: Imã permanente

Peso: 2.1 Kg



Figura 3.2 - Motorreductor  
Fonte: Autor

### 3.3.2 Fuso

O componente é uma barra padrão com rosca, comercialmente disponível, usinando-se o assento para os mancais.

Diâmetro:  $\frac{3}{4}$ " (19,05mm)

Passo: 2,54 mm

Comprimento: 400 mm

Tipo de rosca: Withworth

Material: Aço 1020

### 3.3.3 Freio eletromagnético

O freio eletromagnético modelo 032 da Ciacopla Industrial Ltda pode ser visto na figura 3.3. Ele consta de um disco metálico com um furo central estriado ao qual está acoplado um componente também estriado que fará a ligação entre o disco do freio e o eixo que apóia a base, deste modo o disco é móvel e com movimentos longitudinais em relação ao referido eixo, assim quando acionar-se a bobina contida no alojamento do freio, o disco será atraído e mantido pela bobina efetuando a frenagem, uma vez que o alojamento está fixado à base do sistema.

Suas principais características são:

Tensão de bobina: 24 Vcc

Torque de frenagem máximo: 32 N.m.



Figura 3.3 - Freio eletromagnético Ciacopla  
Fonte: Catálogo... (1994)

### 3.3.4 Sensor de força

O modelo FSR 406 (1,5") da Interlink Electronics consiste de uma película resistiva aplicada sobre um material isolante e flexível. A resistência é sensível à pressão exercida sobre a mesma através de um atuador que consiste de uma chapa plana que pode assumir várias formas geométricas de acordo com a faixa de atuação desejada. O componente possui uma limitação em corrente de alguns poucos miliamperes, necessitando portanto de um circuito que amplifique o valor obtido. A relação entre força aplicada ao sensor e a resistência obtida não é linear em toda a sua faixa de valores, porém apresenta regiões praticamente lineares. A figura 3.4 mostra o elemento sensor utilizado, que é alojado em uma caixa metálica de suporte com base de borracha e emprega em atuador de aço com uma camada de borracha entre este e o sensor para melhor distribuir a força aplicada.

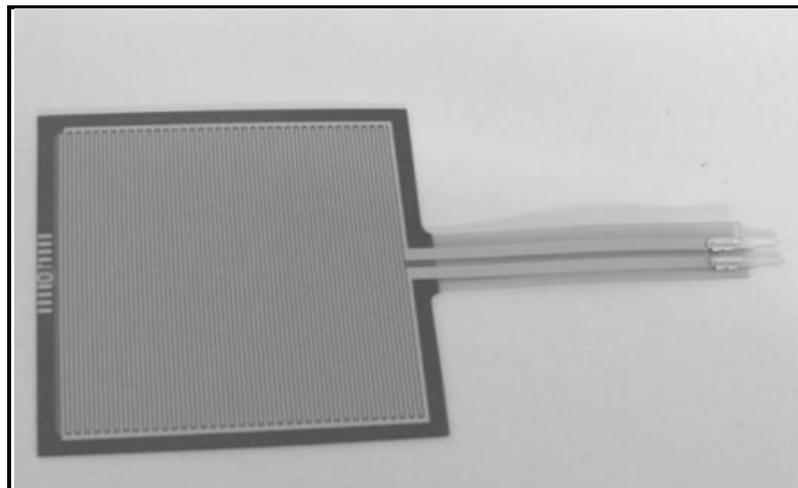


Figura 3.4 - Sensor modelo 406  
Fonte: Interlink Electronics (2012)

### 3.4 Dimensionamento do sistema

O objetivo principal é determinar o valor da massa do contrapeso e seu curso máximo e mínimo de modo a possibilitar o balanceamento do sistema em qualquer condição operacional.

Como visto anteriormente, o sistema é composto de dois braços dispostos horizontalmente, opostos em relação a um eixo denominado de principal aos quais estão agregados o contrapeso e a carga, necessitando-se para o balanceamento que os torques gerados por estes no eixo principal sejam nulos.

Além dos torques gerados pelos braços, também o motor, devido a sua fixação na base do sistema de viga, produz torque no eixo.

A partir da condição de balanceamento do sistema, considerando-se todos os elementos envolvidos, obtém-se o torque necessário por parte do contrapeso em todas as situações operacionais, concluindo-se com a determinação de seu curso e massa.

Um roteiro do cálculo utilizado no dimensionamento do contrapeso, freio e braços a partir de todos os torques envolvidos no sistema é apresentado no apêndice I.

### **3.4.1 Braço da carga**

Forma-se o braço da carga por dois tubos de aço 1020, quadrados, concêntricos, de modo a permitir a expansão e retração do mesmo manualmente pelo operador, de acordo com as especificações anteriormente citadas.

Outros componentes de menor relevância como elementos de fixação, sensores e cabeamentos foram desprezados quanto a geração de torques.

O procedimento de cálculo dos torques inicia-se com a determinação dos centros de massa dos componentes do lado da carga e em seguida a obtenção dos torques gerados.

O motorreductor não está vinculado ao braço da carga, portanto tratar-se-á como lado da carga as situações que o incluam.

### **3.4.2 Braço do contrapeso**

A finalidade do braço do contrapeso é dispor ao eixo principal um torque de valor igual, porém com ação oposta ao torque do lado da carga, em todas as circunstâncias da mesma.

Obtém-se o torque de equilíbrio do sistema por um contrapeso móvel que deverá atuar nas condições extremas, entretanto o torque gerado pela estrutura de suporte e outros componentes também deve ser considerado.

O braço do contrapeso é formado pelos seguintes componentes, como pode ser visto na figura 3.5:

Contrapeso;

Fuso;

Mancais;

Estrutura metálica de suporte ao fuso, mancais e contrapeso.

Adotou-se o comprimento total do braço do contrapeso de 0,45 m, constituindo-se então no ponto de partida para o dimensionamento dos demais componentes.



Figura 3.5 - Braço do contrapeso  
Fonte: Autor

#### 3.4.2.1 Mecanismo de movimentação do contrapeso

A movimentação do contrapeso é efetuada pela rotação do fuso, que por sua vez provoca a movimentação da porca solidária ao contrapeso, onde um sistema de guia impede-o de girar e mantém um movimento retilíneo.

O contrapeso avança com uma velocidade linear  $v$ , dada pela expressão:

$$v = n \cdot \frac{p}{60}$$

Onde:

$n$  = freqüência do fuso em rotações por minuto.

$p$  = passo do fuso em milímetros por rotação.

$v$  = velocidade linear de deslocamento do contrapeso em mm/s.

#### 3.5 Parâmetros elétricos do motorreductor

Devido à indisponibilidade de alguns dados do motorreductor, especialmente aqueles relacionados com seu comportamento dinâmico, necessita-se obtê-los com ensaios, os quais determinarão as características elétricas e mecânicas citadas.

### 3.5.1 Tensão de f.c.e.m. ( $E_g$ ) e constante de f.c.e.m. ( $K_g$ )

A tensão  $E_g$  é obtida acionando-se o eixo do motorredutor sob ensaio, por outro componente idêntico, fazendo-o atuar como gerador e medindo-se a tensão obtida para cada valor de  $\omega$ . Visualiza-se na figura 3.6 a montagem efetuada e na figura 3.7 o circuito adotado. As tensões  $E_g$  medidas para vários valores de  $\omega$  são reunidas e determina-se a constante  $K_g$  segundo a expressão:

$$K_g = \frac{E_g}{\omega}$$

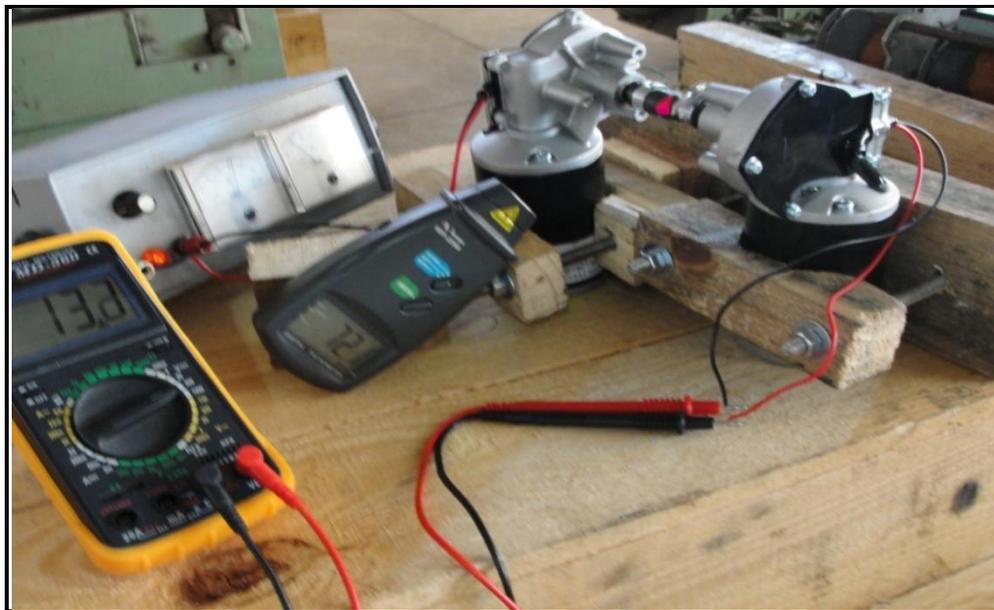


Figura 3.6 - Medida de  $E_g$   
Fonte: Autor

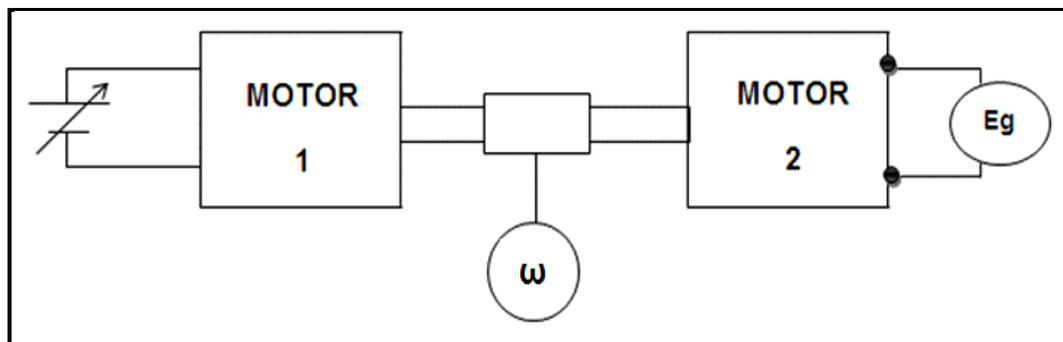


Figura 3.7 - Esquema de ligações dos motores em teste  
Fonte: Autor

### 3.5.2 Resistência da armadura (R)

A medida da resistência de armadura é efetuada de dois modos distintos de forma a garantir o resultado obtido

a) Método do Ohmímetro

A medida da resistência do rotor é realizada conectando-se um multímetro utilizado como Ohmímetro aos terminais do motor e girando-se o eixo manualmente, de modo a obterem-se medições em várias posições de contato do rotor com a escova.

b) Obtenção da resistência do rotor (R) com rotor em movimento.

Esta medição baseia-se na equação característica do modelo do motor elétrico de imã permanente, ou seja: a tensão aplicada ao mesmo é igual à soma das tensões: na resistência do rotor e força contra eletromotriz gerada que é função da rotação, para o motor com velocidade constante, desta forma determina-se o valor da resistência do rotor a partir da expressão:

$$R = \frac{E - E_g}{i}$$

Onde:

E = Tensão aplicada ao motorreductor

$E_g$  = Força contraeletromotriz gerada pelo motorreductor a uma velocidade  $\omega$

$i$  = Corrente no motor a uma velocidade  $\omega$

As figuras 3.8 e 3.9 mostram respectivamente: a disposição de instrumentos e esquema de ligações para efetuar as medições de tensão, corrente e velocidade angular.

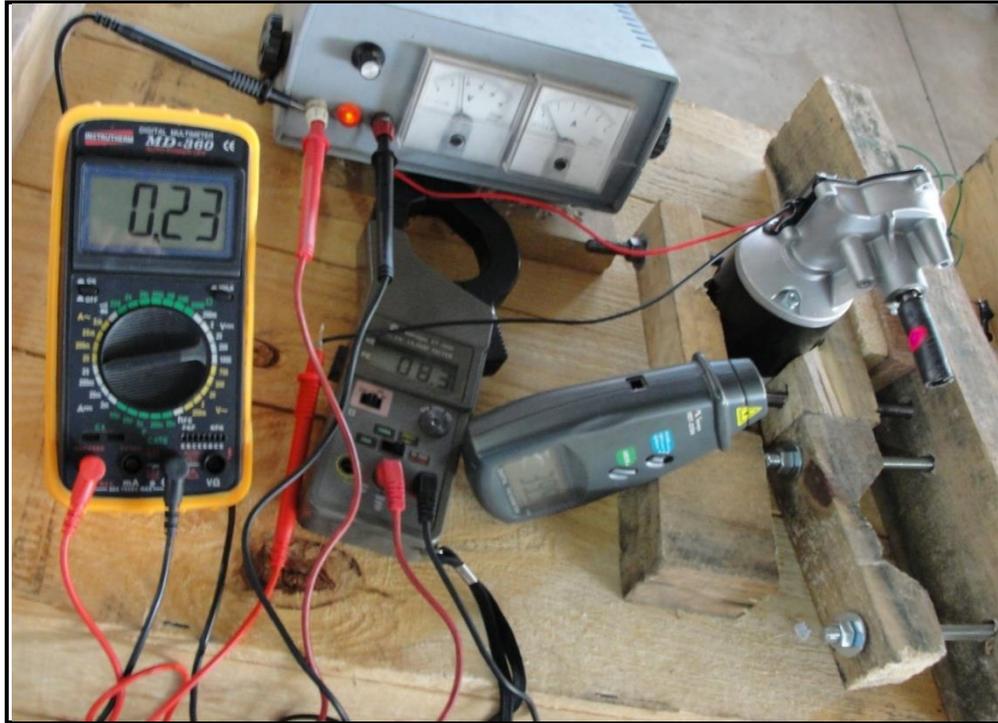


Figura 3.8 - Montagem utilizada para medida de  $E, i, \omega$  e cálculo de  $R$   
Fonte: Autor

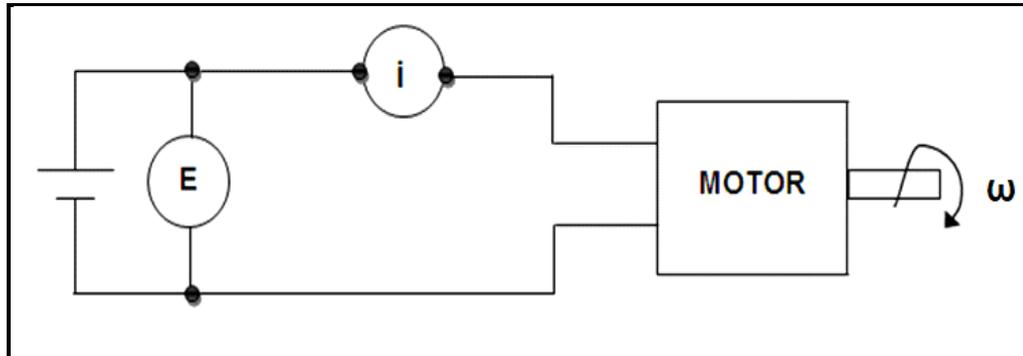


Figura 3.9 - Circuito para medição de  $E, i$  com o motorreductor sem carga  
Fonte: Autor

### 3.5.3 Indutância da armadura ( $L$ )

Para o motor sem movimento seu modelo elétrico reduz-se a um circuito RL série, assim para a determinação do valor da indutância, basta aplicar um pulso de tensão ao mesmo com um gerador de sinais e monitorar a forma de onda da corrente em um resistor externo ( $R_s$ ) acrescentado ao circuito. Através de um osciloscópio mede-se a constante de tempo ( $\sigma$ ) e pelo fato de  $R_s$  e  $R$  serem conhecidos, determina-se o valor de  $L$ . As figuras 3.10 e 3.11 mostram respectivamente o circuito adotado para a medição e a conexão entre instrumentos, motor e resistor série.

