



Laboratório de Controle Automático I

Prof. Dr. Eng.
Fernando Passold

Last Updated: 17 de outubro de 2023

“He toi whakairo, he mana tangata.”

(Where there is artistic excellence, there is human dignity.)
Maori proverb



Este material foi desenvolvido para a disciplina de “**Laboratório de Controle Automático I**” do curso de Engenharia Elétrica da UPF. Trata de experimentos práticos na área de Controle Automático Clássico (analógico).

Este material foi criado usando software livre, multiplataforma e de domínio público: [LaTeX](#) (pacote [MiKTeX](#) / [MacTeX](#)) e editor [TeXmaker](#). Foi adotada a fonte Palatino.

$G > \wedge \vee$

©Prof. Dr. Eng. Fernando Passold, 17 de outubro de 2023.

Sumário

I Servo-sistema CC	7
1 Introdução ao Kit MS150 da Feedback	9
1.1 Introdução	9
1.2 Módulos	9
1.3 Cuidados ao Usar	14
1.4 Sistemas de Controle em Malha Fechada	14
1.5 Experimento Previsto	15
1.5.1 Questões	16
2 Amplificador Operacional	17
2.1 Introdução	17
2.2 Experiência 1: Amplificador Operacional como Ponto de Soma	19
2.3 Experimento 2: Variação de Ganho	23
2.4 Experimento 3: Ajuste de Ganho	24
2.5 Experimento 4: Resposta em Frequência	26
2.6 Teoria Levantamento Freqüencial	28
3 Características do Motor CC	31
3.1 Introdução	31
3.2 Experiência 1: Controle por Armadura	32
3.3 Experiência 2: Curva Característica do Motor sem carga	35
3.4 Experiência 3: Característica Mecânica do Motor (variando a carga)	36
3.5 Aspectos Práticos	37
3.6 Questões:	38
3.7 Anexo: Ajuste de curvas empregando o software MATLAB	39
4 Estudo do Canal de Erro	45
4.1 Introdução	45
4.2 Experiência 1 – Demonstração de Canal de Erro	46
4.3 Sobre o canal de erro	49
4.4 Aspectos Práticos	50
4.5 Questões	51

5 Controle de Posição Simples	53
5.1 Introdução	53
5.2 Experiência 1 – Sistema Manual de Controle de Posição	54
5.3 Experiência 2 – Controle Simples de Posição Acionado por um Motor CC	56
5.4 Experiência 3 – Malha-fechada de controle de posição de motor CC	58
5.5 Questão	61
5.6 Conclusões	63
5.7 Anexo: Comandos Gráficos no Matlab	63
6 Sistema de Controle de Posição em Malha Fechada	65
6.1 Experiência 1 – Característica do Pré-Amplificador PA150C	65
6.2 Experiência 2 – Sistema Simples em Malha Fechada de Controle de Posição	68
6.3 Conclusões	72
7 Sistema Simples de Controle de Velocidade	73
7.1 Introdução	73
7.2 Sistema Simples de Controle de Velocidade em Malha Fechada	74
7.3 O Efeito do Ganho do Canal Direto sobre a Variação de Velocidade	76
7.4 Sistema Simples Reversível de Controle de Velocidade	79
7.5 Conclusões	81
7.6 Comentários Finais	82
8 Banda Morta e Resposta a Degrau	85
8.1 Objetivos	85
8.2 Introdução	85
8.3 Ensaio Estático (1 ^a -Parte)	86
8.4 Ensaio Dinâmico (2 ^a -Parte)	89
8.5 Comentários finais	91
8.6 Análise teórica	91
8.7 Conclusões finais	92
9 Realimentação de Velocidade em Malha de Controle de Posição	93
9.1 Objetivo geral	93
9.2 Objetivos	93
9.3 Introdução	94
9.4 Procedimentos preliminares	94
9.5 Primeira Montagem	95
9.6 Segunda montagem	99
9.7 Comentários Finais	101
9.8 Embasamento teórico	101
9.9 Instruções finais	103

II Servo-sistema CA	105
10 Erro num sistema síncrono	107
10.1 Objetivos	107
10.2 Introdução	107
10.3 Operação de um sistema síncrono	108
10.4 Exp. 1) Medição da saída do Transmissor	109
10.5 Exp. 2) Identificação do “zero” nulo	111
10.6 Exp. 3) Medição da saída do Transformador (receptor)	113
10.7 Exp. 4) Identificação do “zero” no Transformador (receptor)	115
10.8 Exp. 5) Sistema de posicionamento sincronizado usando acionamento direto	115
10.9 Comentários Finais	116
10.10 Aspectos Práticos	116
11 O Demodulador (MD150S)	119
11.1 Objetivos	119
11.2 Introdução	119
11.3 Exp 1) Operação do Demodulador	121
11.4 Comentários finais	126
12 Servo-sistema com link síncrono	127
12.1 Objetivos	127
12.2 Introdução	128
12.3 Exp. 1) Seguimento Contínuo e Zona-Morta	128
12.4 Exp. 2) Efeito da malha de velocidade	132
12.5 Exp. 3) Resposta Transitória	132

Parte I

Servo-sistema CC

1 | Introdução ao Kit MS150 da Feedback

1.1 Introdução

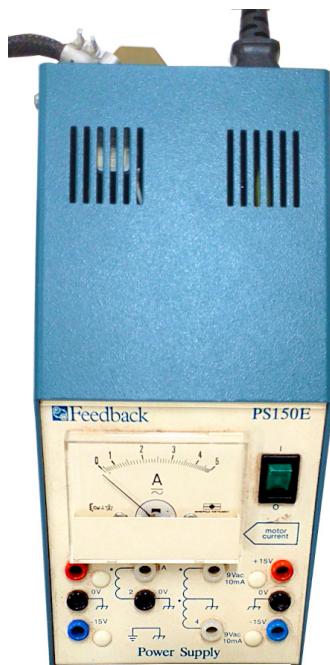
O sistema modular MS150 é destinado ao estudo de sistemas automáticos em malha fechada à base de módulos a CC (Corrente Contínua) e CA (Corrente Alternada).

A nomenclatura de módulos inclui: uma fonte de alimentação, um servo amplificador, um motor a CC, um motor a CA, um módulo de tacogerador com um redutor embutido e mais alguns transdutores e módulos especiais.

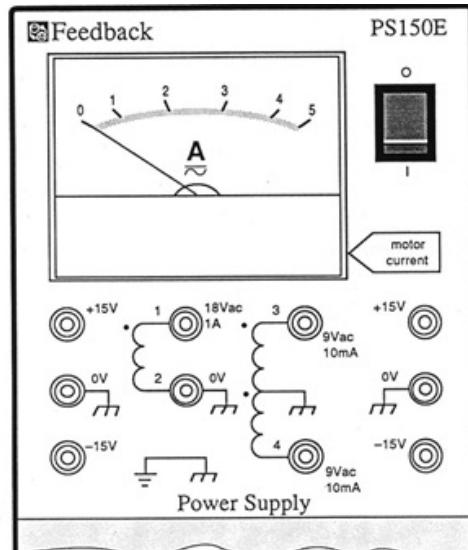
1.2 Módulos

PS150E (fonte de alimentação): pode receber uma tensão de entrada de 115V ou 230V, 50/60 Hz, 40 VA. As tensões secundárias são: 24V CC, 2 A não estabilizada, conectada diretamente no servo amplificador através de um soquete de 8 pinos; $\pm 15V$, 150 mA estabilizadas, para alimentar os módulos de baixa potência; 9 V CA e 18 V CA para os módulos a CA.

Este módulo do sistema MS150 gera várias tensões secundárias a partir da tensão de rede 220V, 60 Hz. O painel frontal do módulo é mostrado na figura 1.1. Essa fonte deve ser conectada com o módulo de Servo Amplificador SA150D através do seu cabo com um conector de 12 pinos. O módulo gera uma tensão não estabilizada de 24 V, e as tensões de $+15V$ e $-15V$ estabilizadas. Além disso, a fonte gera uma tensão de 18 V CA, 1 A e duas tensões de 9 V CA defasadas uma em relação a outra em 180° .



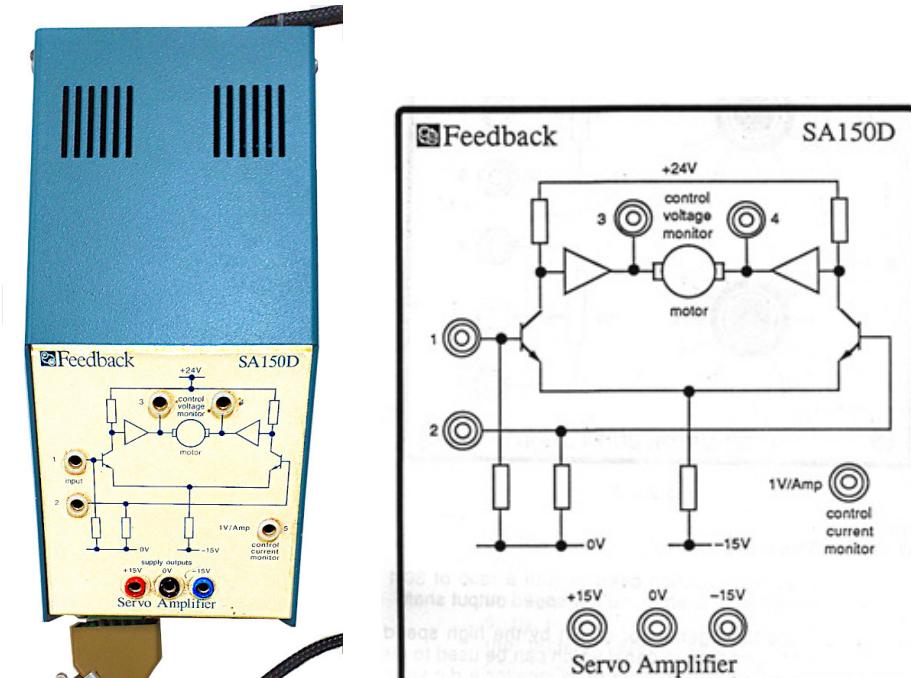
(a) Imagem do Módulo.



(b) Detalhe do painel.

Figura 1.1: Módulo PS150E: Fonte de Alimentação.

SA150D (servo amplificador): ou driver de potência, opera diretamente o motor a CC ou alimenta o enrolamento de controle do motor a CA (bifásico). Pode ser conectado aos motores através de um conector de 12 pinos. Este módulo é mostrada na figura 1.2. Ele serve para aumentar a potência do sinal de controle, deve ser conectado diretamente no motor a CC ou no enrolamento de controle do motor a CA.



(b) Detalhe do painel.

(a) Imagem do Módulo.

Figura 1.2: Módulo SA150D: Servo Amplificador ou driver de potência.

DCM150F (motor CC): equipado com ímãs permanentes. O eixo do motor, através de um adaptador, pode ser acoplado com o disco de inércia ou o de freio magnético.

A aparência deste motor é mostrada na figura 1.3. No eixo do motor pode ser colocado um extensor no qual pode ser acomplado um disco leve (para o funcionamento em conjunto com o freio magnético LU150L) ou um disco de inércia. O eixo do motor, ou o do extensor, pode ser acoplado no eixo de entrada do redutor (embutido no módulo GT150X).

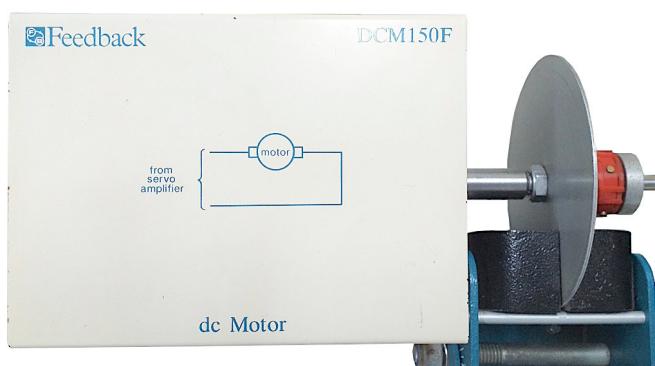


Figura 1.3: Módulo DCM150F: motor CC; na figura aparece acomplado o freio eletromagnético (fator de carga).

AU150B (ajustes de ganho): módulo com potenciômetros; inclui dois potenciômetros de 10 kOhms cada. Esse módulo pode ser utilizado para fazer ajustes de ganhos em sistemas montados a partir de módulos MS150. O layout desse módulo é mostrado na figura 1.4. O módulo contém dois potenciômetros e serve para ajuste de ganhos do sistema.

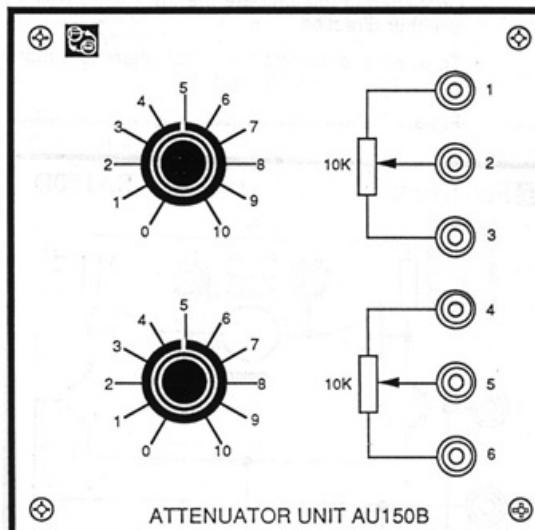


Figura 1.4: Módulo AU150B: ajuste de ganho (potenciômetros).

IP150H e OP150K (potenciômetros de ajuste): de entrada e de saída respectivamente. A precisão desses dispositivos é média. O potenciômetro de saída pode ser acoplado mecanicamente ao eixo de saída do módulo GT150X. Esses dois são potenciômetros rotacionais. O potenciômetro de entrada IP150H é utilizado para gerar uma tensão de referência para o sistema de controle de posição através do ajuste da posição angular do eixo desse potenciômetro. O de saída deve ser acoplado no eixo de saída do redutor (baixa velocidade) do módulo GT150X. Cada um dos potenciômetros IP150H ou OP150K possui na sua saída um amplificador de isolamento para protegê-los contra curto circuito. A alimentação desses potenciômetros é +15V e -15V.



Figura 1.5: Módulo IP150H: potenciômetro de ajuste.

OA150A (Amplificador Operacional): possui três entradas inversoras, possibilitando somar até três sinais. Compreende três tipos de realimentação, a saber, tipo R , tipo RC ou externa.

O amplificador operacional possibilita somar até três sinais, possui dois circuitos de realimentação interna e ainda possibilita, através de realimentação externa, fazer ajustes de seu ganho e/ou corrigir a resposta dinâmica do sistema. O layout de OA150A é mostrado na figura 1.6.

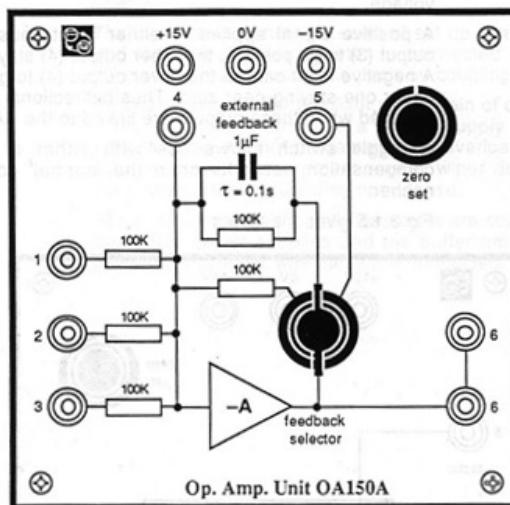


Figura 1.6: Módulo OA150A: Amplificador Operacional (circuito somador inversor).

PA150C (pré-amplificador CC): módulo com dois canais de saída do tipo push-pull para acionar diretamente as entradas do servo amplificador. O ganho é aproximadamente 10.

Esse pré-amplificador é utilizado para fornecer o sinal de controle para o Servo Amplificador SA150D. A tampa do módulo é mostrada na figura 1.7. Os sinais aplicados às entradas 1 e 2 são somados, permitindo, desta maneira, a realização de realimentação. Por exemplo, à entrada 1 pode ser aplicado o sinal de referência enquanto à entrada 2 pode ser aplicado o sinal de realimentação. As saídas 3 e 4 são do tipo diferencial, isto é, quando na saída 3 a tensão aumenta, na saída 4 a tensão diminui e vice-versa.

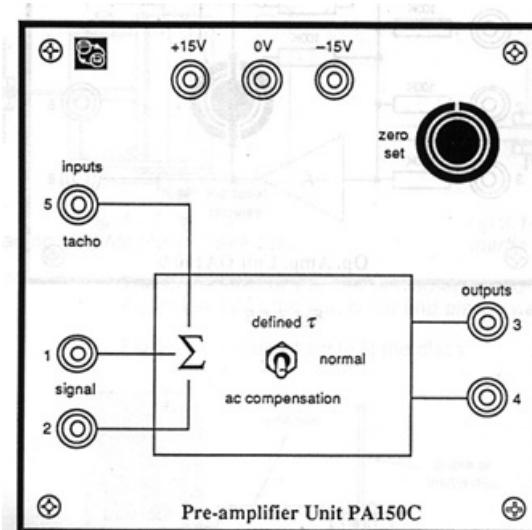


Figura 1.7: Módulo PA150C: pré-amplificador.

LU150L: módulo de carga (freio magnético) em conjunto com um disco fino de alumínio serve para simular um torque externo aplicado ao eixo do motor. A inclinação do freio é variável permitindo um ajuste do valor do torque externo.

Um disco fino de alumínio pode ser montado no extensor do eixo do motor. Quando esse disco está em rotação entre os pólos do ímã permanente de LU150L, correntes de Foucault (“eddy currents” em inglês) estão sendo induzidas no disco. Essas correntes interagem com o campo magnético do ímã permanente o que produz o efeito de freio. A magnitude do torque de freio pode ser ajustada através de variação da inclinação do ímã. O lay out é mostrado na figura 1.8. A posição do disco sobre o extensor do eixo é mostrada na figura 1.9.

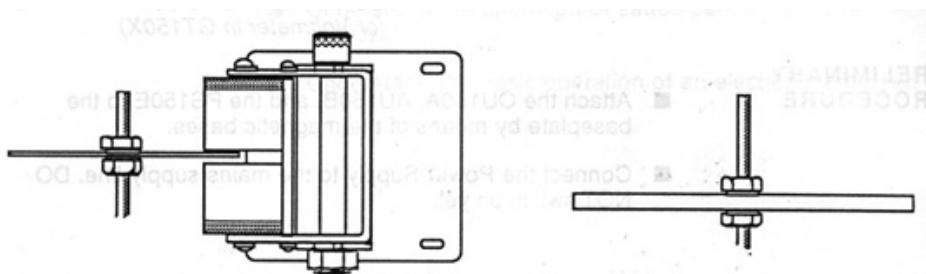


Figura 1.8: Módulo LU150L, do freio magnético.

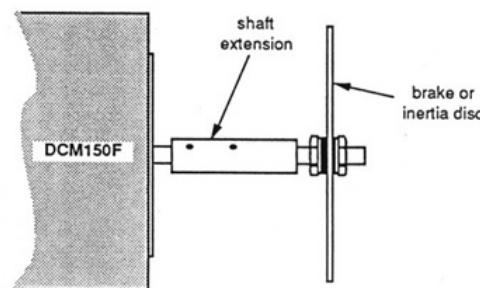


Figura 1.9: Detalhe do acomplamento do freio magnético ao módulo motor DCM150F.

ST150R: transformador de ligação síncrona (faz parte da ligação síncrona) do tamanho 11 padronizado. Possui um disco com uma escala calibrada e outra escala estroboscópica.

ST160T: transmissor de ligação síncrona (faz parte da ligação síncrona) do tamanho 11 padronizado. Possui um disco com uma escala calibrada e um motor acionador a CC com ajuste de velocidade.

MD150S: módulo modulador/demodulador. A seção de demodulador consiste em um retificador sensível a fase e um filtro passa-baixas. Além disso, o demodulador possui um circuito de ajuste de fase de 0º a 180º.

ACM150U: motor a CA bifásico pode ser conectado ao servo amplificador através de um conector de 12 pinos. Possui um resistor para limitar a potência fornecida ao enrolamento de referência. O módulo inclui o circuito de modulador para transformar a tensão CC, gerada pelo tacogerador (encontra-se no módulo GT150X), em uma tensão CA. O circuito do modulador permite ajustar a defasagem do sinal na sua saída.

GT150X: tacogerador e redutor. Esse módulo inclui também um voltímetro digital, que pode ser utilizado para medir tensões CC de até 20V e para medir rotação (rpm) do eixo de alta velocidade (eixo de entrada).

PID150Y: módulo de controlador PID (Proporcional + Integral + Derivativo).

1.3 Cuidados ao Usar

- 1) Cada módulo do sistema MS150 possui uma base magnética e pode ser colocado em qualquer posição sobre a tampa base principal.
- 2) **Iniciar qualquer montagem (mecânica ou/e elétrica) com a fonte de alimentação (módulo PS150E) desligada.**
- 3) As ligações elétricas entre os módulos do sistema são feitos utilizando cabos com 3 fios ou fios simples. Conexões são feitas inserindo os pinos nos conectores. A Retirada de conexões elétricas deve ser feita puxando os pinos (não cabos ou fios) e segurando as tampas dos módulos com outra mão.
- 4) As montagens elétricas devem ser feitas com atenção evitando aplicação de tensões de alimentação invertidas. É proibido unir duas ou mais saídas diferentes entre si. Uma saída pode ser aplicada simultaneamente a várias entradas. Assim, varias entradas podem ser unidas entre si.
- 5) Todas as conexões de alimentação para os módulo devem ser feitas com cabos de 3 fios. As tensões de +15V, -15V e 0V (terra) estão presentes na tampa do **módulo PS150E (fonte de alimentação)** ou na tampa do módulo SA150D (servo amplificador), mas antes é preciso conectar esses dois módulos entre si através do cabo de 12 pinos de servo amplificador.

1.4 Sistemas de Controle em Malha Fechada

Sistemas de controle que enviam o sinal da sua saída para a sua entrada com o propósito de melhorar a sua performance são chamados de sistemas de controle em malha fechada (feedback control systems - em inglês). Sistemas em malha fechada são chamados também de sistemas realimentados (sistemas com realimentação ou com retroação). Um diagrama generalizado de sistemas em malha fechada é mostrado na figura 1.10.

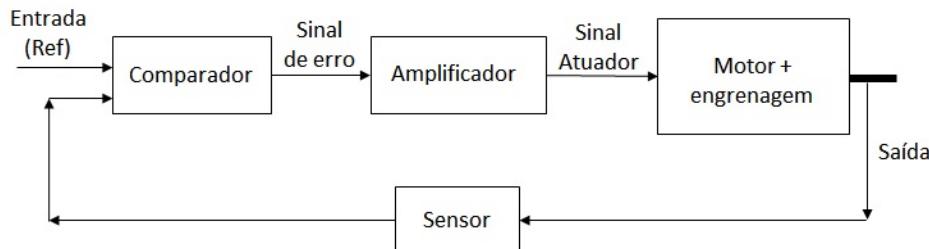


Figura 1.10: Diagrama genérico de sistemas de controle em malha fechada.

Sistemas em malha fechada, em comparação com os em malha aberta, quer dizer, sem realimentação, são mais precisos e não são sensíveis às variações de parâmetros.

1.5 Experimento Previsto

Montar o sistema mostrado na figura 1.11. Esse sistema é do tipo **malha aberta** (sem realimentação). A tensão do potenciômetro superior de AU150B é aplicada à entrada 1 do servo amplificador SA150D. O módulo GT150X é alimentado a partir da fonte PE150E.

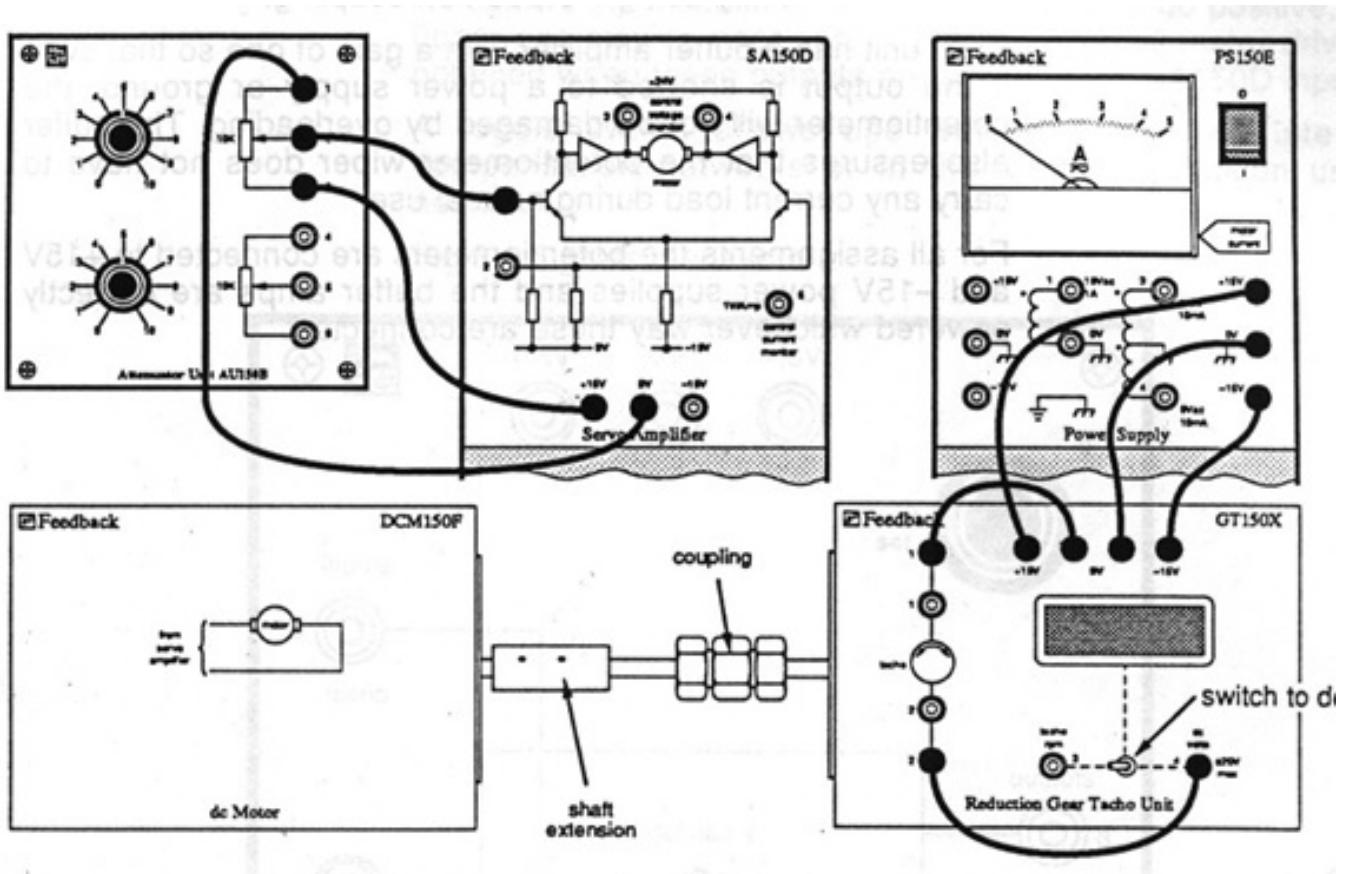


Figura 1.11: Primeira experiência proposta (montagem).

Aumentando a tensão na saída do potenciômetro, aumenta a velocidade do motor. Acrescentando uma ligação entre os conectores 2 e 3 de GT150X e usando a chave seletora é possível medir a tensão na saída do tacogerador e a velocidade em rpm. Se transferir o conector que liga 2 e 4 no módulo GT150X do 2 para a entrada 1 de SA150D, então é possível calcular a relação:

$$\text{Ganho de Velocidade} = \frac{\text{Tensão na saída do tacogerador}}{\text{Tensão na entrada 1 de SA150D}}$$

1.5.1 Questões

Sugere-se que o estudante trace um esboço de um diagrama em blocos exemplificando a montagem mostrada (realizada) na fig. 1.11.

Segue espaço para o desenho/resposta requerido para o item anterior:

2 | Amplificador Operacional

Objetivos

Quando este laboratório for completado, se espera que o estudante:

- Saiba como um Amplificador Operacional pode ser usado para somar entradas;
- Seja capaz de usar um Amplificador Operacional para escalar uma entrada e como acrescentar um controle de ganho (de saída).

2.1 Introdução

Neste laboratório será examinado o comportamento de comparadores e seu uso em sistemas de controle.

Um tipo simples de sistema de controle automático com o qual muitos estão familiarizados está presente na forma de termostatos usados para chavear simples equipamentos domésticos de aquecimento (estufas). Neste tipo de sistema estamos interessados em 2 temperaturas, a atual e a desejada. No termostato, se a temperatura atual é maior que a desejada, um tira elétrica bi-metálica vai se curvar o suficiente para desconectar a eletricidade (potência) do elemento de aquecimento – ver fig. 2.1. Se entretanto, a temperatura atual (do ambiente) estiver abaixo do valor ajustado, a conexão elétrica realizada pelo elemento bi-metálico permanece e assim o elemento de aquecimento continua sendo alimentado (continua recebendo potência).

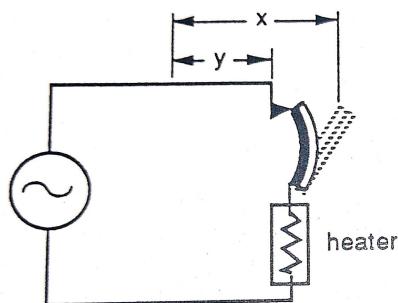


Figura 2.1: Sistema de controle automático baseado em elemento bi-metálico atuando como simples sistema de controle automático.

O termostato pode ser considerado como um elemento que continuamente realiza um “cálculo” de posição, onde: x = posição de ajuste de temperatura, y = posição do contato da tira bi-metálica, de forma que:

$$\begin{cases} x - y > 0, & \text{Os contatos permanecem abertos;} \\ z - y \leq 0, & \text{Os contatos permanecem fechados} \end{cases}$$

Tal sistema de controle pode ser redesenrado como mostrado na fig 2.2, onde, usando o termostato, podemos verificar a temperatura atual (sensor B) e compará-la com a temperatura desejada (sensor A).

O fechamento dos contatos faz com que o fornecimento de energia atue como o “Controlador” que aquece o “Atuador”, assim o “Processo”, ou ar do ambiente, se torna aquecido. O termostato pode ser denominado de dispositivo do tipo “bang-bang” porque ou está totalmente ligado ou totalmente desligado.

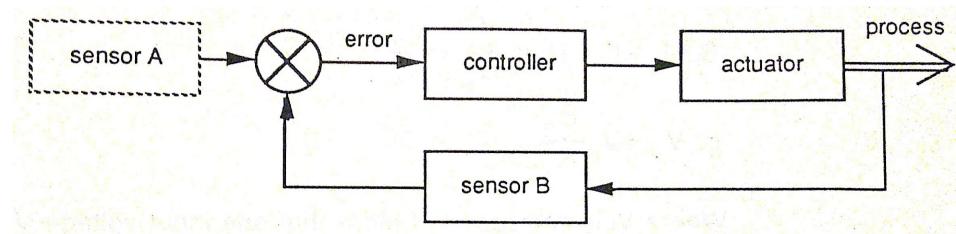


Figura 2.2: Malha fechada simples (com realimentação), típica de sistemas de controle.

Em muitas aplicações, os sensores A e B produzem tensões proporcionais a temperatura desejada e a atual do meio.

Um dispositivo eletrônico analógico capaz de comparar tensões analógicas é o Amplificador Operacional (Amp.Op.).

Algumas considerações podem ser assumidas em relação aos Amp.Op.'s:

- Podem ser considerados um amplificador ideal com Ganho e Largura de Banda infinitos quando usado no modo "malha-aberta"; na realidade, possuem ganhos DC típicos de bem maiores que 100.000 ou 100dB.
 - Um Amp.Op. básica é de um dispositivo de 3 terminais, com 2 entradas (V_+ e V_-) e 1 saída (excluindo as conexões de energia).
 - Ele possui uma impedância de entrada praticamente infinita, ($Z_{in} \cong \infty$), o que significa que praticamente nenhuma corrente flui para qualquer uma de suas duas entradas.
 - Um amplificador operacional também tem impedância de saída praticamente nula, $Z_{out} \cong 0$.
 - Amp.Op.'s detectam a diferença entre os sinais de tensão aplicados aos seus dois terminais de entrada e, em seguida, multiplicam-na por algum ganho pré-determinado, A .
 - Este Ganho, A , é muitas vezes referenciado como "Ganho de malha-aberta".
 - Fechar a malha-aberto conectando componentes resistivos ou reativos entre a saída e um dos terminais de entrada do op-amp, reduz e controla este ganho de malha-aberta.
 - Amp.Op.'s podem ser usados em duas configurações básicas, Inversor e Não-inversor.

A fig. 2.3 apresenta 2 configurações típicas usadas com Amp.Op.

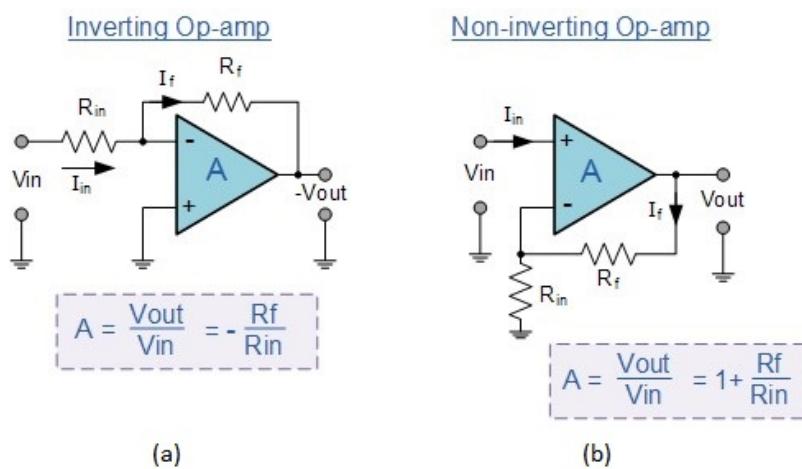


Figura 2.3: Configurações típicas empregadas com Amplificadores Operacionais.

No caso da configuração inversora (realimentação negativa, fig 2.3(a)), se a tensão da realimentação estiver “anti-fase” com a entrada, o ganho geralmente é reduzido.

No caso da configuração não-inversora (realimentação positiva, fig 2.3(b)), a tensão de realimentação entra em “fase” com a entrada, e o ganho geralmente é aumentado.

Ao conectar a saída diretamente de volta ao terminal de entrada negativo (terminal $V-$), 100% da realimentação é alcançada, resultando num circuito de Seguidor de Tensão (ou buffer de corrente) com um ganho constante de 1 (unitário).

Trocando-se o resistor fixo da realimentação, R_f , por um potenciômetro, o circuito passar a ter ganho ajustável.

Porém alguns cuidados devem ser tomados:

- O ganho de malha-aberta também chamado de Produto de Largura de Banda de Ganho (GBP=Gain Bandwidth Product) muito alto é um indicativo de qualidade do mesmo (quanto maior, melhor).
- GBP muito alto torna um circuito amplificador operacional instável, pois um sinal de entrada de micro volts faz com que a tensão de saída oscile para a saturação.
- Usando-se um resistor de realimentação adequado, (R_f), o ganho geral do amplificador pode ser controlado com precisão.

O circuito anterior pode ser modificado para subtrair (comparar) ou somar tensões, conforme mostra a fig 2.4.

