### CONTROLE DA POSIÇÃO DE UMA ESFERA EM UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Douglas Jorge Peixoto de Sousa Mota

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Dr. -Ing. Richard Magdalena Stephan (Orientador)

D. Sc. Afonso Celso Del Nero Gomes

Eng. Ney Bruno

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO 2008

Dedico este trabalho aos meus pais José Arnaldo Peixoto de Sousa Mota e Zarmavete Jorge de Sousa Mota e a minha irmã Danielle Jorge Peixoto de Sousa Mota, eles são a origem, a base e ao mesmo tempo um modelo para a minha vida. Estrutura esta, que me permitiu concluir com êxito o curso de Engenharia.

### Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por estar presente na minha vida e a São Jorge pela proteção e força que possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradeço também ao corpo docente da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que me proporcionou um ensino de excelência. Especialmente ao professor Richard M. Stephan, meu orientador no curso de Engenharia, cuja a paciência e ensinamentos ficarão para sempre na minha memória.

Destaco ainda a participação do professor Rubens Andrade e do Dr. Sc. Guilherme Sotelo, cujos conselhos, opiniões e orientações possibilitaram a conclusão deste trabalho.

Não poderia esquecer da participação fundamental da equipe do LASUP que propiciou um ambiente agradável de amizade e cooperação.

Aos amigos de faculdade pela amizade e companheirismo, fundamentais na superação das dificuldades desta jornada, meus sinceros agradecimentos.

Resumo do projeto final apresentado ao DEE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

#### Controle da Posição de uma Esfera em um Sistema de Levitação Eletromagnética

Douglas Jorge Peixoto de Sousa Mota

Setembro / 2008

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Este trabalho descreve o projeto e a implementação de um sistema de levitação eletromagnética no qual uma esfera de material ferromagnético é mantida em posição controlada de um eletroímã. Este sistema retrata os princípios básicos da levitação magnética utilizada em trens MAGLEV.

No capítulo 1, serão apresentados os principais tipos de levitação magnética e suas aplicações.

O capítulo 2 aborda conceitos da Engenharia, Física e Matemática aplicados na modelagem do levitador eletromagnético.

No capítulo 3, serão descritos os passos para a obtenção de um modelo dinâmico que permita o controle da levitação.

No capítulo 4, serão tratados os aspectos que envolvem o controlador, como projeto, implementação e ajuste dos ganhos.

No capítulo 5, será analisado o desempenho transitório do sistema de controle. Como parâmetro será utilizada a resposta ao degrau do sistema. Através desta será obtido um modelo para a planta de conversão eletromecânica.

Finalmente, no capítulo 6, são discutidas questões sobre o desenvolvimento de um controlador para tal sistema observadas durante a confecção deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros

# Sumário

1.Introdução	1
1.1.Métodos de Levitação Magnética	1
1.1.1 Levitação Eletrodinâmica	1
1.1.2 Levitação Supercondutora	2
1.1.3 Levitação Eletromagnética	3
1.2.Objetivo	4
2.Revisão Teórica	5
2.1.Sistemas Eletromecânicos	5
2.1.1Balanço de Energia	5
2.2.Série de Taylor	
3.Modelagem	10
3.1.Descrição do sistema	10
3.2.Modelo dinâmico	11
3.3.Cálculo dos parâmetros do modelo	
3.4.Sensor de corrente	14
3.5.Sensor de posição	16
4.Controlador	19
4.1.Projeto	19
4.2. Implementação	
4.2.1Circuito de imposição de corrente	23

5.Análise do desempenho	
5.1.Resposta ao degrau do sistema realimentado	
5.2.Obtenção do modelo a partir da malha fechada	
5.3.Parcela de amortecimento	
6.Conclusão	
Referências	
A. Folha de dados do sensor ultrasônico	

# Lista de Figuras

1.1 : Protótipo de trem de levitação do LASUP	3
1.2 : Esfera em levitação	4
2.1 : Fluxo de energia em sistemas eletromecânicos com entrada de energia elétrica	6
2.2 : Sistema eletromecânico modelado por um sistema conservativo somado à energia	
perdida: (a) perdas na saída ; (b) perdas na entrada	6
3.1 : Desenho do eletroímã	11
3.2 : Referencial adotado para o sistema eletromecânico	11
3.3 : Característica da força eletromagnética	13
3.4 : Curva de ganho do circuito de imposição de corrente	15
3.5 : Sensor de posição	16
3.6 : Curva de ganho do sensor de posição	18
3.7 : Derivada do polinômio de ajuste do sinal de saída do sensor de posição	18
4.1 : Diagrama do lugar das raízes do sistema com controlador PD	19
4.2 : Diagrama de blocos do sistema de controle de posição	20
4.3 : Diagrama de lugar das raízes para o sistema com controlador LEAD	20
4.4 : Resposta ao degrau do sistema controlado pelo LEAD, em malha fechada	21
4.5 : Diagrama de blocos do simulink	22
4.6 : Resultado da medição do gap do sistema em funcionamento	22
4.7 : Esquema de ligação do conversor CC-CC para imposição de corrente	23
4.8 : Corrente de saída do conversor CC-CC para referência constante	24
4.9 : Corrente de saída do conversor CC-CC para referência senoidal	25

5.1 : Resposta aos degraus positivos e negativos do sistema realimentado	.26
5.2 : Ajuste das respostas aos degraus positivos e negativos do sistema realimentado	.28
5.3 : Diagrama de blocos do sistema considerando que a planta tenha dois pólos reais	
assimétricos	. 29
5.4 : Comparação entre a resposta simulada e os dados experimentais	.32

# Lista de Tabelas

3.1: Ganhos obtidos das curvas de força para $x_0 = 12 mm$	. 14
3.2: Dados experimentais do teste com o circuito de imposição de corrente	. 15
3.3: Dados experimentais do teste com o sensor de posição	17
4.4: Parâmetros do controlador LEAD	. 21
5.5: Resposta ao degrau	. 28
5.6: Parâmetros do modelo obtidos pela resposta ao degrau	. 31
5.7: Variação de $K_{\nu}$ em função da posição	. 33
5.8: Comparação entre os parâmetros dos modelos obtidos analiticamente e	
experimentalmente $x_0 = 12 mm$	. 34
5.9: Comparação entre os pólos dos modelos obtidos analiticamente e	
experimentalmente $x_0 = 12 mm$	.34

### 1. Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar ao leitor os principais métodos de levitação magnética e suas aplicações. Também serão comentados os princípios físicos envolvidos de cada método e apresentado o objetivo da realização deste trabalho.

#### 1.1. Métodos de Levitação Magnética

O princípio básico da levitação magnética é produzir forças de campo capazes de sustentar um corpo sem nenhum contato físico. A aplicação desta levitação é interessante em casos onde a eliminação do atrito mecânico é vantajosa, por exemplo em meios de transporte. A eliminação das rodas em trens de levitação propiciam maiores velocidades de deslocamento com um gasto menor de energia. Outra aplicação da levitação está na utilização de mancais magnéticos em motores, permitindo um aumento em sua velocidade de rotação.

Os sistemas de levitação magnética são divididos em 3 categorias:

- Levitação Eletrodinâmica
- Levitação Supercondutora
- Levitação Eletromagnética

#### 1.1.1 Levitação Eletrodinâmica

Os sistemas de levitação eletrodinâmica baseiam-se na força produzida da velocidade relativa entre um campo magnético e um condutor. Um corpo que de alguma forma possui um campo magnético, aqui chamado campo gerado, é colocado em movimento próximo a um material condutor. Com o movimento, o material condutor é submetido a uma variação de fluxo magnético. De acordo com a Lei de indução de Faraday [1], esta variação

induz uma tensão e conseqüentemente circulam correntes parasitas no material condutor.