A indutância é calculada segundo a expressão:  $L = (R_s + R) \cdot \sigma$

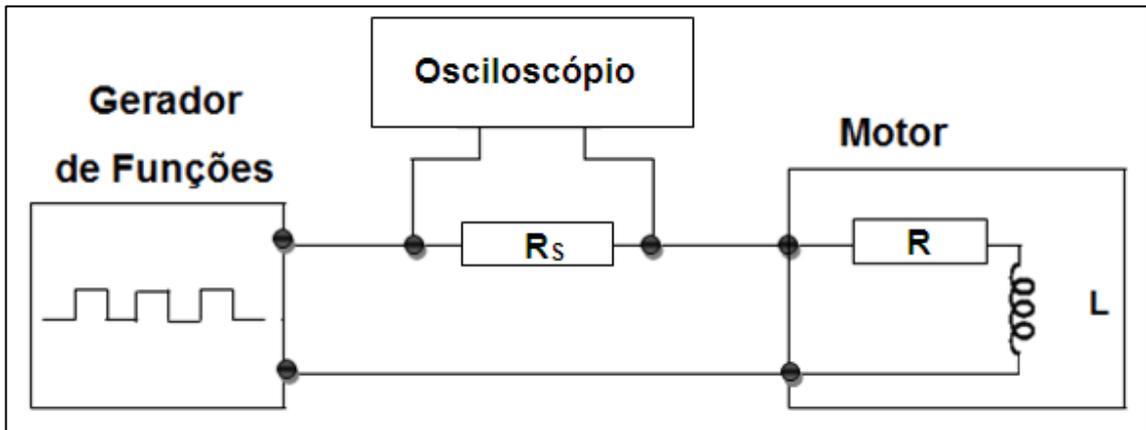


Figura 3.10 - Circuito para determinação da indutância L  
Fonte: Autor

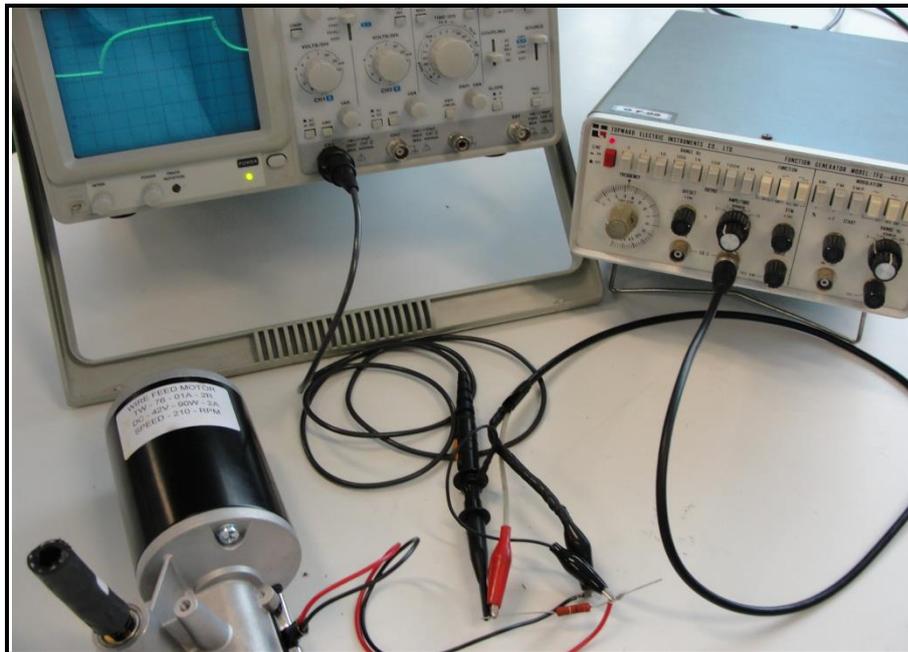


Figura 3.11 - Medição da constante de tempo elétrica do motor  
Fonte: Autor

### 3.6 Parâmetros elétricos e mecânicos da transmissão

Nos ensaios descritos a seguir, determinam-se empiricamente os parâmetros da transmissão em conjunto com o motorreductor, necessários para uma avaliação do comportamento dinâmico do sistema.

### 3.6.1 Torques de: atrito estático ( $T_r$ ) e atrito viscoso ( $B_v$ )

O ensaio consiste em efetuar-se a medição da tensão aplicada ao motorreductor e a corrente consumida para diversos valores de velocidades angulares, com estes dados obtêm-se a potência total consumida pelo motor e conseqüentemente os torques gerados. A potência relativa aos atritos corresponde a potência total menos a potência joule consumida nos enrolamentos do rotor.

Convertendo-se esta potência em torque, obtêm-se o torque referente à soma dos atritos do motor e da transmissão em conjunto, permitindo assim, a partir dos dados obtidos separar os coeficientes de atrito viscoso e torques de atrito estático totais do sistema.

O torque correspondente ao atrito estático é obtido graficamente para velocidade nula, ao passo que o atrito viscoso ( $B_v$ ) é obtido pela relação entre a variação de torque ( $\Delta T$ ) e variação de rotação ( $\Delta \omega$ ), assim:

$$B_v = \frac{\Delta T}{\Delta \omega}$$

### 3.6.2 Momento de inércia (J)

A determinação do momento de inércia do conjunto motorreductor, fuso e contrapeso realiza-se através da medição da constante de tempo mecânica do sistema ( $\sigma_{mec}$ ). Tal medida baseia-se no fato que ao desligar-se o motor da fonte de alimentação, o mesmo continua girando e conseqüentemente gerando a tensão  $E_g$  por um período de tempo associado às características mecânicas do conjunto.

A medida consiste em registrar-se em um osciloscópio com memória o decaimento de  $E_g$  desde seu valor máximo até atingir zero, com isto obtêm-se uma curva tensão versus tempo, onde sobre o eixo vertical da tensão, no valor correspondente a 33% da tensão inicial, traça-se uma linha reta horizontal que ao encontrar a curva transforma-se em uma linha vertical indo ao encontro do eixo horizontal, correspondente ao tempo, indicando assim o valor da constante em questão. O oscilograma utilizado é mostrado na figura 3.12 e nele observam-se os pontos de medição a utilizar.

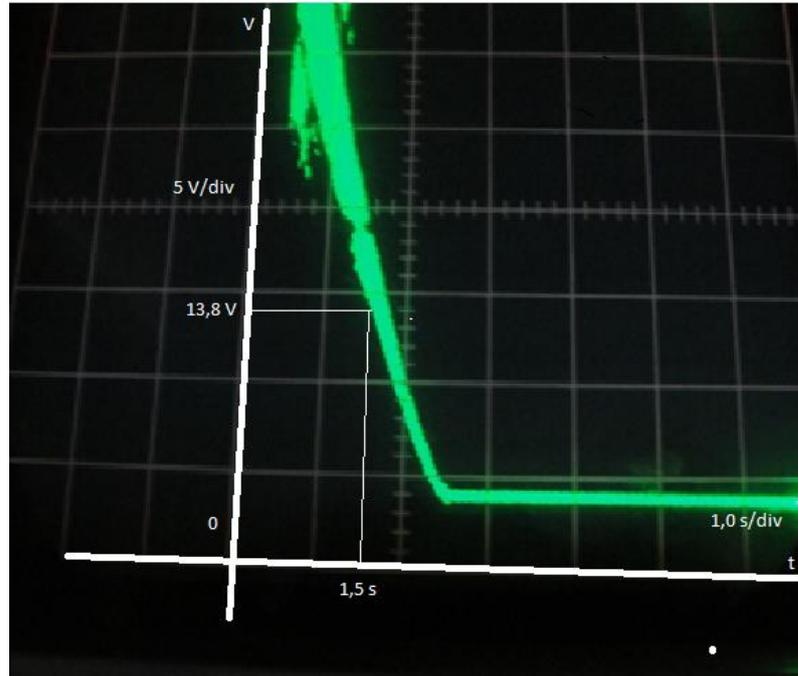


Figura 3.12 - Oscilograma para medida de  $\sigma_{mec}$   
Fonte: Autor

O momento de inércia é obtido a partir da constante de tempo mecânica, que é o quociente entre o momento de inércia e o atrito viscoso o qual já foi anteriormente determinado, assim:

$$J = B \cdot \sigma_{mec}.$$

A figura 3.13 mostra o arranjo adotado para a medição da constante de tempo mecânica. As Medições foram efetuadas com um osciloscópio Hitachi modelo V-134, calibrado no eixo vertical para: 5V/divisão e no eixo horizontal 1s/divisão.

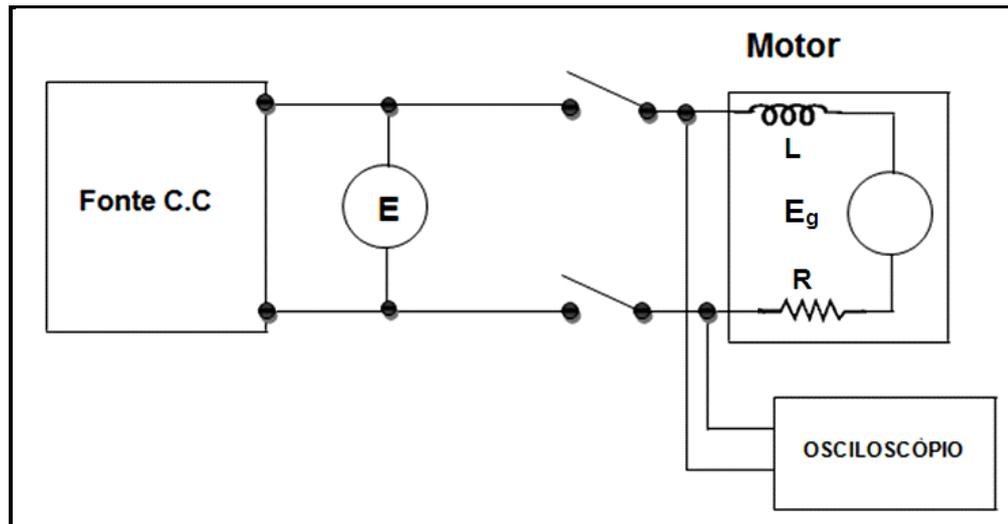


Figura 3.13 - Medida da constante de tempo mecânica  
Fonte: Autor

### 3.6.3 Tensão limiar do movimento ( $E_r$ )

A tensão  $E_r$  é a responsável por gerar o torque para vencer o atrito estático, iniciando o movimento do sistema, desta forma este ensaio é efetuado aplicando-se tensão crescente ao motor, de tal forma que o valor correspondente ao limiar da movimentação constitui-se na referida tensão.

### 3.7 Ensaio dos sensores

O ensaio descrito a seguir tem por finalidade obter empiricamente, a relação entre a posição do contrapeso e a tensão proporcional obtida nos terminais do sensor.

Efetua-se o ensaio para o braço do contrapeso, que permite valores definidos para cada posição do mesmo, estendendo-se os resultados ao sensor da carga, uma vez que são idênticos.

É importante observar que a relação força aplicada versus tensão obtida depende de vários fatores de ordem prática, como: tipo de atuador, geometria, área de atuação, materiais para assentamento da célula, entre outros, portanto o sensor não segue exatamente a curva característica fornecida pelo fabricante.

Variando-se a posição linear do contrapeso com o mesmo no plano horizontal, medem-se as tensões obtidas no sensor diretamente, desta maneira

obtém-se uma relação de conversão entre posição do contrapeso (X) e a tensão no sensor ( $V_{scp}$ ), assim:

$$G_{scp} = \frac{V_{scp}}{X}$$

Onde:

$G_{scp}$  = Coeficiente de conversão posição-tensão

A tensão  $V_{scp}$  é amplificada, filtrada e convertida no valor  $V_{cp}$ , sendo posteriormente utilizada como referência do torque no braço.

### **3.8 Avaliações de desempenho do protótipo**

O equipamento final submeteu-se a avaliações quanto ao comportamento dinâmico do sistema com relação a eventuais oscilações no ponto de parada do contrapeso e aspectos funcionais como: força imposta ao operador para manuseio da carga; balanceamento automático.

#### **3.8.1 Comportamento dinâmico do sistema**

O comportamento dinâmico é função basicamente da atuação do controlador on-off associado à planta do sistema, para tanto simular-se-á através do aplicativo simulink® a aplicação de um degrau de tensão na referência e observar-se-á o que ocorre com a velocidade linear ( $v$ ) e com a posição (X) no momento de parada do contrapeso ao atingir a posição prevista.

De modo a comprovar-se a eficácia do controlador impõem-se duas condições na simulação: com faixa morta; sem a mesma.

A simulação será realizada conforme o diagrama de blocos apresentado na figura 3.14 onde o controlador pode incluir ou não uma faixa morta de atuação.

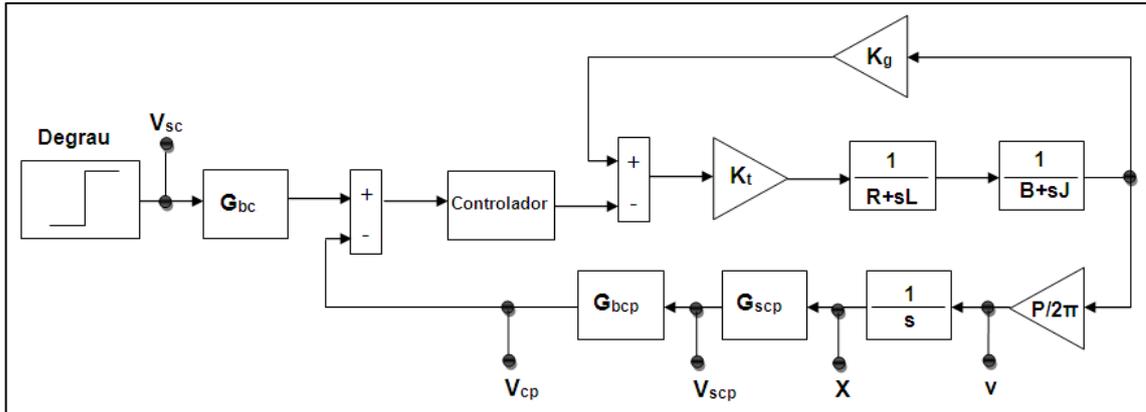


Figura 3.14 - Diagrama de blocos utilizado na simulação

### 3.8.2 Força imposta ao operador para manuseio da carga

A figura 3.15 mostra o procedimento de comparação entre a força necessária à sustentação de uma peça com o auxílio do equipamento e sem a utilização do mesmo. Um dinamômetro mostra a força empregada por um operador nas duas condições.



Figura 3.15 - Comparação entre forças de sustentação  
Fonte: Autor

### 3.8.3 Balanceamento automático

Este ensaio consiste em alterar-se o comprimento do braço da carga e verificar-se a ocorrência do efeito regulador que deve ser perceptível ao equilibrar o sistema aliviando o esforço do operador e mantendo os braços sem movimento.

Para comprovar tal efeito realiza-se uma operação de movimentação que consiste em retirar o rotor de um motor sobre uma bancada e movimentá-lo até ser introduzido na carcaça do mesmo.

O início da sequência operacional é visualizado na figura 3.16, imobilizando-se os braços com o freio e introduzindo-se a carga no dispositivo mecatrônico para sustentação de cargas (DMSC).



Figura 3.16 - Posicionamento inicial do DMSC  
Fonte: Autor

Fixada a carga ao equipamento (DMSC), após balanceamento, com o freio liberado movimenta-se livremente a carga como pode ser visto na figura 3.17.



Figura 3.17 - Movimentação da peça em balanço  
Fonte: Autor

Uma vez equilibrado como visto na figura 3.18, o equipamento (DMSC) sustenta a carga mantendo-se imóvel em uma posição de equilíbrio que pode ser modificada verticalmente com um esforço físico mínimo.



Figura 3.18 - Equipamento em balanço  
Fonte: Autor

A figura 3.19 mostra a deposição da carga no ponto desejado, que será efetuada com o freio acionado, permitindo assim a movimentação no plano horizontal.