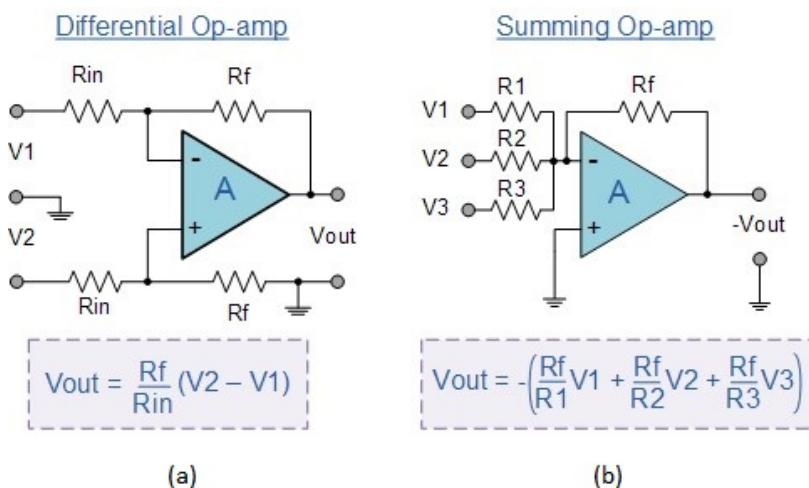


Figura 2.4: Amp.Op. subtraindo (a) ou somando (b) tensões de entrada.

O **Amplificador Diferencial** (fig. 2.4(a)) produz uma saída que é proporcional à diferença entre as duas tensões de entrada, com o resultado da diferença sendo ponderado (ganho) dado pela relação entre as resistências R_f e R_{in} .

O acréscimo de mais resistores de entrada à entrada inversora, cria o circuito **Somador Inversor** – fig 2.4(b). Neste caso, cada entrada i pode ser somada de forma ponderada através do seu resistor de entrada R_i e o resistor de realimentação R_f , porém note que a ponderação obtida (ganho) é negativo (cada sinal de entrada é defasado em 180° , ou têm sua “polaridade invertida”).

No caso dos kits Feedback, o módulo OA150A disponibiliza um Amp.Op. baseado no CI LM 741, na configuração Somador Inversor, e todos os resistores de entrada e de realimentação possuem o mesmo valor ($100K\Omega$).

2.2 Experiência 1: Amplificador Operacional como Ponto de Soma

Montar o sistema conforme o layout mostrado na Fig 2.5.

De forma simplificada, a documentação original da *Feedback* traz sua versão do Amp.Op. na configuração Somador Inversor como a mostrada na fig. 2.6.

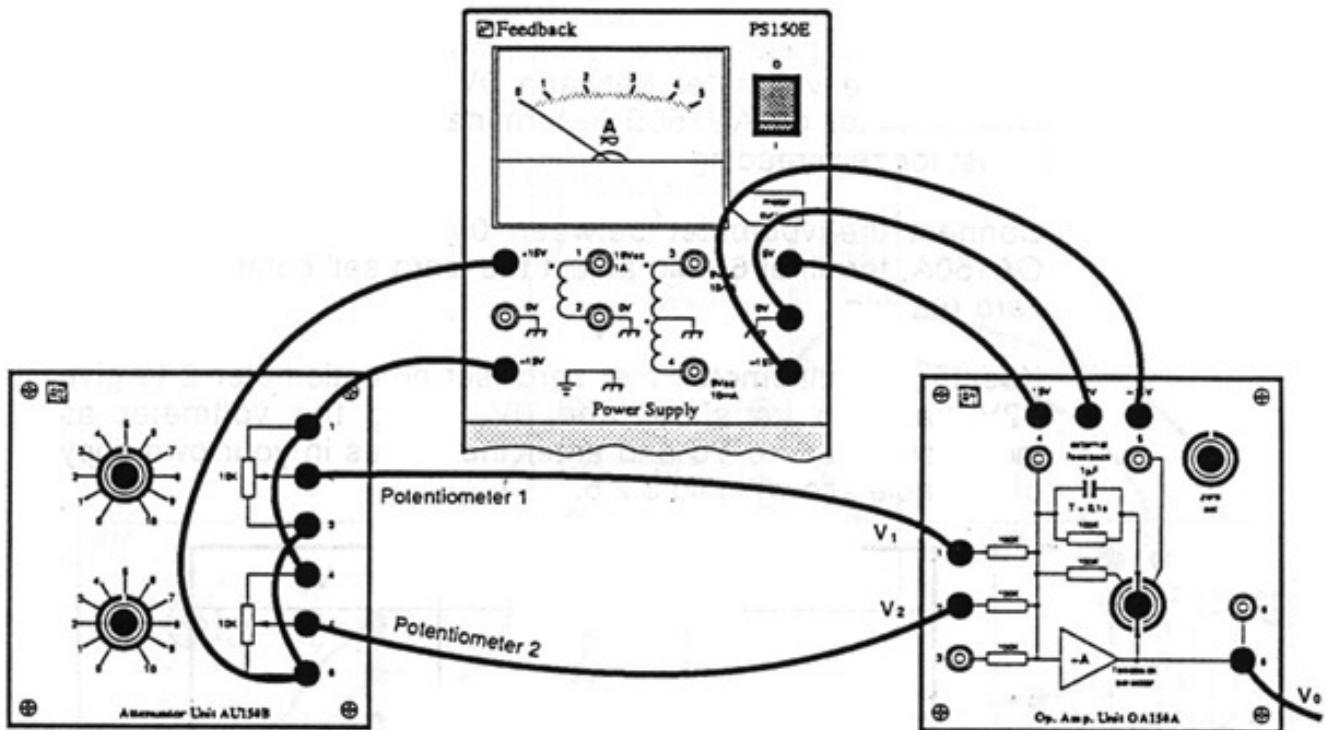


Figura 2.5: Experimento 1 usando amplificador operacional (módulo OA150A) como ponto de soma.

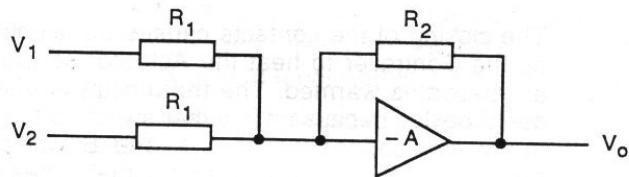


Figura 2.6: Circuito somador de tensões com amplificador operacional (versão simplificada originalmente mostrada pela *Feedback*).

A tensão V_o seria calculada através da equação:

$$V_o = - \left(\frac{R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_2}{R_1} V_2 \right) = - \left[\frac{R_2}{R_1} (V_1 + V_2) \right] \quad (2.1)$$

Analisando esta equação, notamos que este circuito realiza soma de tensões porém invertendo seu sinal na saída (amplificador operacional na configuração Somador Inversor). Desta maneira, se o sinal V_1 é o sinal de referência e o sinal V_2 é o de realimentação, podemos tentar realizar a seguinte operação:

$$\text{Erro} = \text{Referência} - \text{Realimentação}$$

Efetivamente, o circuito mostrado na Fig 2.6 vai desempenhar o papel de um ponto de soma.

Instruções de Montagem:

1. Colocar a chave seletora “feedback selector” de OA150A na posição do resistor de 100 K.
2. Usando o voltímetro de GT150X, ajustar a tensão na entrada 1 de OA150A para 0 volt, variando a posição do cursor do potenciômetro superior de AU150B.
3. Da mesma maneira, ajustar para 0 volt o sinal na entrada 2 de OA150A.
4. Ajustar a tensão na saída do amplificador operacional (saída 6 de OA150A) para 0 volt, variando a posição do knob “zero set” no módulo OA150A. Este procedimento serve para zerar o off-set do amplificador operacional. Um

off-set não nulo, que surge em função de desajustes do circuito interno do amplificador operacional, tem um efeito negativo e pode ser zerado através do potenciômetro especial no módulo OA150A.

- Para efetuar medições de tensão através do voltímetro de GT150X, é preciso anteriormente aplicar ao módulo GT150X as tensões de alimentação (+15 V, -15 V e 0 V). Para fazer isso, usar um cabo preto de três fios e efetuar as ligações com os conectores correspondentes de PS150E ou SA150D.
- Varie as tensões aplicadas nas entradas 1 e 2 de OA150A, preenchendo a tabela 2.1, utilizando o voltímetro GT150X para efetuar as medições. Preencher a última coluna da tabela usando a equação à seguir:

$$V_o = - \left[\frac{R_2}{R_1} (V_1 + V_2) \right] , \text{ como: } R_2 = R_1, \quad V_o = -(V_1 + V_2) \quad (2.2)$$

Essa equação é uma simplificação da eq. (2.1), pois os resistores R_1 e R_2 são iguais a 100 k, então o ganho oferecido pelo Amp. Op. é igual à $A = -1$.

- Note pela fig. 2.5, que as tensões V_1 e V_2 não ingressam invertidas entre si. Por exemplo, se os 2 potenciômetros do módulo AU150B estiverem na posição “3”, tanto V_1 quanto V_2 serão iguais a: $V_1 = V_2 \cong 9$ Volts. Você estará montando algo similar ao mostrado na fig. 2.7.

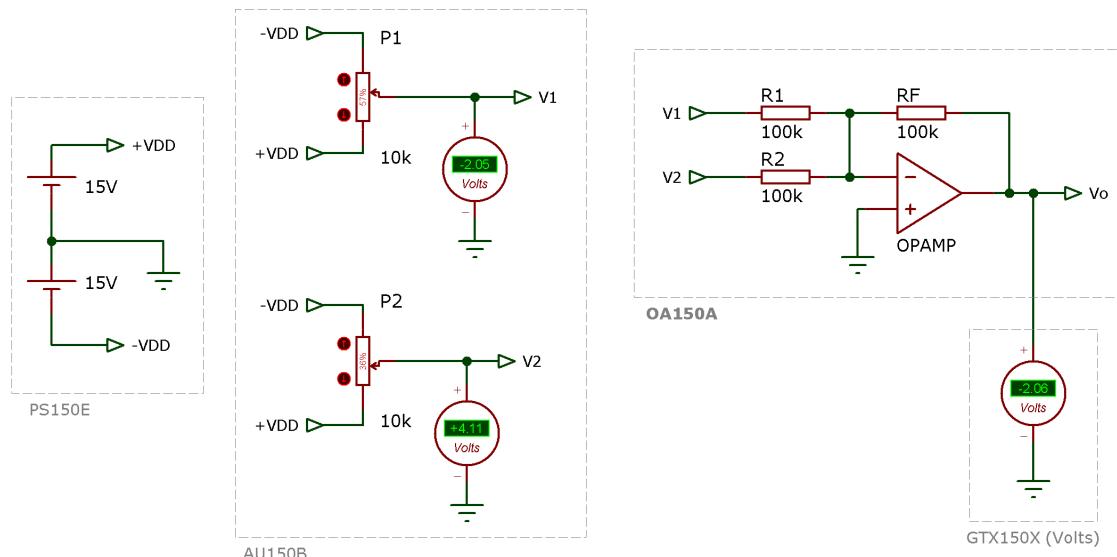


Figura 2.7: Circuito equivalente à fig YY.

- Comparar os valores medidos e calculados de V_o entre si.
- Notar que a diferença entre o valor medido e o calculado aumenta para os valores de $V_1 = 6$ V e $V_2 = 6$ V; $V_1 = 7$ V e $V_2 = 7$ V; $V_1 = -6$ V e $V_2 = -6$ V; $V_1 = -7$ V e $V_2 = -7$ V. Isso acontece devido a saturação do amplificador operacional para as tensões de saída superiores a, aproximadamente, +11 V e inferiores a -11 V.

V_1 (Volts)	V_2 (Volts)	V_o (Volts)	
		Valor medido (Volts)	Valor calculando usando eq. (2.2)
1	0		
2	0		
3	0		
-1	0		
-2	0		
-3	0		
0	1		
0	2		
0	3		
0	-1		
0	-2		
0	-3		
1	-1		
2	-2		
3	-3		
1	1		
2	2		
3	3		
4	4		
5	5		
6	6		
7	7		
-1	-1		
-2	-2		
-3	-3		
-4	-4		
-5	-5		
-6	-6		
-7	-7		

Tabela 2.1: Medições referentes ao experimento 1.

2.3 Experimento 2: Variação de Ganho

Montar o sistema mostrado na fig 2.8.

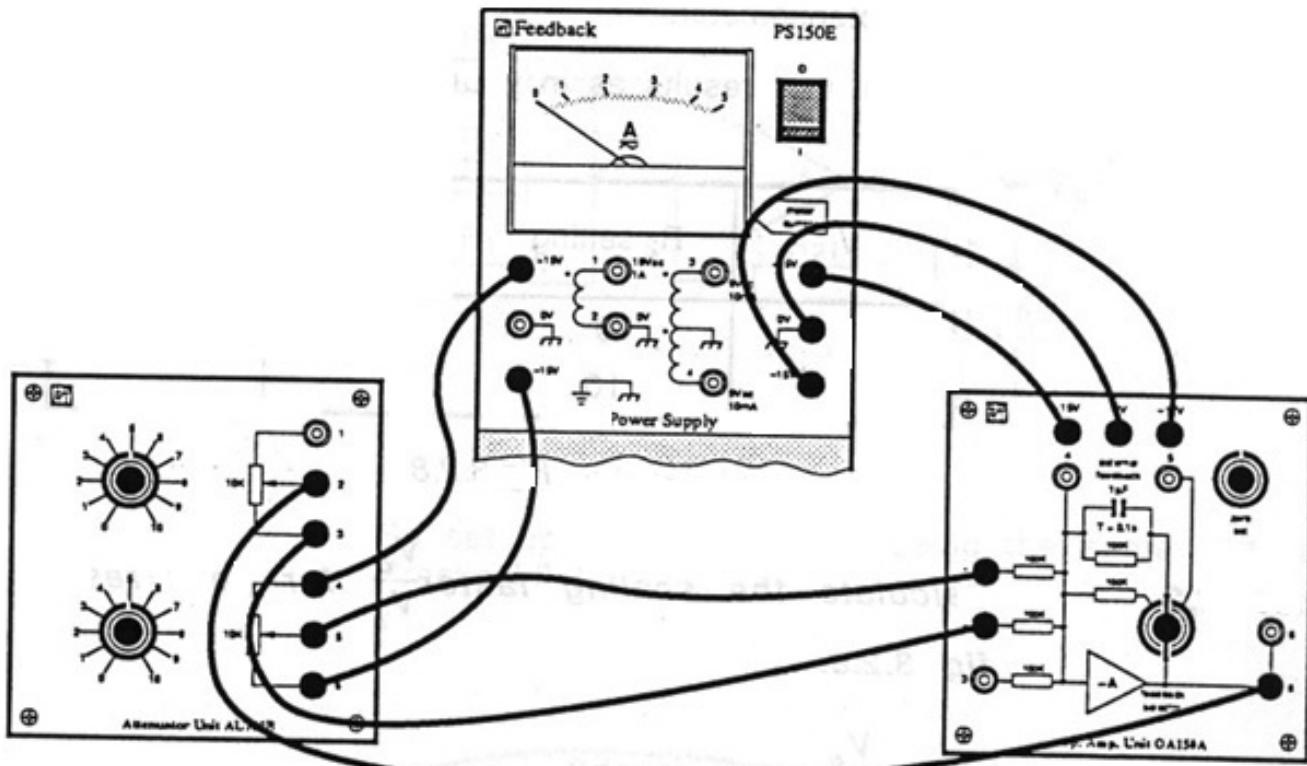


Figura 2.8: Montagem do segundo experimento.

Instruções:

1. Pôr a chave seletora de OA150A na posição “external feedback”.
 2. Através do potenciômetro inferior de AU150B, ajustar o sinal na entrada 1 de OA150A para 5 V.
 3. Observar a variação do sinal na saída 6 de OA150A variando a posição do cursor do potenciômetro superior de AU150B.
 4. Perceber que a variação da tensão da saída 6 de OA150A deve ser insignificante. Isso acontece devido a baixo valor do potenciômetro superior (10 k) em comparação com o valor do resistor de realimentação (100 k). Usar eq. (2.1) para mostrar isso. Para que a variação da tensão na saída 6 de OA150A seja de 10 vezes, é preciso ter um potenciômetro de 900 k, conforme mostra a Fig.2.5.

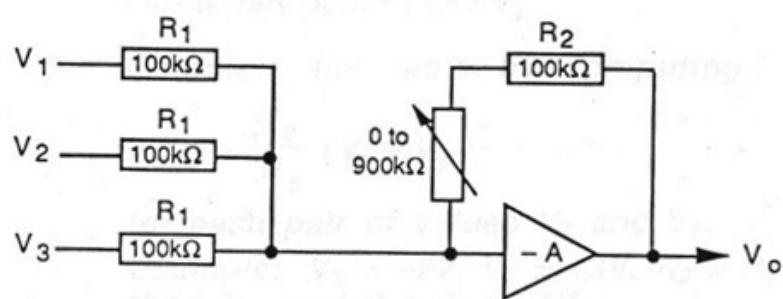


Figura 2.9: Acrescentando potenciômetro de ganho no circuito somador de tensões usando amp. op.

Outro método mais conveniente de aumentar a variação de tensão na saída do amplificador operacional é discutido a seguir.

2.4 Experimento 3: Ajuste de Ganho

Consideremos o esquema principal mostrado na fig 2.10.

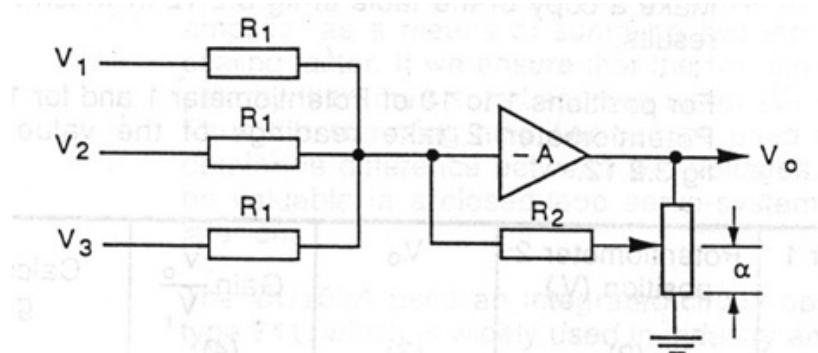


Figura 2.10: Outra estrutura para variar ganho.

Aqui α é a fração de tensão através do potenciômetro. A tensão na entrada inversora do amplificador operacional é aproximadamente 0 V, por isso podemos escrever a seguinte equação:

$$\frac{V_1}{R_1} = -\alpha \cdot \frac{V_o}{R_2} \quad (2.3)$$

Se $R_1 = R_2$, o que é o caso de AU150A, tem-se:

$$Ganho = \frac{V_o}{V_1} = -\frac{1}{\alpha} \quad (2.4)$$

A relação V_o/V_1 determina o ganho do amplificador. Da mesma maneira podem ser deduzidos os ganhos V_o/V_2 e V_o/V_3 . Evidentemente, esses ganhos são iguais a $-1/\alpha$. O valor de α varia entre 0, quando o cursor do potenciômetro fig 2.10 está na posição mais baixa, até 1, quando o cursor está na posição mais alta. Assim, o ganho varia entre 1 e ∞ , conforme eq. (2.4).

Instruções:

1. Montar o sistema mostrado na fig. 2.11. A chave seletora de OA150A deve estar na posição “external feedback”.
2. Conectar o voltímetro de GT150X entre a saída 6 de OA150A e o potencial de terra (0 V).
3. Alimentar o módulo GT150X, fazendo as conexões de +15 V, -15 V e 0 V.
4. Através do potenciômetro inferior de AU150B, ajustar a tensão na entrada 2 de OA150A para 1 V.
5. Preencher as primeiras quatro linhas da tabela 2.2. Depois disso, ajustar a tensão na entrada 2 de OA150A para 2 V e preencher as linhas restantes da tabela.
- Observação:** para calcular o valor de ganho através da eq. (2.4), é preciso relacionar o valor de α com base na posição do cursor do potenciômetro (1a coluna da tabela 2.2). Se a montagem é feita exatamente como mostra a fig. 2.11, o valor de α que corresponde a posição 1 é 0.1 (2 → 0.2; 5 → 0.5; 10 → 1).
6. Comparar os valores do ganho observados (4a coluna da tabela 2.2) com os calculados (5a coluna da tabela 2.2). Explicar a discrepância, se existir.

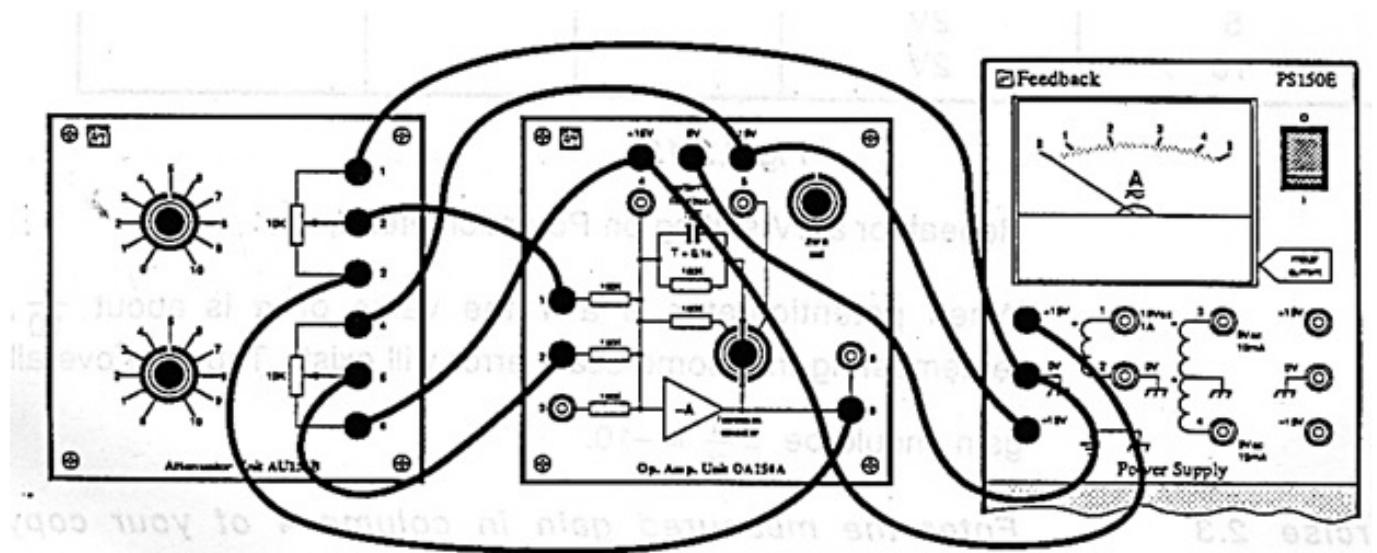


Figura 2.11: Montagem para terceiro experimento.

Posição do cursor do potenciômetro superior de AU150B	Tensão na entrada 2 de OA150A (V_i)	Tensão V_o (saída 6 de OA150A)	$Ganho = \frac{V_o}{V_i}$	Ganho calculado através de eq. (2.4)
1	1			
2	1			
5	1			
10	1			
1	2			
2	2			
5	2			
10	2			

Tabela 2.2: Tabela de resultados referente ao experimento 3.

2.5 Experimento 4: Resposta em Frequência

O objetivo agora é levantar a característica de resposta em frequência do AmpOp OA150A.

Fazer as conexões de acordo com a fig. 2.12.

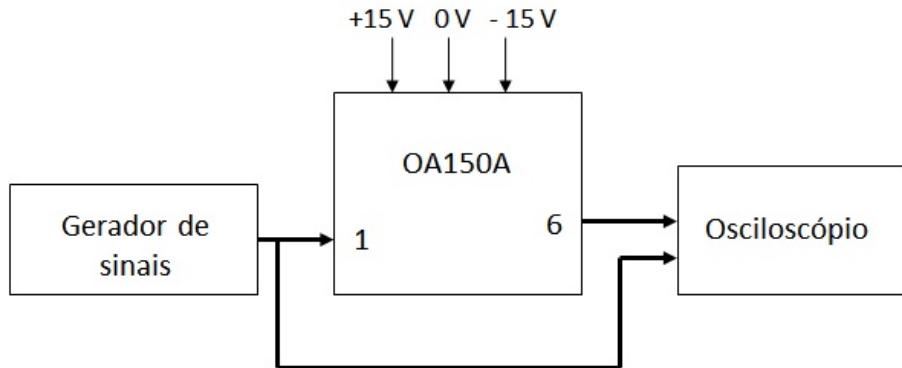


Figura 2.12: Montagem para expeimento 4.

Instruções:

1. Zerar o off-set do AmpOp.
2. Colocar a chave seletora do AmpOp na posição do meio o que coloca na sua realimentação um capacitor de $1 \mu\text{F}$ em paralelo com um resistor de $100 \text{ k}\Omega$.
3. Aplicar à entrada do AmpOp um sinal senoidal com uma amplitude de 5 V de pico e frequência variável na faixa de 0,1 a 10 Hz.
4. Usando o osciloscópio, medir a amplitude de pico e a defasagem do sinal na saída do AmpOp. Preencher a 2^a e a 3^a colunas da tabela 2.3. Onde: A_{Out} = amplitude de pico do sinal de saída; A_{In} = amplitude de pico do sinal de entrada; $A_{In} = 5 \text{ Volts}$ (constante).
5. Calcular os valores de magnitude e os de defasagem, preenchendo a 4^a e a 5^a colunas da tabela 2.3.
6. Plotar os gráficos logarítmicos da resposta em frequência (Diagrama de Bode) com base nos valores da tabela 2.3 – ver fig 2.13.
7. Verificar a concordância entre os gráficos obtidos experimentalmente e os teóricos.

Frequência (Hz)	Amplitude de pico do sinal de saída (Volts)	Atraso do sinal de saída em relação ao sinal de entrada (ms)	Magnitude: $20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_{Out}}{A_{In}} \right)$ (dB)	Defasagem do sinal de saída (graus)
0,1				
0,12915				
0,16681				
0,21544				
0,27826				
0,35938				
0,46416				
0,59948				
0,77426				
1,0				
1,2915				
1,6681				
2,1544				
2,7826				
3,5938				
4,6416				
5,9948				
7,7426				
10				

Obs.: Espaçamento obtido usando comando >> `x=logspace(0,1,10)'` no Matlab.

Tabela 2.3: Levantamento frequêncial referente ao experimento 4.

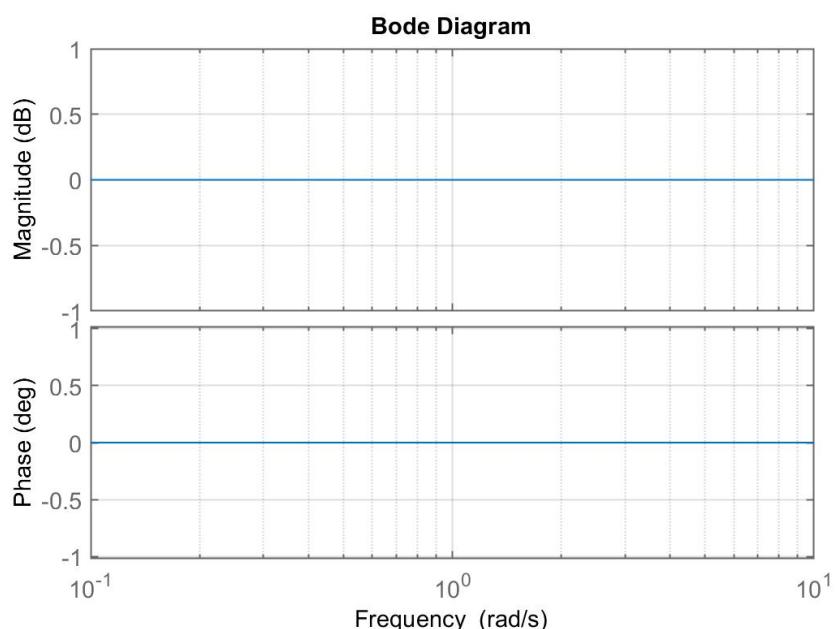


Figura 2.13: Diagrama de Bode – experimento 4.

2.6 Teoria Levantamento Frequencial

O circuito da fig. 2.12 corresponder a um Filtro Ativo Passa Baixas (FPB) de 1^a Ordem.

Usando software como o PSIM podemos simular o seu circuito, ver fig. 2.14.

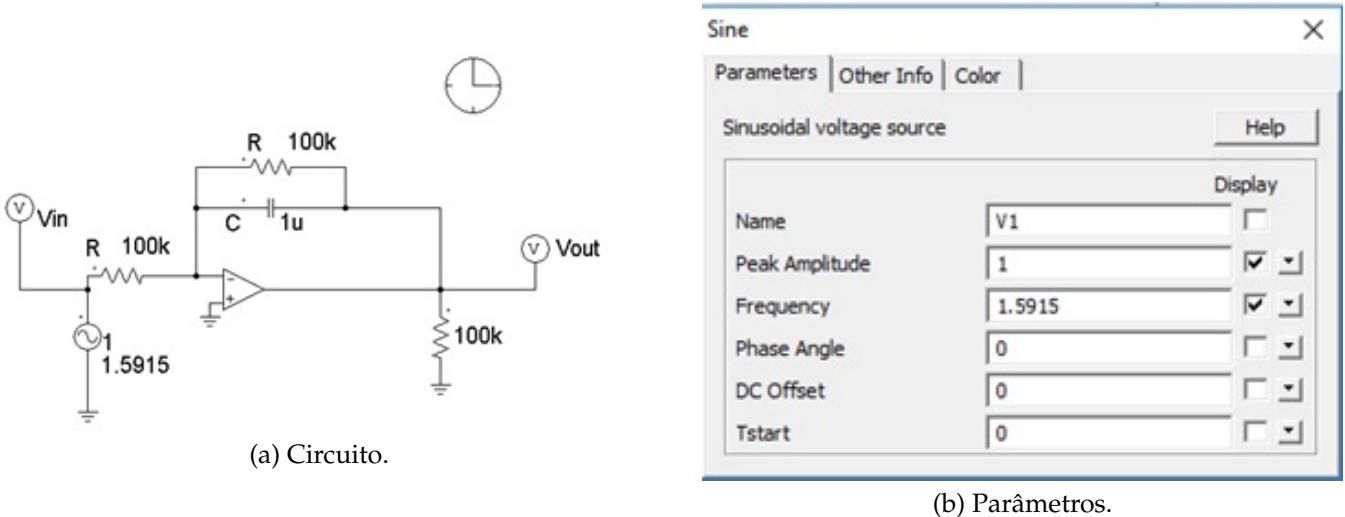


Figura 2.14: Simulando FPB ativo de 1a-ordem (montagem do Experimento 4).

Temos que:

$$\tau = R \cdot C = 100 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^{-6} = 0,1 \text{ (segundos)}$$

Frequência de corte:

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ (rad/s)}$$

ou:

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{10}{2\pi} = 1,5915 \text{ (Hz)}$$

Um diagrama temporal esperado para este circuito é mostrado na fig. 2.15.

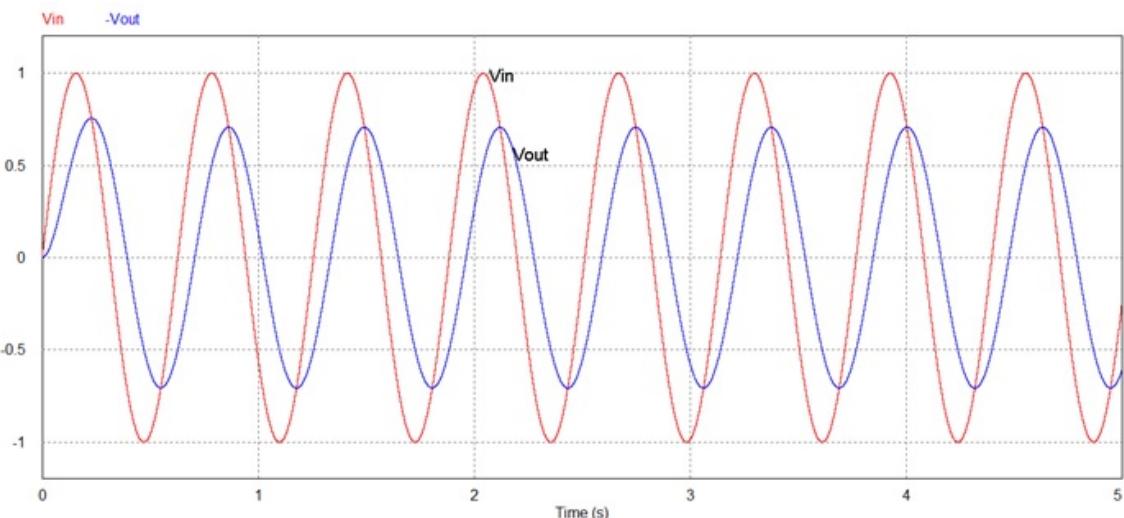


Figura 2.15: Resposta no tempo esperada para $f = 1,5915$ Hz.

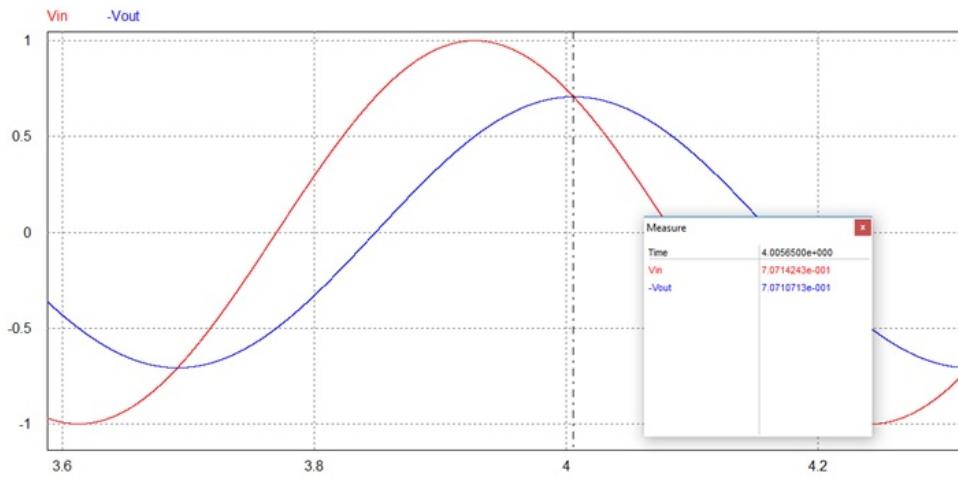


Figura 2.16: Zoom sobre a figura 2.15.

Realizando um zoom sobre a figura anterior chegamos a figura 2.16.

Note que: $V_{Out} = 0,7071$ Volts.

Calculando magnitude:

$$Mag = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{ut}}{V_{in}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{0,7071}{1} \right) = -3,03 \text{ (dB)} \quad (2.5)$$

Verificando a defasagem, percebemos na figura 2.17 que $\Delta t = -0,07798$ segundos.

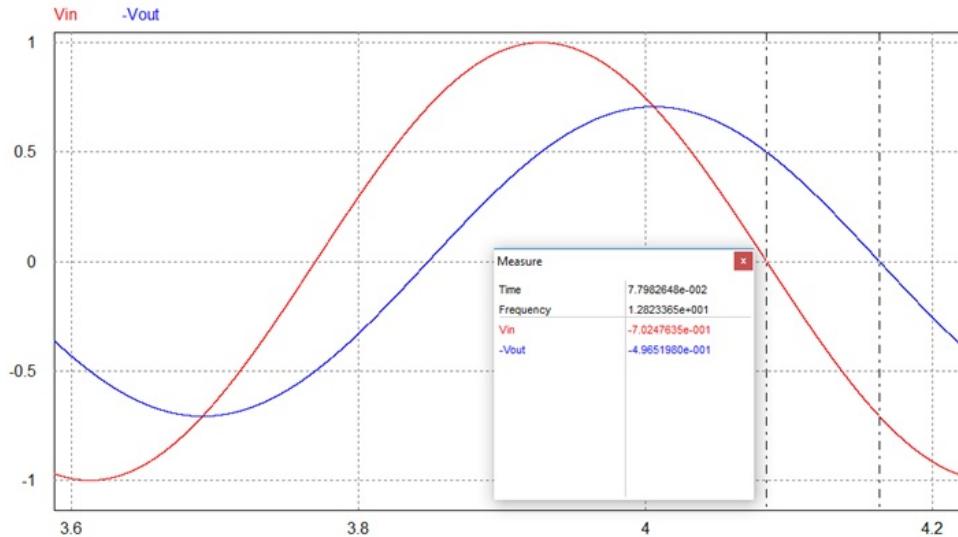


Figura 2.17: Verificando defasagem das ondas.

Note que Δt é negativo porque o sinal V_{Out} está atrasado em relação à V_{In} .