De acordo com a Lei de Lenz [1], as correntes produzem um campo magnético que irá se opor ao campo gerado. Da interação entre os campos magnéticos surgirá uma força responsável pela levitação do corpo que possui o campo gerado.

Este tipo de levitação é a proposta do trem japonês (MAGLEV japonês [2]). Uma desvantagem, é a alta velocidade que o veículo precisa apresentar para levitar, sendo necessário um sistema com rodas que conduzirá o veículo até a velocidade de levitação semelhante ao trem de pouso em aviões. A vantagem é o custo dos materiais condutores em comparação com materiais supercondutores ou ímãs permanentes.

#### 1.1.2 Levitação Supercondutora

Os sistemas de levitação supercondutora estão baseados no efeito Meissner de exclusão de campo magnético no interior dos materiais supercondutores [3].

Neste tipo de levitação é necessária a presença de uma fonte de campo magnético como no caso eletrodinâmico. O material supercondutor do tipo II ( tipo em que a exclusão do campo é parcial ) é resfriado até sua temperatura crítica na presença de campo. Ao entrar no estado supercondutor, o material aprisiona algumas linhas de campo como se fixasse ao próprio.

O LASUP (Laboratório de Aplicações de Supercondutores na UFRJ) trabalha no desenvolvimento de equipamentos que utilizem este tipo de levitação. Um dos projetos do laboratório é um protótipo de trem de levitação em escala reduzida que possui um circuito fechado de circulação de 30 metros, figura 1.1.



Figura 1.1 : Protótipo de trem de levitação do LASUP.

www.dee.lasup.ufrj.br

A grande vantagem deste tipo de levitação é a estabilidade conseguida de forma natural dependente dos materiais. A levitação supercondutora não depende da velocidade do veículo como no caso eletrodinâmico e nem de sistemas de controle para a levitação.

#### 1.1.3 Levitação Eletromagnética

A levitação eletromagnética explora a atração entre um eletroímã e um material ferromagnético. Um campo magnético é gerado através de um eletroímã, a força produzida é controlada por um sistema em malha fechada para manter a levitação. Este trabalho trata da levitação eletromagnética onde o campo é controlado digitalmente para manter uma esfera metálica levitando, figura 1.2.



Figura 1.2 : Esfera em levitação.

A desvantagem deste tipo de levitação é a necessidade de uma malha de controle monitorando a posição da esfera e a utilização de fontes elétricas atuando no sistema.

### 1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto de controle da posição de uma esfera em um sistema de levitação magnética, tratando dos aspectos da modelagem do sistema eletromecânico e comparando os resultados experimentais e simulados, sobre o desempenho transitório do sistema em malha fechada.

O problema da levitação de uma esfera foi estudado anteriormente no LASUP por Gomes [4, 5, 6]. Naquela oportunidade o sensor de posição utilizado foi ótico, o controle analógico e a esfera de pequeno peso aproveitada de um *mouse*. No presente projeto, um eletroímã foi especialmente projetado e construído para suportar uma esfera de 359 g, o sensor utilizado foi ultrasônico e o controle implementado digitalmente, o que conferiu ao sistema um apelo demonstrativo mais adequado para exposições, como a que se pretende colocar no Espaço Coppe de Tecnologia e Desenvolvimento Humano.

### 2. Revisão Teórica

Neste capítulo, serão apresentados conceitos da Engenharia, Física e Matemática aplicados na modelagem do levitador eletromagnético.

### 2.1. Sistemas Eletromecânicos

#### 2.1.1 Balanço de Energia

Com base no Princípio da Conservação de Energia [7], obtêm-se a equação do balanço de energia para sistemas eletromecânicos:

$$W_{ele} = W_{mec} + W_{cmp} + W_{perda}$$
(2.1)

onde  $W_{ele} \rightarrow$  Energia elétrica.

 $W_{mec} \rightarrow$  Energia mecânica.

 $W_{cmp} \rightarrow$  Energia armazenada no campo magnético ou elétrico.

 $W_{perda} \rightarrow$  Energia perdida na forma de calor.

A energia perdida na forma de calor possui diferentes origens, como histerese do material devido à variação do campo (magnético ou elétrico), passagem da corrente elétrica e atrito mecânico. A figura 2.1 apresenta o fluxo de energia.

O sistema real pode ser representado por um sistema conservativo somado as suas perdas. Matematicamente estas perdas podem ser deslocadas para a entrada ou saída como apresentado na figura 2.2.



Figura 2.1 : Fluxo de energia em sistemas eletromecânicos com entrada de energia elétrica.



Figura 2.2 : Sistema eletromecânico modelado por um sistema conservativo somado à energia perdida: (a) perdas na saída ; (b) perdas na entrada.

A consideração do sistema como conservativo é vantajosa, pois a energia torna-se uma função dependente apenas dos estados iniciais e finais do processo. A diferencial de energia elétrica, equação (2.4), pode ser escrito como uma função da corrente i e do fluxo enlaçado  $\lambda$  utilizando as expressões para a potência elétrica e a Lei de Faraday, equações (2.2) e (2.3) respectivamente.

$$\frac{d W_{ele}}{dt} = ei \tag{2.2}$$

$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$
(2.3)

$$d W_{ele} = i d \lambda \tag{2.4}$$

Dispositivos de conversão eletromagnética possuem um espaçamento entre os materiais ferromagnéticos, denominado *gap*. A permeabilidade magnética do ar é muito menor que a dos materiais ferromagnéticos. Devido a isto, pode-se assumir que a relutância do sistema é a própria relutância do *gap*. Como a distribuição espacial de  $\lambda$  é dependente desta relutância pode-se dizer que a força é função da dimensão *x* do *gap* para o caso unidimensional. Com isso, a diferencial de energia mecânica pode ser definido como:

$$d W_{mec} = f \, d \, x \tag{2.5}$$

Com base nas equações (2.4) e (2.5), pode-se escrever a diferencial de energia armazenada no campo magnético:

$$d W_{cmp} = i d \lambda - f d x \tag{2.6}$$

O sistema é conservativo, portanto  $W_{cmp}$  é definido pelos valores de estado de  $\lambda$  e x. Para encontrar equações que permitam o cálculo de f e i, compara-se a equação de  $dW_{cmp}$  com a diferencial total de uma função de duas variáveis, descrito na equação (2.7). Desta comparação resultam as equações (2.8) e (2.9).

$$d F(x_{1,}x_{2}) = \frac{\partial F}{\partial x_{1}} d x_{1} + \frac{\partial F}{\partial x_{2}} d x_{2}$$
(2.7)

$$\frac{\partial W_{cmp}(\lambda, x)}{\partial \lambda} = i$$
(2.8)

$$\frac{\partial W_{cmp}(\lambda, x)}{\partial x} = -f \tag{2.9}$$

Como  $\lambda$  depende da corrente e da posição, verifica-se da equação (2.9), que a força magnética, é uma função da corrente e da posição.