Figura 3.19 - Posicionamento final do DMSC  
Fonte: Autor

## 4 Resultados

O capítulo apresenta resultados de testes, medições e simulações das várias etapas do desenvolvimento do protótipo contribuindo assim para a obtenção de dados de projeto e avaliação funcional do sistema.

### 4.1 Ensaio do motorreductor

Os ensaios a seguir dizem respeito ao conjunto motorreductor desacoplado do sistema de transmissão e tem por finalidade obter alguns parâmetros inexistentes.

#### 4.1.1 Tensão de f.c.e.m. ( $E_g$ ) e constante de f.c.e.m. ( $K_g$ )

A tabela 4.1 mostra tensões ( $E_g$ ) obtidas no ensaio do motor atuando como gerador, para várias rotações ( $\omega$ ) e apresentando a constante  $K_g$  calculada:

Tabela 4.1 - Tensões no motor atuando como gerador

n (r.p.m.)	$\Omega$ (rad/s)	$E_g$ (V)	$K_g \left( \frac{V \cdot \text{rad}}{s} \right)$
20	2,09	3,7	1,77
40	4,18	7,6	1,81
60	6,28	11,6	1,85
80	8,37	15,4	1,84
100	10,47	19,4	1,85
120	12,56	23,0	1,83

Fonte: Autor

Em função dos dados obtidos na tabela 4.1 adota-se um  $K_g$  médio de  $1,83 \frac{V \cdot \text{rad}}{s}$

#### 4.1.2 Resistência do rotor

As tabelas abaixo mostram resultados de medidas de valores da resistência do rotor obtidas por dois métodos.

A tabela 4.2 mostra medidas efetuadas pelo método do Ohmímetro.

Tabela 4.2 - Valores de medidas da resistência do rotor

Medidas Efetuadas	1	2	3	4	5
Resistência ( $\Omega$ )	3,7	4,04	3,37	3,35	3,15

Fonte: Autor

Os valores de resistência do rotor ( $R$ ) da tabela 4.3 foram obtidos com o método do rotor em movimento.

Tabela 4.3 - Tensões e correntes no motorreductor sem carga

n (r.p.m.)	$\omega$ (rad/s)	$E_g$ (V)	E (V)	I (A)	R ( $\Omega$ )
20	2,09	3,7	4,7	0,20	5,00
40	4,18	7,6	8,3	0,23	3,04
60	6,28	11,6	12,4	0,28	2,86
80	8,37	15,4	16	0,30	1,87
100	10,47	19,4	20	0,32	1,88
120	12,56	23,0	24,1	0,34	3,23

Fonte: Autor

Em função dos dois ensaios efetuados adotou-se o valor de  $R = 3\Omega$ .

## 4.2 Transmissão

Os resultados apresentados foram obtidos com o motorreductor e transmissão acoplados.

### 4.2.1 Torque de atrito estático ( $T_r$ ) e coeficiente de atrito viscoso (B)

A tabela 4.4 agrupa resultados de medidas efetuadas com o propósito de obter-se os valores de  $T_r$  e B.

Tabela 4.4 - Tensões, correntes e potências no motorreductor com carga

n (rpm)	$\omega$ rad/s	E (V)	I (A)	$P_t$ (W)	$P_j$ (W)	$P_{tq}$ (W)	$T_m$ N.m
20	2,09	4,9	0,32	1,57	0,31	1,26	0,603
40	4,18	9,2	0,37	3,40	0,41	3,00	0,717
60	6,28	13,0	0,40	5,20	0,48	4,72	0,752
80	8,37	17,4	0,44	7,66	0,58	7,08	0,845
100	10,47	21,6	0,42	9,10	0,53	8,57	0,819
120	12,56	25,8	0,44	11,35	0,58	10,77	0,857

Fonte: Autor

A partir da tabela 4.4 elaborou-se o gráfico apresentado na figura 4.1.

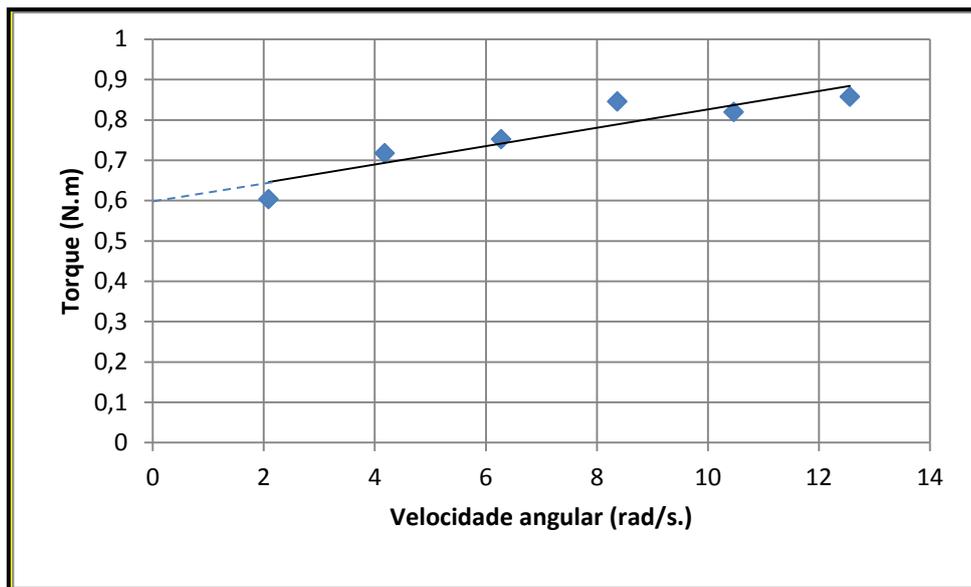


Figura 4.1 - Gráfico torque (T) X velocidade angular ( $\omega$ ) do sistema  
Fonte: Autor

O gráfico da figura 4.1 permite a obtenção de:

$$T_r = 0,6 \text{ N.m e } B = 24,3 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s}$$

#### 4.2.2 Momento de inércia (J)

O momento de inércia é resultado da expressão  $J = \sigma_{mec} \cdot B$ , assim:

$$J = 36,5 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

### 4.3 Tensão limiar do movimento ( $E_r$ )

Tensão medida nos terminais do motorreductor no limiar de sua movimentação.

$$E_r = 1,13 \text{ V}$$

### 4.4 Características gerais do sistema

A tabela 4.5 resume os principais parâmetros obtidos experimentalmente.

Tabela 4.5 - Parâmetros do sistema

Motorreductor			
Parâmetro	Símbolo	Valor	Dimensão
Resistência do rotor	R	3,0	$\Omega$
Indutância do rotor	L	$600 \cdot 10^{-6}$	H
Constante de torque	$K_t$	1,83	$\frac{N \cdot m}{A}$
Constante de f.c.e.m.	$K_g$	1,83	$\frac{V}{\frac{rad}{s}}$
Constante de tempo elétrica	$\sigma$	$24 \cdot 10^{-6}$	s
Motorreductor acoplado à transmissão			
Torque de atrito estático e de Coulomb	$T_r$	0,60	N.m
Coefficiente de atrito viscoso	B	$24,3 \cdot 10^{-3}$	$\frac{N \cdot m}{\frac{rad}{s}}$
Momento de inércia	J	$36,5 \cdot 10^{-3}$	$Kg \cdot m^2$
Constante de tempo mecânica	$\sigma_{mec}$	1,5	s
Tensão	$E_r$	1,13	V

Fonte: Autor

### 4.5 Braço do contrapeso

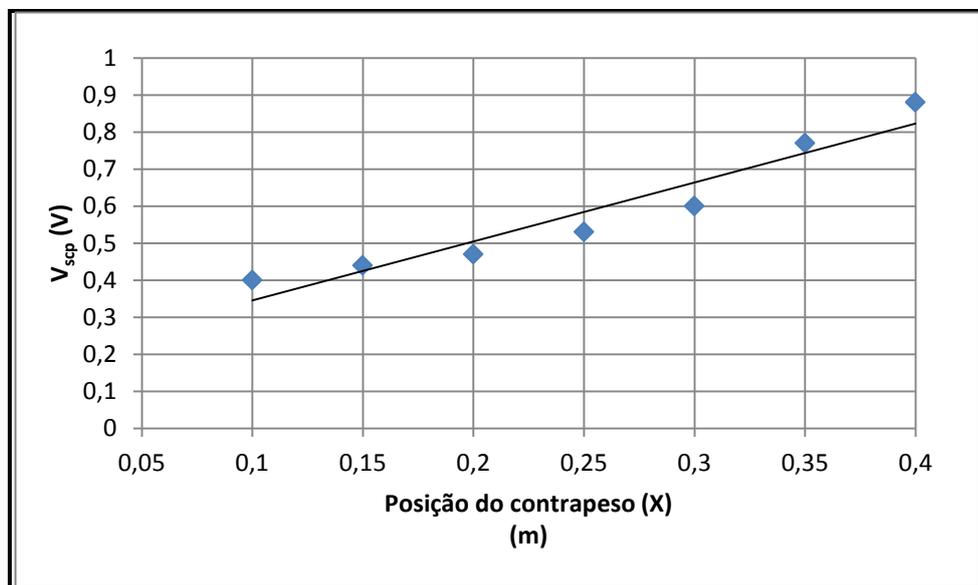
A tabela 4.6 apresenta as medições efetuadas no sensor do contrapeso para várias posições do mesmo.

Tabela 4.6 - Tensões obtidas para posições do contrapeso

Posição X (m)	Tensão no sensor $V_{scp}$ (V)	Tensão amplificada $V_{cp}$ (V)
0,10	0,40	1,99
0,15	0,44	2,10
0,20	0,47	2,37
0,25	0,53	2,46
0,30	0,60	2,76
0,35	0,77	3,04
0,40	0,88	3,75

Fonte: Autor

Com base nos dados obtidos na tabela 4.6, elaborou-se o gráfico visualizado na figura 4.2.

Figura 4.2 - Gráfico  $V_{scp}$  X curso do contrapeso (X)

Fonte: Autor

A figura 4.3 mostra o resultado dos valores obtidos para os resistores, as conexões adotadas para o circuito amplificador e o filtro da tensão referente ao sensor do braço do contrapeso.

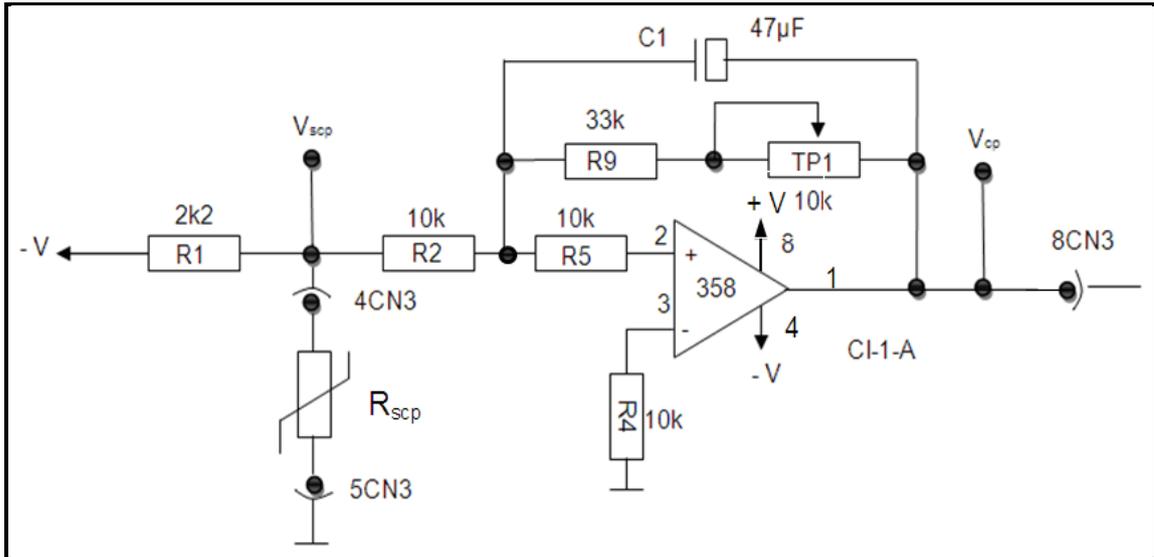


Figura 4.3 - Circuito amplificador do braço do contrapeso  
Fonte: Autor

#### 4.5.1 Coeficiente de conversão do sensor do contrapeso ( $G_{scp}$ )

A partir da tabela 4.6 obtém-se a relação  $G_{scp} = \frac{V_{scp}}{X}$ , logo:

$$G_{scp} = 2,22 \text{ V/m}$$

#### 4.5.2 Função de transferência do circuito amplificador do sensor do braço do contrapeso ( $G_{bcp}$ )

A análise no domínio da frequência do circuito da figura 4.3 relacionando-se  $V_{cp}$  com  $V_{scp}$ , de tal forma que  $G_{bcp(s)} = \frac{V_{cp(s)}}{V_{scp(s)}}$  resulta na expressão:

$$G_{bcp(s)} = \frac{2.13}{s + 0,49}$$

#### 4.5.3 Função de transferência do braço do contrapeso

A relação entre a tensão obtida do sensor ( $V_{cp(s)}$ ) e a tensão aplicada ao motorreductor ( $E_{(s)}$ ), resulta na expressão:

$$\frac{V_{cp(s)}}{E(s)} = \frac{185}{s^4 + 5000,49s^3 + 158240s^2 + 76440s}$$

Pólos do sistema: [0, -0.49, -31,35, -4968,15]

#### 4.6 Braço da carga

O circuito amplificador do sensor do braço da carga com os valores e conexões resultantes é mostrado na figura 4.4.

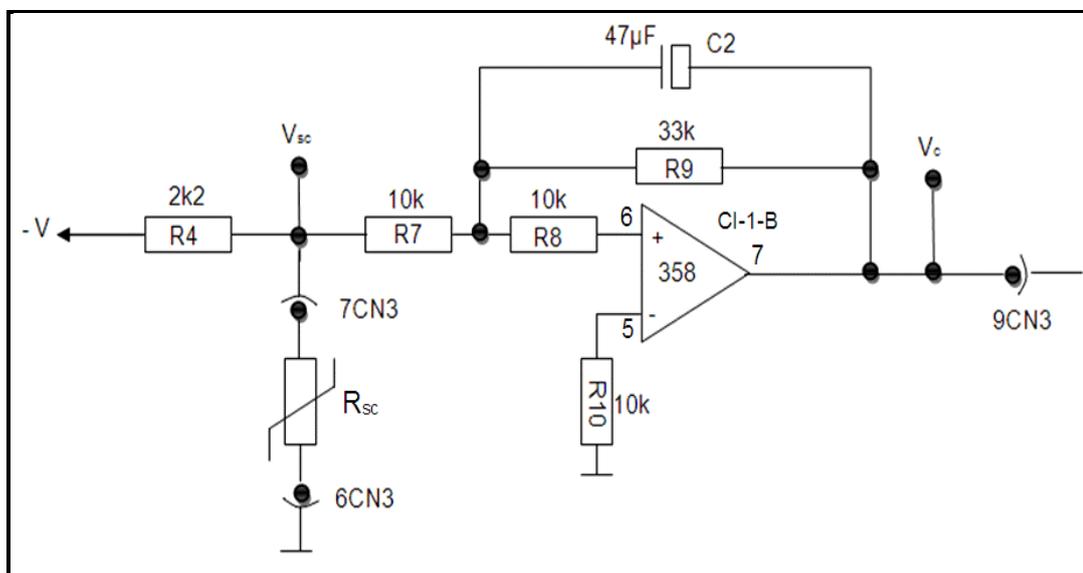


Figura 4.4 - Circuito amplificador do braço da carga  
Fonte: Autor

##### 4.6.1 Função de transferência do braço da carga

A função  $G_{bc}$  resulta da análise no domínio da frequência do circuito da figura 4.4, relacionando-se  $V_c$  com  $V_{sc}$ , assim:

$$G_{bc(s)} = \frac{2,13}{s + 0,65}$$

## 4.7 Comportamento dinâmico do sistema

### 4.7.1 Circuito do controlador on-off

O circuito do controlador on-off com os valores obtidos e componentes adotados é apresentado no circuito da figura 4.5.