O período de V_{In} é:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,5915} = 0,6283 \text{ (segundos)}$$

O ângulo de defasagem fica então:

$$\phi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ = \frac{-0,07798}{0,6283} \cdot 360^\circ = -44,6779^\circ \quad (2.6)$$

Podemos simular este circuito no Matlab:

```

1 >> s = tf('s');
2 >> G = 1/(0.1*s + 1)
3 G =
4     1
5 -----
6 0.1 s + 1
7
8 Continuous-time transfer function.
9
10 >> bode(G)

```

O que gera um gráfico como o mostrado na fig. 2.18.

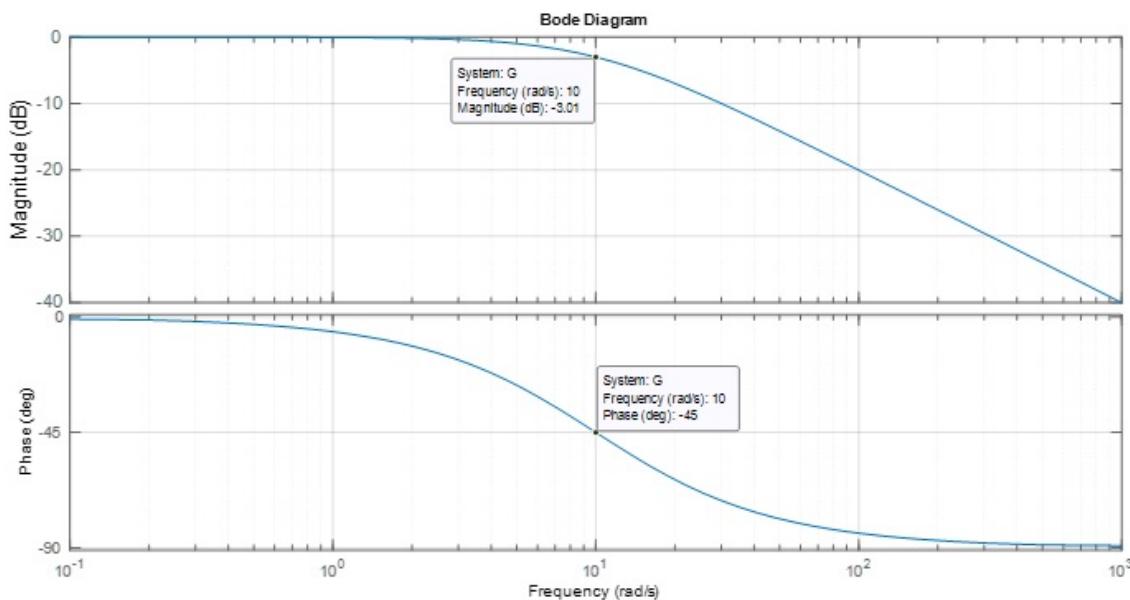


Figura 2.18: Diarama de Bode (teórico) esperado, simulado usando Matlab.

Note na fig. 2.18, que a magnitude é igual a 3,01 dB na frequência de 10 rad/s. Isto está de acordo com eq. (2.5). Além disso, o ângulo de fase nesta frequência é igual a -45° o que está de acordo com o valor calculado na eq. (2.6).

3 | Características do Motor CC

Objetivos

A ideia neste laboratório é:

- Perceber como um motor CC à imã permanente pode ser controlado, variando-se a magnitude ou sentido da sua corrente de armadura.
- Reconhecer a característica torque \times velocidade.
- Encontrar o fator escala associado como o tacho-gerador.

3.1 Introdução

Em outros laboratórios posteriores veremos como um motor elétrico pode ser usado em sistemas de controle de posição ou de velocidade.

Neste laboratório serão ilustradas as características de um motor CC usado no kit do Servo Motor e será mostrado como ele pode ser controlador pelo Servo Amplificador.

O módulo **DCM150F** é um motor a CC com escovas à imã permanente com um único e simples enrolamento de armadura (o estator). A corrente que flui através desse enrolamento é controlada via servo amplificador SA150D, como mostrado na Fig. 3.1. Note que é possível (intencional), variando o sentido da corrente (na armadura do motor), rotacionar o motor nos 2 sentidos, usando apenas 1 ou ambas as entradas do servo simplificador (entradas V_1 e V_2). Em certas ocasiões usaremos o módulo pré-amplificador PA150C para fornecer os sinais de entrada necessários, conectando os pontos 1 e 2 com o servo-amplificador (módulo SA150D).

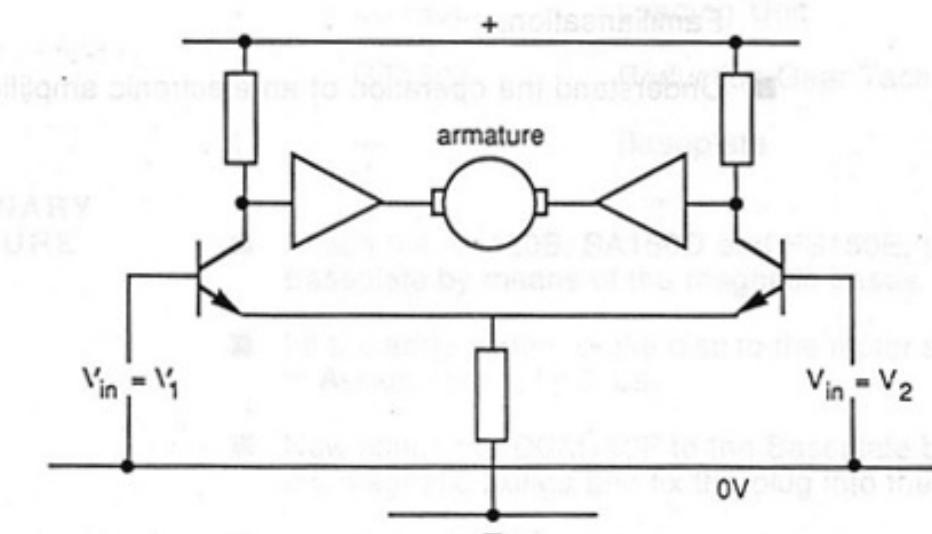


Figura 3.1: Detalhes do módulo/motor DCM150F.

Analisando essa última figura podemos concluir que a tensão aplicada ao enrolamento (*armature*) do motor é proporcional a diferença entre V_1 e V_2 .

O servo-amplificador é necessário para permitir o ingresso de níveis baixos de sinais de controle na entrada de tensão do motor. Em sistemas de reduzidas dimensões, o servo-amplificador (ou “*driver*”) é geralmente construído usando-se transístores de potência. É normal que em sistemas de controle de motores, o mesmo seja reversível e possua 2 arranjos (configurações elétricas) comuns. A fig. 3.2(a) e 3.2(b) apresenta 2 circuitos geralmente usados com motores com enrolamentos (bobinas) de campo separados.

Na fig. 3.2(a), a armadura (vulgarmente designada por “induzido”), está ligada ao circuito emissor com um bobina (enrolamento) de campo em cada coletor, enquanto na fig. 3.2(b), a armadura está ligada ao circuito do coletor. Em ambos os casos, se uma tensão positiva, V_1 ou V_2 (no caso dos transístores NPN, como é mostrado), é aplicada a qualquer deles, a corrente percorrerá uma das bobinas de campo e o induzido provocando a rotação do motor. Os 2 campos (bobinas) estão assim dispostos para que o motor rotacione em sentidos opostos para V_1 ou V_2 . Cada um destes arranjos tem suas características, diferentes, com suas próprias vantagens e desvantagens.

Com o arranjo da fig. 3.2(a), o fato de na armadura aparecer uma força contra-eletromotriz entre o emissor e a massa (comum), leva a que a tensão de controle (V_1 ou V_2) seja aumentada para que se produza aumento na velocidade do motor, e se este não tiver uma carga aplicada, a velocidade será quase diretamente controlada pela tensão de entrada. Se o motor estiver carregado, isto é, com uma carga aplicada, a velocidade vai cair, aumentando a corrente se V_1 for mantida constante. Desta forma, o torque pode ser elevado para conservar a carga em movimento. Este processo leva ao que se chama de “**características de velocidade/tensão e de velocidade/torque**”, mostradas na fig. fig:fig-3-2. Note que se faz necessário uma certa tensão mínima para fazer o motor girar, devido a fricção (atrito) causada pelo movimento em relação às suas escovas.

Com o arranjo da fig. 3.2(b), a corrente do transístor é preponderantemente determinada pela tensão do sinal de entrada. Por isto, quando o valor mínimo necessário para fazer o motor girar é alcançado, e se o motor estiver se carga, a velocidade aumenta para um valor elevado mesmo com aumento muito pequeno de tensão na entrada. Isto aumenta a dificuldade no controle do motor. Também se o motor estiver com uma carga aplicada, a velocidade vai cair abruptamente.

Em termos gerais, a fig. 3.2(a) requer um maior sinal de tensão de acionamento, mas o se torna mais fácil controlar o motor. Porém o circuito da fig. 3.2(b) é mais “sensível” (tem um “ganho” mais elevado), o que pode até ser vantajoso. Entretanto não têm as tais características convenientes quando usado num sistema de malha-fechada em relação à sua estabilidade.

Resumindo, voltando à fig. 3.1 (kit motor DCM150F), a medida que o motor acelera, sua armadura gera uma tensão (força) contra-eletromotriz (“*back-emf*”) crescente, V_a , oposta à tensão fornecida V_{in} . A corrente na armadura é de fato aproximadamente proporcional à diferença de tensão: $(V_{in} - V_a)$. Se a velocidade do motor cai (devido a maior carga submetida ao motor), V_a diminui e a corrente (na armadura), aumenta e desta forma, aumenta o torque do motor. Este comportamento tenta compensar a queda de velocidade. Esta forma de controle é chamada de “**controle por armadura**” e permite que a velocidade do motor seja proporcional a tensão V_{in} como mostra a fig. 3.3.

Devido ao atrito (*friction*) das escovas do motor, um certo nível mínimo de sinal é necessário para o motor começar a girar.

A fig. 3.3 mostra como a velocidade varia conforme o torque de carga.

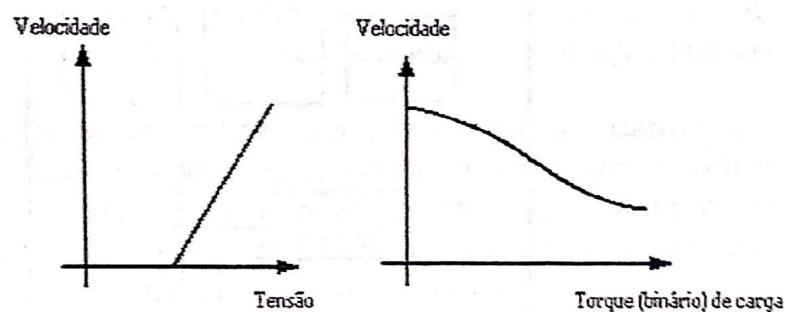
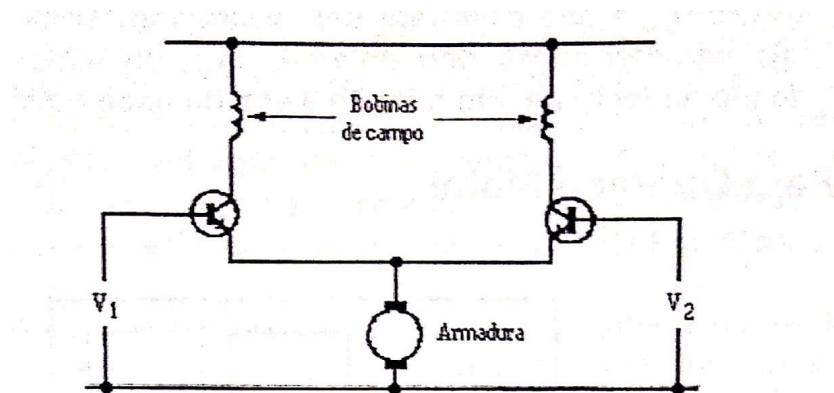
No primeiro experimento, a ideia é levantar as características do motor.

3.2 Experiência 1: Controle por Armadura

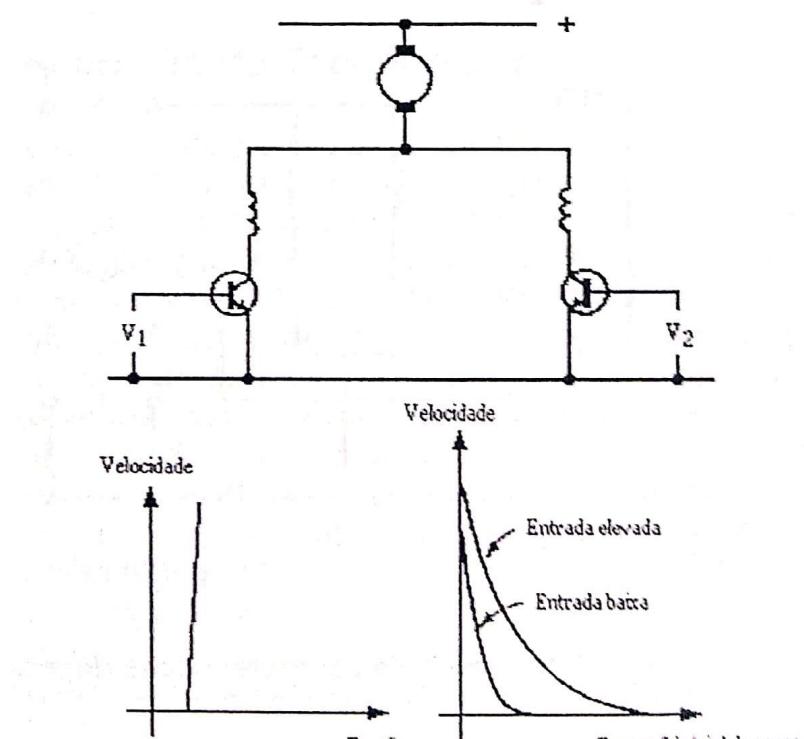
Instruções:

- 1) Montar o sistema mostrado na Fig. 3.4.

Note: O conector de 12 pinos do cabo do módulo DCM150F (motor CC) deve estar conectado no módulo SA150D (driver de potência/servo-amplificador).

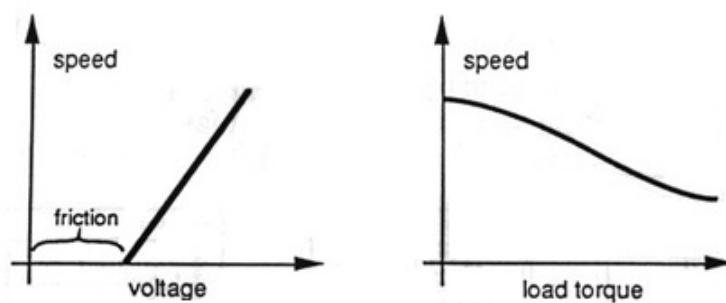


(a) Ligação da armadura (induzido)



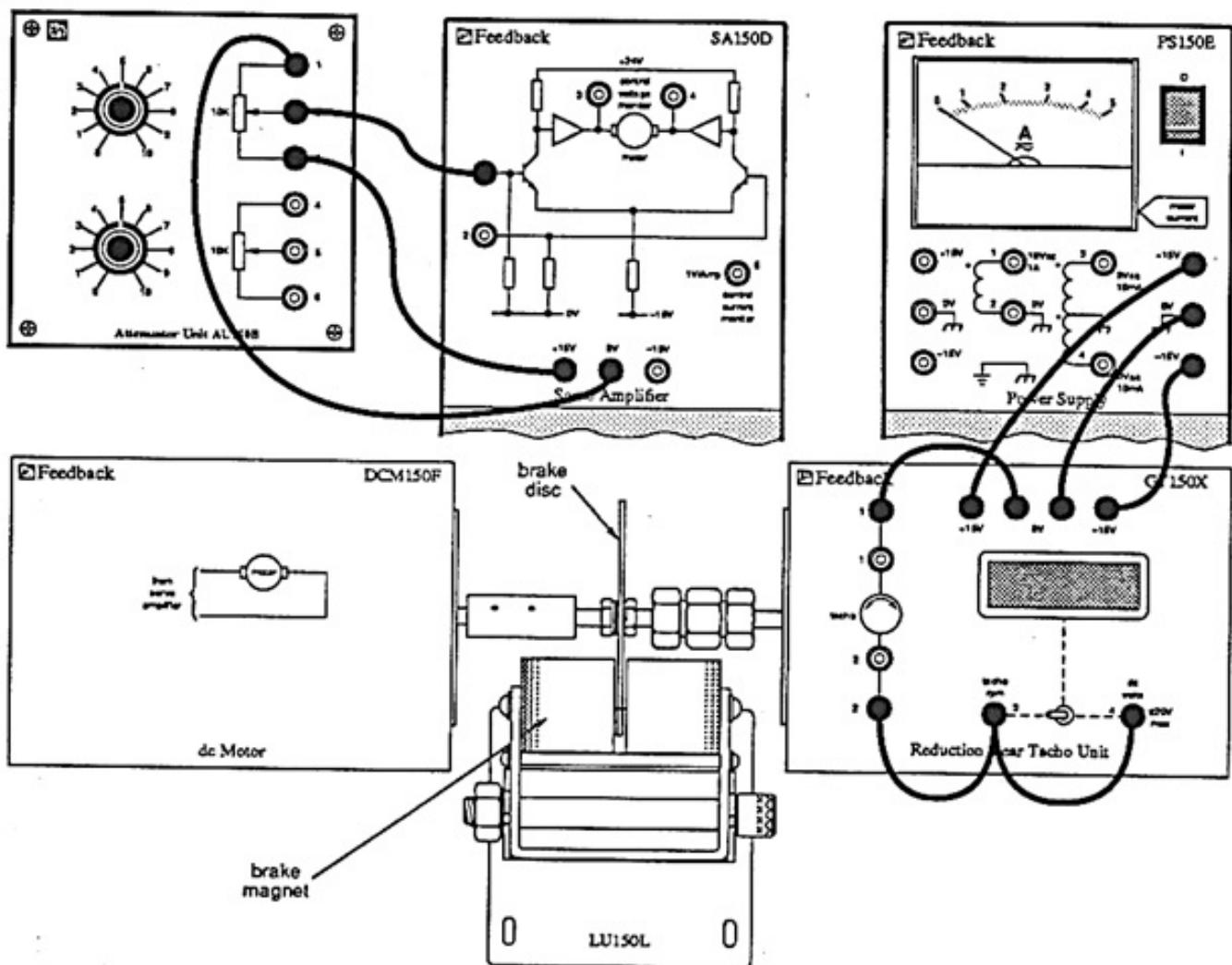
(b) Ligação do campo

Figura 3.2: Curvas características de um motor.



Obs.: *speed*: velocidade; *friction*: atrito; *voltage*: tensão; *load torque*: torque de carga.

Figura 3.3: Curvas típicas de resposta para um motor CC.



Obs.: *brake magnet*: freio magnético; *brake disc*: disco de freio.

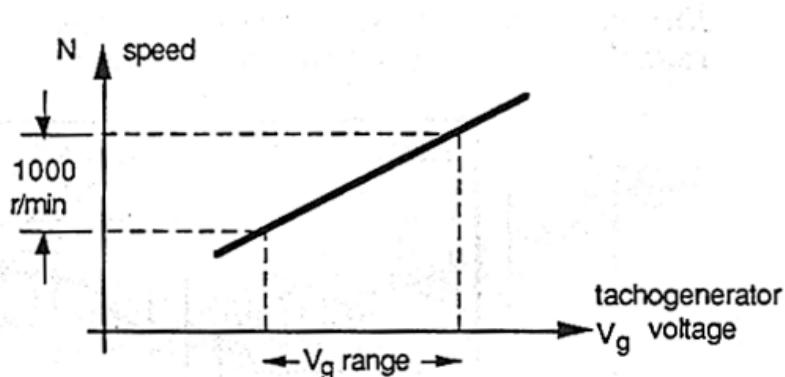
Figura 3.4: Montagem associado ao primeiro experimento.

- 2) O módulo GT150X possui um tacho-gerador acoplado ao motor. Mas primeiramente, é preciso determinar o **fator de calibração do tacho-gerador**, K_g , que corresponde a tensão gerada (Volts) à cada 1000 RPM efetuados pelo eixo do motor. A chave seletora no painel de GT150X deve ser usada para medir a rotação ou a tensão na saída do tacho-gerador (ver fig. 3.4).
- 3) Complete a tabela 3.1, variando a tensão aplicada à entrada 1 de SA150D através do potenciômetro. Varie a posição do cursor do potenciômetro para atingir os valores (de tensão) indicados na 1^a coluna da tabela 3.1. Passar para a 2^a coluna da tabela, as rotações correspondentes observadas na prática.
- Obs.:** Ajuste o freio eletromagnético (módulo LU150L) para a posição “sem carga” (freio na posição “0”).

Saída do Tacogerador (Volts)	Velocidade do eixo do Tacogerador (RPM)
1	
2	
3	
4	
5	

Tabela 3.1: Tabela referente ao primeiro experimento (determinando o fator K_g).

- 4) Em seguida plotar um gráfico com base nos valores da tabela 3.1. O gráfico deve resultar uma linha reta, similar ao mostrado pela Fig. 3.5.



Obs.: r/min: rpm; tachogenerator voltage: tensão do tacogerador.

Figura 3.5: Curva/função transferência do tacogerador.

- 5) Calcule o fator de calibração do tacogerador através da seguinte equação:

$$K_g = \frac{V_g}{N} \frac{(\text{Volts})}{(\text{RPM})} \quad (3.1)$$

O fator K_g deve ficar na faixa de 2,0 à 3,0 Volts/1000 RPM.

3.3 Experiência 2: Curva Característica do Motor sem carga

Esta curva característica (Fig. 3.3(a)) mostra como varia a velocidade do motor em função da tensão aplicada à entrada do servo amplificador SA150D. No caso à seguir, levantaremos uma **primeira curva** de resposta do motor quando o mesmo não está carregado (**sem freio eletromagnético**).

Instruções:

- 1) Afaste o freio magnético do disco colocado no eixo do motor.

Tensão V_{in} (entrada 1 de SA150D)	Velocidade do motor (RPM)
$V_{min} =$	N>0 (motor começa a girar)
1	
2	
3	
4	
5	

Tabela 3.2: Tabela de Velocidade do Motor \times Tensão aplicada no Driver.

- 2) Varie a tensão aplicada à entrada 1 de SA150D conforme mostra a 1^a coluna da tabela 3.2 e meça, para cada tensão colocada na entrada, a velocidade do motor, completando a 2a-coluna da tabela:

Note que V_{min} na tabela 3.2 ser refere ao fato de reduzir bastante a tensão aplicada na entrada de SA150D até perceber que o motor apenas começa a girar.

Realize leituras relacionando tensão de entrada \times velocidade do motor (informação do tacho-gerador) até aproximadamente o motor atingir 2000 RPM que corresponde à velocidade máxima deste motor.

- 3) Gere um gráfico “Velocidade \times Tensão” com base nos dados da tabela 3.2. Perceba (calcule) a taxa de inclinação (*slope*) Volts/1000 RPM (para motor sem carga, neste ensaio).

3.4 Experiência 3: Característica Mecânica do Motor (variando a carga)

Instruções:

- Coloque o freio magnético LU150L na posição “10” (motor completamente carregado) e o aproxime o mais próximo possível do disco, porém, durante o giro do motor, **o disco não pode tocar** no ímã do freio. Este primeiro procedimento é necessário para garantir que agora, neste experimento, quando variarmos a posição do freio (variar a carga no motor), **não ocorra contato entre a parte magnética e o disco do freio**.
- Volte o freio na posição “0” (motor sem carga) e aumente a tensão na entrada até o motor atingir sua rotação máxima (aproximadamente 2000 RPM). Anote o valor dessa tensão como sendo V_1 .
- Coloque (de novo) o freio na posição “10” e verifique se a corrente do motor **ultrapassa o nível de 2 Amperes**. Se for o caso, é necessário reduzir a tensão V_1 na entrada (anote novamente este valor).
- Agora sim, varie a posição do freio e complete a tabela 3.3:

$V_{in} = V_1$	Posição do Freio	Velocidade do Motor (RPM)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabela 3.3: Tabela de dados referente ao experimento 3 para $V_{in} = V_1$.

- 5) Agora, coloque o freio na posição 10, diminua a tensão na entrada para que o motor gire na sua velocidade mínima. Anote o valor dessa tensão como sendo V_2 . Complete a tabela 3.4:

$V_{in} = V_2$	
Posição do Freio	Velocidade do Motor (RPM)
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Tabela 3.4: Tabela de dados referente ao experimento 3 para $V_{in} = V_2$.

- 6) Com base nos dados das tabelas 3.3 e 3.4. gere um gráfico com 2 curvas intitulado: “Velocidade × Posição do Freio”. Uma das curvas está associada com $V_{in} = V_1$ e a outra com $V_{in} = V_2$; faça acompanhar uma legenda junto ao gráfico para permitir a identificação de cada curva. Compare as curvas entre si. Deve ser gerado um gráfico semelhante ao da fig. 3.3(lado direito: curva de velocidade × Torque de carga) mas com 2 curvas, uma curva para cada diferente tensão de entrada.

Note que o torque desenvolvido pelo freio depende da sua posição e da velocidade do disco. As duas últimas curvas podem ser recalculadas para obter a **característica mecânica do motor**, que é a função “Velocidade × Torque” com base na posição do freio (carga) como mostra a Fig. 3.6. No caso desta figura, a velocidade foi “normalizada” para 1000 RPM, relacionando-se assim a relação do torque de carga com a velocidade desenvolvida.

Essa última curva característica foi levantada para uma velocidade de 1000 rpm. Para outras velocidades o torque é proporcional a velocidade. Por exemplo, para a velocidade de 1000 rpm, na posição 8 do freio, o torque é 110 N·mm. Se a velocidade for 2000 rpm, o torque na mesma posição do freio será igual a 220 N·mm.

3.5 Aspectos Práticos

Usando controle por armadura, a realimentação negativa da tensão (força) contra-eletromotriz (emf), vai se opor ao sinal de entrada e desta forma tender a manter constante a corrente do motor. Este comportamento resulta numa velocidade mais constante em função da variação do torque de carregamento. Como resultado, a curva torque/velocidade se torna similar à produzida por um motor *shunt*.

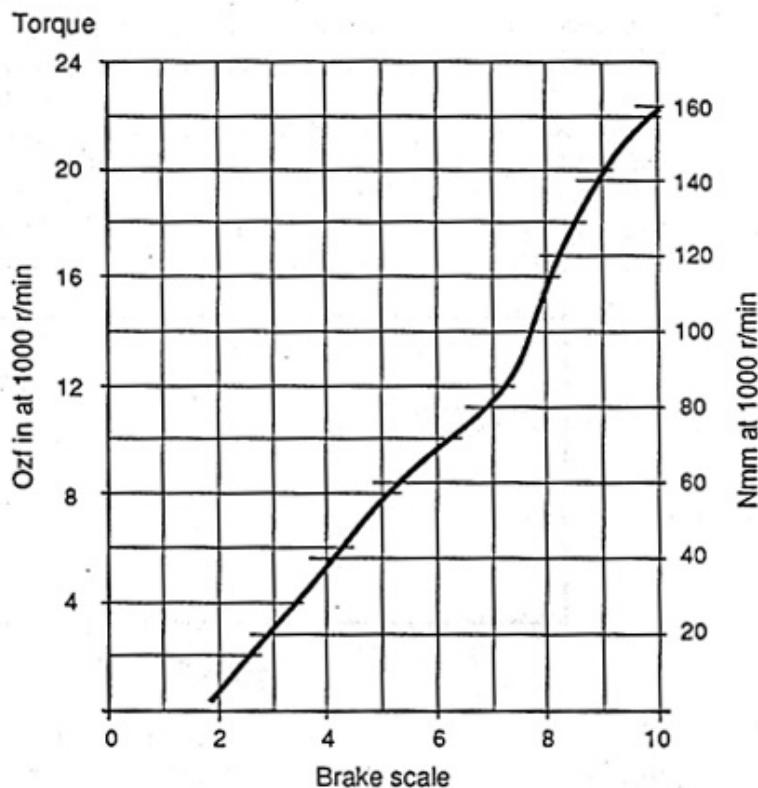
Um motor *shunt* (de derivação) (também conhecido como um motor CC de enrolamento de derivação) é um tipo de motor CC que é auto-excitado e tem os enrolamentos de campo conectados em paralelo ao enrolamento da armadura do motor. Como essas duas partes são conectadas em paralelo, a armadura e os enrolamentos de campo são expostos à mesma tensão de alimentação. O enrolamento do *shunt* é composto de muitas voltas de fio fino de cobre e, uma vez que está conectado a uma fonte CC, sua corrente de campo será constante. Afinal, existem ramos separados para o fluxo de corrente de armadura e corrente de campo.

A diferença nas construções de motores SDC e motores de derivação leva a alguma variação na operação entre esses dois tipos principais de motores DC. Entre todas as diferenças entre esses dois tipos de motores DC, a mais significativa é quanto as suas características de velocidade. Onde um motor em série mostra uma relação direta e inversa entre a carga e a velocidade, um motor de derivação pode manter uma velocidade constante, independentemente da carga no motor.

Os motores *shunt* são usados sempre que houver uma solicitação de velocidade estável. Os motores Shunt DC podem ser usados em bombas centrífugas, elevadores, máquinas de tecelagem e torno, sopradores, ventiladores, transportadores, máquinas de fiação e muito mais.

O controle por armadura de motores *shunt* é extensivamente usada em sistemas de controle e quando o controle por armadura é providenciado por um gerador CC, se transforma na configuração chamada “Ward-Leonard”.

A principal característica do sistema de controle Ward-Leonard é a capacidade de variar suavemente a velocidade



Obs.: Ozfin: onça-polegada; Brake scale: posição do freio; Nmm at 1000 r/min: Newton·mm na velocidade de 1000 rpm.

Figura 3.6: Gráfico exemplo (esperado) para a curva característica do freio magnético do motor.

de um motor DC, incluindo a reversão, controlando o campo e, portanto, a tensão de saída de um gerador DC, bem como o campo do próprio motor. Como a velocidade de um motor CC é ditada pela tensão fornecida, isso proporciona um controle de velocidade simples. O gerador DC pode ser acionado por qualquer meio. Este “motor principal” poderia ser um motor CA, ou poderia ser um motor de combustão interna (sua aplicação a veículos foi patenteada por H.W. Leonard em 1903.).

Um acionamento Ward-Leonard pode ser visto como um amplificador de alta potência na faixa de vários quilowatts, construído a partir de máquinas elétricas rotativas. Onde o “motor principal” é elétrico, uma unidade de acionamento Ward-Leonard consiste em um motor e gerador com eixos acoplados juntos. O motor principal, que gira a uma velocidade constante, pode ser alimentado por CA ou CC. O gerador é um gerador CC, com enrolamentos de campo e enrolamentos de armadura. A entrada para o amplificador é aplicada aos enrolamentos de campo, e a maior potência de saída vem dos enrolamentos da armadura. A saída do amplificador é geralmente conectada a um segundo motor, que move a carga, como um elevador. Com esse arranjo, pequenas mudanças na corrente aplicada à entrada e, portanto, ao campo do gerador, resultam em grandes mudanças na saída, permitindo um controle de velocidade suave.

3.6 Questões:

1) Para que serve o fator de calibração do tacogerador (K_g)?

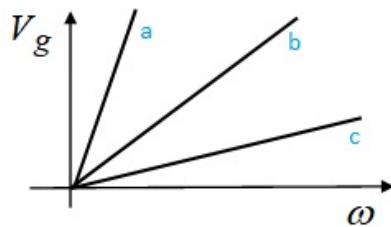
2) Por que K_g é medido na forma que se segue?

$$K_g = \frac{V_g}{1000}$$

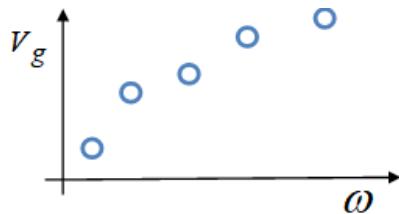
onde: V_g é a tensão na saída do tacogerador.

3) Como medir K_g se a característica $V_g(\omega)$ não é linear, por exemplo, como uma parábola?

4) Qual das características mostradas na figura 3.7 a seguir é melhor?

Figura 3.7: Curvas questão 4, $V_g \times \omega$.

- 5) Como deduzir uma expressão algébrica para a característica $V_g(\omega)$ do tacogerador se foi levantada uma característica discreta (veja a figura)

Figura 3.8: Curva discreta (pontos amostrados) $V_g \times \omega$ obtida na prática.

3.7 Anexo: Ajuste de curvas empregando o software MATLAB

Usando Matlab:

```

1 >> % ingressando dados da curva
2 >> x = [1 2 3 4 5 6 7 8];
3 >> y = [1 1.7 2.3 4.1 5.5 5.9 7.1 8.3];
4 >> figure
5 >> plot(x, y, 'o') % obtendo grafico como no item da questao 5

```

Deverá ser obtido um gráfico como o mostrado na fig. 3.9.

Com o botão direito do mouse, clicar sobre o gráfico e ativar “Basic Fitting”, como mostrado na fig. 3.10.

Deve surgir uma janela como a mostrada na fig. 3.11.

Escolher, por exemplo, a opção *4th degree polynomial* (polinômio de 4^a ordem). Clique no botão da seta “ \rightarrow ” para ativar um rápido processamento (estimativa dos parâmetros do polinômio selecionado). O Matlab deve sobrepor a curva do polinômio selecionado sobre os dados amostrados, como mostra a fig. 3.12 à seguir.

O Matlab mostra no lado direito da janela de ajuste de curva (fig. 3.11) os coeficientes do polinômio selecionando (clicar no botão da seta “ \rightarrow ” no canto inferior direito). Vamos exportar estes dados para o *Workspace* (área de trabalho) do Matlab (variáveis na janela de comando), clicando no botão “Save to workspace” – ver fig 3.13.

Deve aparecer uma janela como a mostrada na fig 3.14. Complete o quadro de texto “Save fit as..” com um nome para esta estrutura de dados. Por padrão o Matlab já sugere “fit”.

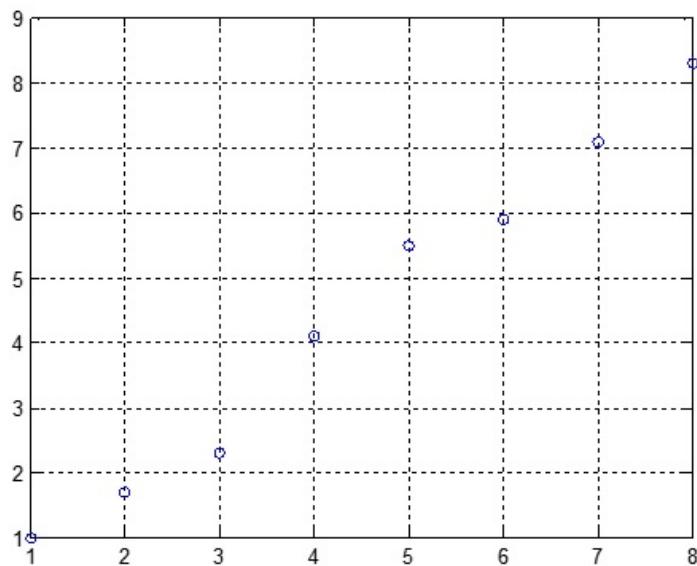


Figura 3.9: Curva com pontos obtidos na prática.