#### 2.2. Série de Taylor

A série de Taylor é utilizada para estudar o comportamento de uma função na vizinhança de um determinado ponto. O desenvolvimento da série para uma função f(x) no ponto x=a é dado por:

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n$$
(2.10)

O Teorema de Taylor pode ser aplicado também a funções com duas variáveis independentes, f(x,y) na vizinhança de um ponto P(a,b). Para isso, é considerada uma reta  $\overline{PQ}$ , sendo Q(a+h,b+k), com todos os pontos pertencentes à vizinhança de P. As coordenadas da reta  $\overline{PQ}$  podem ser expressas por um parâmetro t, da seguinte forma:

$$x = a + ht$$
,  $y = b + kt$ ,  $0 \le t \le 1$  (2.11)

A equação (2.12) representa todos os pontos sobre a reta  $\overline{PQ}$ .

$$F(t) = f(a+ht, b+kt)$$
(2.12)

Aplicando o teorema de Taylor à F(t) para t=0, restringindo a série ao

termo de primeira ordem, tem-se que:

$$F(t) = F(0) + tF'(0)$$
(2.13)

Para o caso particular onde t=1, a equação (2.13) pode ser escrita como:

$$F(1) = F(0) + F'(0)$$
(2.14)

$$F'(t) = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} = h \frac{\partial f}{\partial x} + k \frac{\partial f}{\partial y}$$
(2.15)

A derivada de F(t) está expressa em (2.15). Os termos F(1) e F(0) que compõem a expansão da equação (2.13) são obtidos através da substituição do valor de tem (2.12). Em resumo, a expansão da série de Taylor para f(x, y) na vizinhança do ponto P(a,b) é dada por:

$$f(a+h,b+k) = f(a,b) + h\frac{\partial f}{\partial x} + k\frac{\partial f}{\partial y}$$
(2.16)

O desenvolvimento para os termos de ordens maiores pode ser encontrado em Thomas [8].

### 3. Modelagem

Em qualquer projeto de engenharia é necessária a utilização de modelos matemáticos para prever o comportamento do processo a ser realizado. Neste capítulo, serão descritos os passos para a obtenção de um modelo dinâmico que permita o controle da levitação.

### 3.1. Descrição do sistema

O sistema eletromecânico é constituído por um eletroímã, responsável pela produção da força magnética, e um objeto levitante de material ferromagnético. Uma bobina de fios de cobre inserida em um copo de material ferromagnético forma o eletroímã, como apresentado na figura 3.1. O enrolamento da bobina foi projetado para suportar uma corrente de até 4A. O objeto levitante é uma esfera, com raio r=2,2 cm e massa m=359g.

Para diferentes *gaps* entre a esfera e o eletroímã existe uma corrente  $i_0$ correspondente a força capaz de compensar o peso da esfera na posição de equilíbrio  $x_0$ . O modelo utilizado é um SLIT do tipo SISO [9], representado por uma função de transferência na qual entrada e saída são as variações  $\Delta i$  e  $\Delta x$ , respectivamente.

A corrente i é imposta ao eletroímã por um conversor CC-CC em ponte com controle de corrente. Detalhes sobre este atuador podem ser encontrados na seção 4.2.1.



Figura 3.1 : Desenho do eletroímã.

### 3.2. Modelo dinâmico

Em  $x_0$  o somatório da forças é igual a zero. Supondo um pequeno deslocamento da esfera  $\Delta x$ , como apresentado na figura 3.2, pode-se escrever a equação da força resultante como:

$$m\ddot{x} = mg - F_{mag} \tag{3.1}$$

onde  $m \rightarrow$  Massa da esfera.

 $g \rightarrow$  Aceleração da gravidade.

 $F_{mag} \rightarrow$  Força magnética produzida pelo eletroímã.



Figura 3.2 : Referencial adotado para o sistema eletromecânico.

Na seção 2.1, está demonstrado que a força magnética é dependente da corrente e do *gap*. No caso da esfera, não é possível obter uma expressão analítica para a força devido a geometria complexa, porém aplicando a expansão em série de Taylor como apresentada na equação (2.16), para o ponto de equilíbrio  $(x_0, i_0)$ , tem-se que:

$$F_{mag}(x_0 + \Delta x, i_0 + \Delta i) = F_{mag}(x_0, i_0) + \Delta x \frac{\partial F_{mag}}{\partial x}(x_0, i_0) + \Delta i \frac{\partial F_{mag}}{\partial i}(x_0, i_0)$$
(3.2)

Nota-se que de acordo com referencial adotado, para um  $\Delta x > 0$  a  $F_{mag} \downarrow$  e para um  $\Delta i > 0$  a  $F_{mag} \uparrow$ . Pode-se concluir então que:

$$F_{mag}(x_{0,}i_{0}) = mg \quad , \quad \frac{\partial F_{mag}}{\partial x}(x_{0,}i_{0}) = -K_{x} \quad , \quad \frac{\partial F_{mag}}{\partial i}(x_{0,}i_{0}) = K_{i} \quad , \tag{3.3}$$

e de forma simplificada reescrever a equação (3.2) :

$$F_{mag} = mg - K_x \Delta x + K_i \Delta i \tag{3.4}$$

Por definição  $\Delta x = x - x_0$ , então  $\ddot{\Delta x} = \ddot{x}$ . A partir deste ponto,  $\Delta x$  e  $\Delta i$  serão denominados simplesmente por x e i. A equação (3.5) representa a dinâmica do sistema eletromecânico.

$$m\ddot{x} - K_{x}x = -K_{i}i \tag{3.5}$$

Aplicando a transformada de Laplace à equação acima, tem-se:

$$G(S) = \frac{X(S)}{I(S)} = \frac{-K_i}{ms^2 - K_x}$$
(3.6)

Os pólos da função (3.6) são reais, devido a  $K_x > 0$ .

$$s = \pm \sqrt{\frac{K_x}{m}}$$
(3.7)

12



3.3. Cálculo dos parâmetros do modelo.

Figura 3.3 : Característica da força eletromagnética.

Através da medição de f pode-se obter as curvas características do sistema eletromecânico em função de i e x. A figura 3.3 apresenta as medidas realizadas no Instituto Militar de Engenharia [10].

Escolhendo um ponto no cruzamentos da retas  $x_0=12 mm$  e F=3,59 N na figura 3.3 pode-se obter as constantes  $K_x$  e  $K_i$ . A derivada no ponto de operação  $x_0$  é  $K_x$  e a razão entre a variação da força pela variação da corrente é  $K_i$ . A tabela 3.1 apresenta os valores calculados para  $K_i$  e  $K_x$ .

$K_x(N/m)$	$K_i(N/A)$
559,25	2,25

Tabela 3.1: Ganhos obtidos das curvas de força para  $x_0 = 12 \text{ mm}$ .

#### 3.4. Sensor de corrente

O sensor de corrente utiliza o efeito Hall, produção de um campo elétrico em materiais condutores devido a interação da corrente elétrica com o campo magnético. Em 1879 Edwin Hall mostrou que elétrons de condução podem ser defletidos por um campo magnético [1]. Desta forma, o efeito Hall permite que a intensidade e direção da corrente sejam determinadas.

Dada uma corrente elétrica circulando em um material condutor achatado, onde é aplicado um campo magnético perpendicular a esta corrente, surge uma força que desloca os portadores de cargas para um dos lados do material. O acúmulo de cargas em um dos lados produz um campo elétrico. Desta forma, existe uma diferença de potencial interna à tira condutora. O sinal e intensidade desta ddp são utilizados para determinar o sentido e intensidade da corrente elétrica.