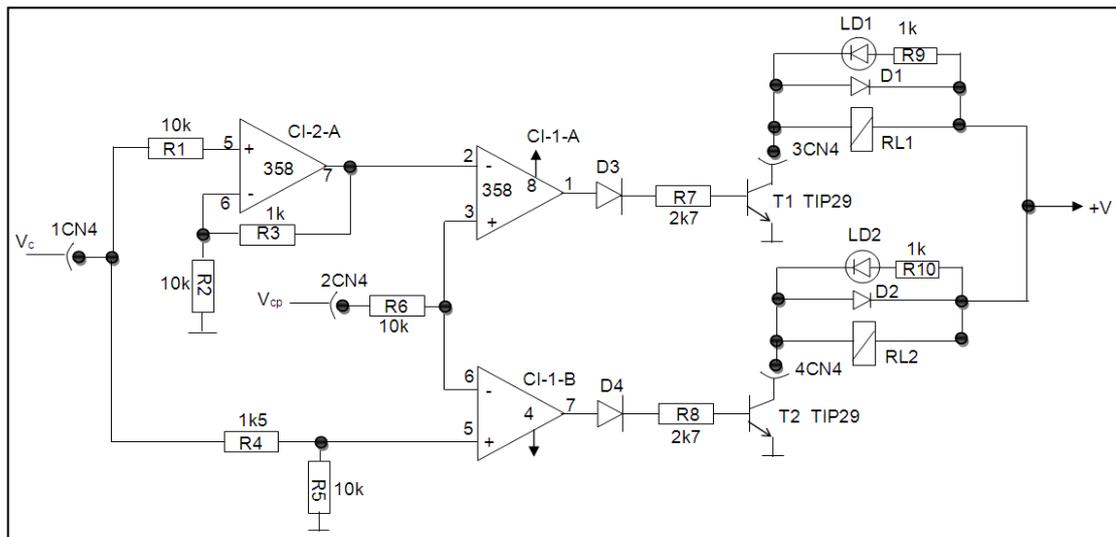


Figura 4.5 - Circuito controlador on-off

Fonte: Autor

### 4.7.2 Simulação do sistema

O resultado da simulação do comportamento dinâmico do sistema no desligamento do motor utilizando-se um controlador on-off sem faixa morta pode ser visto na figura 4.6, que mostra o sentido de velocidade do contrapeso no momento da parada e o valor de sua posição.

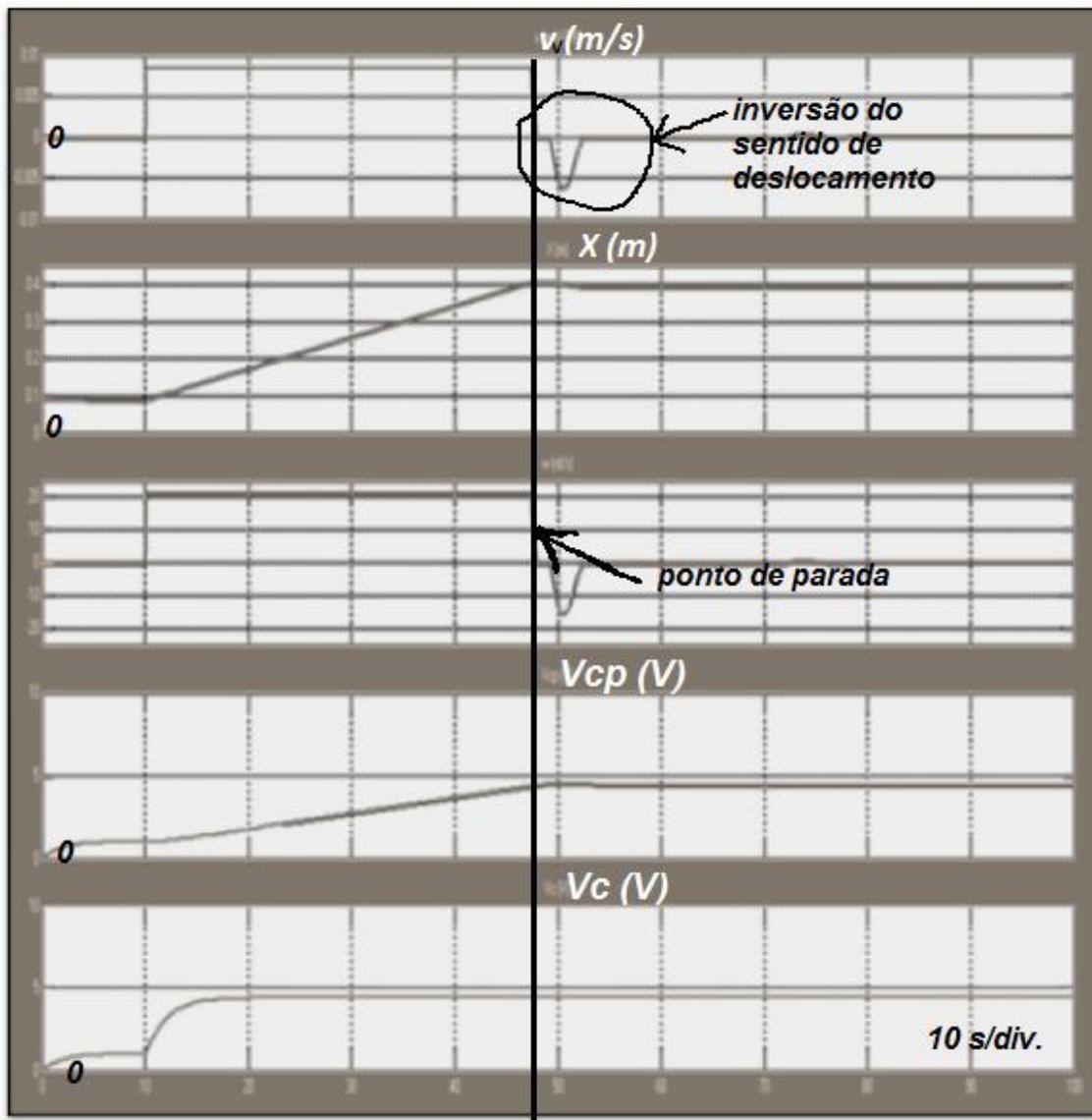


Figura 4.6 - Comportamento do sistema sem faixa morta  
Fonte: Autor

A figura 4.7 mostra o resultado da inclusão de uma faixa morta no controlador, quanto à manutenção do sentido de deslocamento do contrapeso ( $v$ ) até a parada do mesmo.

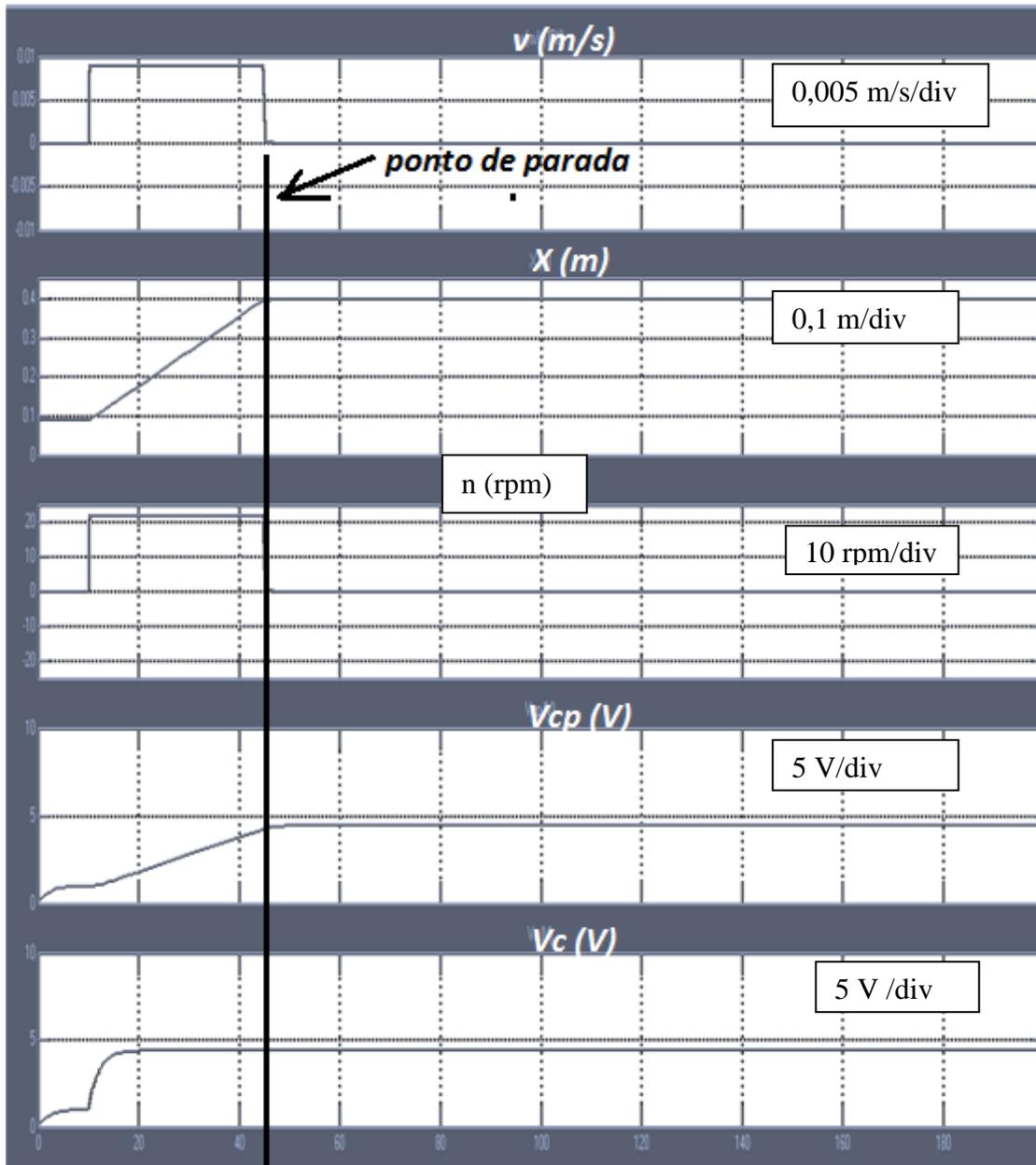


Figura 4.7 - Comportamento do sistema com faixa morta  
Fonte: Autor

## **5 Discussão dos resultados**

O trabalho consistiu resumidamente no dimensionamento de um sistema de braços, a modelagem de um sistema de movimentação do contrapeso e ensaios para determinarem-se as características eletromecânicas de um motorreductor e transmissão acoplada. O capítulo discute os aspectos mais relevantes dos resultados obtidos.

### **5.1 Dimensionamento dos braços**

Os cálculos apresentados no apêndice 1 mostram a obtenção de um sistema que permite a movimentação de cargas em equilíbrio através da utilização de um contrapeso móvel. Fatores determinantes para o funcionamento do sistema, como freio e sensores tiveram seu dimensionamento obtido a partir de dados resultantes das ações dos braços.

### **5.2 Modelagem do sistema**

A expressão 2.38 que foi simplificada de 2.34 pode ser validada pelo valor de  $E_r$  medido (1,13V) e calculado pela expressão 2.25 (0,98V), confirmando-se desprezível em relação à tensão nominal do motor (42 V).

### **5.3 Sistema de movimentação do contrapeso**

O modelo abrangendo o sistema eletromecânico, desenvolvido no capítulo 2, demonstrou consistência uma vez que os resultados práticos de funcionamento do equipamento e simulações confirmaram-no.

Destaca-se a rotação obtida pelo motorreductor na simulação efetuada a partir da função de transferência 2.36 de acordo com o diagrama mostrado pela figura 3.14 cujo resultado é apresentado na figura 4.7, confirmando-se a rotação máxima de 21 RPM para uma alimentação de 42 V.

## **5.4 Ensaaios**

### **5.4.1 Tensão $E_g$ e constante $K_g$**

As medidas efetuadas apresentaram alguma disparidade nos valores principalmente na faixa baixa de rotações devido a imprecisão do instrumento utilizado (tacômetro óptico) nesta situação. Em função deste fato adotou-se a média dos valores como parâmetro final.

### **5.4.2 Medida da resistência da armadura**

Devido às dificuldades na obtenção de um valor próximo ao real uma vez que a posição das escovas é imprevisível e assim as medições apresentam valores variados, utilizaram-se dois métodos de medição com o propósito de validação dos resultados. O valor adotado é uma aproximação da média dos valores encontrados.

### **5.4.3 Indutância da armadura**

A medição deste parâmetro apresenta os mesmos problemas apresentados no item 5.3.2, porém como seu valor não é significativo no desempenho dinâmico do sistema adotou-se somente uma única medida, permitindo assim a obtenção da ordem de grandeza da indutância.

### **5.4.4 Torque de atrito estático ( $T_r$ ) e atrito viscoso ( $B_v$ )**

Estes parâmetros são obtidos a partir da curva torque versus velocidade angular do sistema, apresentada na figura 4.1 que é uma linearização dos valores medidos. Da mesma forma que em outros ensaios a precisão ficou comprometida devido às dificuldades de medição em velocidades angulares baixas.

#### **5.4.5 Momento de inércia (J)**

O método empregado para medir-se a constante de tempo mecânica, da qual se obtém o momento de inércia, revelou-se confiável uma vez que o tempo obtido pelo decaimento da tensão do motor é compatível com o tempo de parada do sistema constatado praticamente.

#### **5.4.6 Tensão limiar do movimento ( $E_r$ )**

Este valor pode ser validado comparando-se com o cálculo teórico de  $E_r$  através da expressão 2.18 que apresenta um resultado de 0,98 V que comparado à medição obtida de 1,13 V é perfeitamente aceitável considerando-se a imprecisão inerente às circunstâncias. A medição tem por finalidade validar também o torque de atrito estático ( $T_r$ ) e a constante de torque  $K_t$ .

#### **5.4.7 Sensores de força**

O ensaio apresenta três aspectos relevantes:

- 1- Mostra que o sensor é compatível com a faixa de forças utilizadas.
- 2- A linearização adotada é razoável, uma vez que as diferenças não são significativas para o sistema e perfeitamente toleráveis.
- 3- O sensor apesar de seu baixo custo e alguns inconvenientes mostrou-se satisfatório.

#### **5.4.8 Comportamento dinâmico do sistema**

A análise é efetuada quanto a três itens:

- 1- Movimentação da carga e utilização do equipamento  
Os testes realizados com o protótipo concluído demonstraram conforme as figuras 3.15 e 3.16 a 3.19:
  - a) O dispositivo efetivamente alivia o esforço de sustentação.

- b) O sistema permite a movimentação da carga com esforço mínimo em várias situações demonstrando a funcionalidade do equipamento.
  - c) O balanceamento automático do sistema é obtido
- 2- Estabilidade do ajuste do contrapeso para a obtenção do equilíbrio do sistema
- O resultado da simulação efetuada como visto na figura 4.6 mostra que um comparador simples adotado no controlador impõe uma oscilação no movimento do contrapeso, que pode ser constatada graficamente pela mudança de sentido de rotação do motor. Ao introduzir-se um comparador com faixa morta elimina-se a oscilação propiciando-se uma parada suave e estável do contrapeso, como pode ser constatado na figura 4.7.
- 3- Tempo de resposta
- O tempo de resposta do sistema é ponto fraco do protótipo, uma vez que torna a operação demorada e exigindo alguns cuidados adicionais do operador.

## **6 Conclusões**

O estudo e a construção do protótipo permitiram basicamente constatar a viabilidade funcional de um equipamento de sustentação de cargas através de braços e contrapeso.

Constatou-se também o efeito de balanceamento automático obtido pelo contrapeso através de um controlador on-off.

Baseado no estudo realizado, concluiu-se pela importância deste tipo de equipamento para o incremento da produtividade devido ao alívio de esforços obtido.

Embora o equipamento desenvolvido possua várias limitações e aspectos inconvenientes como; peso elevado e tempo de resposta muito longo, atingiu-se plenamente os objetivos do trabalho, vislumbrando-se um campo de aplicações interessante e promissor que poderão ser obtidos com a continuidade dos estudos e implementação das melhorias sugeridas.