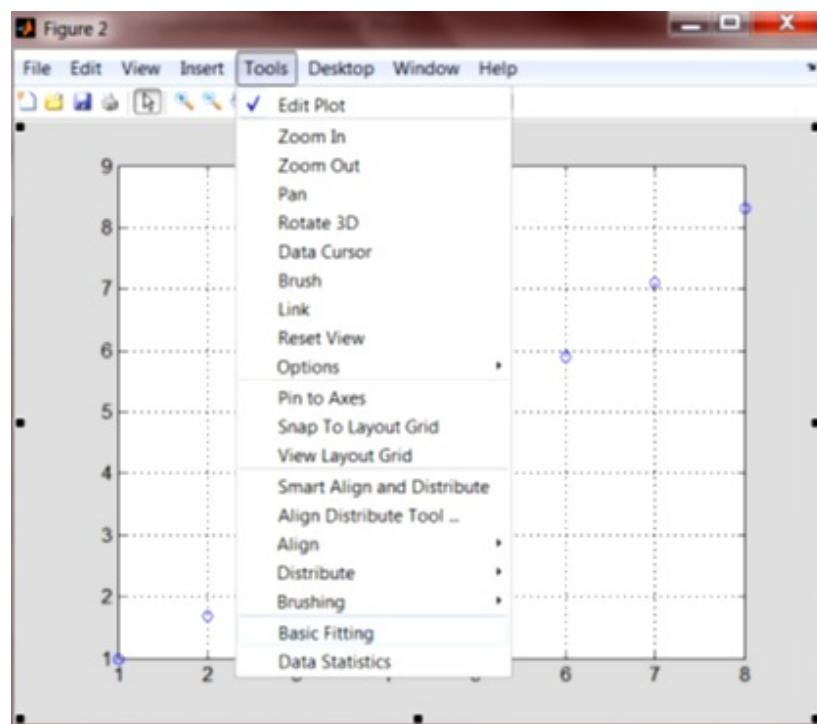


Figura 3.10: Ativando “Basic Fitting” sobre dados amostrados.

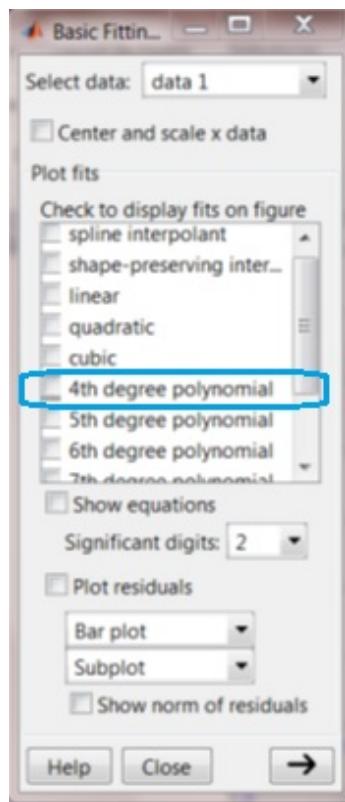


Figura 3.11: Escolhendo polinômio para ajuste da curva

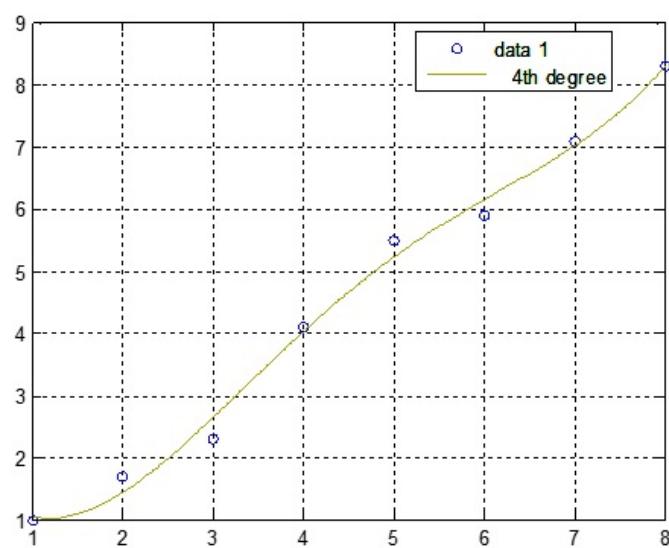


Figura 3.12: Observando o polinômio escolhido sobre os dados amostrados.

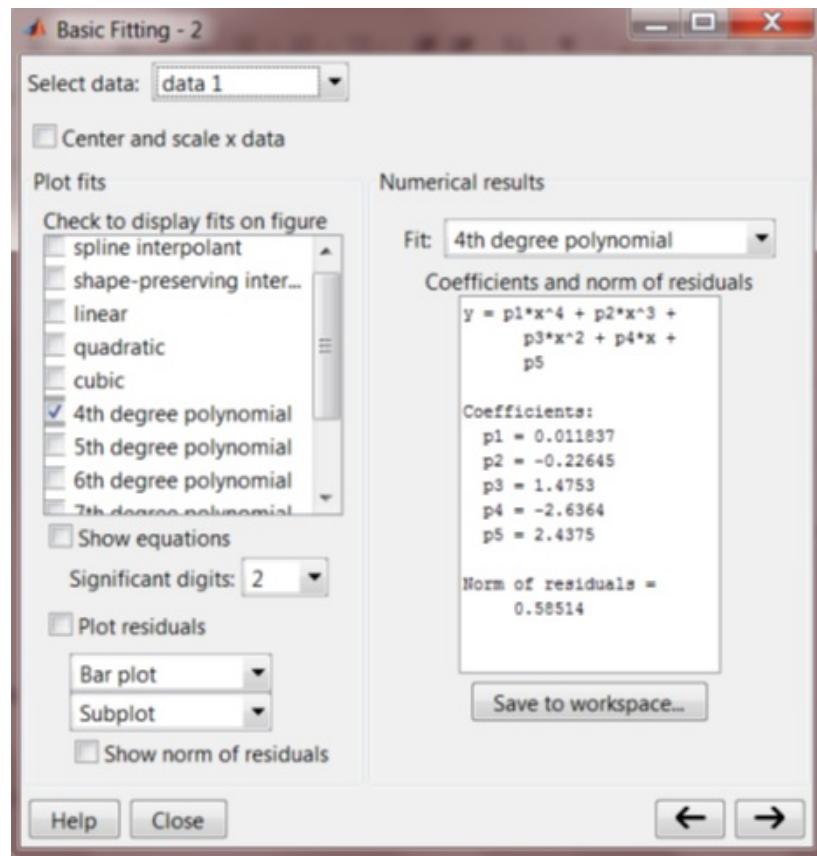


Figura 3.13: Exportando os coeficientes do polinômio selecionado a calculados para os pontos do gráfico.

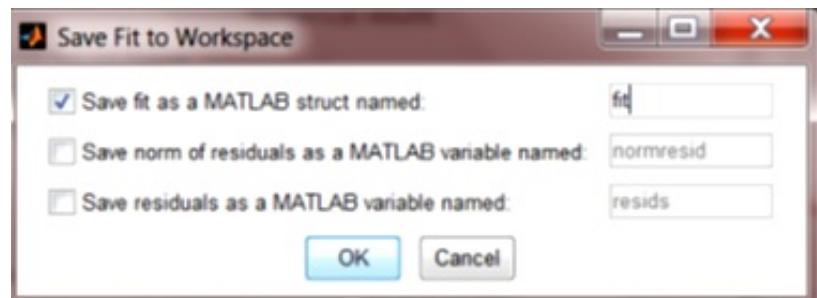


Figura 3.14: Escolhendo nome para estrutura de dados contendo parâmetros do polinômio selecionado.

Agora na janela de comandos do MATLAB faça:

```

1 >> fit                                     % abrir a estrutura fit
2 fit =
3 type: 'polynomial degree 4'
4     coeff: [0.0118   -0.2265    1.4753   -2.6364   2.4375]
5
6 >> Coef = fit.coeff                         % extrair os valores numericos
7 Coef =
8     0.0118   -0.2265    1.4753   -2.6364   2.4375
9
10 >> y = polyval(Coef, 2)                   % calcula o valor do polinomio para x = 2
11 y =
12     1.4436
13
14 >> y = polyval(Coef, 4.418)               % calcula o valor do polinomio para x = 4,418
15 y =
16     4.5673                                 % veja a proxima figura.

```

Compare os valores calculados com os pontos mostrados no gráfico (curva) mostrada na fig. 3.15.

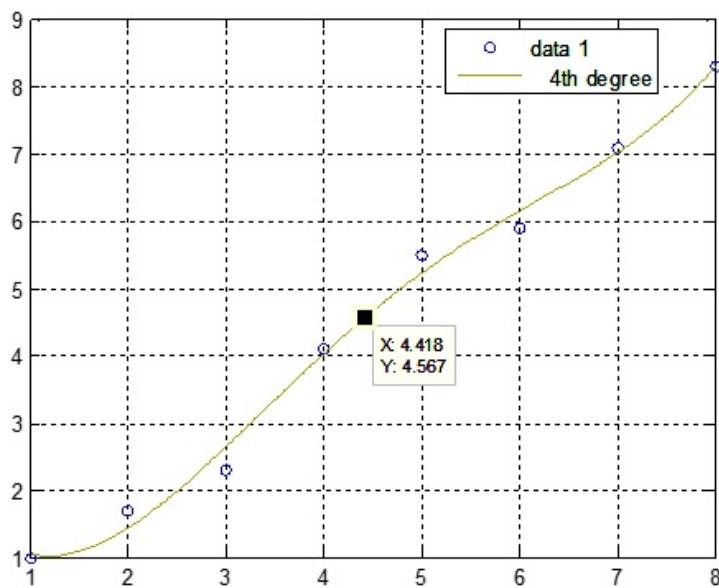


Figura 3.15: Sobrepondo pontos calculados sobre a curva polinomial estimada para os dados que foram amostrados.

4 | Estudo do Canal de Erro

Objetivos

- Entender como um sinal de erro pode ser produzido usando-se um amplificador operacional como comparador.
- Ser capaz de explicar o que significa o termo “canal de erro”.
- Perceber como 2 potenciômetros poder ser usados para formar um canal de erro.

4.1 Introdução

O canal de erro, utilizando a simbologia de diagramas de blocos, consiste em um ponto de soma com pelo menos, duas entradas e uma saída conforme mostra a Fig. 4.1.

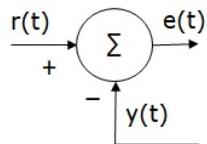


Figura 4.1: Parte do laço de realimentação destacando determinação do erro, $e(t)$.

O canal de erro executa a seguinte operação aritmética

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.1)$$

As vezes, é conveniente acrescentar um ganho K (simples Controlador Proporcional). Neste caso:

$$e(t) = K(r(t) - y(t)) \quad (4.2)$$

Em sistemas de controle automáticos, um amplificador operacional pode ser utilizado para implementar o canal de erro conforme visto no Laboratório 2. Além de utilização de um amplificador operacional, há outros detalhes importantes que devem ser levados em consideração durante a implementação de canal de erro.

Consideremos um sistema em malha fechada de controle de posição que envolve dois potenciômetros. O canal de erro do sistema é mostrado na Fig. 4.2.

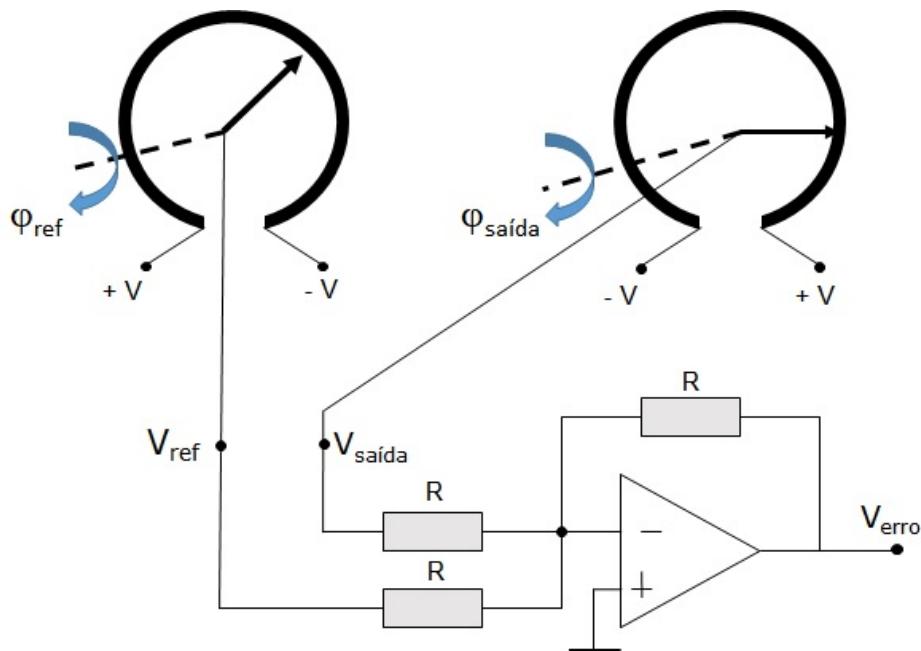


Figura 4.2: Simulando sinais (tensões) na entrada do Amp.Op. para estudo do sinal do erro.

O potenciômetro rotativo da esquerda gera o sinal de referência, enquanto o eixo do da direita gera o sinal de saída. Os dois sinais elétricos, oriundos dos dois potenciômetros, são tratados através do amplificador operacional. O sinal na saída do amplificador operacional é determinado da seguinte maneira:

$$V_{erro} = -\frac{R_2}{R_1} (V_{ref} - V_{saída}) \quad (4.3)$$

O ângulo do eixo de referência (fig. 4.2) é φ_{ref} e o ângulo do eixo de saída é $\varphi_{saída}$.

É preciso notar, que a tensão de alimentação do potenciômetro da direita (fig. 4.2) está **propositamente invertido** em comparação com o potenciômetro da esquerda. Dessa maneira, o Amp.Op. realmente estará determinando a diferença entre os dois sinais (os 2 ângulos). Isto significa que para uma mesma posição angular nos 2 potenciômetros, o sinal $V_{saída}$ será igual a zero (nulo), conforme ditado pela eq. (4.1).

4.2 Experiência 1 – Demonstração de Canal de Erro

Montar o sistema mostrado na fig. 4.3.

Instruções:

1. Ajustar o botão seletor de *feedback* na posição do resistor de $100\text{K}\Omega$.
2. Realize o ajuste inicial do módulo OA150A, zerando o off-set do mesmo. Para isso, desconectar ambas as entradas de OA150A e zerar a tensão na saída 6 através do potenciômetro embutido “zero set”. Utilizar o voltímetro de GT150X. Não esquecer alimentar o módulo GT150X.
3. Restabelecer as entradas 1 e 2 do módulo OA150A. **Notar que** as polaridades (alimentações) dos potenciômetros rotacionais (PS150R e OP150K) são conectados de maneira opostas entre si.
4. Ajustando as posições angulares dos dois eixos conforme a tabela 4.1, medir a tensão na saída 6 de OA150A e passar para a 2a coluna desta tabela.
5. **Gerar o gráfico** “Tensão × Posição angular”.
6. Analisar a linearidade dos potenciômetros. Se os potenciômetros fossem absolutamente idênticos e lineares, o sinal na saída 6 seria igual a 0 sempre. Isto significa que são esperadas linhas com valores diferentes na tabela 4.1, justamente devido a falta de linearidade entre os potenciômetros. Qualquer diferença na relação: Tensão de Saída/Angulo do Dial, irá causar variações no balanceamento dos potenciômetros que por conseguinte vai afetar a saída do Amp.Op.

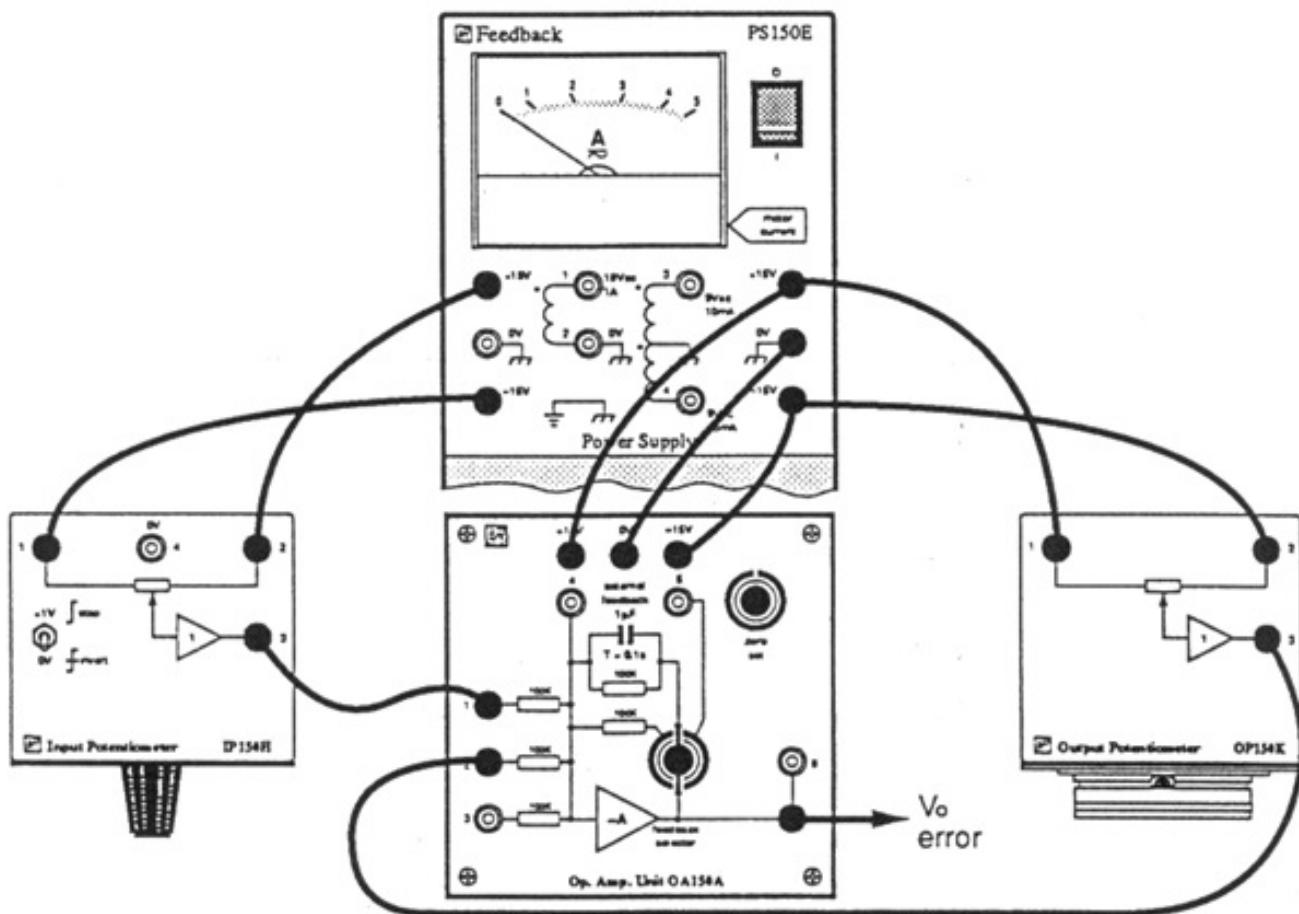


Figura 4.3: Conexões referentes ao Experimento No. 1

Posição angular dos eixos (graus)	Tensão na saída 6 de OA150A (Volts)
$\alpha_1 = \alpha_2$	
0	
15	
30	
45	
60	
75	
90	
105	
120	
135	
165	
180	

Posição angular dos eixos (graus)	Tensão na saída 6 de OA150A (Volts)
$\alpha_1 = \alpha_2$	
180	
195	
225	
240	
255	
270	
285	
300	
315	
330	
345	
360	

Tabela 4.1: Tensão na saída de OA150A (Parte I).

7. Observar um aumento na tensão em torno da posição de 180° . Esse aumento acontece devido a uma descontinuidade mecânica interna dos potenciômetros.
8. Notar que os potenciômetros podem ser utilizados como sensores de posição numa faixa de posições angulares entre -160° e $+160^\circ$. Se o sistema que utiliza esses potenciômetros sair dessa faixa, o sistema vai perder a estabilidade e vai manter oscilações na sua saída em torno da posição angular de 180° .

Obs.: Objetivo nesta primeira parte do experimento é descobrir na prática a faixa angular em que os potenciômetros não podem ser utilizados na prática devido a construção física/mecânica interna dos mesmos.

Parte II:

9. Ajustar agora a posição angular do potenciômetro de saída para 0° (0 Volts) e variar apenas a posição angular do eixo do potenciômetro de entrada. Preencher a tabela 4.2.

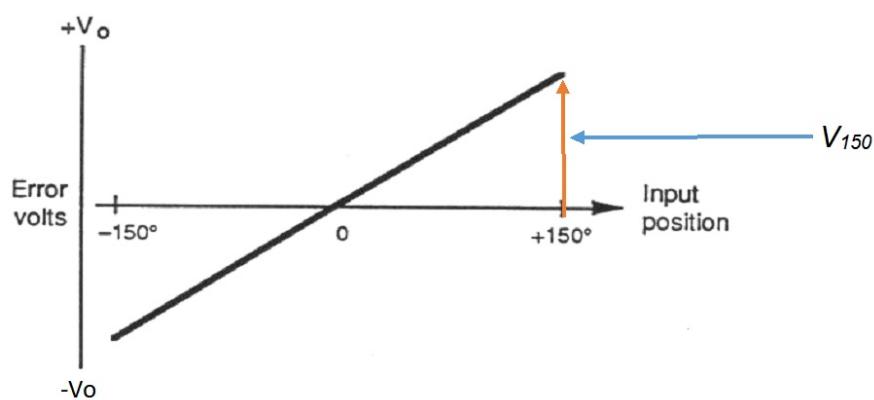
Posição angular do eixo de entrada (graus)	Tensão na saída 6 de OA150A (Volts)	Posição angular do eixo de entrada (graus)	Tensão na saída 6 de OA150A (Volts)
-150		0	
-135		15	
-120		30	
-105		45	
-90		60	
-75		75	
-60		90	
-45		105	
-30		120	
-15		135	
0		150	

Tabela 4.2: Tensão na saída de OA150A, parte II, variando apenas ângulo de entrada.

Obs.: O objetivo agora é perceber o “cálculo do erro” sendo executado na prática pelo módulo do Amp. Op. OA150A e confirmar a relação:

$$\Delta\Phi = K \Delta V_{Volts}$$

10. Plotar um gráfico com base na tabela 4.2 que deve resultar em algo semelhante ao gráfico mostrado na fig. 4.4.



Error volts = tensão do erro (V); *Input position* = posição de entrada.

Figura 4.4: Gráfico tensão (erro) \times ângulo de entrada.

Obs.: Deverá ser percebido que alterar a configuração do potenciômetro de saída alterará a posição angular na qual sua entrada gera erro nulo, porém a inclinação do gráfico requisitado no item 10 não deve ser alterada.

11. Calcular o ganho do canal de erro, também chamado de constante de “fator de erro” através da seguinte equação:

$$K_e = \frac{V_{150}}{150} \quad (4.4)$$

Aqui a tensão V_{150} corresponde à tensão na saída quando o ângulo de entrada é 150° .

O valor numérico do ganho K_e é importante, pois passa uma ideia da magnitude do desalinhamento angular entre os potenciômetros e também determina o valor do ganho do canal direto do sistema em malha fechada. Em diagramas de blocos o ganho K_e aparece logo após o ponto de soma (ver fig. 4.1).

4.3 Sobre o canal de erro

O ganho do canal de erro pode ser calculado da seguinte forma:

$$K_e = \frac{V_{150}}{150^\circ} \approx 80 \times 10^{-3} (V/\text{ }^\circ)$$

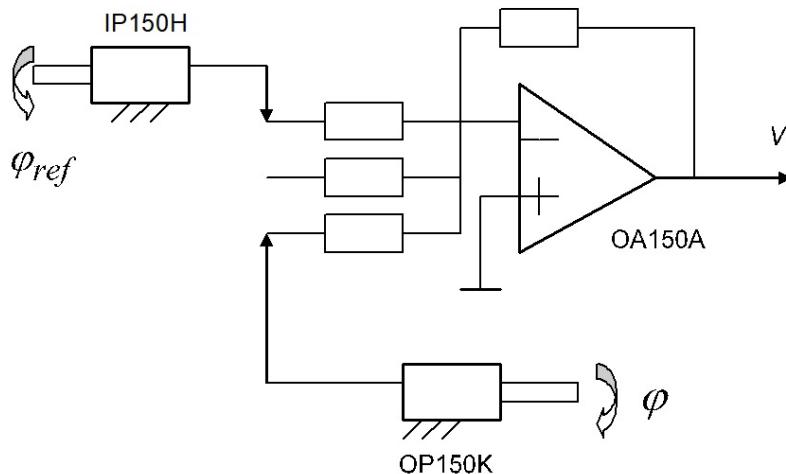


Figura 4.5: Experimento 1 e diagrama em blocos simplificado.

O ganho de IP150H e de OP150K é K_{pot} . Acompanhar pela fig. 4.6.

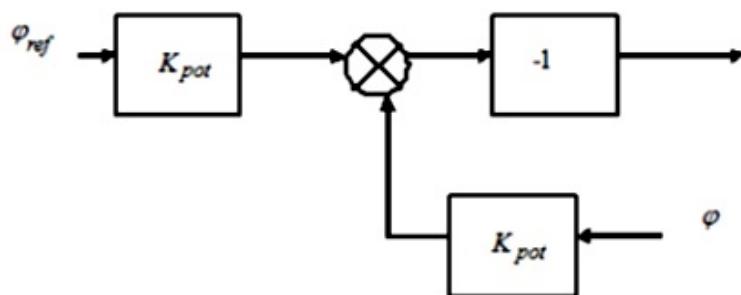


Figura 4.6: Diagrama de blocos ressaltando canal do erro.

Aplicando álgebra de blocos e aplicando adequadamente a alimentação dos potenciômetros, pode-se chegar ao seguinte diagrama de blocos (fig 4.7):

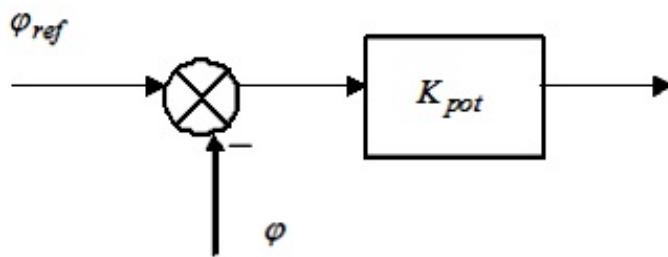


Figura 4.7: Diagrama de blocos resultante final.

4.4 Aspectos Práticos

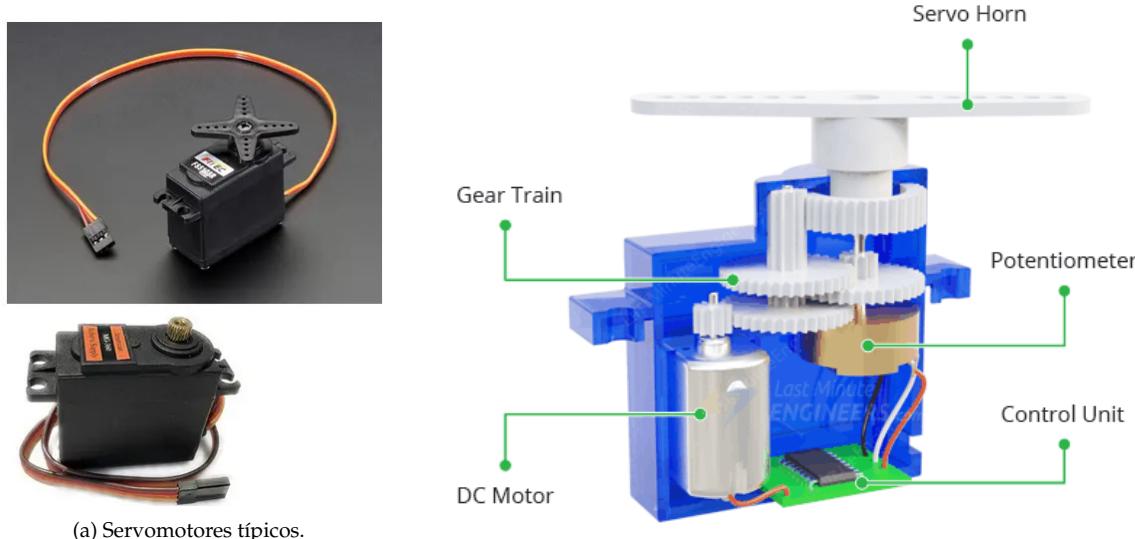
Em um próximo laboratório, vamos acoplar o eixo rotatório do potenciômetro de saída ao eixo do motor e completar um sistema de controle para fazê-lo acompanhar o movimento da entrada (controle de posição angular). Isso significará que, para um sistema prático, são necessários potenciômetros que possam girar completamente os 360°. Como um sistema deste tipo pode ser obrigado a operar continuamente durante um longo período de tempo, o desgaste contínuo nas superfícies de contato do potenciômetro requer uma construção muito resistente.

Para superar esse problema, um sistema sem contato, como um gerador síncrono, pode ser usado. Um laboratório futuro explicará seu princípio de funcionamento.

Os primeiros usos para sistemas de controle de posição foram em baterias de armas, onde um radar podia controlar a posição das plataformas de armas.

Existem muitos outros usos, como no controle do equipamento de direção do navio, posicionamento das superfícies de controle de uma aeronave, controle de máquinas-ferramentas e posicionamento de válvulas de fluxo.

Uso comercial de sistema de controle de posição incluem os famosos servo-motores muito usados ás nível de modelismo. A fig. 4.8 mostra um servo-motor típico. Estes motores giram no sentido horário ou anti-horário variando seu ângulo tipicamente entre valores como ±100°. Um sinal de controle baseado em modulação PWM, indica a magnitude pretendida para o giro do motor.

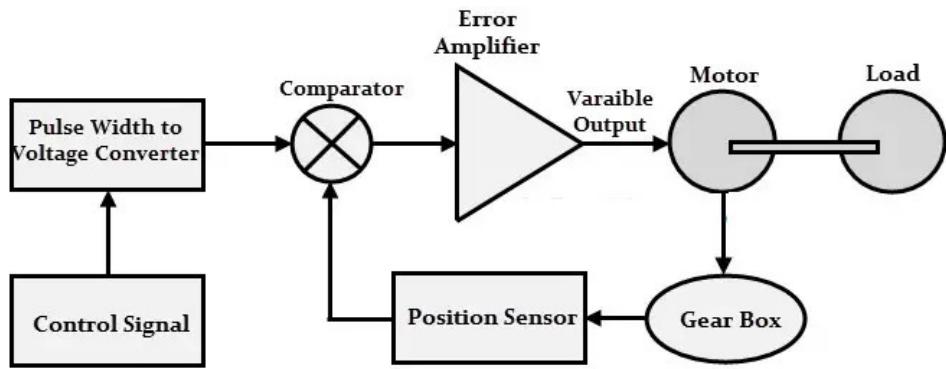


Fontes:

<https://ettron.com/what-is-a-servo-motor-how-a-servo-motor-works-control/> (acessado em 04/04/2023)
<https://lastminuteengineers.com/servo-motor-arduino-tutorial/> (acessado em 04/04/2023)

Figura 4.8: Servomotores típicos.

A próxima figura 4.9 ressalta o sistema de controle embutido internamente num servomotor.



Fonte: <https://ettron.com/what-is-a-servo-motor-how-a-servo-motor-works-control/> (acessado em 04/04/2023).

Figura 4.9: Diagrama de blocos do sistema de controle típico de um servomotor.

4.5 Questões

- 1) Explicar em detalhes como foi obtido o diagrama de blocos da Fig. 4.6.
- 2) Explicar em detalhes como obtido o diagrama de blocos da Fig. 4.7.
- 3) Qual é valor prático de K_e ?
- 4) Como obter o valor numérico de K_{pot} ?

5 | Controle de Posição Simples

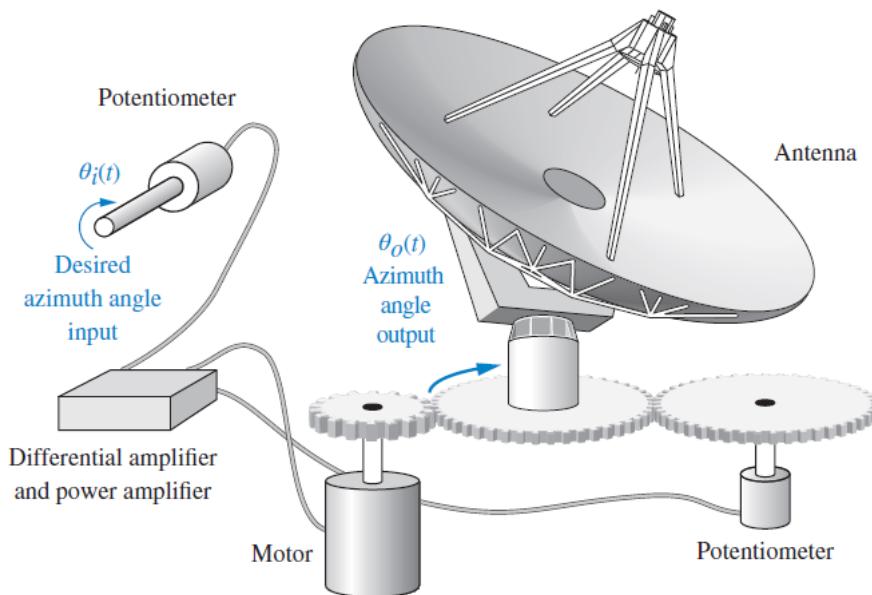
Objetivos

Quando este laboratório for completado, o estudante deverá ser capaz de:

- Perceber como opera um simples controle de posição em malha-aberta.
- Apreciar a necessidade de uma malha-fechada para controle de posição.

5.1 Introdução

Dois potenciômetros rotativos podem ser utilizados no projeto de um sistema de controle automático de posição em malha fechada – ver fig. 5.1. O potenciômetro de entrada, neste caso, gera o sinal de referência e o de saída, com seu eixo acoplado no eixo de objeto de controle, gera o sinal de realimentação.



Fonte: Nise, Norman S., *Control Systems Engineering*, 7th ed., Wiley, 2015.

Figura 5.1: Exemplo de sistema de controle de Azimute de uma antena.

A figura anterior pode ser repassado para um outro esquema conforme mostra a fig. 5.2.

E esta última figura pode ser traduzida na forma de um diagrama em blocos mostrado na fig. 5.3.

Mas usando os dois potenciômetros, também pode ser realizado um simples sistema de controle de posição manual. Nesse caso, o eixo de entrada é deslocado manualmente e com movimentos aleatórios, enquanto o de saída também é movido manualmente, mas os deslocamentos do eixo são feitos com base no sinal de erro.

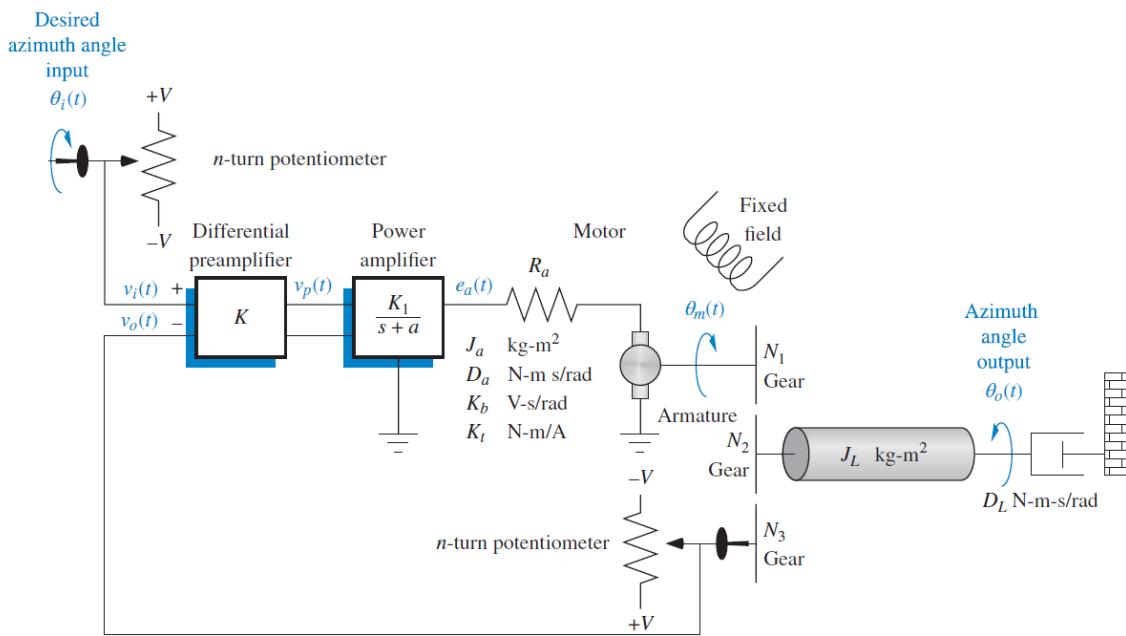


Figura 5.2: Alternativa de diagrama esquemático para sistema mostrado na fig. 5.1.