No caso do levitador eletromagnético, a corrente é imposta no indutor a partir de um sinal de controle. É importante conhecer qual a relação entre a corrente elétrica imposta ao eletroímã e o sinal de controle. Esta relação é denominada  $K_c$ .

Os dados do teste com o sistema de imposição de corrente estão descritos na tabela 3.2 e apresentados na figura 3.4.



Figura 3.4 : Curva de ganho do circuito de imposição de corrente.  $K_c = 2,025 \ A/V$ .

Tabela 3.2: Dados experimentais do teste com o circuito de imposição de corr
--

Sinal de controle (V)	Corrente no eletroímã (A)
0,00	0,00
0,20	0,38
0,40	0,79
0,60	1,17
0,80	1,57
1,00	1,97
1,20	2,38
1,40	2,78
1,60	3,19
1,80	3,61
2.00	4.08

### 3.5. Sensor de posição



Figura 3.5 : Sensor de posição.

O sensor de posição ultrasônico S18UUARQ do fabricante *Banner* (figura 3.5) é capaz de inferir a distância de um objeto até seu alvo, através da medição do intervalo de tempo em que ondas ultrasônicas trafegam por esta distância. Essas ondas possuem alta freqüência, o que permite uma resposta rápida do sensor. A vantagem do componente ultrasônico em comparação com um ótico é a possibilidade de cobrir uma faixa de deslocamento, tornando possível a realização de testes no sistema fora da posição de equilíbrio. Pode-se aplicar, por exemplo, referências senoidais ou obter a resposta ao degrau do sistema à malha fechada.

Este sensor em particular permite o ajuste das distâncias máxima e mínima para medição. A configuração automática de sua saída é 0V para mínima e 10V para máxima. Os pontos obtidos durante o teste para o cálculo do ganho do sensor de posição estão apresentados na tabela 3.3.

Saída do sensor de posição (V)
0,00
0,00
0,87
1,52
3,26
4,48
5,53
6,68
8,02
9,18
9,96
9,96

Tabela 3.3: Dados experimentais do teste com o sensor de posição.

Os dados experimentais podem ser ajustados por um polinômio de grau n, neste caso n=7. O objetivo deste ajuste é encontrar a região linear do sensor para o cálculo do ganho. O ajuste polinomial está apresentado na figura 3.6.

A região linear é obtida pela observação da derivada do polinômio de ajuste, figura 3.7. A parte da curva que varia em torno de um valor constante é a região linear que no gráfico se encontra limitada por retas vermelhas.

O valor de  $K_{POS}$  é resultado da aproximação dos pontos pertencentes à região linear por uma reta, através do método dos mínimos quadrados.



Figura 3.6 : Curva de ganho do sensor de posição.  $K_{POS} = 226,2 \ V/m$ .



Figura 3.7 : Derivada do polinômio de ajuste do sinal de saída do sensor de posição. Região linear 18 mm < x < 40 mm.

## 4. Controlador

Neste capítulo serão tratados os aspectos que envolvem o controlador, como projeto, implementação e ajuste dos ganhos.

### 4.1. Projeto

O projeto foi baseado no diagrama de lugar das raízes do sistema. A figura 4.2 apresenta o diagrama de bloco de todo o sistema.



Figura 4.1 : Diagrama do lugar das raízes do sistema com controlador PD.

Como pode ser observado no diagrama de lugar das raízes, figura 4.1, um controlador PD estabiliza o sistema. Entretanto este controlador possui a característica de amplificar a parte ruidosa do erro. Para contornar tal problema um pólo é adicionado, de forma a limitar o ganho para sinais de alta freqüência. Este tipo de controlador é conhecido como LEAD, equação (4.1).

Figura 4.2 : Diagrama de blocos do sistema de controle de posição.

Os parâmetros do controlador LEAD foram sintonizados com o objetivo de tornar o sistema realimentado predominantemente de primeira ordem. O diagrama de lugar das raízes e a resposta ao degrau do sistema estão demonstrados nas figuras 4.3 e 4.4 respectivamente. Os valores dos parâmetros estão relacionados na tabela 4.4.



Figura 4.3 : Diagrama de lugar das raízes para o sistema com controlador LEAD.



Figura 4.4 : Resposta ao degrau do sistema controlado pelo LEAD, em malha fechada.

К <sub>р</sub>	-0,7550
$T_d$	0,0333
α	0,3754

Tabela 4.4: Parâmetros do controlador LEAD.

#### 4.2. Implementação

O controlador foi implementado digitalmente utilizando uma ferramenta do software *Matlab*, o *Real-Time Windows Target* do *simulink*, e a placa para aquisição de dados da *Advantech*, PCI-1711. Além do controlador de posição LEAD, a lógica de disparo das chaves do conversor CC-CC (responsável pela imposição da corrente) foi colocada internamente no programa. Outros comparadores foram adicionados por questões de segurança para evitar que a corrente atingisse valores muito altos em caso de queda da esfera. A figura 4.5 apresenta o digrama de blocos do *simulink*. Os intervalos de aquisição para os sinais de posição e corrente são 1ms e  $66,7\mu s$ , respectivamente.



Figura 4.5 : Diagrama de blocos do simulink.

Na prática, o ganho  $K_p$  do controlador teve que ser ajustado para o valor  $K_p = -0.65$ , afim de garantir a estabilidade. A figura 4.6 mostra o sinal medido referente à posição da esfera.



Figura 4.6 : Resultado da medição do gap do sistema em funcionamento.

#### 4.2.1 Circuito de imposição de corrente

O circuito de imposição de corrente é constituído de um conversor CC-CC em ponte. Como o sentido da corrente é sempre o mesmo, o conversor possui duas chaves ao invés de quatro do conversor *Full-Brige* convencional [11], como demonstra a figura 4.7.



Figura 4.7. Esquema de ligação do conversor CC-CC para imposição de corrente.

A alimentação do conversor vem de um retificador de onda completa com um filtro capacitivo. A carga do conversor pode ser considerada um reator com indutância variável de acordo com a posição da esfera. Como observado na figura 4.7, se as chaves A e B estiverem fechadas, a tensão aplicada sobre a carga  $V_L = V_{CC}$ , aumentando a corrente. Quando as chaves são abertas, a corrente no indutor circula pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$  devolvendo a energia para fonte. A tensão na carga neste caso vale  $V_L = -V_{CC}$ , reduzindo a

intensidade de corrente no eletroímã. O controle das chaves é feito de uma forma que o indutor seja carregado e descarregado seguindo uma corrente de referência. Se  $i_{med} < i_{ref}$ , as chaves A e B são fechadas e no caso contrário são abertas. Para que a comutação das chaves não ocorra em uma freqüência muito alta, o sinal de controle das chaves é enviado em intervalos fixos de tempo. As figuras 4.8 e 4.9 apresentam o sinal da corrente para uma referência constante e senoidal, respectivamente.



Figura 4.8 : Corrente de saída do conversor CC-CC para referência constante.



Figura 4.9 : Corrente de saída do conversor CC-CC para referência senoidal.

O ripple do sinal, oscilação em torno do valor de referência, pode ser reduzido com uma freqüência de chaveamento maior ou redução na tensão CC do conversor. O aumento da freqüência é limitado pelo sistema digital utilizado. A tensão de alimentação mínima corresponde à mínima corrente aplicável ao eletroímã capaz de produzir a levitação.

### 5. Análise do desempenho

Neste capítulo, serão tratados aspectos do desempenho transitório do sistema de controle. Como parâmetro será utilizada a resposta ao degrau do sistema. Através desta é possível obter um modelo para a planta de conversão eletromecânica.