O equipamento pode ser utilizado vantajosamente em aplicações como transportadores de peças de um ponto a outro em operações de montagem e beneficiamento.

### **6.1 Sugestões para futuros desenvolvimentos**

Podem-se classificar os aperfeiçoamentos sugeridos em dois aspectos principais:

#### **6.1.1 Aspecto construtivo**

Aperfeiçoar a relação peso da carga, peso do equipamento, aliviando a estrutura do sistema e reposicionando-se componentes. Introduzir rolamentos nos mancais dos eixos e reforçar a sustentação dos mesmos.

Programar um sistema de braço para a carga com garra adequada à peça a ser manuseada, além de um freio para impedir deslocamentos em ângulos diferentes de zero.

O sistema de braço móvel deverá ser aperfeiçoado quanto ao seu sistema de deslizamento para facilitar a movimentação horizontal.

Digitalizar o sistema de controle e adotar elementos em estado sólido, principalmente no acionamento do motor, que deverá permitir um controle proporcional e reversibilidade do sentido de rotação.

Desenvolver um sensor de força com custo baixo, linear e de rápida resposta.

### **6.1.2 Aspecto operacional**

Introduzir um fuso de esferas recirculantes com passo maior de modo a aumentar a velocidade de resposta.

Adotar um controlador PID que introduzirá em conjunto com o fuso um balanceamento rápido, evitando o atual tempo elevado de espera para estabilização. Incluir um sistema mecânico de freio de segurança.

Adotar um mecanismo de garra dirigido pelo operador para facilitar a captação e devolução da peça.

O circuito de comando deverá possuir um calibrador automático de balanceamento para algumas situações críticas.

## Referências

AUTOTEC. Disponível em: <<http://www.autotec.pt/>>. Acesso em: 06 set. 2011.

BAGGIO COMPRESSORES. Disponível em:  
<<http://www.baggiocompressores.com.br>>. Acesso em: 04 abr. 2012.

BERNDET, E.; TEO, C. L.; BOY, E. S. The learning cobot. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2002, New Orleans. **Proceedings...** p. 867-873. Paper no. IMECE2002-33833.

BULLIET, L. J. **Servomechanisms**. Massachusetts, 1967.

CAMERON, J. F. **Determining an autonomous position of a point of interest on a lifting device**. US Patent 2008/0.288.125 A1, 7 May. 2007, 20 Nov. 2008.

CAMPOS, G. L. Robótica estado da arte. **Boletim Sobracom**, Porto Alegre, n. 23, 1985.

CAO, Y.; FUKUNAGA, A. S.; KHANG, A. B. In: AUTONOMOUS ROBOTS, 4., 1997, Boston. **Proceedings...** Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.

CATÁLOGO Ciacopla Industrial Ltda. Ciacopla Industrial, 1994.

CATÁLOGO de acionamentos lineares. Washington: Thonson Industries Inc., 1993.

CATÁLOGO de braços multifuncionais. São Paulo: Celmar Comercial Ltda., 2011a.

CATÁLOGO de equipamentos. São Paulo: Macco Maquinas e Acessórios Ltda., 2011b.

CATÁLOGO de guincho agrícola. Matão: Matão Equipamentos Agrícolas Ltda., 2011c.

CATÁLOGO de perfis metálicos. São Carlos: Antari Comércio de Metais Ltda., 2005.

CATÁLOGO de posicionadores e dispositivos para soldagem. Scheld Manfred, 1989.

CATÁLOGO de produtos para movimentação de cargas. Marília: Marcon Indústria Metalúrgica Ltda., 2005.

CATÁLOGO de produtos. São Paulo: Kolfix Componentes Industriais Ltda., 2011d.

CATÁLOGO de rosqueadeira articulável. São Paulo: Dauer Máquinas Ltda., 2011e.

CATÁLOGO de rosqueadeira pantográfica. São Bernardo do Campo: Triaxis Indústria e Comercio Ltda., 2011f.

CATÁLOGO de rosqueadeiras. São José dos Campos: Fesmo Indústria Metalúrgica Ltda., 2011g.

CATÁLOGOS de equipamentos para movimentação de materiais. São Paulo: Transall Equipamentos Industriais Ltda., 2004.

CHESTNUT, H.; MAYER, R. W. **Servomechanisms and regulating system design**. New York: Wiley, 1955.

COELLO, C. A. C.; CHRISTIANSEN, A.; AGUIRRE, A. H. Multiobjective design optimization of counterweight balancing of a robot arm using genetic algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOOLS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 7., 1995, Herndon. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, 1995.

COIFFET, P.; CHIROUZE, M. **Introduction to robot technology**. Londres: Kogan Page, 1983.

COLGATE, E. J. et al. **Control handle for intelligent assist devices**. US Patent 6.738.691 B1, 16 May. 2002, 08 May. 2004.

COLGATE, E. J. et al. **Methods and apparatus for manipulation of heavy payloads with intelligent assist devices**. US Patent 7.185.774 B2, 06 Mar. 2007.

COLGATE, J. E.; PESHKIN, M.; KLOSTERMEYER, S. H. Intelligent assist devices in industrial applications: a review. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 4., 2003, Las Vegas. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, 2003.

COLGATE, J. E.; WANNASUPHOPRASIT, W.; PESHKIN, M. A. Cobots: robots for collaboration with human operators. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXHIBITION, 1996, Atlanta. **Proceedings...** 1996, p. 433-439.

CORLISS, W. R. **Teleoperators: mans machine partners**. Oak Ridge: U.S. Atomic Energy Commission, 1972.

CYBERNETICZOO. Disponível em: <<http://cyberneticzoo.com/>>. Acesso em: 09 maio 2012.

CYNERGY ergonomics. Disponível em: <<http://www.cynergyergonomics.com>>. Acesso em: 01 set. 2011.

DAVIS, S. A.; LEDGERWOOD, B. K. **Electromechanical components for servomechanisms**. New York: McGraw-Hill, 1961.

DECKER, K. The Sky is the limit. **Energy Bulletin**, California, 2010.

EDSINGER, A.; KEMP, C. C. Human-robot interaction for cooperative manipulation: handing objects to one another. In: IEEE international workshop on Robot and Human interactive communication, 16., 2007, Jeju Island. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, 2007.

ENCOBOTICS. Disponível em: <<http://www.encobotics.com>>. Acesso em: 02 set. 2011.

FELÍCIO, L. C. **Dinâmica de sistemas e estudo da resposta**. São Carlos: Ryma, 2010.

GATTA, R. P. **Practical intelligent assist device**. US Patent 7.461.753 B1, 06 Dec. 2004, 09 Dec. 2008.

GORBEL: a class above. **G-Force Servo: powered intelligent assist devices** Disponível em: < <https://www.gorbel.com/Products/intelligent-assist-devices.aspx> >. Acesso em: 02 set. 2011.

HOLZBOCK, W. G. **Robotic technology**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.

HYPE SCIENCE: o universo em um clique. **Pernas robóticas da Honda não transformam você em super-herói**. Disponível em: <<http://www.hypescience.com/pernas-roboticas-honda>>. Acesso em: 09 set. 2012.

INDUSTRIAL GAS SPRINGS. Disponível em: <<http://industrialgassprings.com/uk/about.asp>>. Acesso em: 06 out. 2011.

INTELLIGENT DEVICES FOR HANDLING. Disponível em: <<http://www.indevgroup.com>>. Acesso em: 01 set. 2011.

INTERLINK ELECTRONICS. Disponível em: <<http://www.interlinkelectronics.com/>>. Acesso em: 01 mar. 2012.

IWB. Disponível em: <[www.iwb.tum.de](http://www.iwb.tum.de)>. Acesso em: 05 set. 2011.

JUNG, W. G. **IC Op-amp cookbook**. Indiana: H. W. Sams, 1974

KAZEROONI, H. **Device and method for wireless lifting assist devices**. US Patent 6.554.252 B2, 27 Mar. 2003.

KENJO, T.; NAGAMORI, S. **Permanent-magnet and brushless DC Motors**. Oxford: Clarendon, 1985.

MASON, M. **Mechanics of robotic manipulation**. Boston: Massachusetts Institut of Technology, 2001.

McGEE, D. **Method of controlling an intelligent assist device**. US Patent 6.204.620 B1, 10 Dec. 1999, 20 Mar. 2001.

MILLER, R. **Fundamentals of industrial robots and robotics**. Boston: PWS Kent Publishing Company, 1988.

MILLER, R. K. **Industrial robot handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.

MONTGON, S. **Variable reach crane jib with automatic balancing device**. US Patent 4.867.321, 16 Mar. 1988, 19 Set. 1989.

NORTHWESTERN UNIVERSITY. **Michael A. Peshkin**. Disponível em: <<http://www.mech.northwestern.edu/peshkin/gallery/index.html>>. Acesso em: 05 set. 2011.

OLIVEIRA, D. J. P. N. **Braço robótico manipulador para aplicação em robô de serviços**. 2010. Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, Braga, 2010.

OLIVEIRA, V. A.; AGUIAR, M. L.; VARGAS, J. B. **Sistemas de controle**. São Carlos: EESC/USP, 2004. Apostila do curso de graduação em Engenharia Elétrica.

PARTNERS. Disponível em: <<http://www.partners.com>>. Acesso em: 01 set. 2011.

PAZOS, F. **Automação de sistemas e robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil Editora, 2002.

POWER spring. Disponível em: <<http://www.powerspring.com.tw>>. Acesso em: 06 out. 2011.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SILVA, R. G.; CAL, V. C. Aperfeiçoamento de grua e processo de controle de contrapeso em uma grua, em tempo real. **Revista eletrônica**, Salvador, n. 5-E, 2010.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. **Automação e controle discreto**. São Paulo: Editora Érica, 1998.

STOCKMASTER, J. et al. **Lift actuator**. US Patent 7.559.533 B2, 16 Jan. 2007, 14 Jul. 2009.

TIMME, M. **How to choose a lifting device**. Disponível em: <<http://www.articlesnatch.com/Article/How-To-Choose-A-Lifting-Device/843056>>. Acesso em: 05 set. 2011.

USSTAR INFORMÁTICA. Disponível em: <<http://www.usstar.com.br/>>. Acesso em: 06 ago. 2012.

VAN DYKE, T. et al. **Intuitive controller for vertical lift assist device**. US Patent 7.756.601 B1, 05 Mar. 2007, 13 Jul. 2010.

YAMAMOTO, R. I. **Dispositivo automático para auxiliar a manipulação de cargas**. 2010. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2010.

## Apêndice A - Dimensionamento do braços

O texto a seguir mostra um roteiro de cálculo para os principais componentes do sistema, como: braço da carga, braço do contrapeso, sensores e freio.

### 1 Dimensionamento do braço da carga

O braço da carga é composto por dois semibraços, um inserido no interior do outro de modo a formar um braço expansível. Sua estrutura é previamente determinada a partir das especificações iniciais adotando-se tubos metálicos quadrados.

#### 1.1 Centro de massa (CM) do braço da carga

Uma vez que o braço é composto por dois elementos, calcula-se independentemente o centro de massa de cada peça e posteriormente o CM do conjunto para as duas situações extremas: totalmente retraído e totalmente expandido.

Como o material é uniforme ao longo de seu comprimento, o CM dos mesmos é seu centro geométrico e a massa de cada elemento é obtida pelo produto de seu comprimento pelo peso específico do tubo, fornecido por um catálogo técnico de perfis metálicos (CATÁLOGO..., 2005). As dimensões e posições dos centros de massa podem ser vistos nas figuras A.1.a e A.1.b.

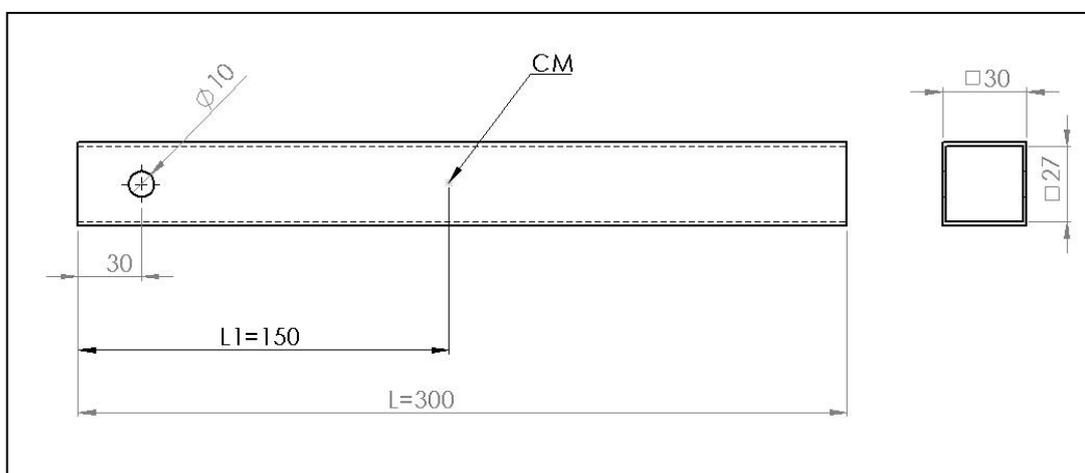


Figura A.1.a - Semibraço fixo

Fonte: Autor

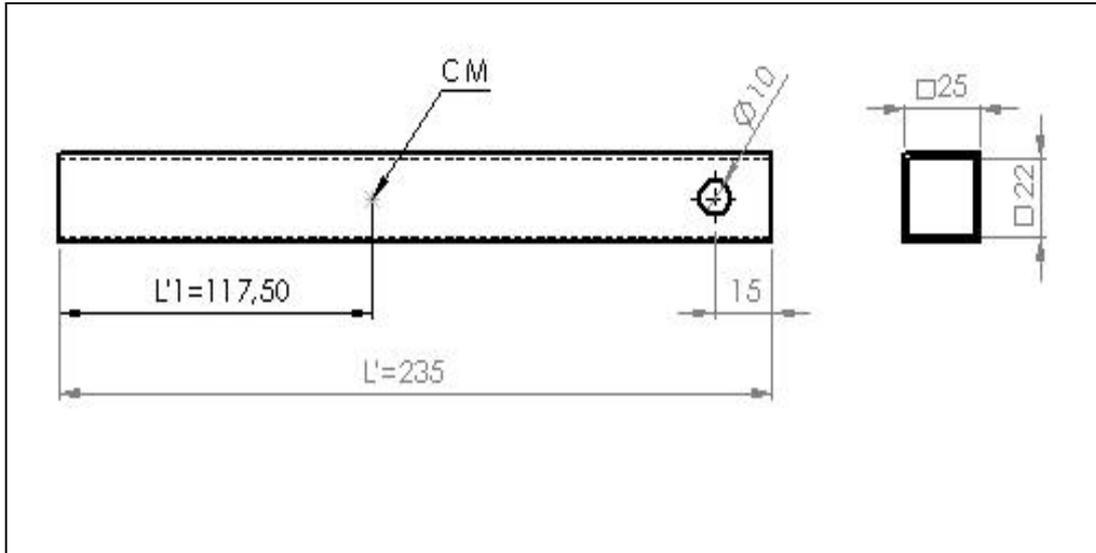


Figura A.1.b - Semibraço móvel  
Fonte: Autor

## 1.2 Cálculo da massa dos semibraços fixo e móvel

$$m_1 = \ell \cdot p_1 = 0,300 \cdot 1,34 = 0,402 \text{ Kg.}$$

$$m_2 = \ell' \cdot p_2 = 0,235 \cdot 1,11 = 0,260 \text{ Kg}$$

$$m_b = 0,402 + 0,260 = 0,662 \text{ Kg}$$

Onde:

$m_b$  = Massa total do braço da carga

$m_1$  = Massa do semibraço fixo

$m_2$  = Massa do semibraço móvel

$p_1$  = Peso específico do tubo do semibraço fixo = 1,34 Kg/m<sup>3</sup>  
(CATÁLOGO..., 2005)

$p_2$  = Peso específico do tubo do semibraço móvel = 1,11 Kg/m<sup>3</sup>  
(CATÁLOGO..., 2005)

$\ell$  = Comprimento do semibraço fixo

$\ell'$  = Comprimento do semibraço móvel

## 1.3 Cálculo das posições dos centros de massa do braço

O Centro de massa do braço deve ser calculado para as duas condições extremas do semibraço móvel: totalmente retraído e totalmente expandido. A

determinação do CM do braço depende, em cada caso, das posições relativas dos CM dos semibraços, as quais são mostradas nas figuras A.2.a e A.2.b. As figuras A.3.a e A.3.b apresentam as posições finais dos CM do braço em relação ao eixo principal.