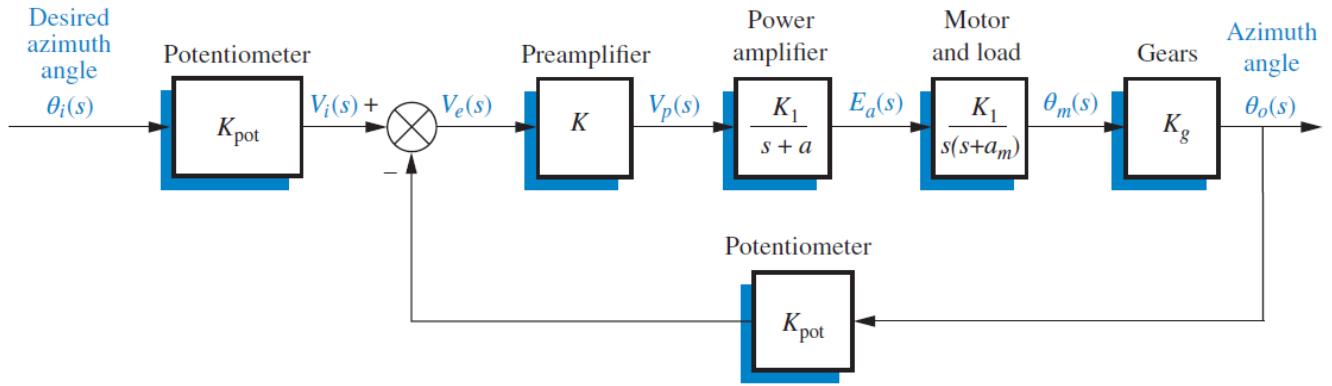


Figura 5.3: Diagrama em blocos correspondente a fig. 5.2.

5.2 Experiência 1 – Sistema Manual de Controle de Posição

Para este experimento se sugere a participação de 2 estudantes. Montar o sistema mostrado na fig. 5.4.

Instruções:

1. Zerar o off-set do amplificador operacional OA150A. Para isto, utilizar o voltímetro do módulo GT150X. Esse voltímetro será utilizado também para medir todas as tensões CC nesta aula.
2. Ajustar a posição angular dos eixos dos potenciômetros IP150H e OP150K para 0º.
3. O 1º estudante desloca o eixo de IP150H para uma nova posição (entre -160º e +160º). Feito isso, o 2º estudante, observando o sinal de erro na saída 6 de OA150A e desloca o eixo de saída (OP150K) para zerar o erro.
4. O 1º estudante varia lentamente a posição do eixo de entrada, enquanto o 2º tenta manter o sinal de erro igual a zero.
5. O 1º estudante faz mudanças bruscas na posição do eixo de entrada e o 2º estudante tenta zerar o sinal de erro mais rápido possível.

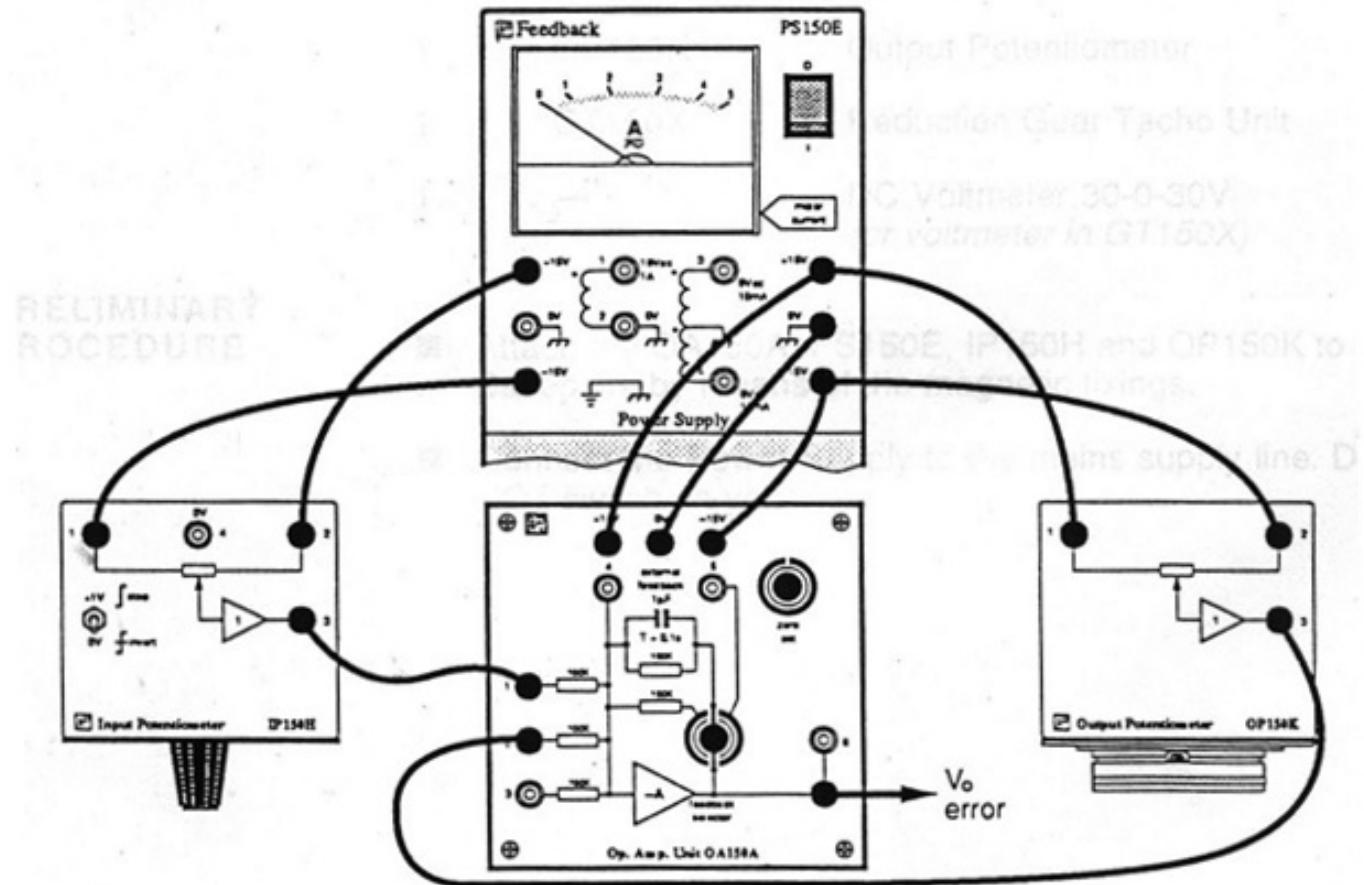
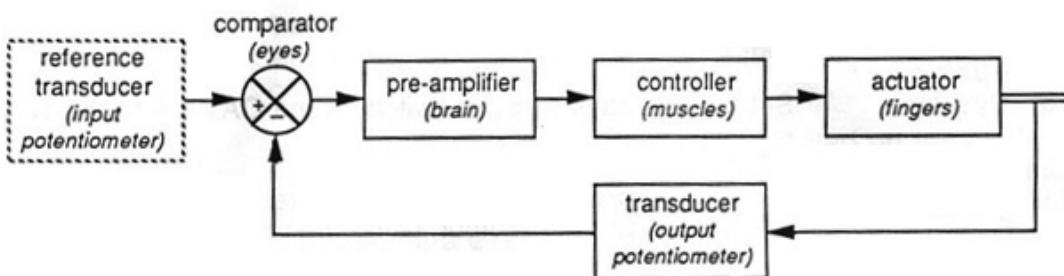


Figura 5.4: Primeira montagem.

Deve ser percebido que a tensão V_o (erro) vai à zero, apenas quando os 2 potenciômetros estão alinhados (na mesma posição angular). Quanto maior a diferença angular (o desalinhamento) entre os 2 potenciômetros, maior será a tensão V_o .

Um possível diagrama de blocos do sistema anterior é mostrado na fig. 5.5.



input potentiometer – potenciômetro de entrada; brain – cérebro; eye – olho; muscles – músculos; fingers – dedos; output potentiometer – potenciômetro de saída; transducer – transdutor (sensor + condicionador de sinal).

Figura 5.5: Diagrama de blocos (proposta) para o controle manual de posição angular.

5.3 Experiência 2 – Controle Simples de Posição Acionado por um Motor CC

Montar o sistema mostrado na fig. 5.6.

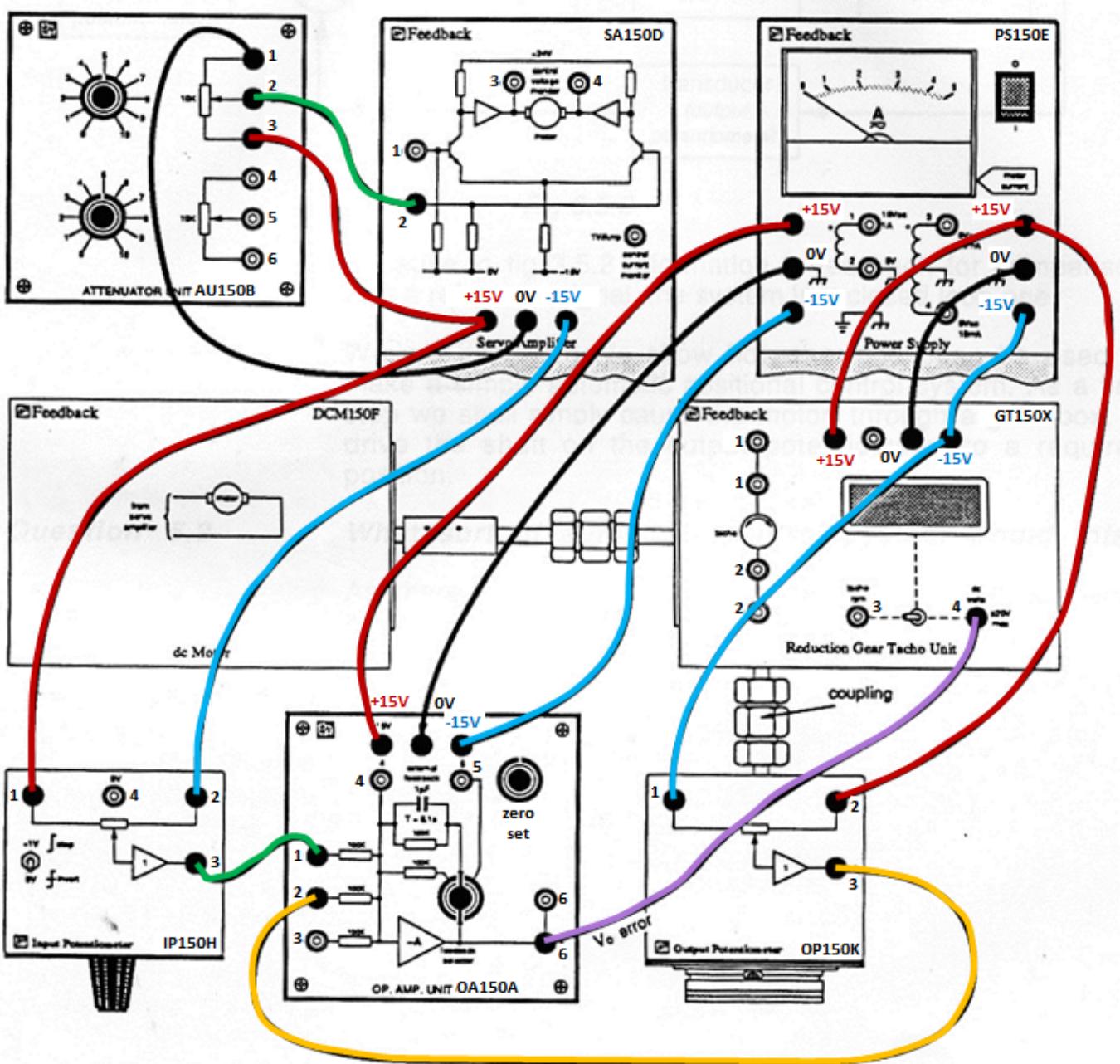


Figura 5.6: Ligações para segunda montagem.

Atenção: Nunca conecte os curadores de AU150B (terminais 2 e 5) nos terminais de alimentação +15 V, -15 V, 0 V, 18 VCA ou 9 VCA. Esse erro é muito grave e danifica o equipamento!!!

Instruções:

1. Zerar o offset de OA150A.
2. Ajustar o cursor do potenciômetro AU150B na posição 0° (zero graus).
3. Deslocar vagarosamente o cursor no sentido horário até o motor começar a girar. Anotar a posição do cursor de AU150B como n_1 .

4. Adotar (selecionar) uma posição angular para o eixo de saída, por exemplo, 100° . Ajustar o cursor de AU150B na posição n_1 e quando o eixo de OP150K atingir essa posição, ajustar o cursor de AU150B na posição 0° .
5. Repetir esse último procedimento três vezes para posições diferentes do eixo de OP150K.

Observações: Algumas intercorrências deverão ser percebidas:

- a) Pode-se concluir que **o sistema é unidirecional**, isto é, se a posição desejada for ultrapassada é necessário esperar até o eixo de saída completar mais uma volta.
- b) Além disso, se o sinal na saída do potenciômetro AU150B aumentar, ou seja, se o cursor for deslocando muito além da posição n_1 , será muito **difícil estabilizar** o eixo de OP150K na posição desejada, pois a velocidade do motor aumenta.

Modificações sugeridas:

6. Para que o motor possa girar em ambas as direções, é necessário transferir o cabo que liga o terminal 1 de AU150B de 0V de SA150D para $-15V$. Agora o sinal 0V na saída do potenciômetro corresponde a posição 5 (central) do seu cursor.
7. Ajustar o eixo de IP150H numa posição entre -160° e $+160^\circ$. Tentar transferir o eixo de OP150K para a mesma posição, observando o valor do erro através do voltímetro de GT150X.
8. **Opcionalmente**, pode ser usado um **osciloscópio** para entender melhor o funcionamento deste conjunto. Para tanto, conecte o canal 1 do osciloscópio na saída do tap central (pino 3) do potenciômetro OP150K usado como sensor de posição. Conecte o terra desta ponteira ao terra geral do circuito (pode ser aproveitado o pino "0V" do módulo OA150A que provavelmente estará do lado do OP150K). Depois conecte o canal 2 do osciloscópio à saída do Amp.Op. (módulo OA150A), pino 6, que está relacionado com sinal de erro: " V_o error". Poderá ser observada então uma tela semelhante à mostrada na fig. 5.7.
Poderá ser notado que:
 - Quando o sensor mede 0° , a tensão de erro (V_o error) também se anula (assume 0 Volts);
 - Quando o sensor mede uma tensão positiva, o Amp.Op. (módulo OA150A) gera uma tensão negativa (resultado da sua configuração inversora, com ganho $-A$);
 - Quando o sensor mede uma tensão negativa, o Amp.Op. (módulo OA150A) gera uma tensão positiva (resultado da sua configuração inversora, com ganho $-A$);
 - O módulo Amp.Op. OA150A, satura em 2 extremos, no caso da captura real feita em osciloscópio e mostrada na fig. 5.7, os extremos ficaram em $[-12.4, +13.2]$ Volts.

Note:

Agora, por um lado, o processo de controle ficou mais fácil, pois não é mais preciso esperar uma volta completa do motor se seu eixo de saída ultrapassar a posição desejada. Por outro lado, comparando-se com a experiência anterior (Exp. 1), o controle torna-se mais complicado em função da necessidade de controlar a posição do eixo de saída "compensando" a "dinâmica" do motor. O problema é que o motor é controlado através da tensão aplicada ao enrolamento do seu rotor.

Entendendo o problema:

Analizando o diagrama de blocos do motor (fig. 5.8), pode-se ver que o modelo envolve dois integradores.

Por isso, para controlar manualmente a posição do eixo do motor através da variação de tensão aplicada ao seu enrolamento, o usuário deve resolver, em "tempo real", uma tarefa de dinâmica inversa, ou seja, "calcular" as variações necessárias de tensão para conseguir as variações desejadas na posição do eixo do motor.

Vamos agora considerar o esquema simplificado do servo amplificador SA150D (fig. 5.9).

Na fig. 5.9, o resistor, que liga os emissores dos transistores ao potencial negativo ($-$), representa uma fonte de corrente. Desta maneira, a soma das correntes dos emissores é constante. Por isso, se a tensão V_1 for maior do que V_2 , a corrente do transistor da esquerda aumenta e a do transistor da direita diminui. Em função disso, a tensão no coletor do transistor da esquerda diminui e a do transistor da direita aumenta. As tensões dos coletores são aplicadas aos

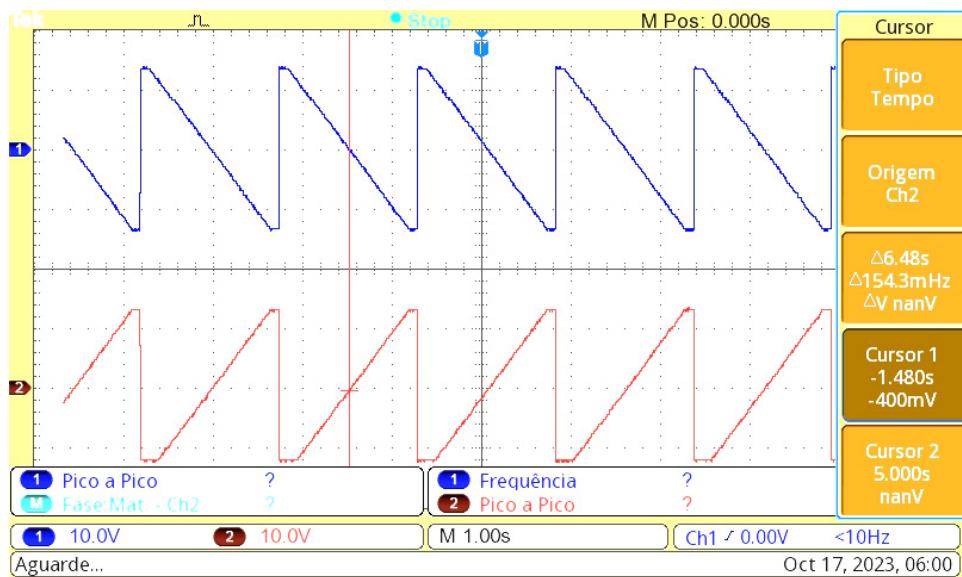
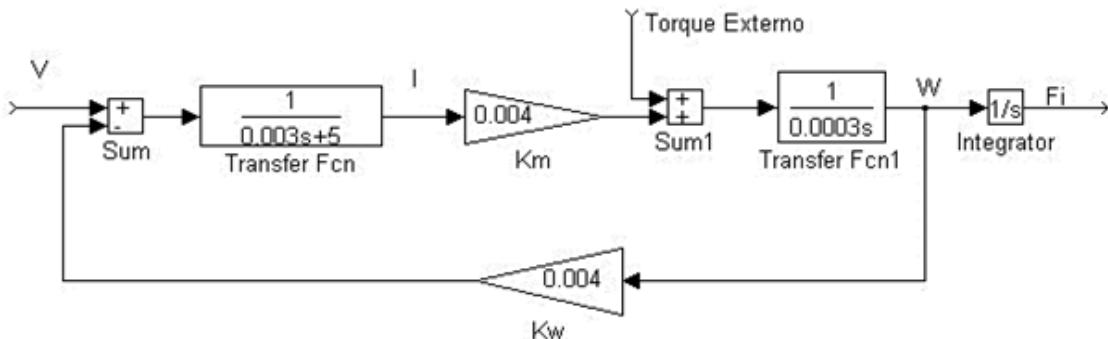


Figura 5.7: Relação entre Ângulo (posição) medida via OP150K (canal 1 = curva azul) \times Sinal de Erro (V_e error) gerado pelo módulo OA150A (canal 2 = curva vermelha) – referente ao esquema da fig. 5.6.



V é a tensão aplicada ao motor; I é a corrente do motor; W é a velocidade angular do motor; F_i é a posição angular do eixo do motor; K_m e K_w são os coeficientes associados com a construção do motor.

Figura 5.8: Diagrama de blocos do motor.

amplificadores de potência (esboçados como triângulos na fig. 5.9). Esses 2 amplificadores alimentam o motor. A tensão aplicada ao motor, é então proporcional à diferença: $(V_1 - V_2)$.

Esse método de controle é amplamente utilizado em aplicações industriais, porque se ambas as entradas V_1 e V_2 receberem a mesma tensão, não circulará corrente pelo motor, assim o servo amplificador se torna **imune a ruídos** presentes no ambiente industrial. Num próximo laboratório será usada um módulo especializado pré-amplificador (PA150C).

É possível obter um controle bidirecional do motor, aplicando apenas uma das tensões V_1 ou V_2 . Obviamente, que neste caso a tensão de entrada deve ser bipolar. Esse método parece mais simples, porém o circuito não fica imune aos ruídos elétricos.

5.4 Experiência 3 – Malha-fechada de controle de posição de motor CC

Montar o sistema mostrado na fig. 5.10.

Instruções:

1. Alimentar o módulo GT150X, passando as tensões de alimentação através do cabo conector preto de três fios. Conectar o tacogerador de GT150X conforme ilustrado na fig. 5.11.
2. Ajustar o potenciômetro superior (fig. 5.10) para que a tensão V_1 seja igual a 0 V. **Preencher a tabela 5.1**, variando a tensão V_2 (fig. 5.10) e medindo a tensão V_3 e V_4 através do voltímetro do módulo GT150X. Para medir tensões CC, a

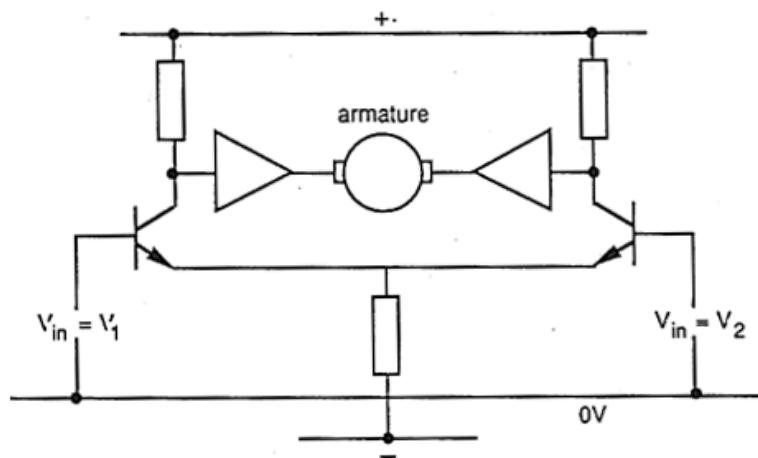


Figura 5.9: Esquema simplificado do servo-amplificador SA150D.

chave seletora de GT150X deve estar na posição “dc volts” e para medir velocidade - na posição “tacho rpm”.

$V_1 = 0 \text{ V}$	V_2 (V)	V_3 (V)	V_4 (V)	Velocidade (RPM)	Rotação \leftarrow ou \rightarrow
	-1				
	-0,5				
	0				
	+0,5				
	+1				
	+1,5				
	+2				
	+2,5				

Tabela 5.1: Tabela considerando $V_1 = 0 \text{ V}$.

3. **Plotar um gráfico** com base na tabela 5.1. No gráfico, devem ser esboçadas 2 curvas. Curva 1) $(V_3 - V_4) \times V_2$. Curva 2) $Velocidade \times V_2$. Como sugestão sobre como gerar o gráfico, sugere-se consultar o item 5.7, pág. 63.

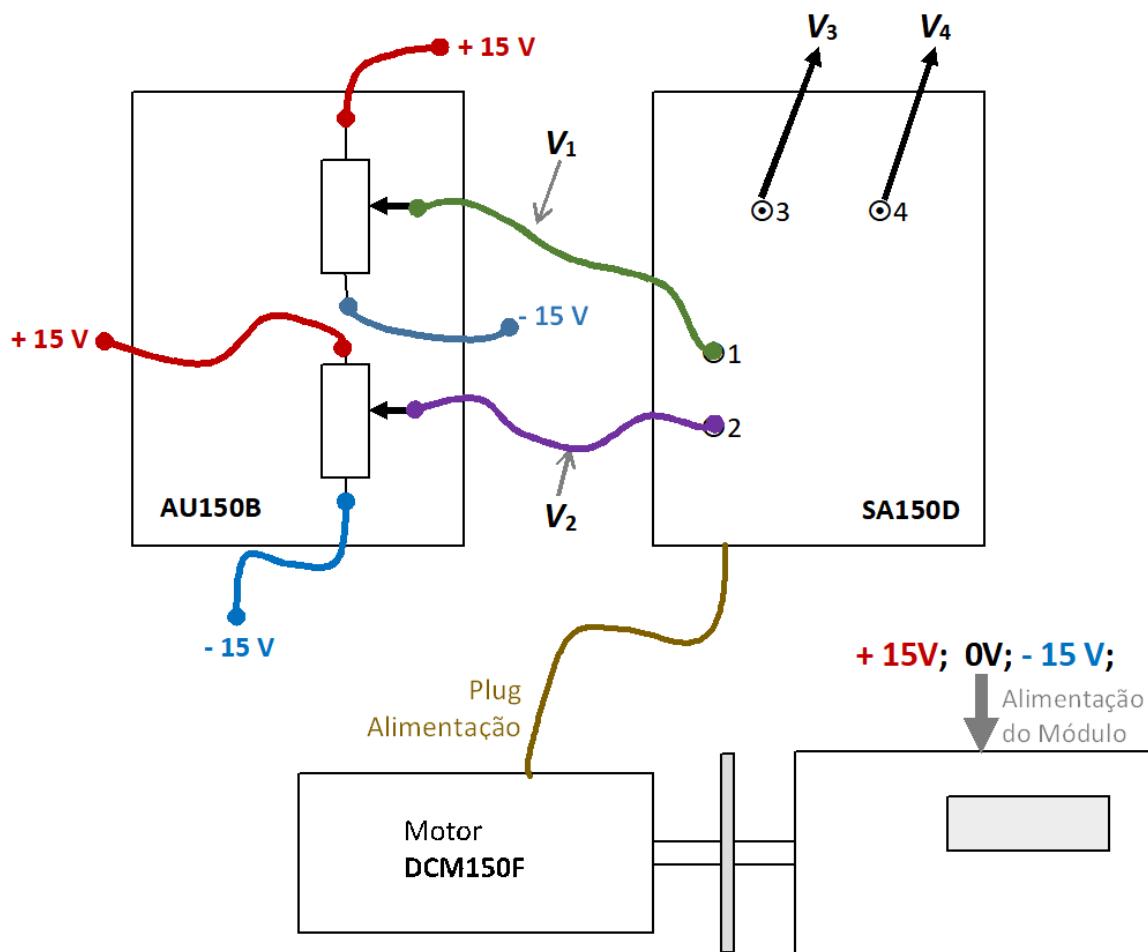


Figura 5.10: Terceira montagem prevista.



Figura 5.11: Conexão sugerida para o tacho-gerador.

4. Ajustar agora a tensão V_2 para 0 V e preencher a (outra) tabela 5.2.

$V_2 = 0 \text{ V}$				
V_1 (V)	V_3 (V)	V_4 (V)	Velocidade (RPM)	Rotação  ou 
-1				
-0,5				
0				
+0,5				
+1				
+1,5				
+2				
+2,5				

Tabela 5.2: Tabela considerando $V_2 = 0 \text{ V}$.

5. Plotar outro gráfico com base na tabela 5.2. Neste gráfico esboçar as 2 curvas, onde: Curva 1) $(V_3 - V_4) \times V_1$ e Curva 2) $\text{Velocidade} \times V_1$. Pode ser usado o comando “`plotyy(.)`” para gerar as 2 curvas no mesmo gráfico (ver item 5.7).

6. Último teste... Ajustar a tensão V_2 para +2V. Preencher a tabela 5.3.

$V_2 = 2 \text{ V}$				
V_1 (V)	V_3 (V)	V_4 (V)	Velocidade (RPM)	Rotação  ou 
0				
+0,5				
+1				
+1,5				
+2				
+2,5				
+3				
+3,5				
+4				
+4,5				

Tabela 5.3: Tabela considerando $V_2 = +2 \text{ V}$.

7. Desta vez, plotar outro gráfico com base na tabela 5.3, onde as 2 curvas devem aparecer como: Curva 1) $(V_3 - V_4) \times V_1$ e Curva 2) $\text{Velocidade} \times V_1$.

8. Comparar entre si os gráficos obtidos a partir das tabelas anteriores.

A conclusão deve ser que $(V_3 - V_4)$ e Velocidade não dependem dos valores absolutos de V_1 e V_2 e, sim, da diferença $(V_1 - V_2)$.

5.5 Questão

– Analisando-se o gráfico $\text{Velocidade} \times (V_3 - V_4)$, percebe-se que esta função é quase linear. Por quê?

Resposta:

Analisemos o diagrama de blocos do motor a CC (fig. 5.8). Essa figura é reproduzida novamente a seguir (fig. 5.12).

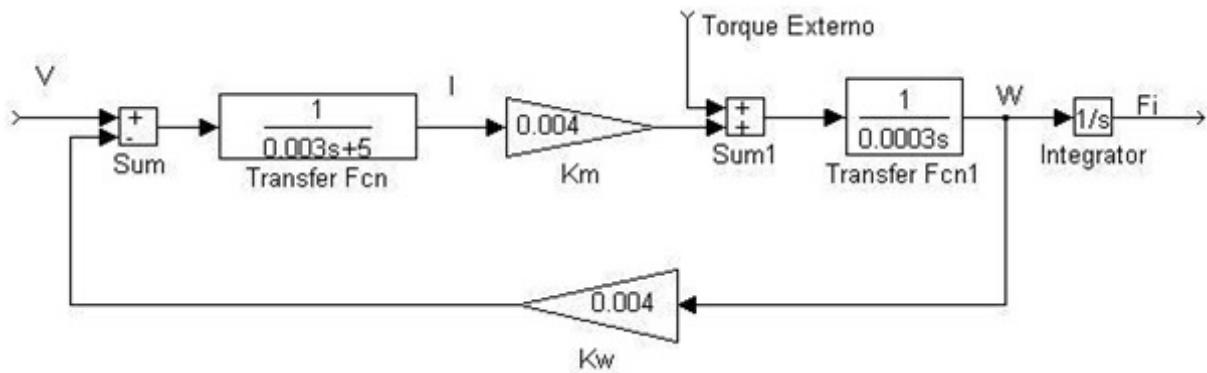


Figura 5.12: Diagrama de blocos do motor.

Aqui a função de transferência *Transfer Fcn* modela a dinâmica do enrolamento do rotor, enquanto a *Transfer Fcn 1* modela a conversão do torque resultante em velocidade angular do rotor. Para fins de generalidade, consideremos essas duas funções de transferência dadas na forma genérica:

$$\begin{aligned} \text{TransferFcn} &= \frac{1}{Ls + R} \\ \text{TransferFcn1} &= \frac{1}{Js} \end{aligned}$$

onde: L é a indutância do enrolamento, R é a resistência do enrolamento, J é o momento de inércia do rotor.

Analizando o regime estacionário...

A velocidade é medida após o regime transitório, devido à variação na tensão V , estabilizar. Em regime estacionário, a velocidade angular é constante. Em função disso, o sinal na entrada de *Transfer Fcn 1* é nulo. Isso acontece devido ao fato de que qualquer sinal não nulo na entrada de integrador implica uma variação no sinal na sua saída. Então, pode-se escrever:

$$T - P = 0 \quad (5.1)$$

onde: T é o torque gerado pelo motor, ou seja, o sinal na saída de K_m ; P é o Torque Externo (ver fig 5.12).

Supondo que P seja constante, temos $T = \text{constante}$. Agora, pode-se escrever a equação:

$$\left(\frac{V - \omega \cdot K_w}{Ls + R} \right) K_m = T \quad (5.2)$$

Em regime estacionário, quando a corrente permanece constante, a impedância de L é nula (zero), logo $(Ls) = 0$. Então, da eq. (5.2) obtém-se:

$$V - \omega \cdot K_w = \left(\frac{R}{K_m} \right) T \quad (5.3)$$

Isolando ω , tem-se:

$$\omega = \frac{V - \left(\frac{R}{K_m} \right) T}{K_w} = \frac{V - A}{K_w} \quad (5.4)$$

aqui $A = (R/K_m) T = \text{cte}$.

Na eq. (5.4), $V = (V_3 - V_4)$, por isso a velocidade do motor a CC com ímã permanente linearmente depende de $(V_3 - V_4)$.

5.6 Conclusões

Neste laboratório começamos por configurar um sistema de controle que produzia um erro que visualmente tínhamos de interpretar antes de fazer uma correção manual na saída do sistema (experimento #1). Foi percebido que o atraso entre uma mudança de estado, ou seja, uma entrada degrau e a ação à seguir, poderia causar sobre-compensação, sobressinais ou “overshoot”.

Começamos então a mecanizar o sistema anexando um moto-redutor (motor com caixa de redução) ao potenciômetro rotativo de saída, mas descobrimos que o controle ainda fica difícil porque a interpretação visual se faz necessária para determinar quando o motor deveria ser parado.

Na tarefa a seguir, serão tratadas três questões. O uso de um amplificador especial, o pré-amplificador que pode gerar sinais de acionamento diretos ou reversos, dependendo se ele recebe uma entrada positiva ou negativa. Usaremos o sinal de erro como entrada para o pré-amplificador, onde a magnitude ($|e(t)|$) será usada para moderar a amplitude (“potência”) de acionamento do motor e a polaridade (do sinal de erro) definirá a direção da rotação. Entretanto, evitar ou reduzir o overshoot poderá se transformar num problema mais difícil de lidar. Os laboratórios posteriores gastarão tempo considerável explorando alguns métodos para lidar com o problema do overshoot.

5.7 Anexo: Comandos Gráficos no Matlab

Segue um exemplo de entrada de dados e geração de gráficos associado com a primeira parte do Experimento 3, baseado nos dados levantados via tabela 5.1:

```

1 >> V2=[-1 - .5 0 0.5 1 1.5 2 2.5];
2 >> V3_4=[-8.7 -5.1 0.9 5.27 9 12.45 15.53 15.5];
3 >> Vel=[960 480 0 -420 -870 -1350 -1840 -1900];
4 >> whos % apenas para conferir dimensao dos vetores de dados
5 Name      Size            Bytes  Class       Attributes
6
7 V2        1x8             64   double
8 V3_4      1x8             64   double
9 Vel       1x8             64   double
10
11 >> [V2' V3_4' Vel'] % apenas exibindo dados num formato semelhante a tabela 5.1
12 ans =
13     -1          -8.7         960
14    -0.5         -5.1         480
15      0           0.9          0
16      0.5         5.27        -420
17      1             9         -870
18      1.5        12.45       -1350
19      2           15.53       -1840
20      2.5        15.5        -1900
21 >> [hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(V2, V3_4, V2, Vel); % plota 2 curvas (escalas diferentes, na mesma janela)
22 >> % Ref.: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/plotyy.html
23 >> title('Grafico Tabela 5.1')
24 >> xlabel('Tensao V_2 (Volts)')
25 >> ylabel(hAx(1),'(V_3-V_4)') % eixo y da esquerda
26 >> ylabel(hAx(2),'Velocidade (RPM)') % eixo y da direita
27 >> grid

```

Os comandos anteriores rendem um gráfico como o mostrado na fig. 5.13.