### 5.1. Resposta ao degrau do sistema realimentado

Um sinal degrau de pequena amplitude foi aplicado ao sistema realimentado estável, com o compensador descrito no capítulo 4. A amplitude do degrau deve ser suficientemente pequena, para que o comportamento transitório do sistema possa ser igual tanto para uma variação positiva quanto negativa. Isso foi conseguido experimentalmente com uma amplitude A=0,22 mm, o que corresponde a um sinal de 0,05 V na entrada do sistema.



Figura 5.1 : Resposta aos degraus positivos e negativos do sistema realimentado.

Pode-se perceber que a resposta ao degrau do sistema realimentado (figura 5.1) é sub-amortecida, diferente da considerada na fase de projeto do controlador, figura 4.4. Este fato, leva a conclusão que o modelo utilizado pode ser melhorado afim de permitir um maior controle das características transitórias do sistema.

O *software Matlab* possui uma ferramenta especial para análise e ajuste de curvas chamada *cftool*. Dada uma expressão matemática que aproxima o comportamento da curva, esta ferramenta permite calcular os valores de suas constantes. Para o ajuste foi utilizada a resposta no tempo de um sistema de segunda ordem sub-amortecido para uma entrada degrau, equação (5.1). A função de transferência de um sistema de segunda ordem sub-amortecido está apresentada na equação (5.2).

$$y(t) = A \left( 1 + e^{-\sigma t} \sin(\omega_d t) + \frac{\sigma}{\omega_d} e^{-\sigma t} \cos(\omega_d t) \right)$$
(5.1)

$$G(s) = \frac{A}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi s}{\omega_n} + 1} , \quad 0 < \xi < 1$$
(5.2)

onde  $\sigma = \xi \omega_n$  e  $\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n$ 

Os resultados experimentais para os degraus positivos e negativos foram ajustados pelos parâmetros da equação (5.1). A figura 5.2 mostra a comparação entre os ajustes e os pontos experimentais. De acordo com a tabela 5.5 os valores de A,  $\xi \in \omega_n$  apresentam variações menores que 10% entre as respostas aos degraus positivo e negativo.



Figura 5.2 : Ajuste das respostas aos degraus positivos e negativos do sistema realimentado.

Parâmetros da Resposta	Resposta positiva	Resposta negativa	Valor médio	Razão entre resposta positiva e resposta negativa
A (V/V)	0,2099	0,1976	0,2037	1,063
ξ	0,2350	0,2385	0,2367	0,985
$\omega_n(rad/s)$	28,48	30,69	29,58	0,928

Tabela 5.5: Resposta ao degrau.

# 5.2. Obtenção do modelo a partir da malha fechada



Figura 5.3 : Diagrama de blocos do sistema considerando que a planta tenha dois pólos reais assimétricos.

Considere que a planta do levitador possua dois pólos reais assimétricos na forma:

$$\frac{K}{\left(\frac{s}{\sigma_1}+1\right)\left(\frac{s}{\sigma_2}-1\right)}\tag{5.3}$$

O controlador utilizado para estabilizar a planta é do tipo LEAD, como apresentado no capítulo 4. A função de transferência do LEAD para ganho unitário é dada por:

$$\left(\frac{\left(\frac{s}{z}+1\right)}{\left(\frac{s}{p}+1\right)}\right)$$
(5.4)

A partir do diagrama de blocos apresentado na figura 5.3, pode-se encontrar uma função de transferência que represente a malha fechada, dada por:

$$\frac{\frac{K}{K-1}\left(\frac{s}{z}+1\right)}{\frac{1}{\sigma_{1}\sigma_{2}p(K-1)}s^{3}+\frac{\left[\left(\frac{1}{\sigma_{2}}-\frac{1}{\sigma_{1}}\right)\frac{1}{p}+\frac{1}{\sigma_{1}\sigma_{2}}\right]}{(K-1)}s^{2}+\frac{\left(\frac{1}{\sigma_{2}}-\frac{1}{\sigma_{1}}-\frac{1}{p}+\frac{K}{z}\right)}{(K-1)}s+1}$$
(5.5)

Os resultados experimentais discutidos na seção anterior permitem concluir que o sistema realimentado possui pólos dominantes complexos, como na equação abaixo:

$$\frac{K_{MF}\left(\frac{s}{z}+1\right)}{\left(\frac{s}{\alpha}+1\right)\left(\frac{s^{2}}{\omega_{n}^{2}}+\frac{2\xi s}{\omega_{n}}+1\right)}$$
(5.6)

Realizando as multiplicações no denominador da equação (5.6), tem-se que:

$$\frac{K_{MF}\left(\frac{s}{z}+1\right)}{\frac{1}{\alpha \omega_n^2} s^3 + \left(\frac{1}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n \alpha}\right) s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_n} + \frac{1}{\alpha}\right) s + 1}$$
(5.7)

As equações (5.5) e (5.7) representam o mesma planta de controle, portanto devem ser iguais. Desta comparação, surge um sistema de equações apresentado nas equações (5.8)a-d.

(a) 
$$K_{MF} = \frac{K}{K-1}$$
(5.8)  
(b)  $\alpha \omega_n^2 = \sigma_1 \sigma_2 p (K-1)$   
(c)  $\left(\frac{1}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n \alpha}\right) (K-1) = \left[\left(\frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_1}\right) \frac{1}{p} + \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2}\right]$   
(d)  $\left(\frac{2\xi}{\omega_n} + \frac{1}{\alpha}\right) (K-1) = \left(\frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{p} + \frac{K}{z}\right)$ 

Nota-se que os valores de z e p são dados do controlador e  $K_{MF}$ ,  $\omega_n$ e  $\xi$  são obtidos experimentalmente. Serão incógnitas neste sistema de equações as variáveis  $\alpha$ ,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ .

Parâmetros do Modelo	Resposta Negativa	Resposta Positiva	Valor médio	Razão entre resposta positiva e resposta negativa
K(V/V)	1,313	1,339	1,326	0,980
$\sigma_1(rad ls)$	26,27	26,62	26,44	0,987
$\sigma_2(rad/s)$	51,31	52,08	51,69	0,985

Tabela 5.6: Parâmetros do modelo obtidos pela resposta ao degrau.

De acordo com a tabela 5.6, os valores de K,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  apresentam variações menores que 2% entre as respostas aos degraus positivo e negativo. Devido à pequena variação, pode-se utilizar os valores médios dos parâmetros no modelo do sistema, equação (5.9). Na seção 3.2, foi discutido que o modelo dinâmico linear só poderia ser considerado válido para uma região próxima ao ponto de equilíbrio. O ponto de equilíbrio pode ser adotado como a média entre os valores de máximo e mínimo do *gap* durante a aplicação dos degraus. De acordo com a figura 5.1, o *gap* varia entre 10,5*mm* e 12,2*mm*. Com isso, resulta o ponto de equilíbrio  $x_0=11,35mm$ . Dado que a força produzida pelo eletroímã em regime permanente é igual ao peso da esfera, o ponto de cruzamento entre as retas  $x=x_0$  e F=P, na figura 3.3, é o ponto de operação.

$$\frac{1,326}{\left(\frac{s}{26,44}+1\right)\left(\frac{s}{51,69}-1\right)}$$
(5.9)

O ganho K é o ganho de malha aberta do sistema que inclui os fatores dos sensores. O modelo do levitador é dado por:



Figura 5.4 : Comparação entre a resposta simulada e os dados experimentais.