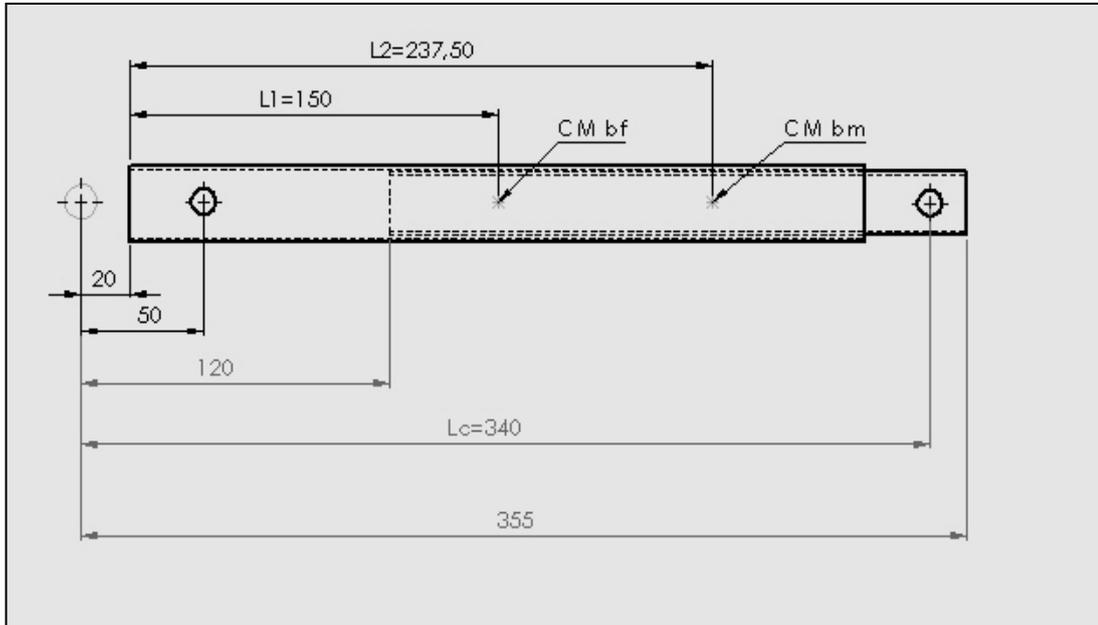


Figura A.2.a - Posições relativas dos CM com o braço retraído  
Fonte: Autor

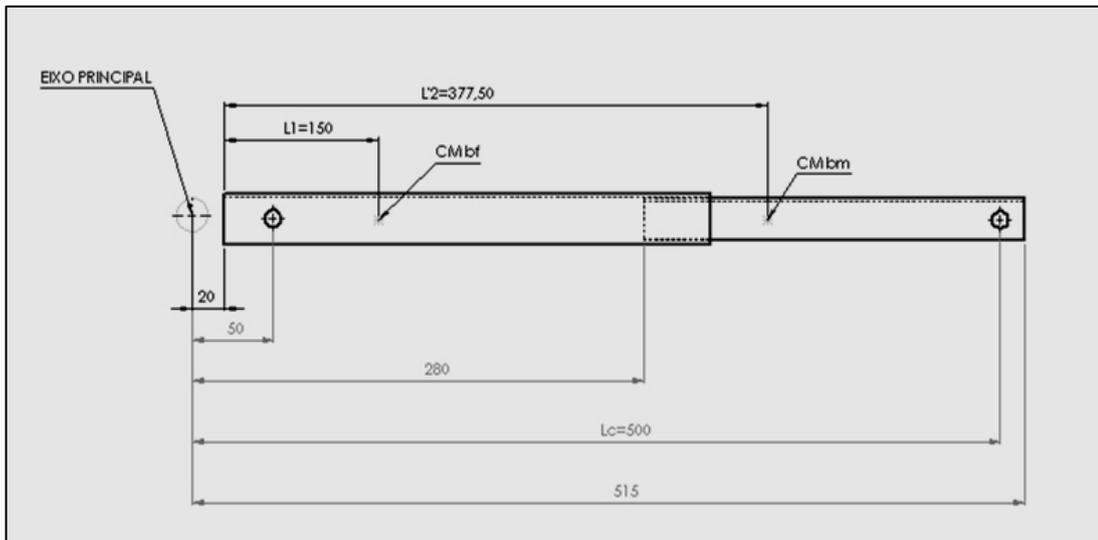


Figura A.2.b - Posições relativas dos CM com o braço expandido  
Fonte: Autor

$$\ell_3 = \frac{m_1 \cdot l_1 + m_2 \cdot l_2}{m_1 + m_2} = \frac{0,402 \cdot 0,150 + 0,260 \cdot 0,2175}{0,402 + 0,260} = 0,1765 \text{ m}$$

$$\ell'_3 = \frac{m_1 \cdot \ell_1 + m_2 \cdot \ell_2}{m_1 + m_2} = \frac{0,402 \cdot 0,150 + 0,260 \cdot 0,3775}{0,402 + 0,260} = 0,239 \text{ m}$$

Onde:

CM = Centro de massa

CM<sub>bf</sub> = Centro de massa do semibraço fixo

CM<sub>bm</sub> = Centro de massa do semibraço móvel

CM<sub>bc</sub> = Centro de massa do braço da carga

$\ell_1$  = Posição do CM do semibraço fixo

$\ell_1$  = Posição do CM do semibraço móvel

$\ell_2$  = Posição relativa do CM do braço móvel retraído

$\ell_2$  = Posição relativa do CM do braço móvel expandido

$\ell_3$  = Posição do CM do braço retraído

$\ell_3$  = Posição do CM do braço expandido

$\ell_4$  = Posição do CM do braço retraído relativa ao eixo principal

$\ell'_4$  = Posição do CM do braço expandido relativa ao eixo principal

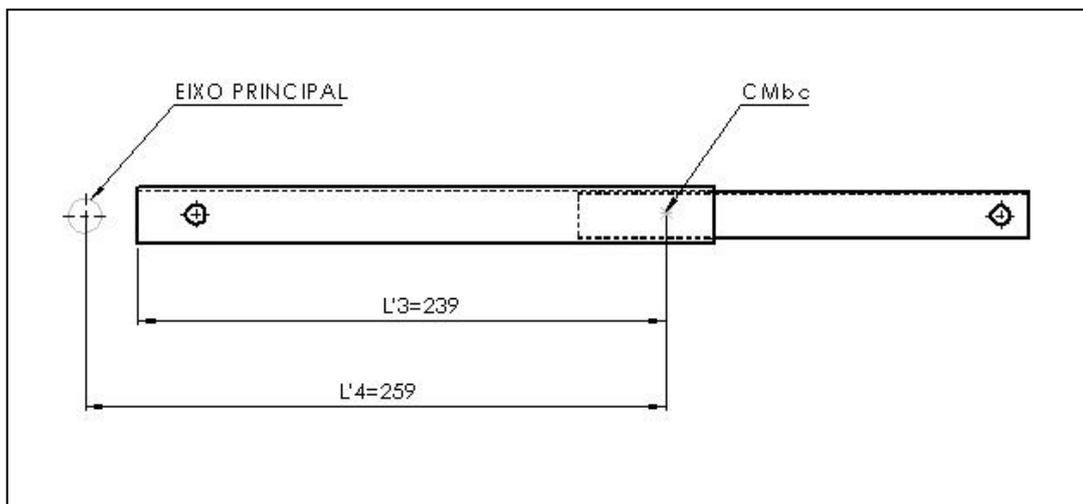


Figura A.3.a – Posição do CM para o braço expandido

Fonte: Autor

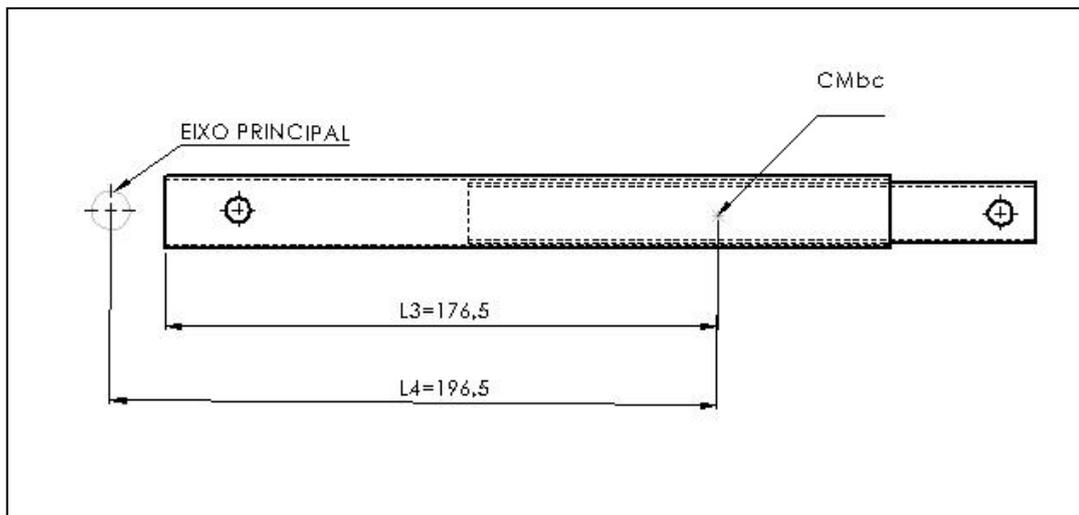


Figura A.3.b – Posição do CM para o braço retraído  
Fonte: Autor

#### 1.4 Centro de massa do motorreductor

De forma simplificada adotou-se o posicionamento do CM do motorreductor localizando-o no eixo de saída do mesmo e alinhado horizontalmente com o eixo principal, como visto na figura A.4.

Onde:

$l_5$  = Posição do CM do motor em relação ao eixo principal

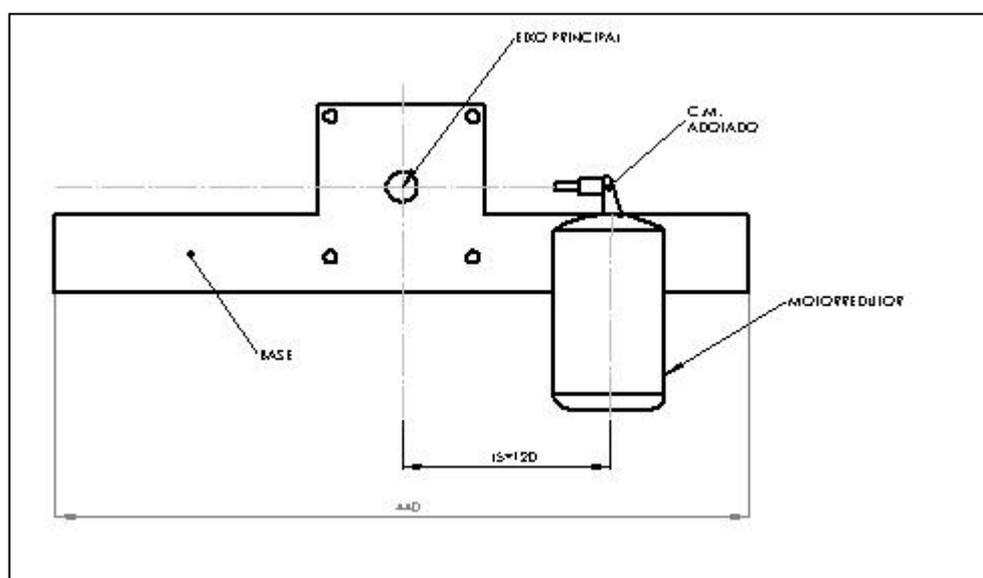


Figura A.4 - Posição adotada para o CM do motorreductor  
Fonte: Autor

### 1.5 Cálculo dos torques gerados no eixo principal devido ao lado da carga

O torque total gerado pelo lado da carga será a soma dos torques individuais de cada componente, levando-se em consideração os casos extremos de operação.

Definindo-se:

$T_1$  = Torque devido ao motorreductor

$T_2$  = Torque devido a carga máxima

$T_3$  = Torque devido a estrutura do braço da carga

$T_4$  = Torque devido a carga mínima

$T_{bc}$  = Torque total aplicado pelo lado da carga ao eixo principal

$\ell_c$  = Posição da carga em relação ao eixo principal

$m_m$  = Massa do motorreductor

$m_c$  = Massa da carga

$m_b$  = Massa total do braço da carga

$g$  = aceleração da gravidade = 10 m/s<sup>2</sup>

#### 1.5.1 Braço totalmente expandido e carga máxima

$$T_1 = m_m \cdot g \cdot \ell_5 = 2,1 \cdot 10 \cdot 0,12 = 2,52 \text{ N.m}$$

$$T_2 = m_c \cdot g \cdot \ell_c = 3,0 \cdot 10 \cdot 0,50 = 15,0 \text{ N.m}$$

$$T_3 = m_b \cdot g \cdot \ell'_4 = 0,66 \cdot 10 \cdot 0,259 = 1,71 \text{ N.m}$$

$$T_{bc} = T_1 + T_2 + T_3 = 19,23 \text{ N.m}$$

#### 1.5.2 Braço totalmente retraído e carga mínima

$$T_1 = m_m \cdot g \cdot \ell_5 = 2,1 \cdot 10 \cdot 0,12 = 2,52 \text{ N.m}$$

$$T_4 = m_c \cdot g \cdot \ell_c = 0,5 \cdot 10 \cdot 0,34 = 1,7 \text{ N.m}$$

$$T_3 = m_b \cdot g \cdot \ell_4 = 0,66 \cdot 10 \cdot 0,197 = 1,3 \text{ N.m}$$

$$T_{bc} = T_1 + T_3 + T_4 = 5,52 \text{ N.m}$$

A tabela A.1 apresenta um resumo dos componentes utilizados e torques gerados no lado da carga nas condições extremas de operação.

Tabela A.1 - Torques devido aos componentes no lado da carga

Componente	Peso (Kg)	C.M. (m)	Torque (N.m)		Obs.
			mín.	max.	
Estrutura do Braço	0,66	0,197	1,30	-	retraído
		0,259	-	1,7	expandido
Motorreductor	2,1	0,12	2,52		
Carga	0,5	0,34	1,70	-	Mínima
	3,0	0,50	-	15	Máxima
Total	-	-	5,52	19,22	

Fonte: Autor

## 2 Dimensionamento do braço do contrapeso

Em função dos parâmetros iniciais do equipamento, adotou-se um comprimento para o braço, composto por um tubo quadrado de 30 mm e espessura de 1,2 mm. As dimensões de sua estrutura de apoio, comprimento de fuso e diâmetro do contrapeso foram também predeterminados. O dimensionamento proposto consta em adequar estes componentes, em função do torque introduzido ao braço da carga, de forma a permitir a obtenção do equilíbrio do sistema em todas as condições operacionais.

### 2.1 Cálculo da massa do contrapeso ( $m_{cp}$ )

Analisando a tabela A.1 conclui-se pela necessidade de um torque superior a 19,22 N.m por parte do braço do contrapeso, em sua posição máxima, de modo a equilibrar o sistema em sua condição de torque máximo, por outro lado em sua posição mínima o torque deve ser inferior a 5,52 N.m para obtenção do equilíbrio também nesta condição.

O cálculo inicia-se pela condição de torque máximo, satisfazendo o equilíbrio nesta situação e avaliando-se o resultado de torque mínimo quanto a possíveis soluções caso não seja possível obtê-lo de imediato.