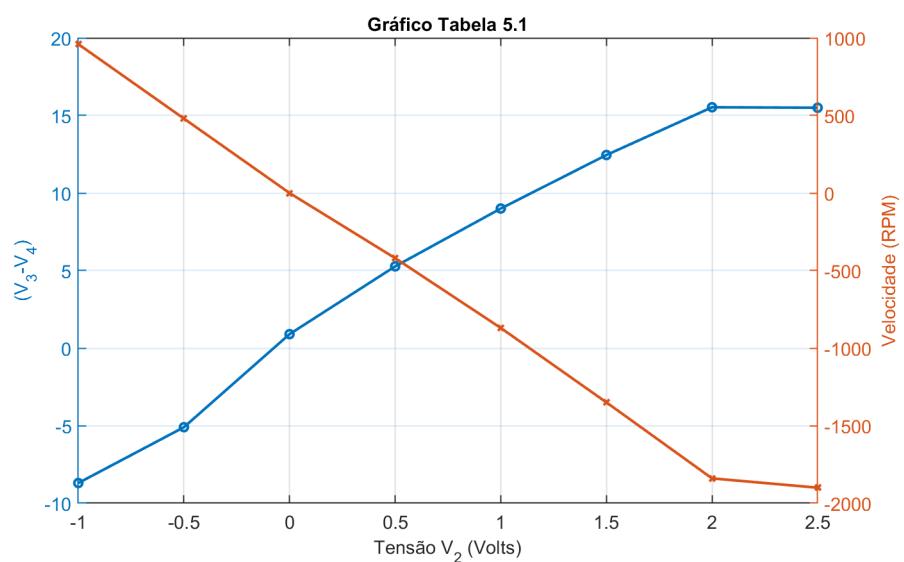


Figura 5.13: Exemplo de gráfico esperado para tabela 5.1.

6 | Sistema de Controle de Posição em Malha Fechada

Objetivos

Quando este laboratório for completado, o estudante deverá ser capaz de:

- Estabelecer a operação característica do módulo Pré-Amplificador (PA150C);
- Ter presenciado o comportamento de um motor simples controlado através de um sistema de controle de posição em malha-fechada.

6.1 Experiência 1 – Característica do Pré-Amplificador PA150C

Neste experimento vamos observar o comportamento do módulo pré-amplificador (PA150C), na presença de 2 sinais de entrada e suas 2 saídas geradas. Se existe uma tensão positiva em qualquer uma de suas entradas, então uma de suas saídas se torna positiva, enquanto que se uma de suas saídas se torna negativa, a outra saída se torna positiva.

Montar o sistema mostrado na Fig. 6.1.

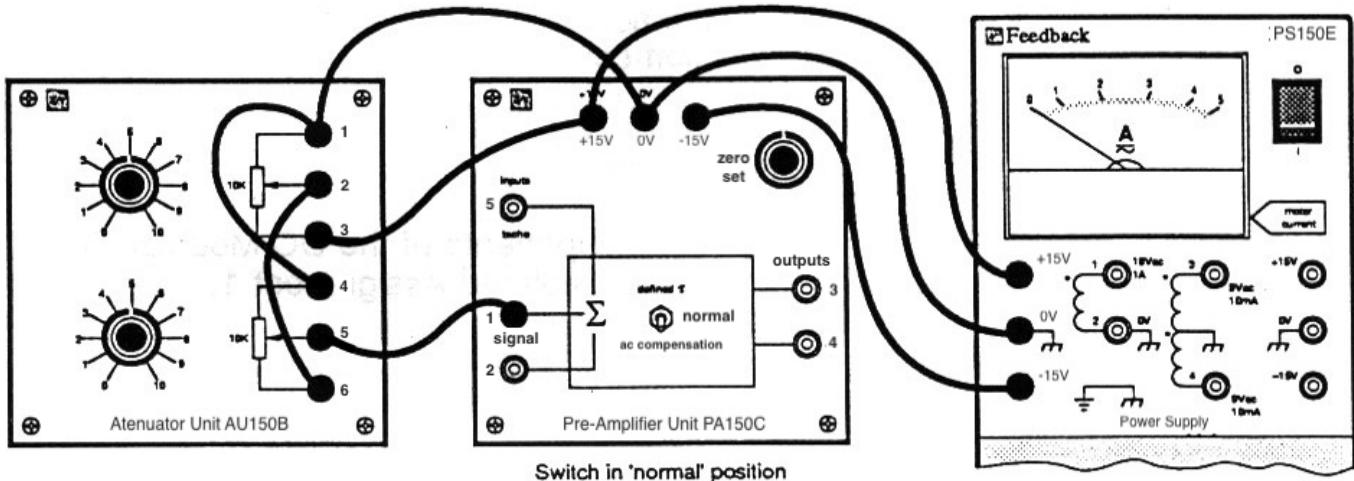


Figura 6.1: Ligações elétricas 1o-experimento (Gerando tensão de referência).

Instruções:

1. Ajustar a chave seletora do pré-amplificador (módulo PA150C) na posição “*normal*”. Isto significa que nenhum filtro interno será utilizado. E também ajustar seu potenciômetro de “*zero set*” para a posição central.
2. Ajustar a tensão na saída 2 do módulo atenuador (AU150B) para +1 V. Nessa experiência, o **potenciômetro superior** serve para ajustar a tensão aplicada ao potenciômetro inferior. O **potenciômetro inferior**, por sua vez, serve para fazer um **ajuste fino de tensão** V_i que é aplicada à entrada 1 do pré-amplificador (módulo PA150C), desta forma fica mais fácil realizar incrementos de tensão de 0,1 Volts.

3. Preencher a tabela 6.1, variando a tensão V_i e medindo as tensões nas saídas 3 e 4 do pré-amplificador (módulo PA150C). Usar o módulo GTX150X como voltímetro para medir as tensões.

Sinal de Entrada V_i (V)	Tensões de saída do pré-amplificador (PA150C)		
	V_3 (V)	V_4 (V)	$(V_4 - V_3)$ (V)
0			
+0,1			
+0,2			
+0,3			
+0,4			
+0,5			
+0,6			
+0,7			
+0,8			
+0,9			
+1,0			

Tabela 6.1: Dados coletados, 1a-parte do primeiro experimento (tensões positivas para V_i).

4. Repetir o mesmo procedimento anterior, mas agora para **valores negativos** de V_i . **Atenção:** Para fazer isso, é preciso aplicar na entrada 3 de AU150B (potenciômetro superior) a tensão de $\sim 15V$ e ajustar a tensão na saída do potenciômetro superior para $\sim 1V$. Preencher a tabela 6.2.

Sinal de Entrada V_i (V)	Tensões de saída do pré-amplificador (PA150C)		
	V_3 (V)	V_4 (V)	$(V_4 - V_3)$ (V)
0			
-0,1			
-0,2			
-0,3			
-0,4			
-0,5			
-0,6			
-0,7			
-0,8			
-0,9			
-1,0			

Tabela 6.2: Dados coletados, 2a-parte do primeiro experimento (tensões negativas para V_i).

5. Gerar o gráfico das curvas características (2 curvas no mesmo gráfico): $(V_3 \times V_i)$ (1a-curva) e $(V_4 \times V_i)$ (2a-curva) com base nos resultados levantados nas tabelas 6.1 e 6.2. O resultado deve ser similar ao da fig. 6.2.
Obs.: pode ser usado o comando “`plotyy(.,.)`” do Matlab para gerar o gráfico (ver item 5.7).
6. Plotar a curva característica $(V_4 - V_3) \times V_i$ (veja a fig. 6.3).
Note: as partes não lineares de curva se devem ao circuito interno do pre-amplificador que limita tensões próximas da sua alimentação ($\pm 15V$). Será percebido que a tensão V_i deve ser mantida na faixa dos $\pm 0,3V$.
7. Calcular o ganho K_{pa} do pré-amplificador como a inclinação da parte linear da curva característica:

$$K_{pa} = \frac{\Delta(V_4 - V_3)}{\Delta V_i}$$

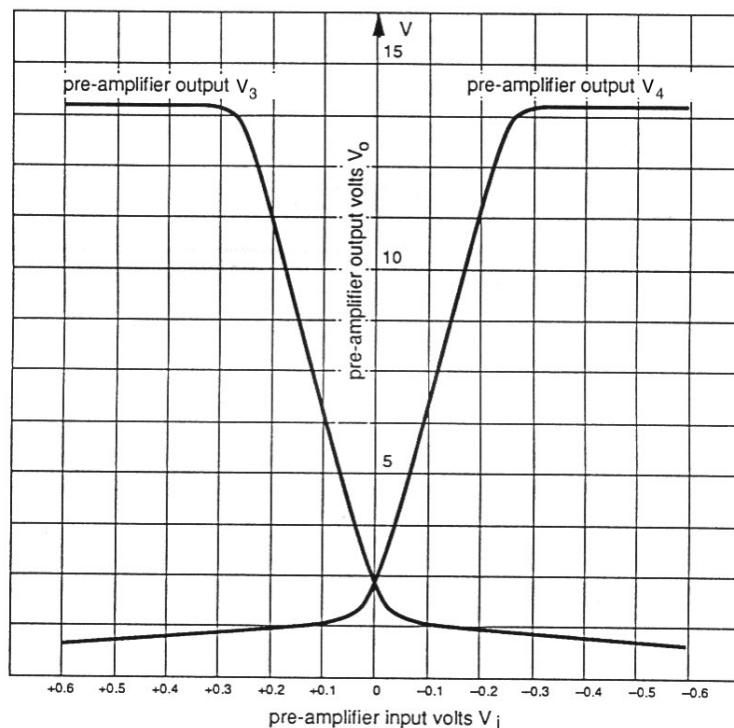


Figura 6.2: Tensões na saída do pré-amplificador.

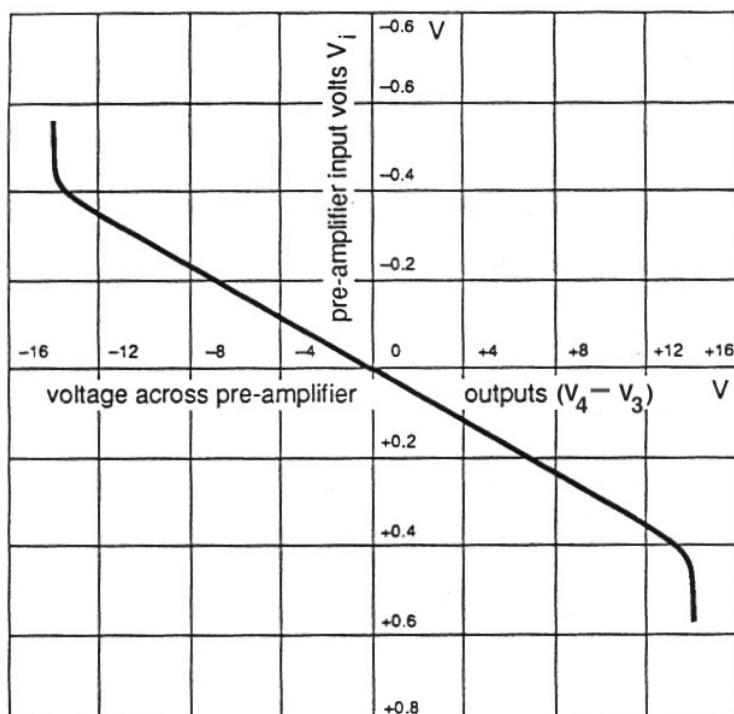


Figura 6.3: Curva característica do pré-amplificador.

8. **Atenção para o ajuste correto do “zero set” do pré-amplificador (PA150C).** Se a curva característica (fig. 6.3) for deslocada para a direita ou para a esquerda, isto significa que o “zero set” do pré-amplificador (módulo PA150C) não foi realizado com precisão. Se o “zero set” está zerado e V_i é 0 volts, a tensão V_4 deve ser igual à tensão V_3 , ou seja: $V_o = (V_4 - V_3) = 0$ quando $V_4 = V_3$ (a curva passa na origem dos eixos).

Segue um método prático de zerar o offset:

- desconectar as entradas 2 e 5 de PA150C;
- aterrar a entrada 1;
- conectar um voltímetro às saídas 3 e 4 de PA150C;
- girando o potenciômetro “zero set”, tornar a tensão entre as saídas 3 e 4 igual a zero.

Deve ter sido percebido que:

- A saída 3 do módulo PA150C só repassa a parte positiva do sinal apresentado nas suas entradas. A parte negativa é anulada (tensão zerada);
- A saída 4 do módulo PA150C só repassa a parte negativa do sinal apresentado nas suas entradas, mas inverte sua polaridade, isto é, executa um “módulo” da parte negativa do sinal de entrada. Tensões positivas na entrada do PA150C se transformam em tensões nulas na saída 4.
- A fig. 6.4 resume o comportamento do módulo PA150C.

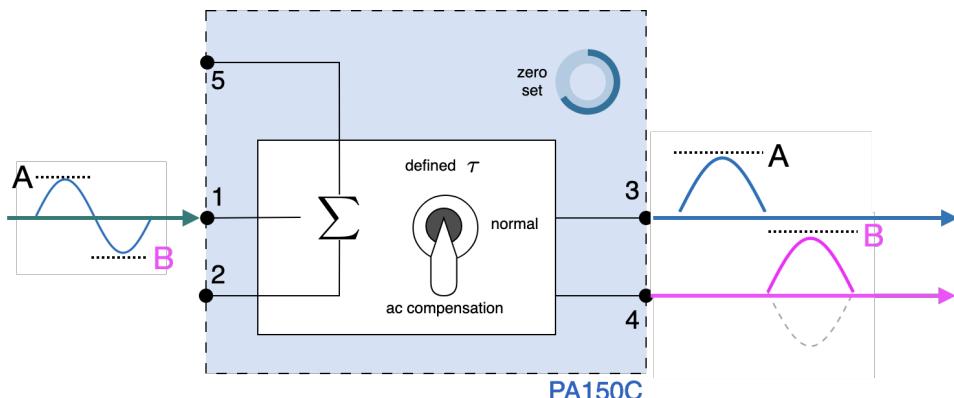


Figura 6.4: Tratamento do sinal de entrada efetuado pelo módulo PA150C.

6.2 Experiência 2 – Sistema Simples em Malha Fechada de Controle de Posição

Montar o sistema conforme mostrado na fig. 6.5. O sistema é de controle de posição em malha fechada.

Desta vez, vamos ponderar (atenuar) o sinal de erro, realizar algo como:

$$u(t) = K \underbrace{(\theta_{ref}(t) - \theta_{actual}(t))}_{\tilde{\theta}(t), \text{erro}} \quad (6.1)$$

onde $u(t)$ corresponda ao sinal de controle (atuação) aplicado ao motor.

Note que a saída V_o do amplificador operacional (módulo OA150A), corresponde ao sinal do erro. Este sinal será atenuado (**ganho**, $K \leq 1$) via potenciômetro (módulo AU150B). A saída deste atenuador é repassado para o pré-amplificador (módulo PA150C) para que sejam gerados os 2 sinais que são repassados para o servo-amplificador (módulo SA150D) que comanda o motor. Os 2 sinais controlam o “balanço” da corrente de armadura que passa pelo motor CC, resultando no movimento bidirecional do mesmo. A fig. 6.6 demonstra, na forma de um diagrama esquemático próximo de um diagrama em blocos, a montagem realizada na fig. 6.5.

Instruções:

- O potenciômetro superior do módulo atenuador (AU150B) é utilizado para ajustar o **ganho do canal direto** do sistema – eq. (6.1).

2. **Importante:** Zerar o *offset* do pré-amplificador (PA150C). Para fazer isso, desconectar temporariamente a entrada 1 do pré-amplificador (PA150C) e, girando o potenciômetro “*zero set*”, fazer com que o motor pare. Restaurar a conexão na entrada 1.
3. Zerar o *offset* do Amplificador Operacional (OA150A), ajustando o potenciômetro “*zero set*”.
4. Ajustar o eixo do potenciômetro de entrada (IP150H) para posições arbitrárias dentro da faixa de -160° a $+160^\circ$. Medir o erro de posição como a diferença entre a posição angular do eixo do potenciômetro de entrada (IP150H) e a do potenciômetro de saída OP150K.
5. Variar o ganho (potenciômetro superior do módulo atenuador AU150B) preenchendo a tabela 6.3, realizando 3 medições para cada valor do ganho do canal direto.
6. **Traçar o gráfico** (Valor médio do erro de posicionamento) \times (Posição do cursor do potenciômetro AU150B).
Obs.: quando a posição do cursor do potenciômetro AU150B é superior a 6, o sistema apresenta auto-oscilações. Esse efeito surge devido às não linearidades do sistema, do tipo saturação (saturações de OA150A, de PA150C e de SA150D) e folga no redutor de GT150X. Auto-oscilações podem ser eliminadas através da realimentação tacométrica ou através do **acréscimo do freio magnético LU150L** em conjunto com um disco de alumínio fixado no eixo do motor.

Deve ter sido percebido que o erro de posição (angular) deve ter diminuído com o aumento do ganho (proporcional). Quanto maior o ganho, menor o erro.

Observações:

No experimento anterior, durante o procedimento de variação do “*set-point*” (referência) e variação do ganho, poderá ser percebido que o cursor de saída pode parar antes de ser alcançada a posição desejada. Quando isto ocorre, acabamos por perceber que o sistema é algo “tolerante” quanto ao erro de posicionamento, e será percebido que o motor não irá responder (mudar de posição) até que erro exceda um determinado valor. Este efeito será abordado no próximo laboratório e é ocasionado por um problema denominado de “**zona-morta**” (*deadband*). Deverá ser percebido que quando isto ocorre, um aumento no ganho pode compensar este comportamento e assim um correto alinhamento entre os potenciômetros de entrada e de saída poderá ser alcançado.

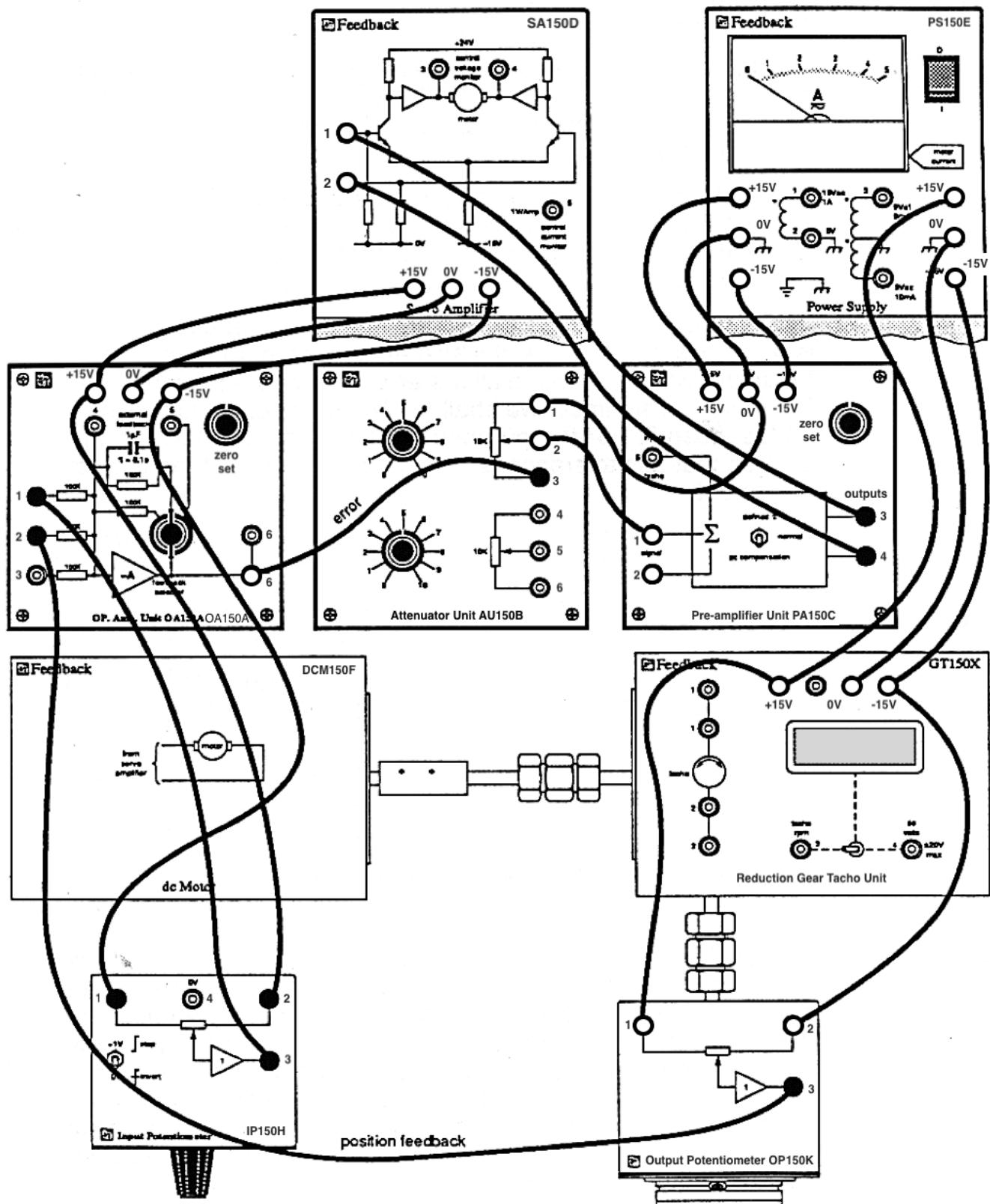


Figura 6.5: Montagem para controle de posição em MF.

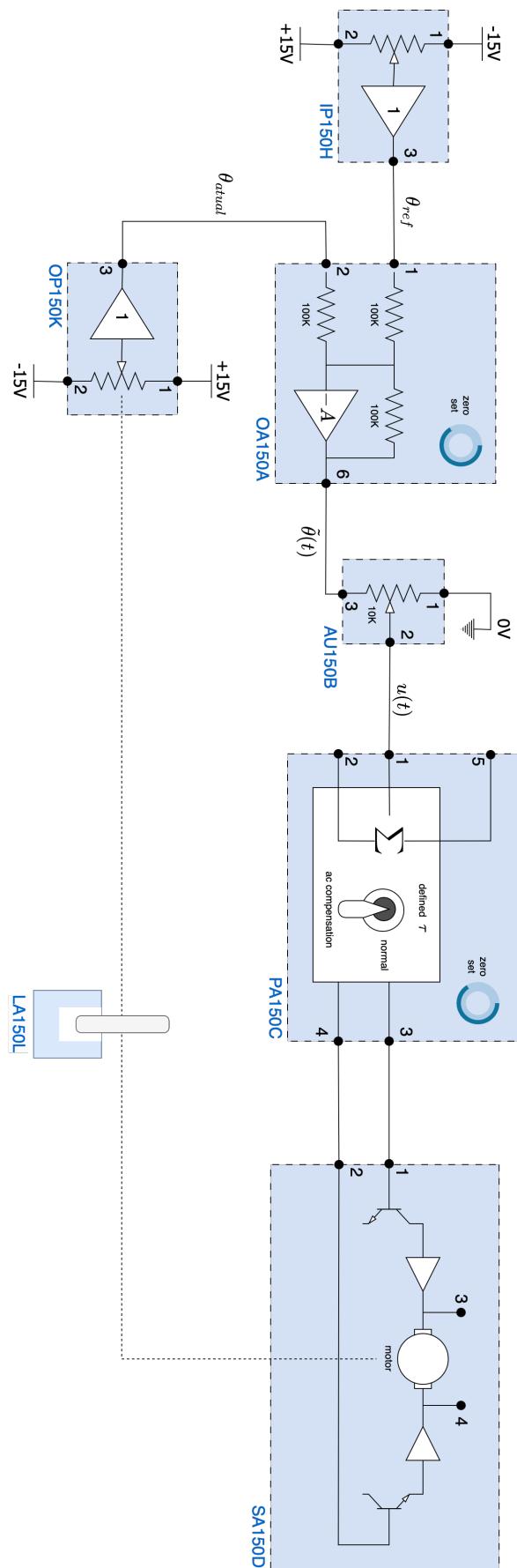


Figura 6.6: Diagrama esquemático do controle de posição em MF

Ganho do sistema Posição do Potenciômetro (Módulo AU150B)	Erro de Posicionamento, $\tilde{\theta}(t)$			
	Erro 1	Erro 2	Erro 3	Erro Médio
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabela 6.3: Erro × variação do ganho Proporcional no controle de posição em MF.

6.3 Conclusões

Num sistema real prático de controle de posicionamento é de grande importância que a parada próxima ou no ponto desejado, deva ocorrer de forma suave. Se existe um sobressinal (*overshoot*) associado ao alinhamento, significa que um movimento de reversão foi realizado para compensar a ultrapassagem do ponto desejado. Entretanto se for adotado um ganho elevado num sistema deste tipo, este movimento de alinhamento será muito rápido, incluindo um período oscilatório com sobressinais, implicando que o alinhamento para a posição desejada não será suave. Imagine isto ocorrendo num sistema envolvendo um elevador. Isto significa que há casos de sistemas em malha-fechada, nos quais, o sobressinal não é tolerado ou deve ser mínimo. Se o ganho for aumentado, a tendência é o aumento do sobressinal, com oscilações cada vez maiores, o motor avançando e retrocedendo em torno da posição desejada, podendo chegar a um ponto de instabilidade (as amplitudes das oscilações só aumentam a medida que o tempo passa).

Notar que até agora só lidamos com motor sem carga. As características de velocidade/torque de um motor podem ainda não produzir uma resposta adequada sob carga. Para superar esse problema, as caixas de redução são frequentemente usadas, entretanto, elas introduzem o problema adicional de folga nas engrenagens ou *backlash*.

7 | Sistema Simples de Controle de Velocidade

Objetivos

Quando este laboratório for completado, o estudante:

- Saberá como um simples sistema de controle de velocidade por ser construído e operado.
- Perceber a importância de um tacogenerator dentro de um sistema de controle de velocidade em malha-fechada.

7.1 Introdução

Um sistema de controle de velocidade em malha aberta pode funcionar razoavelmente bem somente se a carga é constante. Usando realimentação de velocidade é possível fazer um sistema de controle de velocidade significativamente menos sensível as variações de carga.

No Lab. 3, *Características do Motor CC*, foram levantadas as características do motor DC (unidade DCM150F) e obtida uma curva (gráfico) mostrando como sinais na entrada da unidade SA150D (Servo-Amplificador) afetam a velocidade do motor. Deve ter sido percebido que a velocidade do motor é facilmente ajustável quando não existe carga acoplada ao motor, apenas confrontando a tensão aplicada na entrada. Deve ter sido percebido que: “a medida que o motor acelera, sua armadura gera uma força contra-eletromotriz (*back-emf*), V_a , crescente, que se opõe à tensão de entrada V_{in} (ver figura 7.1, que corresponde à fig. 3.1). A corrente na armadura é aproximadamente proporcional à diferença de tensão: $V_{in} - V_a$. Se a velocidade “cai” (devido a um efeito de carregamento), V_a se reduz, a corrente (de armadura) aumenta e por isto, aumenta o torque do motor. Este comportamento tenta se opor a quedas de velocidade. Este modo de controle é conhecido como “*controle por armadura*” e resulta numa velocidade proporcional à V_{in} com mostra a figura 7.2 (cópia da fig. 3.3).”.

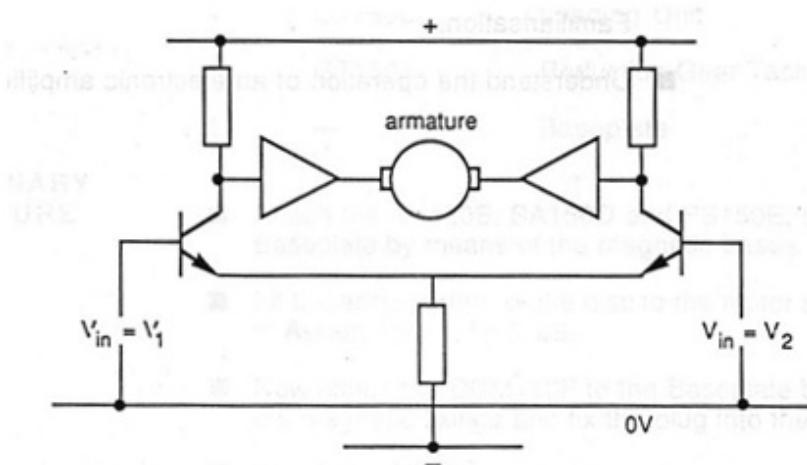


Figura 7.1: Controle por armadura.

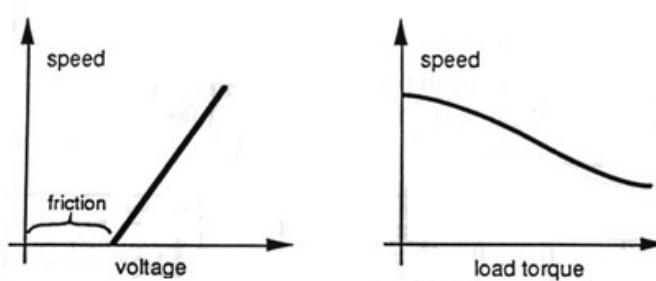


Figura 7.2: Curvas esperadas para um motor CC.

Notar pela fig. ?? que um nível mínimo de sinal de entrada é necessário para iniciar o movimento do motor, devido ao atrito nas escovas do motor.

Este tipo de sistema (motor CC) em malha aberta, é capaz de manter relativamente bem uma velocidade constante enquanto não houver uma carga acoplada ao mesmo, ou o valor desta carga for fixo. Mas este sistema (em MA) se mostra inadequado (incapaz de manter a velocidade constante) quando sua carga varia.

Neste laboratório a ideia é mostrar que uma melhoria substancial pode ser obtida quando se estabelece uma malha de realimentação. Isto é, a velocidade atual será comparada com a velocidade desejada. Um sinal de erro será produzido. Este sinal será usado para fazer atuar a saída do servo amplificador de forma que o motor mantenha uma velocidade constante.

7.2 Sistema Simples de Controle de Velocidade em Malha Fechada

Primeiramente vamos simplesmente realimentar um sinal proporcional à velocidade, ω_{tc} , usando o tacho gerador (módulo GT150X). Então vamos comparar este sinal (uso do módulo OA150A), com um sinal de referência de polaridade oposta (gerado na unidade AU150B), ω_{ref} , assim, o somatório resultante (sinal de erro) produzirá o sinal de entrada requerido para o servo amplificador (módulo SA150D), ou seja:

$$\tilde{\omega} = \omega_{ref} - \omega_{tc}$$

Montar o sistema mostrado na figura 7.3.

Instruções

1. Zerar o off-set do amplificador operacional OA150A e ajustar o seletor "feedback selector" para a posição do resistor de $100K\Omega$.
2. Antes de conectar o tacho gerador (GT150X) na entrada do módulo OA150A (Amp. Op.), aumente a tensão de "referência" (módulo AU150B) até que o motor comece a girar em torno de aproximadamente 1000 RPM e use o voltímetro (comutar chave para "Volts" no GT150X) para descobrir a saída positiva do tacho gerador (GT150X).
3. O lado correto (do tacho gerador, módulo GT150X) pode então ser conectado à saída do módulo OA150A e o outro lado nos 0 Volts (GND). Se a velocidade do motor diminuir, a **realimentação é negativa como deve ser**. Se a velocidade do motor aumentar, a **realimentação é positiva** e deve ser invertida.
4. Na sequência, será necessário zerar o off-set do amplificador operacional OA150A (isto vai anular/zerar a tensão de referência) e então gradualmente aumente a tensão usada como referência (módulo AU150B). Note que a chave "feedback selector" do OA150A deve estar na posição para o resistor de $100 K\Omega$.
5. Preencher a tabela 7.1.
Obs.: Para medir a tensão na saída do tacogerador, usar o voltímetro digital de GT150X (entrada 4). A velocidade deve ser medida através do velocímetro de GT150X (entrada 3).
6. Plotar o gráfico $V_{erro} \times Velocidade$.
7. Comparar o resultado obtido para $Erro \times Velocidade$ com o mesmo tipo de gráfico levantado no Lab. 3;

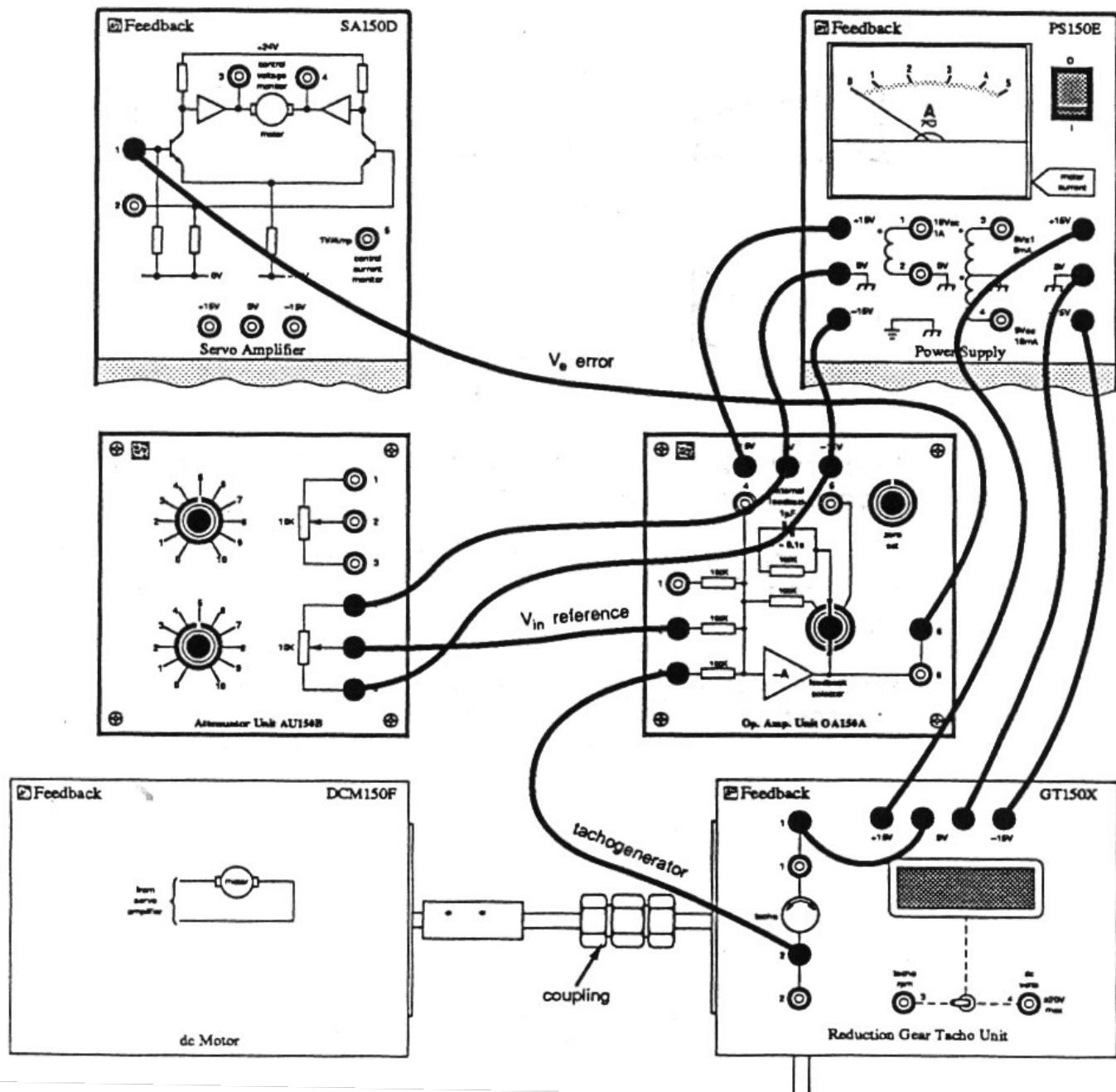


Figura 7.3: Sistema simples de controle de velocidade em malha fechada.

V_{in} (V)	$V_{tacogedor}$ (V)	$V_{erro} = (V_{in} - V_{tacogedor})$ (V)	Velocidade (rpm)
0,5			
1,0			
1,5			
2,0			
2,5			
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0			
5,5			
6,0			
6,5			
7,0			
7,5			
8,0			
8,5			
9,0			
9,5			
10,0			

Tabela 7.1: Dados 1o-experimento.

7.3 O Efeito do Ganho do Canal Direto sobre a Variação de Velocidade

Para descobrir o efeito da carga na velocidade do motor, nós podemos usar o freio magnético como uma carga. A mudança na velocidade provocada pelo efeito de carregamento nos dá o que chamamos de “*regulação*”.

Para tanto, posicione o freio magnético sobre o disco de inércia, como mostrado na figura 7.4. Se certifique que a unidade de carga possa ser totalmente engajada sem travar o motor ou o disco de inércia.