A figura 5.4 apresenta a comparação entre a resposta ao degrau simulada e medida. A reposta transitória é alterada devido a presença do zero do controlador LEAD, principalmente em relação ao sobrepasso, porém este modelo retrata melhor o comportamento do sistema em comparação com o modelo anterior.

#### 5.3. Parcela de amortecimento

Como observado na equação (5.10), pode-se reescrever as equações diferenciais na forma:

$$0,359\frac{d^2x}{dt^2} - 9,065\frac{dx}{dt} - 490,77\ x = -0,0045\ i$$
(5.11)

Este modelo possui um termo proporcional à velocidade  $K_v$ , conhecido como parcela de amortecimento. Pode-se imaginar que seja um efeito da resistência do ar ao movimento da esfera. Para uma melhor análise da origem deste termo, o mesmo procedimento descrito nas seções 5.1 e 5.2 ( obtenção do modelo a partir da reposta ao degrau da malha fechada ), foi realizado para outras três posições de equilíbrio.

A comparação entre os valores de  $K_{\nu}$  está apresentada na tabela 5.7.

	Valores médios				
<b>Posição de equilíbrio</b> x <sub>0</sub> mm	K(V/V)	$\sigma_1(radls)$	$\sigma_2(rad ls)$	$K_{v}(N.s/m)$	
8,94	1,428	25,57	58,21	11,719	
9,23	1,521	24,71	56,76	11,508	
11,35	1,326	26,44	51,66	9,065	
11,93	1,231	26,84	48,11	7,637	

Tabela 5.7: Variação de  $K_y$  em função da posição.

Estes valores permitem concluir que  $K_v$  é dependente da posição de equilíbrio, o que confirma que a resistência do ar não é responsável por este efeito e pode ser desprezada. Esta força é atribuída a variação brusca da indutância durante a aplicação do degrau.

Parâmetros do Modelo	Modelo Analítico	Modelo Experimental	Razão entre os parâmetros analíticos e experimentais
$K_i(N/A)$	2,25	1,94	1,160
$K_x(N/m)$	559,25	463,58	1,206
$K_v(N.s/m)$	-	7,637	-

Tabela 5.8: Comparação entre os parâmetros dos modelos obtidosanaliticamente e experimentalmente(r = 12mm)

Tabela 5.9: Comparação entre os pólos dos modelos obtidos analiticamente e experimentalmente  $(x_0=12 \text{mm})$ 

freqüência dos pólos	Modelo Analítico	Modelo Experimental	Razão entre os parâmetros analíticos e experimentais
$\sigma_i(rad/s)$	39,45	48,11	0,82
$\sigma_e(rad/s)$	-39,45	-26,84	1,47

A tabela 5.8 apresenta a comparação entre o modelo obtido analiticamente sem o termo de amortecimento e o modelo experimental, enquanto os pólos dos modelos estão apresentados na tabela 5.9. Estes diferem consideravelmente em relação a posição dos pólos, porém apresentam as mesmas características de um sistema de segunda ordem com pólos reais. Devido a estas diferenças não se atinge o desempenho transitório esperado para o projeto do sistema obtido analiticamente.

O lugar das raízes de um sistema de segunda ordem, equação (5.3), com pólos reais controlado por LEAD, equação (5.4), possui duas assíntotas ortogonais ao eixo real que se encontram no ponto  $\sigma_{ass}$ . O cálculo de  $\sigma_{ass}$  está apresentado na equação (5.12).

$$\sigma_{ass} = \frac{(\sigma_i - \sigma_e) - (p - z)}{n_p - n_z}$$
(5.12)

No modelo experimental  $\sigma_i > \sigma_e$ , logo  $\sigma_i - \sigma_e > 0$ . Apesar desta condição, é possível obter um controlador onde  $(p-z) > (\sigma_i - \sigma_e)$  garantindo desta forma que o ponto de encontro das assíntotas possua parte real negativa. Este fato comprova a existência de ganhos, que aplicados à malha aberta estabilizam o sistema.

Conclui-se que mesmo sem o conhecimento do termo de amortecimento, é possível apenas com as curvas de f obter um modelo cujo o projeto de controle estabilize o sistema.

### 6. Conclusão

Neste trabalho, procurou-se controlar a posição de uma esfera de metal demonstrando o funcionamento de um sistema de levitação eletromagnético. O mesmo princípio de levitação é utilizado em trens MAGLEV na Alemanha (Transrapid).

Um projeto de controle possui três partes principais: modelagem, análise e síntese. Este projeto apresentou três etapas: obtenção de um modelo a partir de curvas características da força magnética; projeto de um controlador do tipo LEAD, capaz de estabilizar o sistema; e retorno ao modelo para melhorá-lo, acrescentando uma parcela de amortecimento. Esta foi obtida através da reposta ao degrau da malha fechada.

É importante ressaltar, que para atingir a estabilidade não é necessário o conhecimento do termo de amortecimento. Basta identificar as curvas características da força eletromagnética. Este fato pôde ser observado nos capítulos 3 e 4.

Aplicando os conceitos descritos neste trabalho, é possível levitar também um disco que possui as equações de força magnética conhecidas e descritas analiticamente. Outro trabalho futuro para este tema é a implementação de um novo sistema de controle através da medição da corrente elétrica e do fluxo magnético. Apesar de mais complexo, este caso torna o sistema mais econômico devido a diferença de custo entre sensores mecânicos e sensores elétricos. Como o controle foi implementado digitalmente com o auxilio do *simulink*, a troca do computador por um microcontrolador tornaria o sistema portátil, o que representaria uma melhora nas características construtivas do projeto.

Este experimento tem sua importância por apresentar diversos aspectos que são abordados durante o curso de engenharia, como a parte de modelagem de um sistema físico, a aplicação da teoria de controle e a utilização de atuadores de eletrônica de potência. Além de sua característica didática, o tema levitação magnética gera curiosidade e admiração no público em geral, que o torna um produto em potencial.

A base teórica implementada neste sistema pode ser considerada uma introdução aos mancais magnéticos e motores-mancais, muito aplicados em máquinas especiais que necessitam excluir o atrito mecânico entre as partes girantes.

## Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick, K.S. Krane. *Física 3*. 5<sup>a</sup> Edição, LTC, 2004.
- [2] P.K. Sinha. *Electromagnetic Suspension*. IEE Control Engineering Series, England, 1987.
- [3] F.C. Moon. Superconducting Levitation. John Wiley and Sons, 1997.
- [4] R. R. Gomes. Um Experimento para Ilustrar o Sistema de Levitação Eletromagnética Utilizado em Trens Maglev. Projeto Final DEE/ UFRJ, 2004.
- [5] R. R. Gomes. Relatório de Estágio Supervisionado. DEE/ UFRJ, 2004.
- [6] R. M. Stephan, R. R. Gomes. Um experimento para ilustrar o sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens maglev. In. *Semana da Eletrônica 2003/ UFRJ*, volume 1, Rio de Janeiro, Agosto 2003.
- [7] A.E. Fitzgerald, C.J. Kinsley, S.D. Umans. *Eletric Machinery*. Mc Graw-Hill, 1992.
- [9] G.B. Thomas. Cálculo. Livro Técnico S.A., 1966.
- [10] K. Ogata. Modern Control Engineering. Prentice-Hall, Inc, 1997.
- [11] G.G. Farves, B. R. Sodré, R. M. Stephan, N. Bruno. Validação dos Resultados de Simulação por FEM para o Caso de Levitação Eletromagnética de uma Esfera. Jornada IC, UFRJ, 2007.
- [12] N. Mohan, T. M. Underland, W. P. Robbins. *Power Eletronics*. John Wiley and Sons, 1995.