Uma vez que o comprimento do braço do contrapeso é predeterminado tem-se a massa de seus componentes e centros de massa conforme pode ser visto na figura A.5

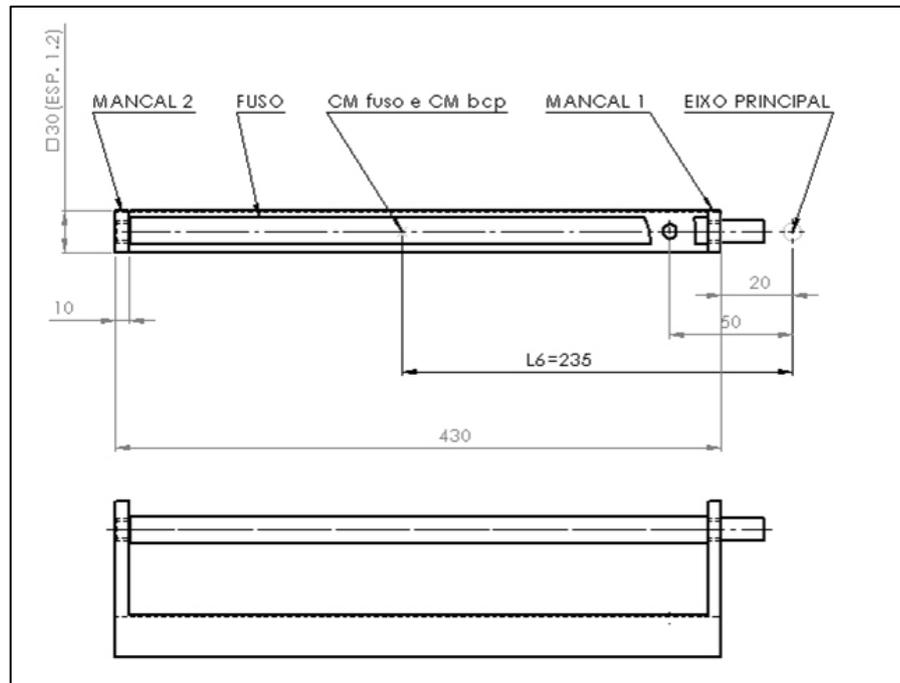


Figura A.5 - Centros de massa do braço do contrapeso  
Fonte: Autor

## 2.2 Cálculo da massa da estrutura do contrapeso ( $m_{ecp}$ )

Considera-se como estrutura os itens: perfil base, mancais e fusão, portanto a  $m_{ecp}$  é a soma das massas de todos estes componentes.

O peso do perfil base é calculado a partir de suas dimensões: Trata-se de um tubo quadrado de lado 0,03m, espessura 1,2 mm e comprimento 0,430 m, que conforme catálogo (CATÁLOGO..., 2005), apresenta o valor de 0,47 Kg.

Os mancais compõem-se de duas peças de barra chata de aço com largura de 0,0317m, espessura 0,0095m e comprimento 0,08 que conforme catálogo (CATÁLOGO..., 2005) apresentam um peso total de 0,38 Kg.

Calcula-se o fusão de forma simplificada a partir de um tarugo de diâmetro  $\frac{3}{4}$  e comprimento 0,46 m apresentando um peso de 0,96 Kg (CATÁLOGO..., 2005).

Ressalta-se o fato de que para efeito de simplificação de cálculo, foram desprezados os elementos de fixação, furações, rebaiços e outros detalhes de menor importância, assim  $m_{ecp} = 1,81$  Kg.

### 2.3 Centro de massa da estrutura do contrapeso ( $\ell_6$ )

A partir da figura A.5 obtêm-se o CM da estrutura, adotada de forma simplificada como o centro geométrico da mesma, portanto:  $\ell_6 = 0,235$  m.

### 2.4 Torque gerado pela estrutura do contrapeso ( $T_{ecp}$ )

$$T_{ecp} = m_{ecp} \cdot \ell_6 \cdot g = 4,25 \text{ N.m}$$

### 2.5 Cálculo das dimensões do contrapeso

Como o braço do contrapeso deve gerar um torque superior a 19,22 N.m para equilibrar o sistema na condição de torque máximo, logo:  $T_{bcp} \geq 19,22$  N.m.

$$T_{bcp} = T_{cp} + T_{ecp}$$

Onde:

$T_{bcp}$  = Torque total do braço do contrapeso

$T_{cp}$  = Torque devido a massa do contrapeso

$T_{ecp}$  = Torque devido a massa da estrutura do contrapeso

Então:

$$T_{cp} = 19,22 - 4,25 = 14,97 \text{ N.m}$$

Sabe-se que  $T_{cp} = m_{cp} \cdot g \cdot \ell_{CMcp}$

Onde:

$m_{cp}$  = massa do contrapeso

$\ell_{CMcp}$  = Posição do CM do contrapeso

Pode-se calcular a massa do contrapeso a partir da posição do CM do mesmo, mas como esta depende de seu comprimento e este interfere na posição do CM tem-se uma interdependência de fatores que é solucionada através de uma tabela obtida pela imposição de valores ao comprimento  $\ell_{cp}$ , levando-se a obtenção

de um par de valores ideal entre  $l_{CMcp}$  e  $l_{cp}$ , a figura A.6 mostra o desenho do contrapeso e a figura A.7 apresenta os posicionamentos máximo e mínimo do mesmo na estrutura.

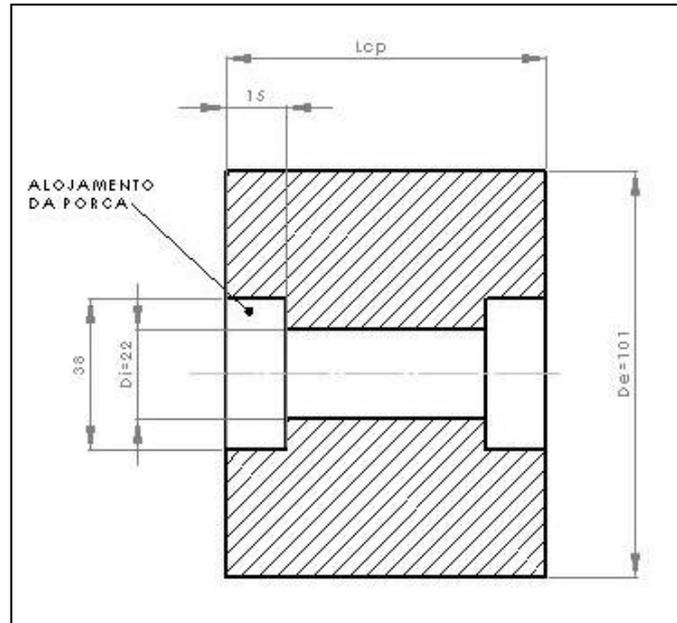


Figura A.6 - Dimensões do contrapeso  
Fonte: Autor

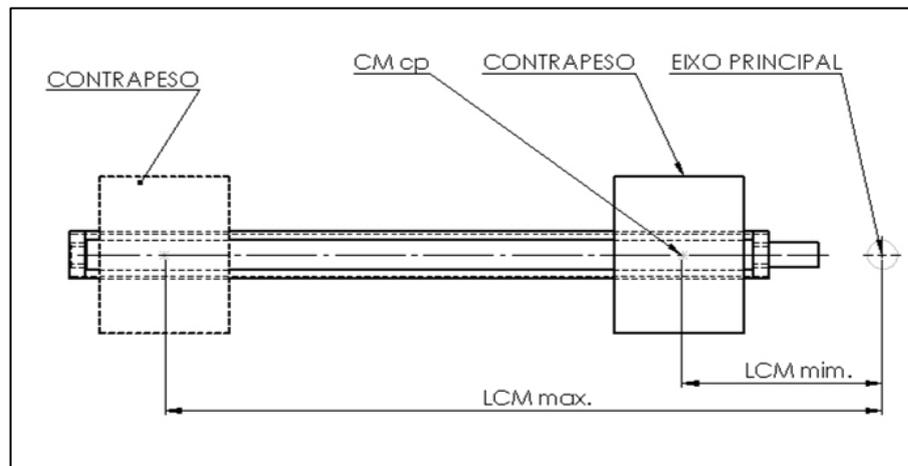


Figura A.7 - Posicionamentos do contrapeso  
Fonte: Autor

A tabela A.2 apresenta os vários parâmetros necessários para a determinação do par ideal  $l_{CMcp}$ ,  $l_{cp}$  e como consequência a massa do contrapeso.

Os itens tabelados são definidos abaixo e elaborados a partir das seguintes expressões:

$$m_{cp} = \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot \rho_3 \cdot \ell_{cp}}{4}$$

Onde:

$D_e$  = Diâmetro externo do contrapeso, adotado 4" ou 0,101 m

$D_i$  = Diâmetro do furo do contrapeso para introdução do fuso, adotado 0,022 m

$\rho_3$  = Peso específico do aço 1020 = 7.840 Kg/m<sup>3</sup> (Antares, 2005)

$\ell_{cp}$  = comprimento do contrapeso

$\ell_{CM\ max}$  = Posição máxima do CM do contrapeso =  $0,44 - \frac{\ell_{cp}}{2}$

$\ell_{CM\ min}$  = Posição mínima do CM do contrapeso =  $0,030 + \frac{\ell_{cp}}{2}$

$T_{cp\ max}$  = Torque máximo devido a massa do contrapeso =  $\ell_{CM\ max} \cdot m_{cp} \cdot g$

$T_{cp\ min}$  = Torque mínimo devido a massa do contrapeso =  $\ell_{CM\ min} \cdot m_{cp} \cdot g$

$T_{bcp\ max} = T_{cp\ Max} + T_{ecp} = T_{cp\ Max} + 4,25$

$T_{bcp\ min} = T_{cp\ min} + T_{ecp} = T_{cp\ min} + 4,25$

Tabela A.2 - Torques resultantes em função da variação de  $\ell_{cp}$

$\ell_{cp}$ (m)	$m_{cp}$ (Kg)	$\ell_{cm\ max}$ (m)	$\ell_{cm\ min}$ (m)	$T_{cp\ max.}$ (N.m)	$T_{bcp\ max.}$ (N.m)	$T_{cp\ min.}$ (N.m)	$T_{bcp\ min.}$ (N.m)
0,060	3,55	0,410	0,060	14,54	18,79	2,13	6,38
0,065	4,00	0,408	0,063	16,31	20,56	2,50	6,75
0,070	4,31	0,405	0,065	17,46	21,71	2,80	7,05
0,075	4,62	0,403	0,068	18,59	22,84	3,12	7,37
0,080	4,93	0,400	0,070	19,72	23,97	3,45	7,70
0,085	5,23	0,398	0,073	20,80	25,05	3,79	8,04
0,090	5,54	0,395	0,075	21,89	26,14	4,16	8,41
0,095	5,85	0,393	0,078	22,96	27,21	4,53	8,78
0,100	6,16	0,390	0,080	24,01	28,26	4,93	9,18

Fonte: Autor

Analisando-se a tabela A.2, verifica-se na coluna  $T_{bcp\ min}$  que nenhum dos valores atende ao requisito de torque mínimo oferecido pelo braço do contrapeso, uma vez que este deveria ser inferior ao torque mínimo proporcionado pelo braço da carga, deste modo, em tal braço conclui-se pela necessidade de elevação do referido torque através de um contrapeso fixo.

Ocorre que ao elevar-se o torque mínimo, eleva-se também o torque máximo alterando-se a faixa de torques. A solução adotada para tal impasse foi simplesmente escolher-se um valor compatível com o sistema, deste modo elegeu-se um torque de 4 N.m para o contrapeso fixo, resultando em uma nova faixa de torques para o lado da carga: 9,52 a 23,22 N.m.

Submetendo-se esta nova faixa à tabela A.2, verifica-se que a linha correspondente a um comprimento ( $\ell_{cp}$ ) de 0,08 m atende perfeitamente aos requisitos de torque, ou seja: O valor de torque mínimo do lado da carga é superior ao valor de torque mínimo do braço do contrapeso e o valor máximo do lado da carga é inferior ao valor máximo do braço do contrapeso.

Desta forma a tabela A.3 apresenta a faixa de valores de torques do braço do contrapeso para o comprimento  $\ell_{cp}$  escolhido de 0,08 m.

Tabela A.3 - Faixa de torques do braço do contrapeso

Componente	Peso (Kg)	CM (m)	Torque (N.m)		Obs.
			Min.	Max.	
Contrapeso	4,93	0,07 0,40	3,45	19,72	Pos. mínima Pos. máxima
Estrutura	1,81	0,23	4,25		
Total			7,70	23,97	

Fonte: Autor

### 3 Dimensionamento do contrapeso fixo

Como a diferença de torques entre o lado da carga e o braço do contrapeso na condição de mínimo torque é de 4 N.m, determina-se a massa necessária para um contrapeso fixo no lado da carga, prevendo-se sua fixação ao semibraço fixo do braço da carga e adotando-se a posição do CM em 0,25 m, conduzindo-se a expressão:

$$m_{\text{cpf}} = \frac{T_5}{g \cdot \ell_7} = \frac{4}{10,0,25} = 1,6 \text{ Kg}$$

Onde:

$\ell_7$  = posição do C.M. do contrapeso fixo = 0,25 m

$m_{\text{cpf}}$  = massa do contrapeso fixo

$T_5$  = Torque gerado pelo contrapeso fixo = 4 N.m

Partindo-se da massa necessária ao contrapeso fixo para equilibrar o sistema, dimensiona-se seu diâmetro, a partir do qual, seleciona-se um tarugo de aço 1020.

Adotando-se um comprimento do tarugo de 0,09 m, que é compatível com o comprimento do semibraço fixo e posição do CM adotado, obtém-se a expressão:

$$m_{\text{cpf}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \ell_8 \cdot P_3$$

Onde:

D = diâmetro do tarugo do contrapeso fixo a ser utilizado

$\ell_8$  = Comprimento do tarugo do contrapeso fixo = 0,09 m

$P_3$  = Peso específico do aço 1020 = 7.840 Kg/m<sup>3</sup> (CATÁLOGO..., 2005).

Deste modo:  $D = \sqrt{\left(\frac{m_{\text{cpf}} \cdot 4}{\pi \cdot \ell_8 \cdot P_3}\right)}$  resultando em  $D = \sqrt{\left(\frac{1,6 \cdot 4}{\pi \cdot 0,09 \cdot 7,84 \cdot 10^3}\right)} = 0,053$  m ou 2"1/8.

Assim, o contrapeso fixo fica definido como um tarugo de aço 1020 com diâmetro de 2"1/8 e comprimento 0,09 m conforme pode ser visto na figura A.8.

O cálculo do contrapeso fixo desprezou: elementos de fixação, furações e outros itens acessórios, cujas eventuais diferenças de torque poderão ser facilmente compensadas com um pequeno ajuste na posição do mesmo.

A inclusão do contrapeso fixo no braço da carga altera o balanceamento anteriormente obtido e mostrado na tabela A.3 apresentando-se a nova situação na tabela A.4

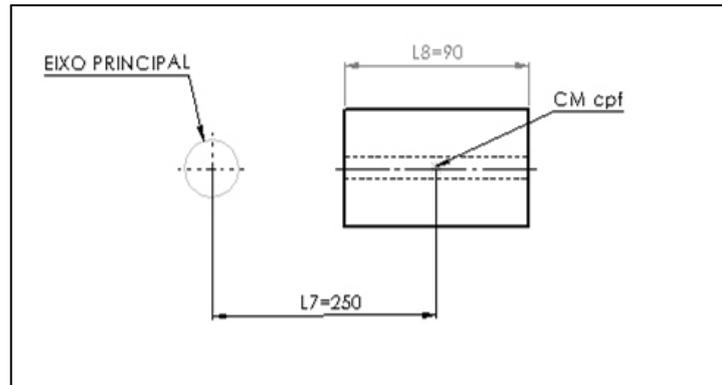


Figura A.8 - Dimensões do contrapeso fixo  
Fonte: Autor

Tabela A.4 - Torques no braço da carga após inclusão de contrapeso fixo

componente	Peso (Kg)	CM (m)	Torque (N.m)		Obs.
			mín.	max.	
Estrutura do Braço	0,66	0,197	1,30	-	retraído
		0,259	-	1,7	expandido
Motor	2,1	0,12	2,52		
Carga	0,5	0,34	1,70	-	Mínima
	3,0	0,50	-	15	Máxima
Contrapeso fixo	1,60	0,25	4,00		
Total	-	-	9,52	23,22	

Fonte: Autor

A tabela A.5 mostra a comparação entre torques obtidos antes e depois da inclusão do contrapeso fixo, concluindo-se que na condição mínima a pequena diferença pode ser facilmente ajustada pela posição do CM e na condição máxima ao lado do contrapeso supera o lado da carga, permitindo assim que o sistema possa ser equilibrado em qualquer condição operacional.