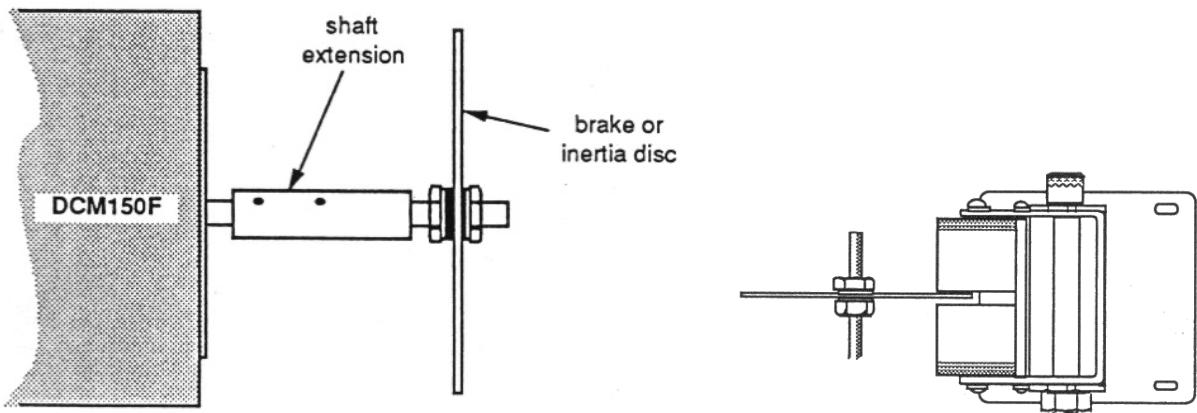
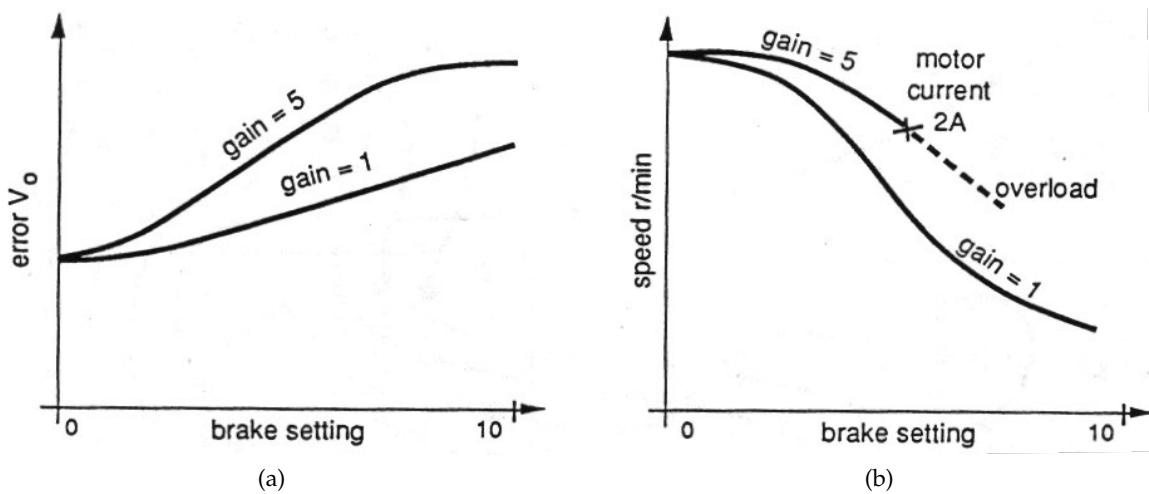


Figura 7.4: Detalhes da unidade de freio magnético e disco de inércia.

A segunda montagem deste laboratório está direcionada à mostrar como o aumento no ganho do canal direto vai causar uma determinada queda na velocidade de forma a forçar um aumento no valor do erro, ou V_o , assim, qualquer mudança na carga, a queda na velocidade será atenuada aumentando-se o ganho, como mostra a figura 7.5.

Figura 7.5: Gráficos de Posição do freio $\times V_o$ (erro) e Posição do freio \times Velocidade .

Para o controle do ganho, nós vamos usar o circuito da figura 7.6, que possui um ganho de:

$$K = -\frac{1}{\alpha}; \quad (0 < \alpha < 1)$$

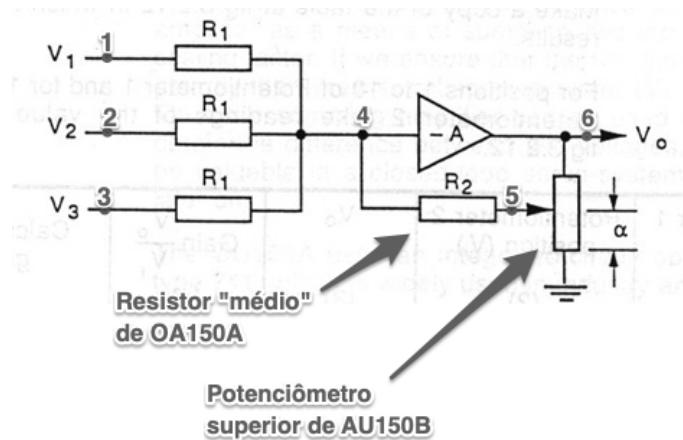


Figura 7.6: Modificação do ajuste de ganho no módulo OA150A (segundo experimento).

Montar o sistema mostrado na figura 7.7.

A ideia é perceber como a velocidade varia conforme varia a carga, dependendo ainda do ganho adotado no sistema (potenciômetro superior do módulo AU150B). Deverá ser percebido que o aumento no ganho da malha-direta vai fazer com que uma queda na velocidade do motor, provoque um aumento maior no valor de erro (tensão V_o), ou seja, vamos estabelecer um simples controlador Proporcional:

$$V_o = K \underbrace{(\omega_{ref} - \omega_{tc})}_{\tilde{\omega} \text{ (erro)}}$$

Qualquer variação de carga forçando a velocidade a baixar vai ser menos percebida quanto maior for o ganho adotado.

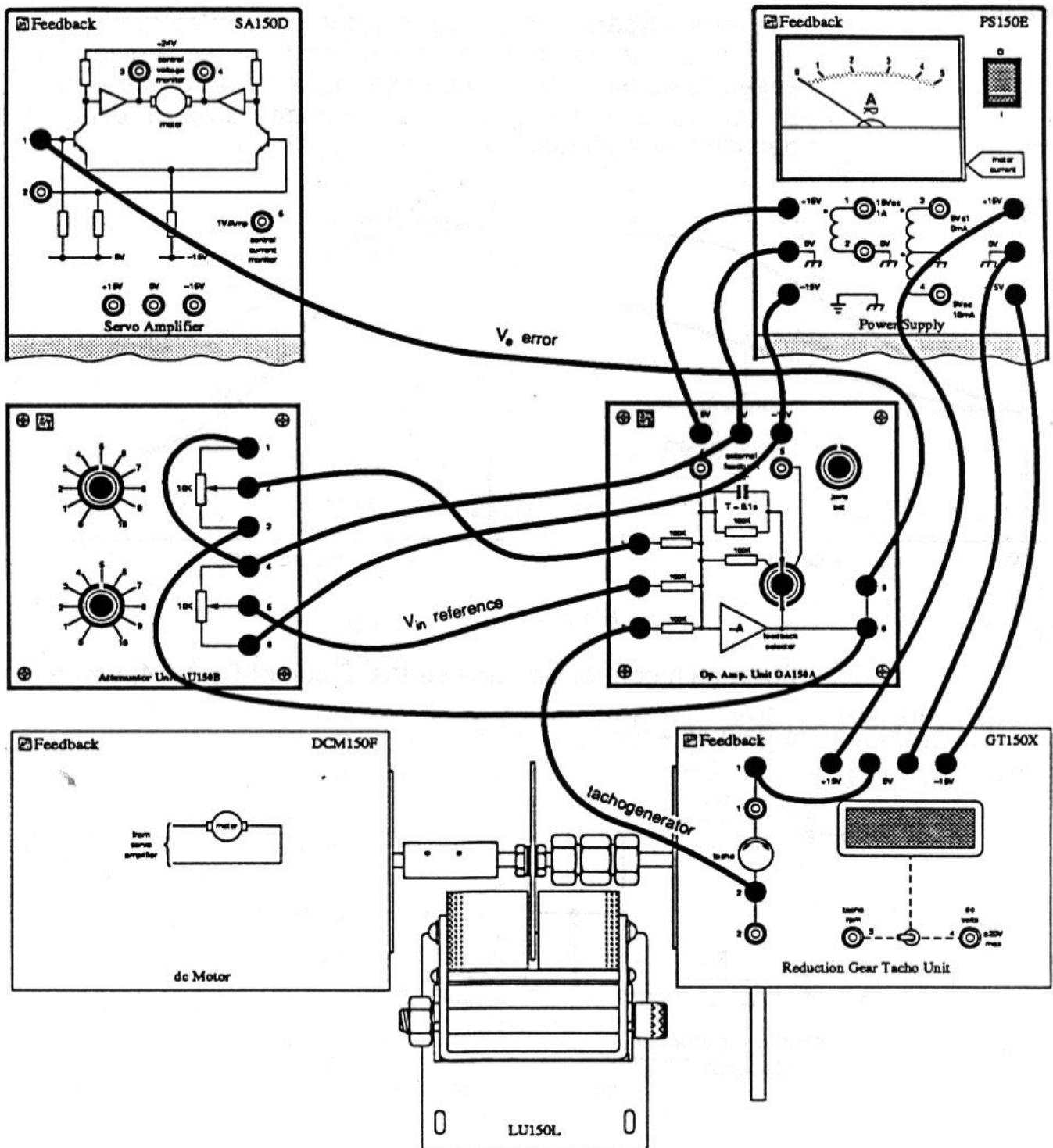


Figura 7.7: Controle de velocidade em MF com ganho ajustável.

Instruções:

1. Ajustar a chave seletora de OA150A para a posição “external feedback” (realimentação externa).
2. Ajuste o **ganho de OA150A para 1** (corresponde a posição 10 do potenciômetro superior).
Obs.: Agora o **ganho do controlador** depende da posição do cursor do potenciômetro superior de AU150B.
3. Colocar o freio magnético na posição 0 (sem carga, freio liberado).
4. Ajustar a velocidade do motor para $\omega_{ref} = 1000 \text{ rpm}$, variando a posição do cursor do potenciômetro inferior de AU150B. Este potenciômetro varia a tensão de referência ou V_{in} (note: $\omega_{ref} \propto V_{in}$).
Obs.: Esta tensão (V_{in} ou ω_{ref}) permanecerá fixa.

5. Preencher a tabela 7.2, variando a posição do freio (variando a carga no motor) e anotando os valores da tensão do erro, V_{erro} ($\propto \tilde{\omega}$) e da tensão gerada pelo tacogerador, V_{taco} ($\propto \omega_{tc}$).

Posição do freio	V_{in} (V)	V_{erro} (V)	V_{taco} (V)	Velocidade (rpm)
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabela 7.2: Dados do experimento para $K = 1$.

Segunda parte:

6. Agora ajustar o **ganho de OA150A para 5** (posição 1 do potenciômetro superior). Voltar o freio magnético para a posição 0 (liberar o freio). Ajustar a velocidade do motor para, $\omega_{ref} = 1800$ rpm variando a posição do cursor do potenciômetro inferior de AU150B (novo valor de V_{in} ; V_{in} permanece constante depois disto).
7. Preencher a tabela 7.3, variando novamente a posição do freio.

Posição do freio	V_{in} (V)	V_{erro} (V)	V_{taco} (V)	Velocidade (rpm)
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Obs.: fique atendo para o motor não exceder o limite de corrente de 2A.

Tabela 7.3: Dados do experimento para $K = 5$.

8. Plotar os gráficos: a) $Posição\ do\ freio \times V_o$ (erro) e b) $Posição\ do\ freio \times Velocidade$, com base nos dados das tabelas 7.2 e 7.3; são 2 curvas para cada gráfico. Deve resultar algo semelhante a fig. 7.5 (a) e (b).

7.4 Sistema Simples Reversível de Controle de Velocidade

Nesta **última montagem** será montado um simples sistema reversível de controle de velocidade. Falta analisar neste laboratório a questão do **sinal mínimo** necessário para gerar resposta no motor, ou o que chamamos de “**zona morta**” (**deadband**).

Anteriormente deve ter sido percebido que a adoção de um ganho elevado, reduz o nível de amplitude mínimo necessário para o sinal da referência de forma que o motor já responda. Desta forma, nesta última montagem será adotado um ganho elevado.

Usando-se as 2 entradas do servo-amplificador (módulo SA150D), pode-se controlador o motor nos 2 sentidos, mas neste caso, ambas entradas exigem tensões positivas. Como a saída do comparador (módulo OA150A) varia do positivo para o negativo, se fez necessário agora, usar o módulo pré-amplificador (PA150C), assim, uma entrada

positiva produz tensão positiva numa das saídas, enquanto que uma entrada negativa, gera uma tensão positiva na outra saída, com um ganho aproximado de 25.

Montar o sistema mostrado na Fig.7.4.

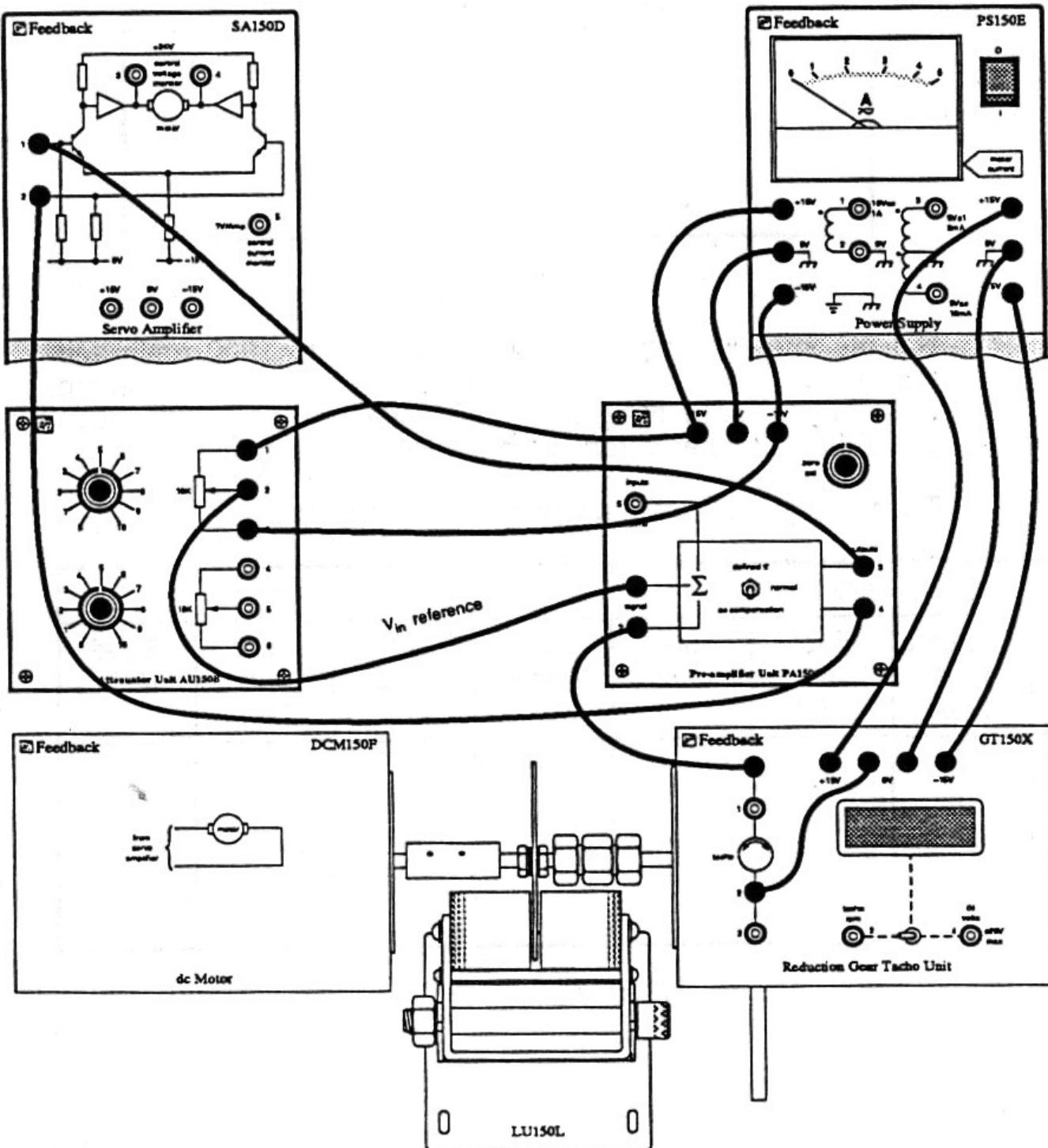


Figura 7.8: Esquema de ligações da última montagem.

Instruções:

1. Troque o módulo OA150A (Amp.Op.) pelo módulo PA150C (pré-amplificador) e ajuste sua chave seletora para compensação AC ("ac compensation") de forma a reduzir o efeito do *ripple* (ruído) presente no sinal do tacogerador que pode causar instabilidade.
2. Ajuste a referência (potenciômetro de AU150B) para saída nula (referência $V_{in} \approx 0$) **antes** de conectar-lo ao módulo PA150C. Este potenciômetro ficará aproximadamente na posição 5.

3. Sem carga no motor, você deve perceber que pode inverter o sinal de V_{in} ($= V_{ref}$) de forma a reverter o sentido de rotação do motor. Para isto, gire lentamente o potenciômetro da referência para cada lado em torno da posição central "5". Anote na tabela 7.4, que nível de tensão de referência faz o motor girar para cada lado. Realize 3 testes e anote seus resultados na tabela.

Atenção: Se a velocidade não puder ser ajustada e for máxima em torno de 2000 rpm, isto significa que a **realimentação** de velocidade (realimentação tacométrica) está **positiva** e portanto, sua polaridade deve ser invertida (inverter conexões entre os terminais 1 e 2 no módulo GTX150X).

Teste	Sinais mínimos necessários para resposta do motor			
	Sentido horário		Sentido anti-horário	
	V_{in}	Velocidade	V_{in}	Velocidade
#1				
#2				
#3				

Tabela 7.4: Tensões mínimas necessárias para rotação do motor.

4. Agora ajuste a velocidade do motor, numa das direções, para **1000 rpm** variando a posição do cursor do potenciômetro de AU150B.

Obs.: isto fixará a tensão de referência, V_{ref} .

5. **Variando a posição do freio**, preencher a tabela 7.5. A diferença $(V_3 - V_4)$ medida na saída do módulo PA150C é proporcional ao erro do sistema, ou seja:

$$(V_3 - V_4) \propto K \underbrace{(V_{ref} - V_{tc})}_{\text{erro}}$$

onde: V_{ref} é o sinal de referência e V_{tc} é a tensão na saída do tacogerador.

Posição do freio	Sentido horário				Sentido anti-horário			
	V_{tc} (V)	V_{ref} (V)	$(V_3 - V_4)$ (V)	Velocidade (rpm)	V_{tc} (V)	V_{ref} (V)	$(V_3 - V_4)$ (V)	Velocidade (rpm)
0								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Tabela 7.5: Dados experimento final.

6. Esboçar os gráficos: a) $\text{Posição do Freio} \times (V_3 - V_4)$ (erro) e b) $\text{Posição do Freio} \times \text{Velocidade}$ com base nos dados da tabela 7.5.
7. Explicar os gráficos obtidos.

7.5 Conclusões

Um taco gerador pode acabar fazendo parte integrante de um motor nos casos de sistemas com controle de velocidade.

O controle de velocidade realizado no Lab 3 era na realidade um sistema em malha-aberta. Uma carga variável no eixo de um motor, num sistema em malha-aberta, vai resultar em fortes variações de velocidade.

A falta de cuidado nas polaridades dos sinais nas entradas do módulo OA150A (que atua como o módulo que deveria calcular o sinal de erro; o bloco comparador), pode resultar numa realimentação positiva, percebida facilmente porque o motor continua elevando sua velocidade independente de outros ajustes realizados.

Se a carga no motor for continuamente aumentada, chegará um ponto no qual o driver amplificador do motor (módulo SA150D) vai saturar (limitar sua saída) e a velocidade então irá cair rapidamente. Isto significa que o controle automático de velocidade só funciona dentro de certos limites.

7.6 Comentários Finais

Exemplos de controles de velocidade podem ser observados em processos contínuos como controle da espessura de chapas de aço em laminadores a quente, em geradores e na maioria dos motores industriais.

Um tacogerador pode ser tão importante para controle de velocidade, que as vezes o mesmo já faz parte construtiva de alguns motores, caso do “DC-Tacho DCT 22” da Maxon mostrado na fig. 7.9.

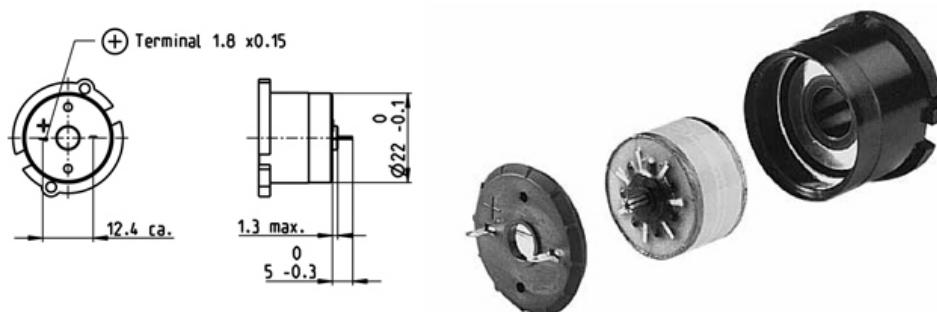


Figura 7.9: Motor Maxon com tacho-gerador embutido.

Porém, motores mais modernos estão preferindo incorporar dentro de si, encoders relativos de posição. Neste último caso, conta-se a quantidade de impulsos gerados durante a rotação do mesmo, dentro de períodos específicos de tempo e se infere (por software), a velocidade do mesmo. Mas existem outras formas de monitorar o movimento de motores, usando outros tipos de sensores como mostra a fig 7.10.



(a) Encoder

(b) Tacometro

(c) Resolver

Fonte: [Maxon > Product Overview > Sensors](#).

Figura 7.10: Sensores típicos usados com motores elétricos.

A figura 7.11 mostra o motor da conhecida marca japonesa NIDEC de 12-24 Vdc, *brushless* equipado de fábrica com encoder relativo que gera 100 pulsos por volta.

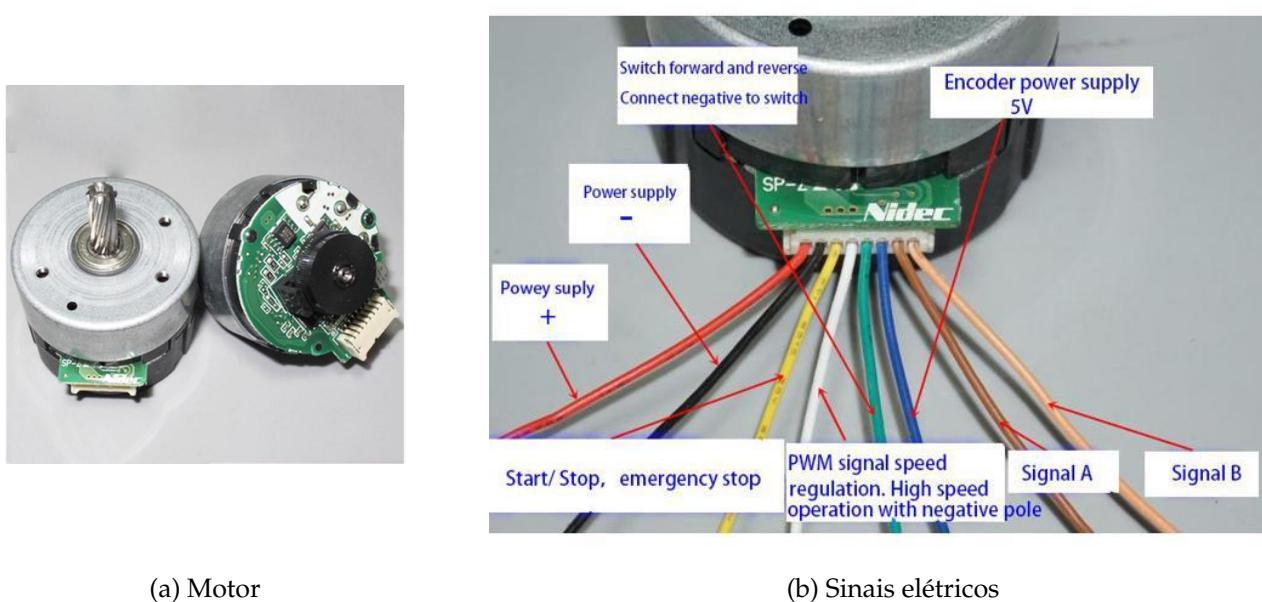


Figura 7.11: Servo motor Nidec 24H.

A figura 7.12 mostra um caso simples de controle de velocidade de motores para posicionamento de um robô móvel doméstico. Note que o motor já incorpora encoders (relativos) de posição. Neste caso (motor JGB37-545-EN), a “carcaça” do motor (Model NFP-37-3530) já prevê uma caixa de redução (jogo de engrenagens de 1:30) e um encoder capaz de gerar 3200 pulsos por volta (maiores informações em: [Polulu Robotics & Electronics > 50:1 Metal Gearmotor 37Dx70L mm 12V with 64 CPR Encoder \(helical pinion\)](#)).

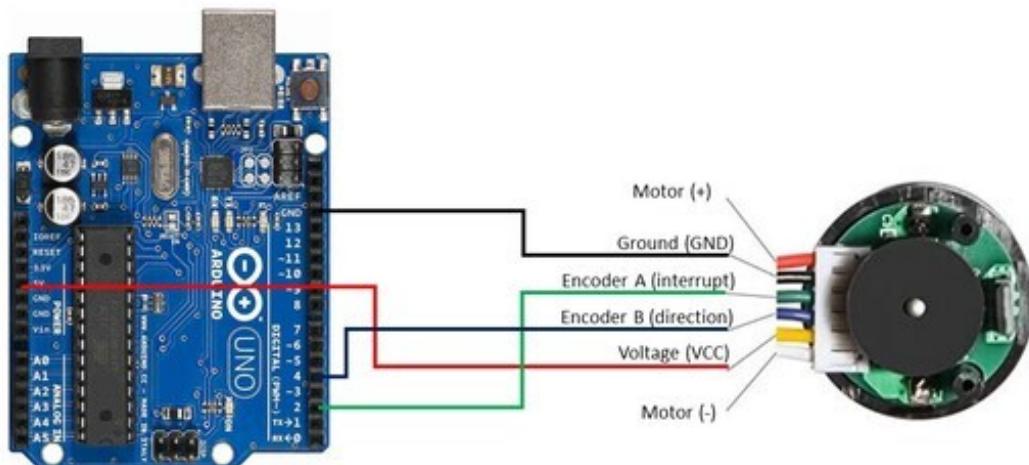
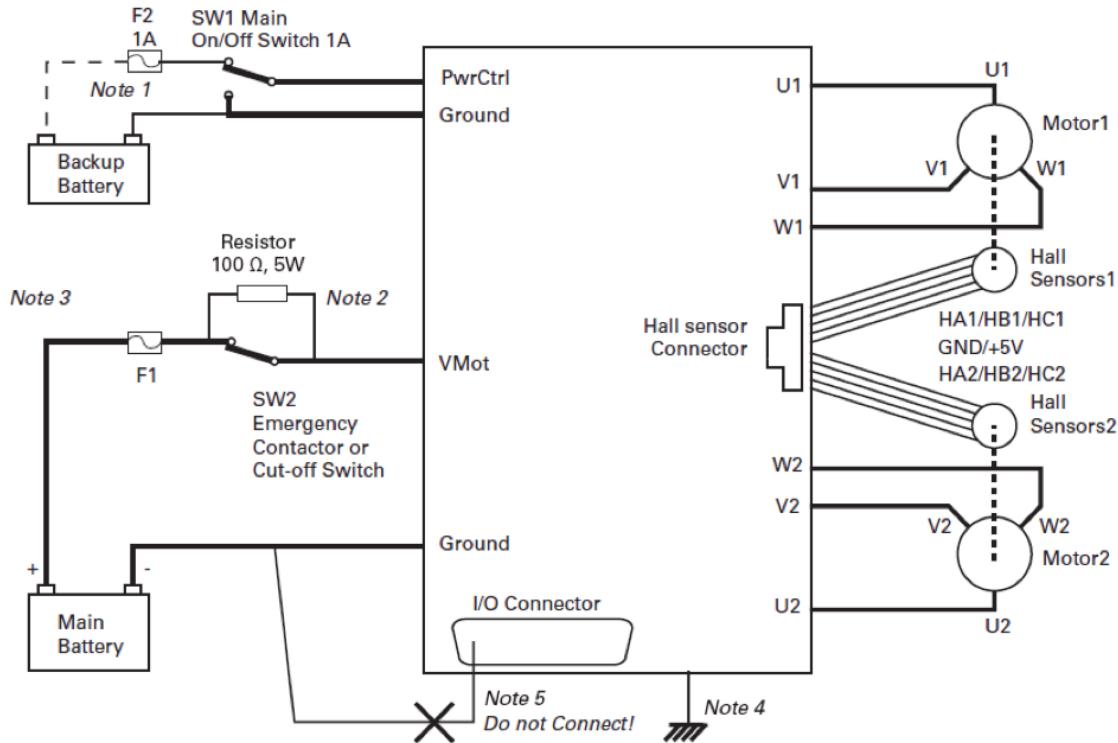


Figura 7.12: Exemplo de sistema simples de motor com encoders.

Em outros casos, mais sofisticados como de motores para AGVs (*Automated Guided Robots*), o próprio controlador (FBL2360 da RoboteQ) sugerido para seus motores (*brushless*) já é capaz de lidar até com sinais provenientes de sensores de efeito hall instalados na carcaça do próprio motor, como mostra a fig. 7.13, além de aceitar sinais de encoders e de resolvers.

Este tipo de controlador é capaz de acionar motores trifásicos de até 60V, até 60A de consumo e já trabalha com conexões RS232, USB, Ethernet e CAN. Ele controla motores gerando comutação sinusoidal (via gerador PWM de 3 fases trabalhando com auxílio de sensor de posição por efeito hall ou outros) e incorpora diferentes modos de controle como mostra a fig 7.14.



Fonte: Controlador FBL2360T da Roboteq:
<https://www.roboteq.com/products/products-brushless-dc-motor-controllers/fbl2360-detail>.

Figura 7.13: Exemplo de controlador para motor já capaz de lidar com informações de sensores por efeito hall e também com sinais de encoders e de resolvers.

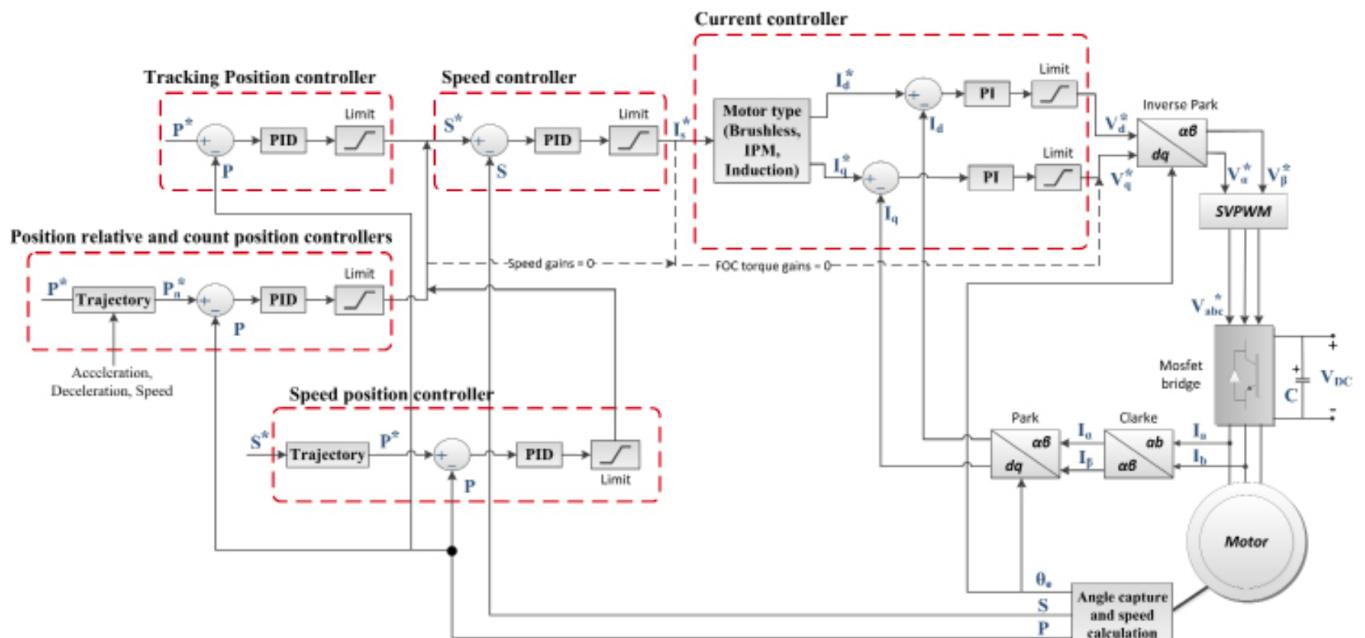


Figura 7.14: Opções de controladores disponíveis para módulo FBL2360 da RoboteQ.

8 | Banda Morta e Resposta a Degrau

8.1 Objetivos

- Reconhecer o que significa o termo “banda-morta”;
- Observar a resposta de um sistema de controle de posição para uma entrada degrau;
- Investigar o efeito do ganho na banda-morta e na resposta ao degrau;
- Observar o efeito inercial acrescentado à resposta ao degrau.

8.2 Introdução

Este laboratório estuda a banda morta e sua resposta ao degrau. Estuda também o efeito do aumento de ganho e o efeito de acréscimo de uma inércia na resposta ao degrau.

Banda morta é uma medida do grau de sensibilidade de um sistema. Banda morta corresponde ao nível de sinal mínimo, aplicado à entrada do sistema, necessário para que o mesmo comece a se mover.

A banda morta, em sistemas eletromecânicos, geralmente, surge devido a atrito. Porém, pode ser causado pela banda morta do amplificador eletrônico. Por exemplo, ver fig. 8.1.

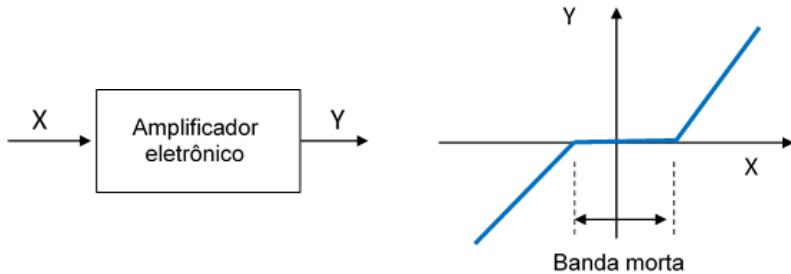


Figura 8.1: Amplificador eletrônico com banda morta.

Um amplificador eletrônico, com a característica estática mostrada na Fig. 8.1, se for inserido no canal direto de um sistema em malha fechada, vai aumentar mais ainda a banda morta condicionada pelo atrito em componentes mecânicos. Para que amplificador não apresente uma banda morta significativa, algumas medidas devem ser tomadas durante o projeto deste último.

No Lab 4 (*Estudo do Canal de Erro* – guiar-se pela fig. 8.2), deve ter sido percebido a presença de um “*fator de erro*”, K_e , de aproximadamente 0,1 Volts/grau referente ao desalinhamento entre os cursores (potenciômetros) de entrada e de saída. Isto significa que, um desalinhamento de $\pm 10^\circ$ (corresponde a um erro de ± 1 Volt), precisa ocorrer para fazer o motor responder. Então neste caso, podemos afirmar que banda-morta total deste dispositivo é de 20° .

Geralmente, neste tipo de sistema, aumentar o ganho reduz o valor da entrada necessária para produzir um efeito na sua saída e assim reduzir o efeito da banda-morta.

A ideia neste laboratório é descobrir se podemos quantizar a relação entre o ganho e a banda-morta.