# A. Folha de dados do sensor ultrasônico

<b>EFAININGER</b>	U-GAGE <sup>™</sup> S18U Series Sensors with Analog Output
more sensors, more solutions	18 mm Ultrasonic Sensors with TEACH-mode programming
	Features
	• Fast, easy-to-use TEACH-Mode programming; no potentiometer adjustments
Piaht Analo Housing	Short dead zone
	<ul> <li>Scalable output automatically distributes the output signal over the width of the programmed sensing window</li> </ul>
	Two bi-colored status LEDs
00	<ul> <li>Rugged encapsulated design for harsh environments</li> </ul>
Straight Housing	Choose 2 meter or 9 meter unterminated cable, or 5-pin Euro-style QD connector
	<ul> <li>Wide operating range of -20° to +60°C (-4° to +140°F)</li> </ul>



- Temperature compensation
- · Selectable response times of 2.5 or 30 ms
- · Select analog models with either 0-10V dc or 4-20 mA output



Models					
Model Number	Sensing Range	Cable*	Supply Voltage	Output	Housing Configuration
S18UUA		5-wire, 2 m (6.5') cable		0 to 10V do	
S18UUAQ		5-pin Euro style QD		01010040	Straight
S18UIA	S18UIA		10 to 201/ do	4 to 20 mA	
\$18UIAQ 30 to 300 mm		5-pin Euro style QD			
S18UUAR	\$18UUAR (1.2" to 11.8")		10 to 30V dc	0 += 401/ ==	
S18UUARQ		5-pin Euro style QD		0 to 10V ac	
S18UIAR		5-wire, 2 m (6.5') cable	]	4. 00 4	Right-Angle
S18UIARQ		5-pin Euro style QD		4 to 20 mA	

\* 9 m cables are available by adding suffix "W/30" to the model number of any cabled sensor (e.g., S18UUA W/30).

A model with a QD connector requires a mating cable; see page 10.

#### Information about discrete models is available on Banner's website: www.bannerengineering.com



#### WARNING . . . Not To Be Used for Personnel Protection

Never use these products as sensing devices for personnel protection. Doing so could lead to serious injury or death. These sensors do NOT include the self-checking redundant circuitry necessary to allow their use in personnel safety applications. A sensor failure or malfunction can cause either an energized or de-energized sensor output condition. Consult your current Banner Safety Products catalog for safety products which meet OSHA, ANSI and IEC standards for personnel protection.

#### Principles of Operation

Ultrasonic sensors emit one or multiple pulses of ultrasonic energy, which travel through the air at the speed of sound. A portion of this energy reflects off the target and travels back to the sensor. The sensor measures the total time required for the energy to reach the target and return to the sensor. The distance to the object is then calculated using the following formula:

 $D = \frac{ct}{2}$ 

To improve accuracy, an ultrasonic sensor may average the results of several pulses before outputting a new value.

#### Temperature Effects

The speed of sound is dependent upon the composition, pressure and temperature of the gas in which it is traveling. For most ultrasonic applications, the composition and pressure of the gas are relatively fixed, while the temperature may fluctuate.

In air, the speed of sound varies with temperature according to the following approximation:

#### Temperature Compensation

Changes in air temperature affect the speed of sound, which in turn affects the distance reading measured by the sensor. An increase in air temperature shifts both sensing window limits closer to the sensor. Conversely, a decrease in air temperature shifts both limits farther away from the sensor. This shift is approximately 3.5% of the limit distance for a 20° C change in temperature.

The S18U series ultrasonic sensors are temperature compensated. This reduces the error due to temperature by about 90%. The sensor will maintain its window limits to within 1.8% over the  $-20^{\circ}$  to  $+60^{\circ}$  C range.

#### NOTES:

- Exposure to direct sunlight can affect the sensor's ability to accurately compensate for changes in temperature.
- If the sensor is measuring across a temperature gradient, the compensation will be less effective.
- The temperature warmup drift upon power-up is less than 1.7% of the sensing distance. After 10 minutes, the apparent distance will be within 0.3% of the actual position. After 25 minutes, the sensing distance will be stable.

2 P/N 110738 rev. A



Figure 1. Sensor features

#### Sensor Programming

Two TEACH methods may be used to program the sensor:

- Teach individual minimum and maximum limits, or
- · Use Auto-Window feature to center a sensing window around the taught position.

The sensor may be programmed either via its push button, or via a remote switch. Remote programming also may be used to disable the push button, preventing unauthorized personnel from adjusting the programming settings. To access this feature, connect the gray wire of the sensor to 0 - 2V dc, with a remote programming switch between the sensor and the voltage.

NOTE: The impedance of the Remote Teach input is 12 kg.

0.04 seconds < T < 0.8 seconds

Programming is accomplished by following the sequence of input pulses (see programming procedures starting on page 4). The duration of each pulse (corresponding to a push button "click"), and the period between multiple pulses, are defined as "T":





Status Indicators				
Power ON/OFF LED Indicates				
OFF	Power is OFF.			
ON Red	Target is weak or outside sensing range.			
ON Green	Sensor is operating normally, good target.			
Output/Teach LED Indicates				
OFF	Target je outside window limite			

0FF	Target is outside window limits.
Yellow	Target is within window limits.
ON Red (solid)	In Teach Mode, waiting for first limit.
ON Red (flashing)	In Teach Mode, waiting for second limit.

### U-GAGE<sup>™</sup> S18U Series Sensor — Analog Output

#### **Teaching Minimum and Maximum Limits**

#### General Notes on Programming

- The sensor will return to Run mode if the first Teach condition is not registered within 120 seconds.
- After the first limit is taught, the sensor will remain in Program mode until the Teach sequence is finished.
- To exit Program mode without saving any changes, press and hold the programming push button > 2 seconds (before teaching the second limit). The sensor will revert to the last saved limits.

#### **Analog Output Slope:**

The U-GAGE S18U sensor may be programmed for either a positive or a negative output slope, based on which limit is taught first (see Figure 3). If the Near limit is taught first, the slope will be positive. If the Far limit is taught first, the slope will be negative. Banner's scalable output automatically distributes the output signal over the width of the programmed sensing window.

In the event of signal loss, the analog output goes to 3.6 mA or 0V dc, which may be used to trigger an alarm.



Figure 3. Analog output slope

	Pi	ocedure	
	Push Button 0.04 < "click" < 0.8 sec.	<b>Remote Wire</b> 0.04 sec. < T < 0.8 sec.	Result
Programming Mode	• Push and hold the push button	<ul> <li>No action required; sensor is ready for 1st limit teach</li> </ul>	Output LED: ON Red Power LED: ON Green (good signal) or ON Red (no signal)
Ŧ	<ul> <li>Position the target for the first limit</li> </ul>	• Position the target for the first limit	Power LED: Must be ON Green
Teach First Limit	• "Click" the push button	• Single-pulse the remote line	Teach Accepted (Sensor learns the OV dc or 4 mA limit) Output LED: Flashing Red Teach Unacceptable Output LED: ON Red
it	<ul> <li>Position the target for the second limit</li> </ul>	• Position the target for the second limit	Power LED: Must be ON Green
Teach Second Lin	• "Click" the push button	• Single-pulse the remote line	Teach Accepted (Sensor learns the 10V dc or 20 mA limit) Output LED: Yellow or OFF Teach Unacceptable Output LED: Flashing Red

#### Teaching Limits Using the Auto-Window Feature

Teaching the same limit twice for the same output automatically centers a 100 mm window on the taught position.