Tabela A.5 - Comparativo de torques após inclusão do contrapeso fixo

Condição		Sem contrapeso fixo		Com contrapeso fixo	
Braço		carga*	contrapeso	carga*	contrapeso
Torque N.m	min.	5,52	7,70	9,52	7,70
	max.	19,22	23,97	23,22	23,97
*Inclui todos os componentes do lado da carga					

Fonte: Autor

#### 4 Freio do sistema

O freio deve estar preparado para atuar, introduzindo no sistema um torque correspondente a diferença de valores entre o braço do contrapeso e o lado da carga para a situação operacional mais crítica, de modo a imobilizar a base e consequentemente os braços. O pior caso ocorre com o contrapeso em sua posição máxima e o braço da carga totalmente retraído e sem carga.

O valor de torque a ser fornecido ao sistema nesta condição é obtido da expressão abaixo:

$$T_{fr} = T_{bcp \max} - (T_1 + T_3 + T_4) = 23,97 - (2,52 + 1,30 + 4,00) = 16,15 \text{ N.m}$$

Onde:

$T_{fr}$  = Torque necessário para frear o sistema

Como o torque máximo fornecido pelo freio eletromagnético é de 32 N.m, a condição de frenagem é plenamente atendida por este componente.

#### 5 Sensores de força

A medida dos torques nos braços é realizada de modo indireto, medindo-se através de um sensor a força aplicada pelo braço à base em uma posição conhecida de seu comprimento resultando em um valor diretamente proporcional ao torque aplicado ao eixo principal.

A análise é efetuada em cada braço separadamente e tem por objetivo verificar a adequação da máxima força imposta ao sensor com suas características.

### 5.1 Braço da carga

A figura 3.15 mostra um diagrama das forças atuantes no braço com o mesmo totalmente expandido, e a expressão abaixo define a força máxima aplicada ao sensor.

$$F_s = F_c \cdot \frac{d_c}{d_s} + F_{bc} \cdot \frac{d_{cm\ bc}}{d_s}$$

Onde:

$F_{bc}$  = Força aplicada pela estrutura do braço da carga = 6,6 N

$F_s$  = Força aplicada ao sensor

$F_c$  = Força aplicada pela carga ao braço = 30 N

$d_c$  = Distância entre o eixo secundário e a carga = 0,45 m

$d_s$  = Distância entre o eixo secundário e o sensor = 0,20 m

$d_{cm\ bc}$  = Distância do C.M. do braço da carga ao eixo secundário = 0,21 m

$$F_s = \frac{30 \cdot 0,45}{0,20} + \frac{6,6 \cdot 0,21}{0,20} = 74,43 \text{ N}$$

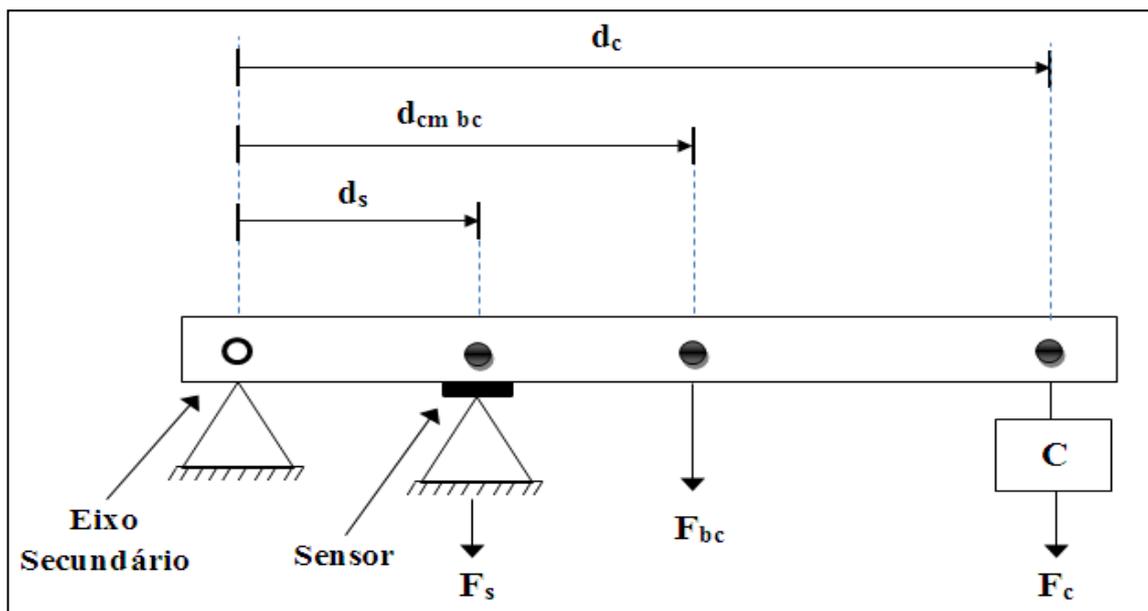


Figura A.9 - Forças atuantes no sensor do braço da carga  
Fonte: Autor

## 5.2 Braço do contrapeso

As forças atuantes no braço, em sua condição máxima, são mostradas no diagrama da figura 3.16 resultando na expressão abaixo:

$$F_s = F_{cp} \cdot \frac{d_{cm\ cp}}{d_s} + F_{bcp} \cdot \frac{d_{cm\ bcp}}{d_s}$$

Onde:

$F_{cp}$  = Força exercida pela massa do contrapeso = 49,3 N

$d_{cm\ cp}$  = Distância do CM do contrapeso = 0,35 m

$F_{bcp}$  = Força exercida pela massa da estrutura do braço = 18,1 N

$d_{cm\ bcp}$  = Distância do CM da estrutura do braço 0,18 m

$$F_s = \frac{49,3 \cdot 0,35}{0,20} + \frac{18,1 \cdot 0,18}{0,20} = 102,57 \text{ N}$$

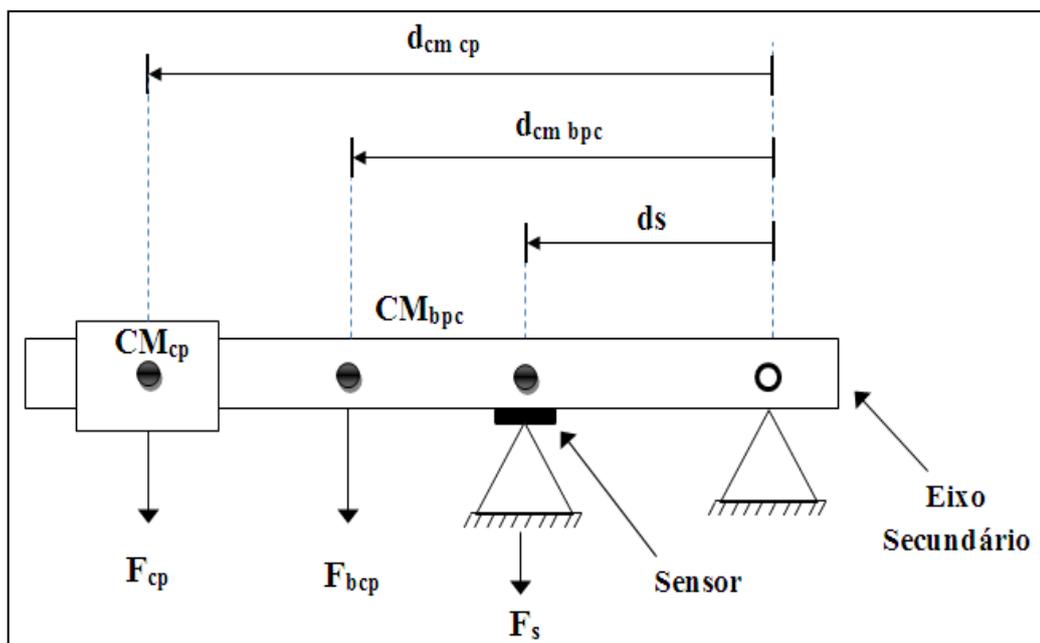


Figura A.10 - Forças atuantes no sensor do braço do contrapeso

Fonte: Autor

Analisando-se os cálculos efetuados conclui-se pela viabilidade de utilização do sensor proposto, conforme características apresentadas na figura 3.3, mesmo com uma ligeira ultrapassagem da faixa permitida pelo sensor no caso do braço do

contrapeso, o que pode ser facilmente solucionado dimensionando-se adequadamente o atuador do referido sensor.

## 6 Mecanismo de movimentação do contrapeso

A movimentação do contrapeso, como pode ser visualizado na figura A.11, é efetuada pela rotação do fuso, que por sua vez provoca a movimentação da porca solidária ao contrapeso, onde um sistema de guia impede-o de girar e mantém um movimento retilíneo.

O contrapeso avança com uma velocidade linear  $v$ , dada pela expressão:

$$v = n \cdot \frac{p}{60}$$

Onde:

$n$  = freqüência do fuso em rotações por minuto

$p$  = passo do fuso em milímetros por rotação

$v$  = velocidade linear de deslocamento do contrapeso

Obtendo-se a velocidade linear máxima de 8,8 mm/s.



Figura A.11 - Mecanismo de movimentação do contrapeso

Fonte: Autor

## Apêndice B - Montagem do circuito elétrico

As figuras A.2.1 e A.2.2 mostram a disposição física dos principais componentes elétricos utilizados, como placa de fonte 12 V, placa de fonte do motor, transformador principal, placa de relés, protoboards com os circuitos de sensores, controlador on-off e contadores de reversão da velocidade do motor.

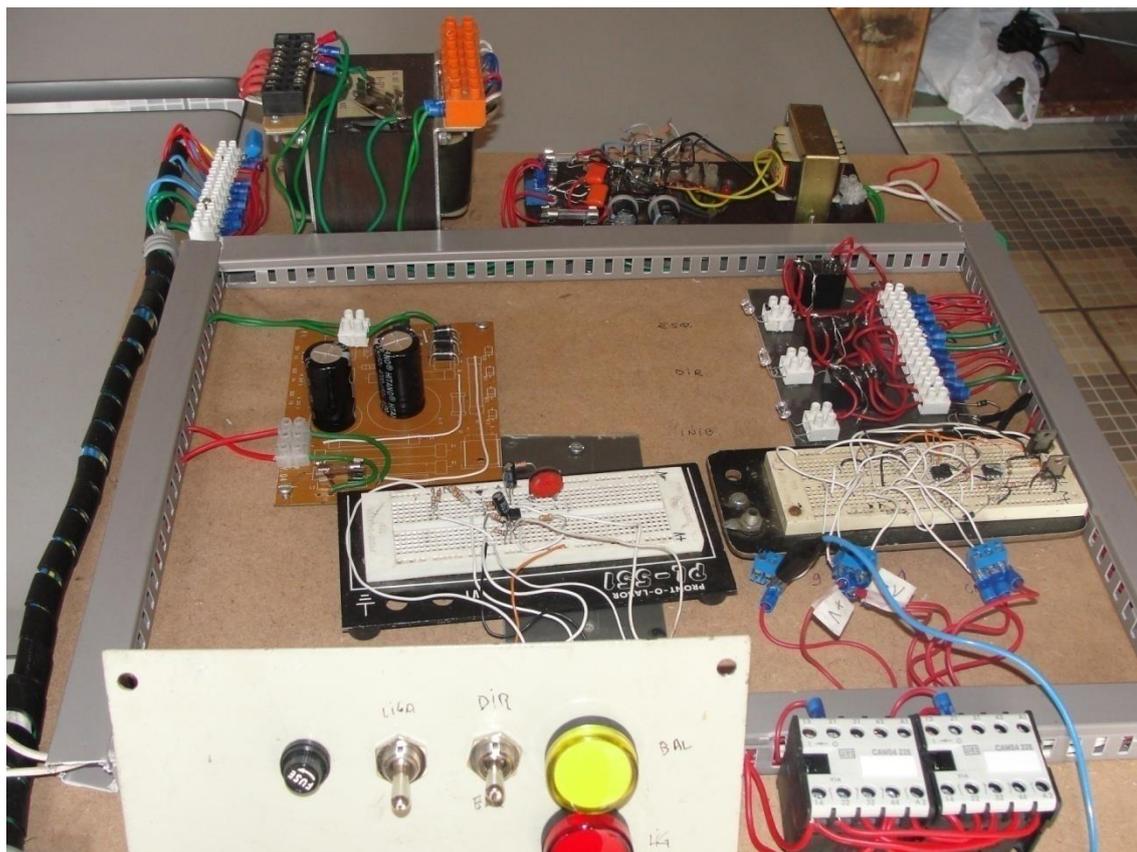


Figura A.2.1 - Disposição física dos componentes I  
Fonte: Autor

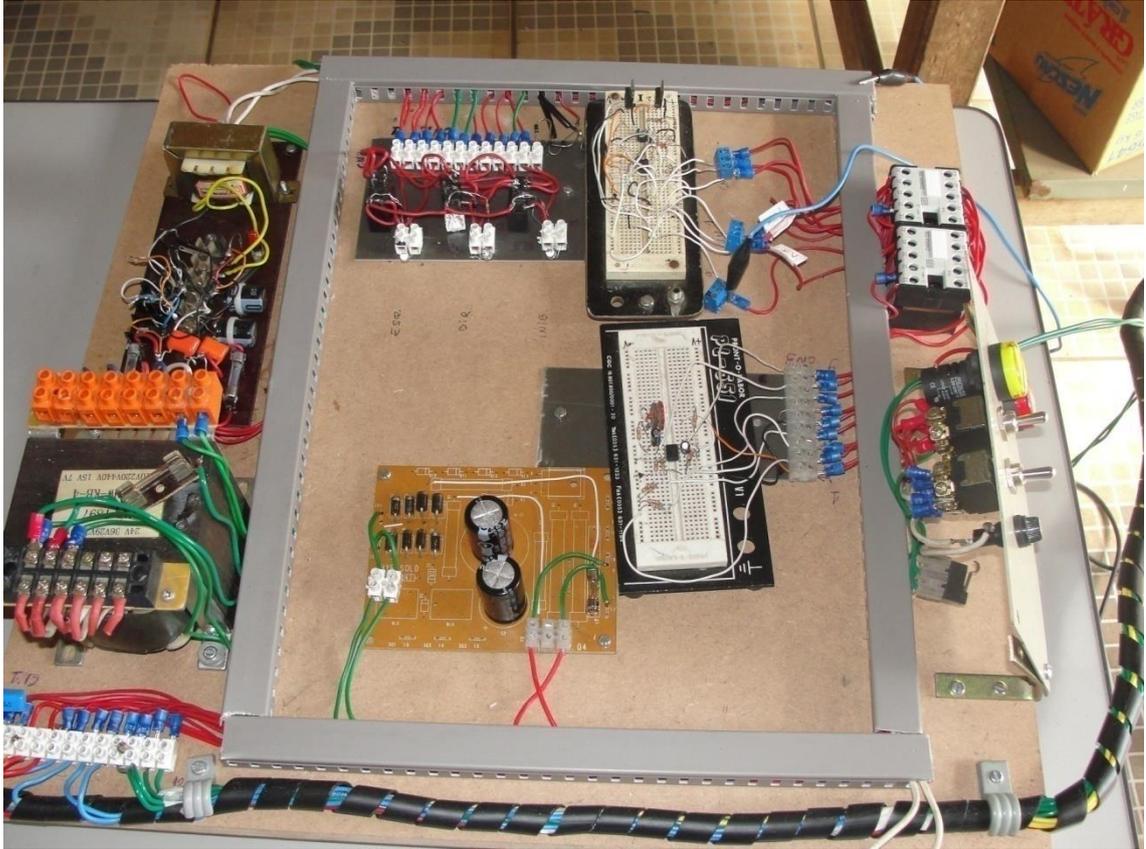


Figura A.2.2 - Disposição física dos componentes II  
Fonte: Autor