#### General Notes on Programming

- The sensor will return to Run mode if the first Teach condition is not registered within 120 seconds.
- After the first limit is taught, the sensor will remain in Program mode until the Teach sequence is finished.
- To exit Program mode without saving any changes, press and hold the programming push button > 2 seconds (before teaching the second limit). The sensor will revert to the last saved limits.
- Using this procedure the analog output will be centered on the taught position at approximately 5V dc or 12 mA.

	Pr	ocedure	
	Push Button         Remote Wire           0.04 < "click" < 0.8 sec.         0.04 sec. < T < 0.8 sec.		Result
Programming Mode	• Push and hold the push button	<ul> <li>No action required; sensor is ready for first limit teach</li> </ul>	Output LED: ON Red Power LED: ON Green (good signal) or ON Red (no signal)
ŧ	<ul> <li>Position the target for the center of the window</li> </ul>	<ul> <li>Position the target for the center of the window</li> </ul>	Power LED: Must be ON Green
Teach Lim	• "Click" the push button	• Single-pulse the remote line	Teach Accepted Output LED: Flashing Red Teach Unacceptable Output LED: ON Red
Re-Teach Limit	Without moving the target, target, "click" the push button again		Teach Accepted Output LED: Yellow or OFF Teach Unacceptable Output LED: Flashing Red

	Push Butto				
nables or disables the push button to prevent unauthorized adjustment of the program settings.					
	P				
	Push Button	Remote Wire 0.04 sec. < T < 0.8 sec.	Result		
Enable/Disable Push Button	• Not available via push button	• Four-pulse the remote line $- \underbrace{\mathbf{T}_{\mathbf{T}} \underbrace{\mathbf{T}_{\mathbf{T}} \underbrace{\mathbf{T}_{\mathbf{T}} \underbrace{\mathbf{T}_{\mathbf{T}}}}_{\mathbf{T}} \underbrace{\mathbf{T}_{\mathbf{T}}}_{\mathbf{T}}$	<ul> <li>Push buttons are either enabled or disabled, depending on previous condition.</li> </ul>		

Specifications				
Sensing Range	30 to 300 mm (1.2' to 11.8')			
Supply Voltage	10 to 30V dc (10% maximum ripple); 65	10 to 30V dc (10% maximum ripple); 65 mA max. (exclusive of load), 40 mA typical @ 25V input		
Ultrasonic Frequency	300 kHz, rep. rate 2.5 ms			
Supply Protection Circuitry	Protected against reverse polarity and tr	ansient voltages		
Output Configuration	Analog Output: 0 to 10V dc or 4 to 20 m	nA, depending on model		
Output Protection	Protected against short circuit condition	S		
Output Ratings	<ul> <li>Analog Voltage Output: 2.5 kΩ minimum load resistance Minimum supply for a full 10V output is 12V dc (for supply voltages between 10 and 12, V out max is at least V supply -2)</li> <li>Analog Current Output: 1 kΩ max @ 24V input Max load resistance = (Vcc-4)/0.02 ohms</li> <li>For current output (4-20 mA) models, ideal results are achieved when the total load resistance R = [(Vin - 3)/0.020]Ω. Example, at Vin = 24V dc, R ≈ 1 kΩ (1 watt). A worst-case shift of 1% of sensing distance is caused by operating the sensor at Vin = 30V dc and R = 0 Ω.</li> </ul>			
Output Response Time (for a 95% step change)	<ul> <li>2.5 milliseconds: Black wire at 5-30V d</li> <li>30 milliseconds: Black wire at 0-2V dc</li> <li>Consult factory for other response speed</li> </ul>	do (or open) d options		
Delay at Power-Up	300 milliseconds			
Temperature Effect	0.02% of distance/ °C			
Linearity*	2.5 ms response: ±1 mm	30 ms response: ± 0.5 mm		
Resolution*	2.5 ms response: 1 mm	30 ms response: 0.5 mm		
Minimum Window Size	5 mm			
Adjustments	Sensing window limits: TEACH-Mode programming of near and far window limits may be set using the push button or remotely via TEACH input (see page 3).			
Indicators	Range Indicator (Red/Green)	Green — Target is within sensing range Red — Target is outside sensing range OFF — Sensing power is OFF		
	Teach/Output Indicator (Yellow/Red)	Yellow — Target is within taught limits OFF — Target is outside taught window limits Red — Sensor is in TEACH mode		
Remote TEACH Input	Impedance: 12 kΩ			
Construction	Threaded Barrel: Thermoplastic polyest Push Button: Santoprene	er Push Button Housing: ABS/PC Lightpipes: Acrylic		
Operating Conditions	Temperature: -20° to +60° C (-4° to +140° F) Maximum relative humidity: 100%			
Connections	2 m (6.5') or 9 m (30') shielded 5-conductor (with drain) PVC jacketed attached cable or 5-pin Euro-style quick-disconnect (see page 10 for quick-disconnect cable options)			
Environmental Rating	Leakproof design is rated IEC IP67; NEMA 6P			
Vibration and Mechanical Shock	All models meet Mil. Std. 202F requirements method 201A (vibration: 10 to 60 Hz max., double amplitude 0.06", maximum acceleration 10G). Also meets IEC 947-5-2 requirements: 30G 11 ms duration, half sine wave.			
Temperature Warmup Drift	Less than 1.7% of sensing distance upo	n power-up (see Temperature Compensation, page 2)		
Application Notes	Objects passing inside the specified nea	r limit may produce a false response.		
Certifications	( E c <b>RL</b> 'us			

\* Linearity and resolution are specified using a 50 mm x 50 mm (2" x 2") aluminum plate at 22°C under fixed sensing conditions.



NOTE: It is recommended that the shield wire be connected to earth ground or DC common.



 Banner Engineering Corp. • Minneapolis, MN U.S.A. www.bannerengineering.com • Tel: 763.544.3164

P/N 110738 rev. A 9

Accessories					
	Quick-Disconnect Cables				
Style	Style Model Length Dimensions Pinout				
5-pin Euro-style straight, with shield	MQDEC2-506 MQDEC2-515 MQDEC2-530	2 m (6.5') 5 m (15') 9 m (30')	44 mm max. (1,7')	white	
5-pin Euro-style right-angle, with shield	MODEC2-506RA Modec2-515RA Modec2-530RA	2 m (6.5') 5 m (15') 9 m (30')	28 mm max. (1.5°) 28 mm max. (1.5°) 28 mm max. (1.5°) 112 x 1 015 mm 0.5°)	Block Cray	



Banner Engineering Corp. • Minneapolis, MN U.S.A. www.bannerengineering.com • Tel: 763.544.3164



**WARRANTY:** Banner Engineering Corp. warrants its products to be free from defects for one year. Banner Engineering Corp. will repair or replace, free of charge, any product of its manufacture found to be defective at the time it is returned to the factory during the warranty period. This warranty does not cover damage or liability for the improper application of Banner products. This warranty is in lieu of any other warranty either expressed or implied.

P/N 110738 rev A.

Banner Engineering Corp., 9714 Tenth Ave. No., Minneapolis, MN USA 55441 • Phone: 763.544.3164 • www.bannerengineering.com • Email: sensors@bannerengineering.com