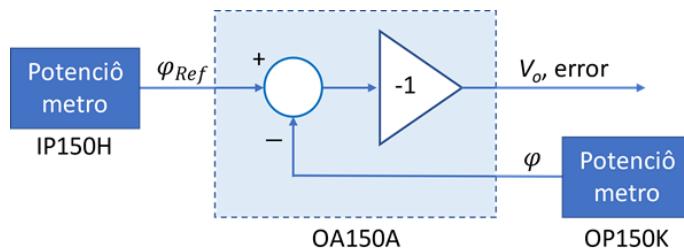


Figura 8.2: Lab 4) Estudo do canal do erro, diagrama em blocos (parcial).

Há dois métodos de detecção da banda morta em sistemas eletromecânicos:

- 1) **Método estático:** Este método consiste em aplicação à entrada do sistema de um sinal crescente. A taxa de crescimento do sinal deve ser baixa. Inicialmente, o sistema está em repouso. Quando na saída do sistema aparecer um sinal não nulo (por exemplo, quando o eixo de saída começar a se mover), o sinal na entrada é medido. O valor deste sinal é, digamos, Δ_1 . Em seguida, o sinal na entrada é zerado, o sistema entra em repouso e o sinal na entrada começa a crescer mas com uma taxa negativa. Quando na saída aparecer um sinal não nulo, o sinal na entrada é medido. O valor deste sinal é, digamos, Δ_2 . Os valores de Δ_1 e Δ_2 não necessariamente são iguais. O valor da banda morta é $|\Delta_1| + |\Delta_2|$.
- 2) **Método dinâmico:** Este método subentende a aplicação de um trem de pulsos retangulares bipolares à entrada do sistema. O método é aplicável apenas aos sistemas tipo 1 ou superior. O método não é aplicável aos sistemas tipo 0, porque esses sistemas apresentam um erro estacionário de posição não nulo quando sujeitos a entrada em degrau (trem de pulsos retangulares). Esse erro não permite detectar a banda morta.

8.3 Ensaio Estático (1ª-Parte)

Instruções:

1. Montar o sistema mostrado na fig. 8.3 ou fig. 8.4, que corresponde a um *ensaio usando o método estático*.
2. Não esquecer de zerar o offset do pré-amplificador (PA150C) e do Amplificador Operacional Somador (OA150A).
3. Ajustar a posição do “feedback selector” do OA150A para o resistor de 100 KΩ.
4. Ajuste o potenciômetro usado como Referência (IP150H) para 0 (zero) e zere a saída do Amplificador Operacional Somador (OA150A) usando o voltímetro de GT150X (fazendo o ajuste de offset do mesmo).
5. Ajuste o “zero set” do pré-amplificador (PA150C) de tal forma que o motor não gire em nenhuma direção.
6. Se assegure que as entradas do servo-amplificador (SA150D) estejam corretamente conectadas: aumentando o ganho da unidade de atenuação (AU150B) e verificando que um deslocamento no potenciômetro de entrada (IP150H) faz com o potenciômetro de saída (OP150K) gire na mesma direção.
7. Com o potenciômetro de ganho (AU150B) ajustado em “1”, lentamente gire o potenciômetro de entrada (IP150H) no sentido horário até que uma resposta ocorra no potenciômetro de saída (OP150K).
8. Meça o valor da banda morta para diferentes níveis de ganho na unidade AU150B. Isto é, gire lentamente o potenciômetro de referência (IP150H) no sentido horário até que uma resposta ocorra no potenciômetro de saída (OP150K). Anote o valor do ângulo na tabela 8.1 em função do ajuste do potenciômetro de ganho (AU150B). Repita a mesma operação no sentido anti-horário. A zona-morta total corresponde à soma das 2 leituras.
9. Preencher a tabela 8.1.
Obs.: Anote os resultados da zona-morta para cada ajuste de ganho entre 2, 3, 4, 5 e 6 até que a corrente do motor alcance 2A. Resete o potenciômetro de ganho cada vez que executa teste.
10. Plotar um gráfico (Banda morta) × (ganho) – deve resultar algo como o mostrado na figura 8.3.

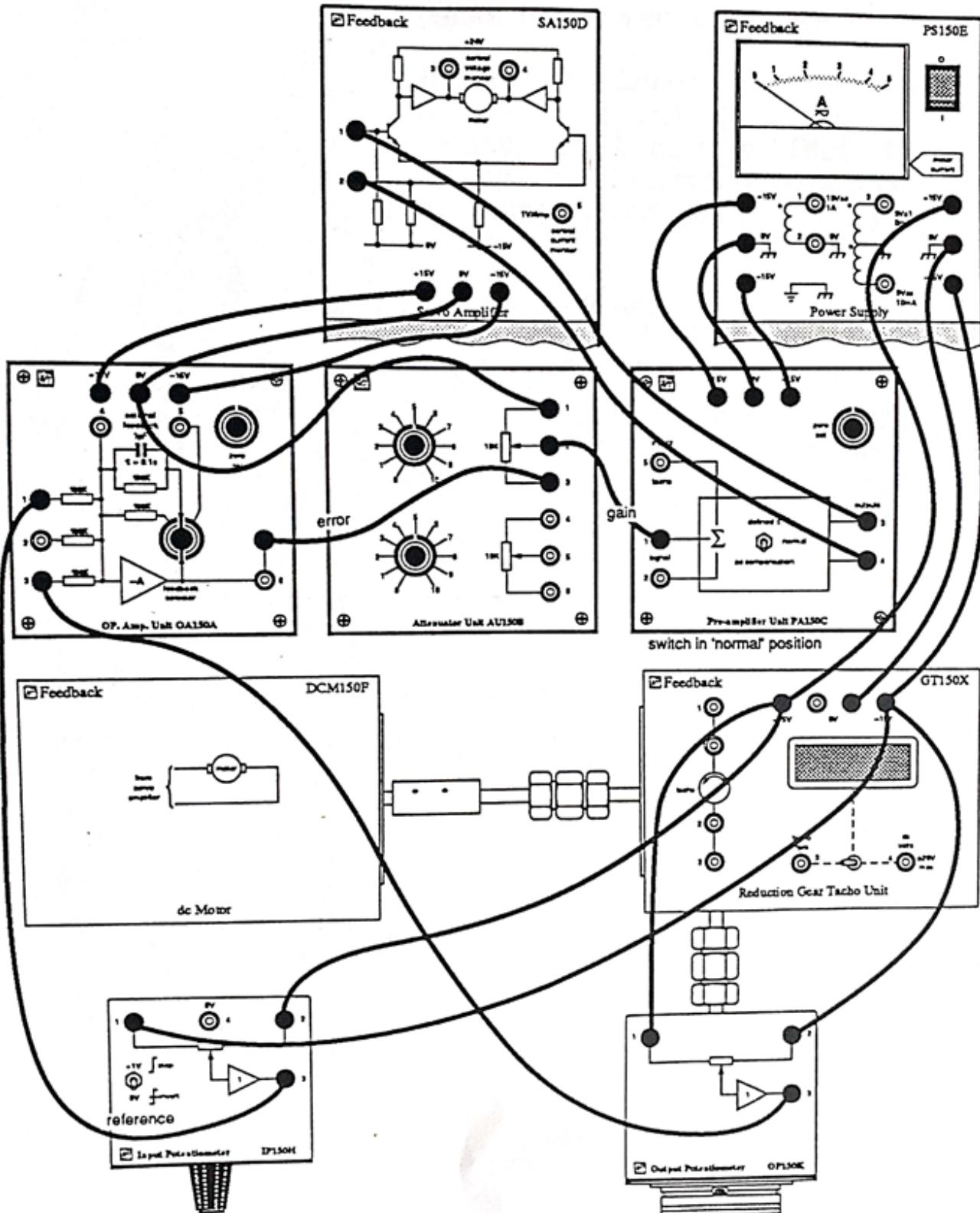


Figura 8.3: Esquema elétrico para ensaio usando método estático.

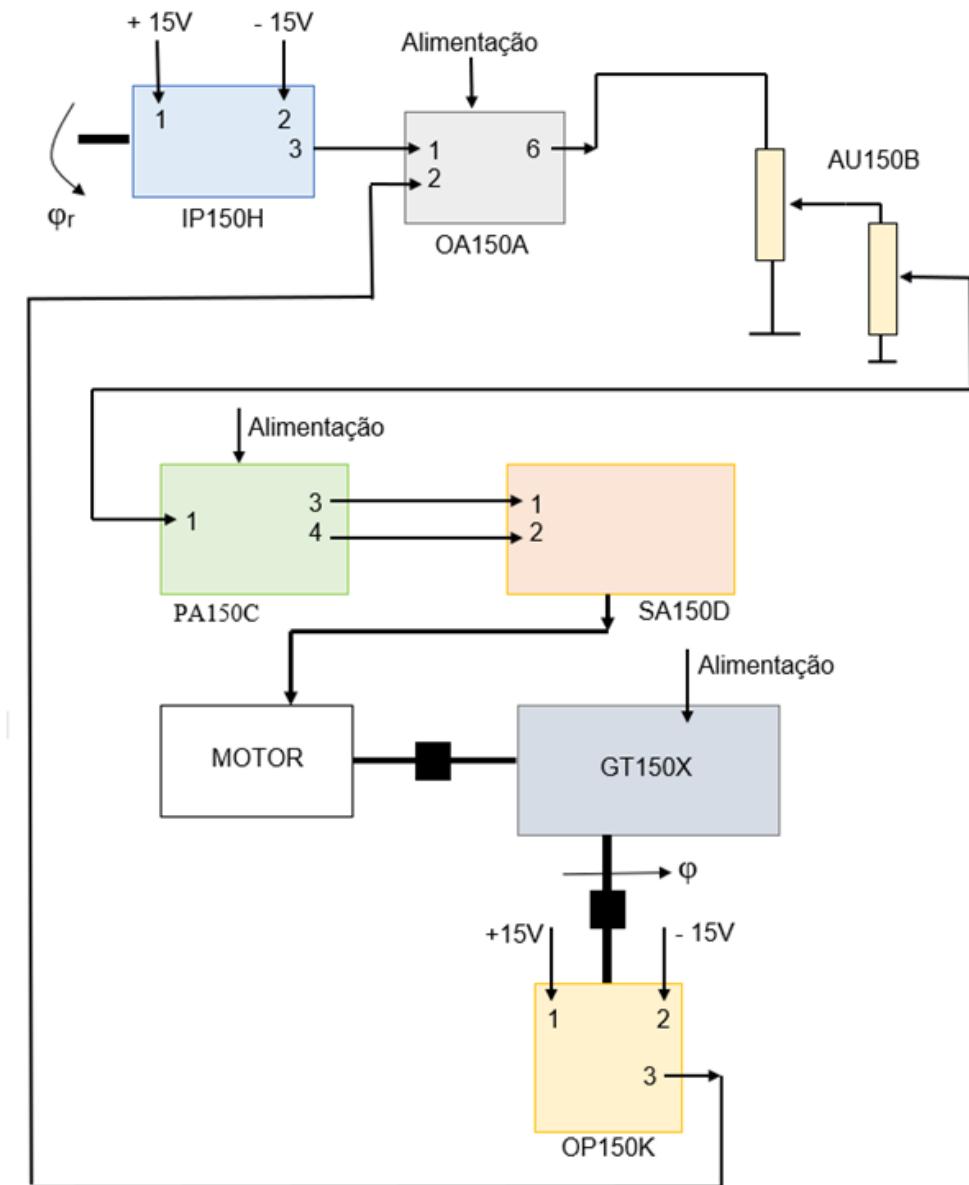


Figura 8.4: Variação do esquema elétrico do sistema a ser montado (ensaio usando método estático).

Ganho	Sentido Horário Δ_1 (graus)	Sentido anti-horário Δ_2 (graus)	Banda morta Total ($ \Delta_1 + \Delta_2 $) (graus)
0,01			
0,02			
0,03			
0,04			
0,05			

Obs.: Anote os resultados da zona-morta para cada ajuste de ganho entre 2, 3, 4, 5 e 6 até que a corrente do motor alcance 2A. Resete o potenciômetro de ganho cada vez que executa teste.

Tabela 8.1: Resultados do primeiro experimento (método estático).

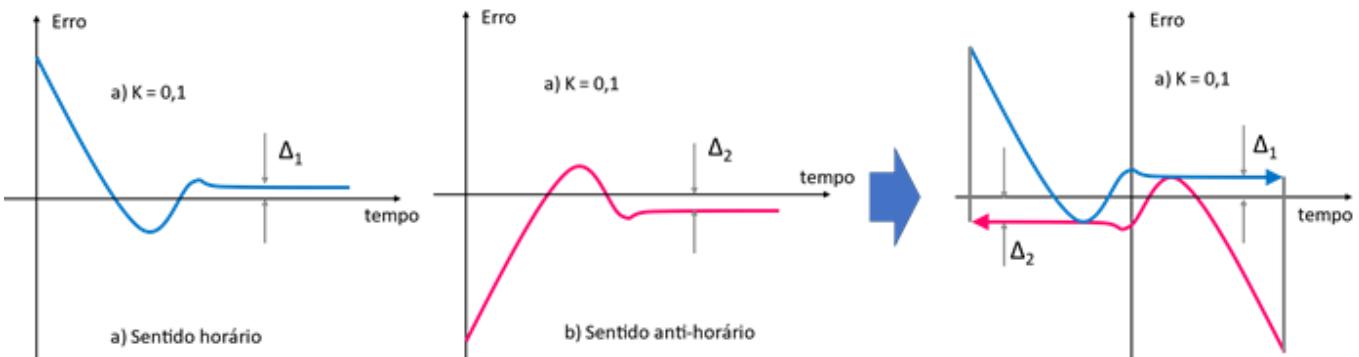


Figura 8.5: Resposta do sistema destacando a zona-morta

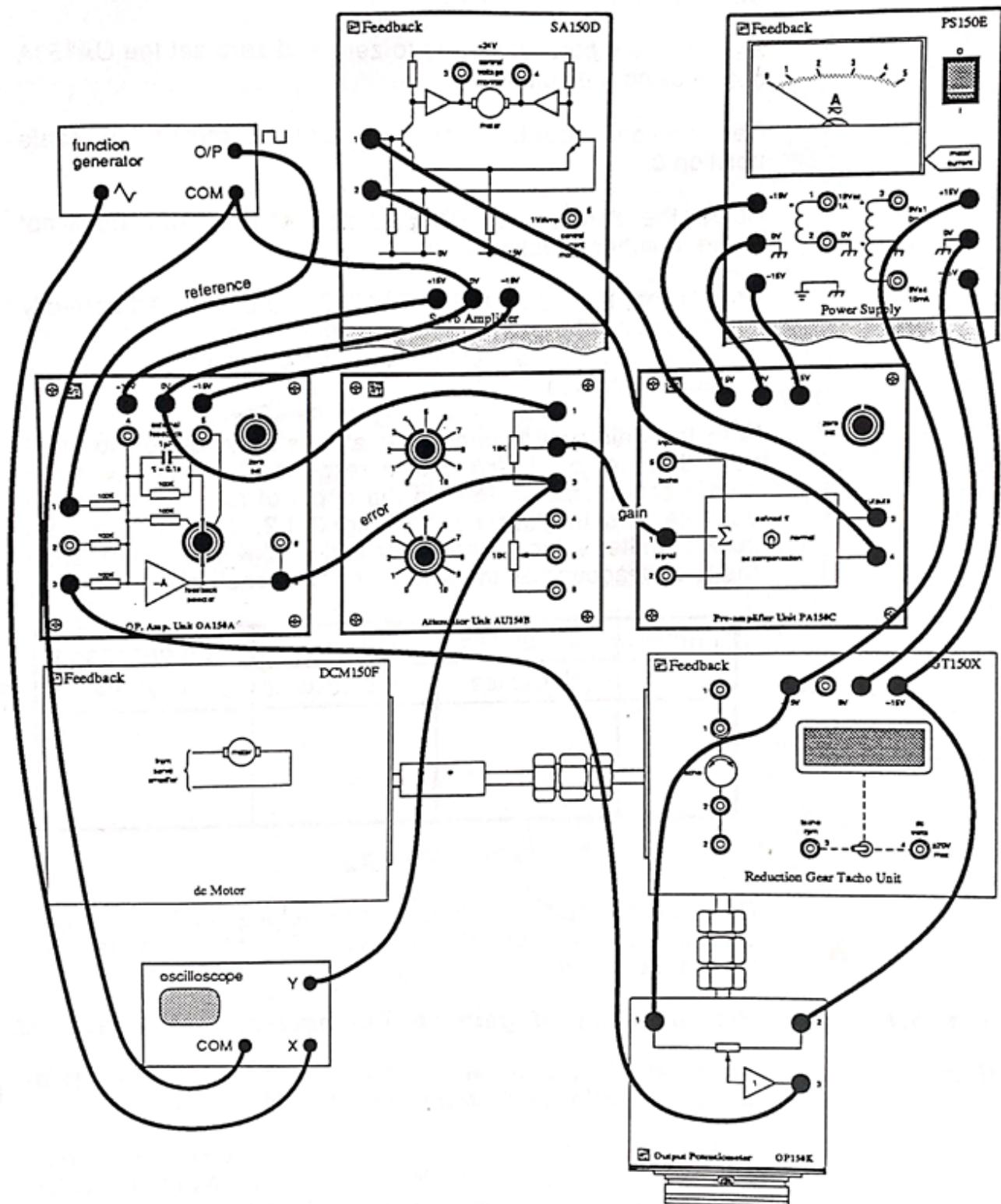
8.4 Ensaio Dinâmico (2^a-Parte)

O procedimento é similar ao executado anteriormente com a diferença de que desta vez, o sinal de entrada não será mais estático (tensão gerada pelo potenciômetro de entrada IP150H) e sim será gerado por um gerador de sinais. E como a entrada agora é dinâmica, usaremos um osciloscópio, conectando o sinal de entrada (saída do gerador de sinais) no canal 1 (ou X) e no canal 1 (ou Y) será acoplada o sinal de saída (saída de OA150A/entrada de AU150B) – ver próxima figura 8.6.

Vamos verificar os valores da banda morta através do método dinâmico. O método dinâmico pode ser aplicado, pois o sistema em questão é tipo 1.

Instruções:

1. Montar o sistema mostrado na fig. 8.6.

Figura 8.6: Diagrama de conexões para **ensaio dinâmico**.

2. Desconectar o módulo IP150H da entrada 1 de OA150A e conectar o gerador de sinais.
3. Ajustar a saída do gerador de funções para onda quadrada, $V_p = 2,5V$ (ou seja, 5 Volts pico-a-pico), freq = 0,3 à 0,5 Hz.
4. Para a medição de banda morta pode ser usado ou processo transitório de erro (Fig. 8.5(a)) ou processo transitório de φ (Fig. 8.5(b)).
5. Gradualmente aumente o ganho (módulo atenuador AU150B), da posição zero até que o sistema responda e o

osciloscópio produza uma imagem semelhante à figura 8.7.

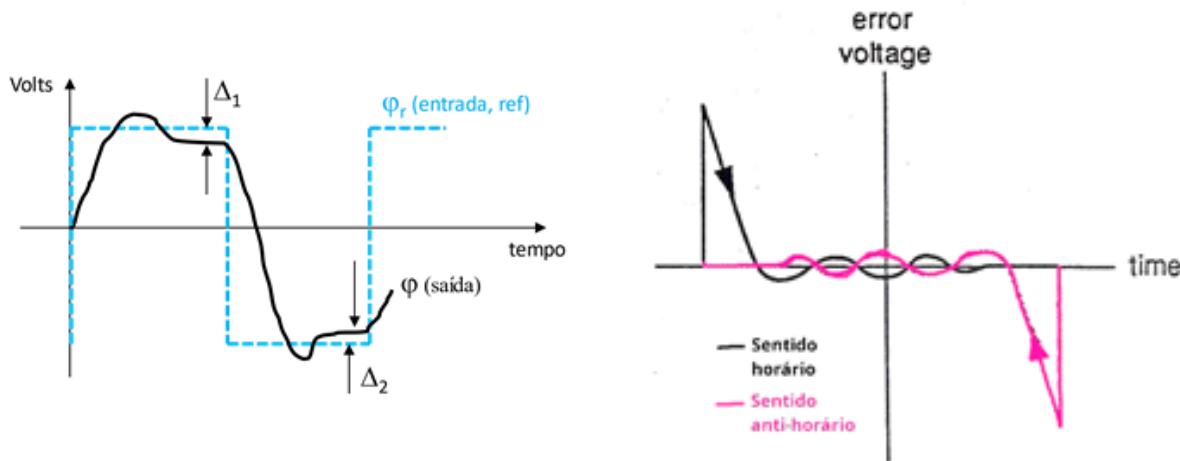


Figura 8.7: Resultados esperados para o ensaio dinâmico.

- Se o disco de inércia (ou carga) for acrescentado ao sistema da figura 8.6 poderá ser percebido que um acréscimo na inércia do motor, implica numa resposta transitória mais lenta (a frequência dos overshoots também diminui). Isto ocorre porque o torque extra necessário para incrementar a inércia faz com que o motor acelere e desacelere numa velocidade mais baixa. Mas isto também faz com que os overshoots aumentem sua amplitude. Esta última parte ocorre porque a energia extra estocada no motor, reverte (muda de sentido), assim a saída continua a se mover na direção original por um período de tempo maior antes de mudar de sentido.

8.5 Comentários finais

Na prática, em situações como nas de um elevador de carga, se um usuário desejar ir de um piso para outro, eles querem de forma rápida, suave e precisa. Eles não desejam uma parada oscilatória, subindo e descendo no piso desejado antes de parar ou pior, ninguém vai desejar sair do elevador com o mesmo ainda se movendo para cima e para baixo (de forma oscilatória). Uma forma de contornar este problema é realizar um controle de posição com uma 2a-malha-fechada de velocidade (malha mais externa).

8.6 Análise teórica

O sistema testado é mostrado na Fig.8.4.

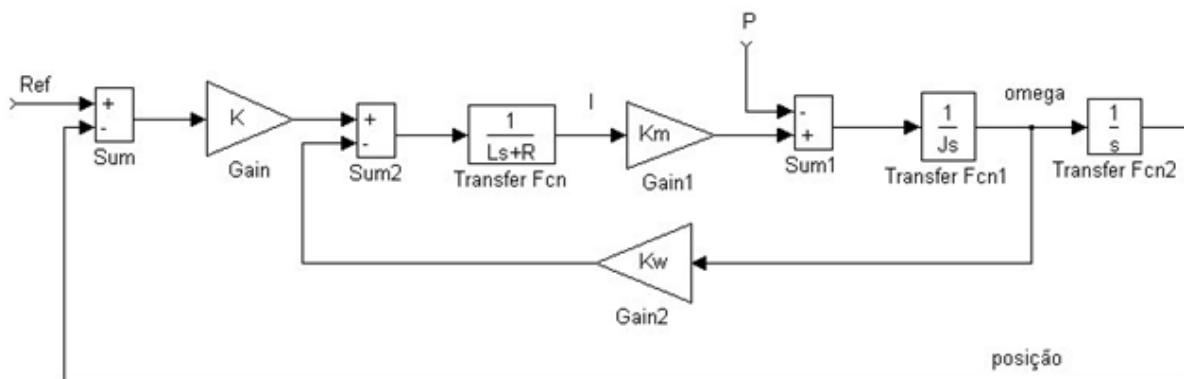


Figura 8.8: Diagrama de blocos do sistema.

O ganho K inclui somados os ganhos do canal de erro (IP150H + OA150A), do ganho de AU150B, do ganho de PA150C e o ganho de SA150D. Para fins de simplificação, suponhamos que todos os módulos do sistema funcionem dentro de suas faixas de linearidade (não acontece saturação).

Analisando o comportamento do sistema em regime estacionário, temos:

$$\begin{aligned}\text{Ref} &= \varphi_r \\ \text{omega} &= \omega \\ \text{posição} &= \varphi \\ \text{erro} &= \varphi_r - \varphi = e\end{aligned}$$

Inicialmente, têm-se:

$$\varphi = \omega = 0 \quad (8.1)$$

$$\begin{aligned}e &= \varphi_r - \varphi = \varphi_r \\ U &= K \cdot e = K \cdot \varphi_r\end{aligned}$$

Levantando a eq. do sistema temos:

$$I = \frac{(U - K_w \cdot \omega)}{(L \cdot s + R)} = \frac{(U - K_w \cdot \omega)}{R} = \frac{U}{R} = \frac{K \cdot \varphi_r}{R} \quad (8.2)$$

A variação de φ_r é lenta, por isso na eq. (8.2) podemos desprezar o termo $(L \cdot s)$ no denominador.

Nesta última equação foi considerado o fato de que: $\omega = 0$ (ver eq. (8.1)). Assim:

$$T = K_m \cdot I = \frac{K_m \cdot K \cdot \varphi_r}{R} \quad (8.3)$$

Quando o sistema começa a se mover (situação limiar):

$$T = P \quad (8.4)$$

Substituindo-se (8.3) em (8.4), obtemos:

$$\frac{K_m \cdot K \cdot \varphi_r}{R} = P$$

Logo:

$$\varphi_r = \frac{P \cdot R}{K_m \cdot K} \quad (8.5)$$

Analizando a eq. (8.5), pode-se ver que aumentando K é possível reduzir o valor de φ_r , mas (8.5) foi deduzido para a situação limiar, ou seja, quando o sistema começa a se mover. Por isso, o valor de φ_r determina a banda morta. Então, **aumentando-se o valor de K , diminuímos a banda morta**.

8.7 Conclusões finais

- A relação entre ganho e zona-morta é tal que que tensão de erro da zona-morta é reduzido conforme o ganho é incrementado.
- Aumentar o ganho aumenta o número de *overshoots* já que o sistema tende à instabilidade (oscilação contínua).
- Alcançar ou não o limiar de estabilidade (aumentando seu ganho) depende das características dinâmicas do motor e da sua carga.

9 | Realimentação de Velocidade em Malha de Controle de Posição

9.1 Objetivo geral

Estudar o efeito de 2 laços de realimentação usando realimentação de posição e de velocidade num sistema de controle de posição.

9.2 Objetivos

Quando você completar este laboratório será capaz de:

- Perceber o problema do “overshoot” e notar como o mesmo pode ser reduzido usando o freio eletromagnético;
- Reconhecer uma “realimentação de velocidade” e perceber como a mesma afeta o desempenho de um sistema de controle de posição;
- Reconhecer uma oscilação crítica.

Lista de equipamentos necessários

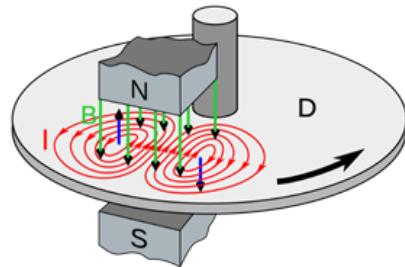
- OA150A – Unidade de Amp. Op.
- AU150B – Unidade de Atenuação.
- PA150C – Unidade pré-ampificadora.
- SA150D – Servo Amplificador.
- PS150E – Fonte de Alimentação.
- DCM150F – Motor CC.
- IP150H – Potenciômetro de Entrada.
- OP150K – Potenciômetro de Saída.
- LU150L – Unidade de Carga (freio eletromagnético).
- GT150X – Unidade Taco geradora com Redução
- Voltímetro CC +/- 30 Volts.
- Osciloscópio.
- Gerador de Funções (onda quadrada, triangular: 0,1 à 1 Hz).

9.3 Introdução

Num sistema de controle de posição, enquanto aumentar seu ganho possui a vantagem de reduzir sua banda morta (*deadband*), isto provoca o aumento do sobressinal (*overshoot*) na sua resposta. Eventualmente o sistema pode se tornar instável (ganho muito elevado, $K > K_u$), e o indicador de posição oscila em torno da posição desejada (referência).

O problema do sobressinal (*overshoot*) surge por causa da velocidade desenvolvida pelo motor tentando alinhar sua posição final no ponto desejado (referência). O motor acaba passando do ponto. Quanto mais alto o ganho, maior a velocidade de resposta do motor e assim, depois de certo valor, o sistema começa a oscilar e não consegue mais manter o alinhamento com a posição desejada.

Uma forma simples de evitar o *overshoot* é usar o freio magnético. Este freio consiste em um disco de corrente induzida (ou “*Eddy current*”, também conhecida como **correntes de Foucault**) girando entre os polos de um ímã, que ocorre para qualquer posição (ângulo) do disco – ver fig. 9.1. Esta corrente induzida produzirá um torque (contrário) proporcional à velocidade desenvolvida pelo disco freando o motor. Este freio, também conhecido como “*Eddy current brake*”, “aplica” uma carga proporcional à velocidade de rotação assumida pelo disco. No laboratório 3, sobre “Características do Motor”, a fig. 9.2 mostrava o torque desenvolvido quando o disco gira à 1000 RPM, para diferentes posições do freio eletromagnético. Para outras velocidades, este torque (contrário) é proporcional à velocidade do disco.



Fonte: [Wikipedia: Eddy current brake](#).

Figura 9.1: Freio eletromagnético sobre disco circular mostrando as correntes induzidas de Foucault.

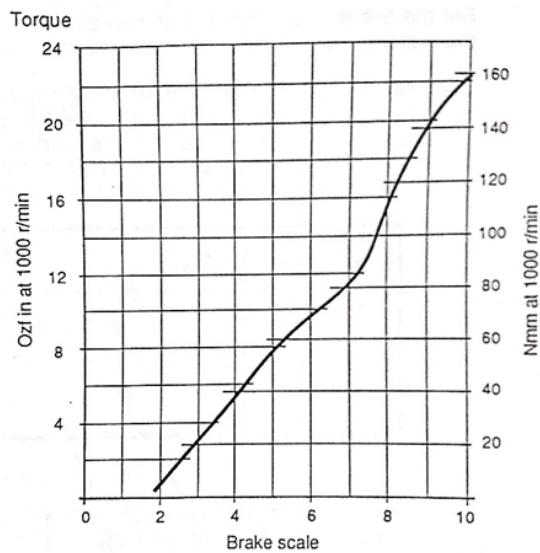


Figura 9.2: Exemplo de curva característica do freio para velocidade de 1000 rpm.

9.4 Procedimentos preliminares

1. Ajustar a unidade de freio (LU150L) no eixo do motor, garantido que o freio possa ser totalmente retirado ou totalmente ativado sem tocar no disco do freio.

2. Garantir que o módulo do Servo Amplificador (SA150D) esteja conectado via plug especial à fonte de alimentação (módulo PS150E).
3. Garantir que os módulos do Servo Amplificador (SA150D) e do Motor CC (DCM150F) estejam conectados através de seu plug especial.

9.5 Primeira Montagem

A ideia aqui é observar o efeito do freio eletromagnético no sobressinal (*overshoot*).

Monte o sistema mostrado na fig. 9.3 à seguir.

Instruções:

1. Ajuste o seletor do módulo OA150A para o resistor de 100 KΩ.
2. Ajuste o gerador de sinais para onda quadrada com frequência de 0,3 Hz, 2,5 Volts pico-à-pico.
3. Não esquecer de zerar o *off-set* de OA150A e de PA150C.
4. Verifique se a realimentação de posição é negativa. Se a realimentação for positiva, o potenciômetro de saída OP150K vai oscilar em torno da posição de 180°.
5. Não esquecer de zerar o *off-set* de OA150A e de PA150C.
6. Varie o ganho (posição do cursor de AU150B) e a posição do freio, preencha a tabela que aparece mais adiante. Deve ser obtido algo similar ao mostrado na fig. 9.4.
7. Se necessário, ajuste a frequência do gerador para obter um padrão semelhante à fig 9.4 (máximo de 0,5 Hz e 5,0 Vpp).
8. Com o freio na posição 0, aumente o ganho (potenciômetro do módulo AU150B até observar certos sobressinais. Então anote o número de sobressinais à medida que varia a posição do freio da posição 0 até a posição 2, 5 e 10. Repita este processo para valores cada vez maiores de ganho, mas pare de elevar o ganho se o número de sobressinais (*overshoots*) se tornar muito elevado ou se a corrente no motor exceder 2A.
9. Complete a tabela 9.1.

Ganho	Posição do Freio:			
	0	2	5	10
	Número de sobressinais (picos positivos):			
0,1				
0,2				
0,3				
0,5				

Tabela 9.1: Sobressinais (picos) × Posição do freio.

Obs: você deve ter percebido que ao aumentar o freio, deve ter reduzido o número de oscilações (sobressinais), mas também reduziu o tempo de resposta do sistema.

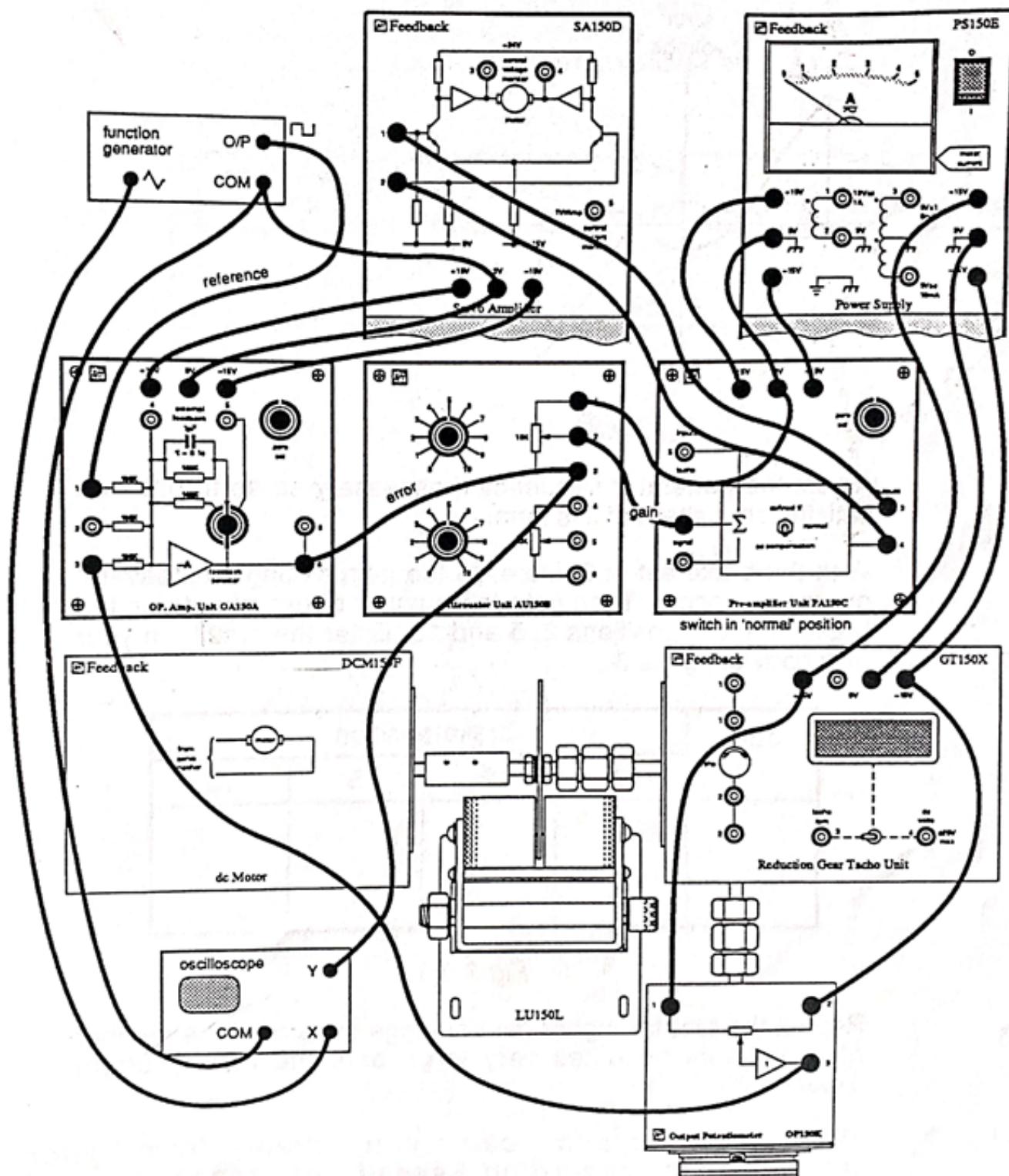


Figura 9.3: Efeito do freio eletromagnético no overshoot.

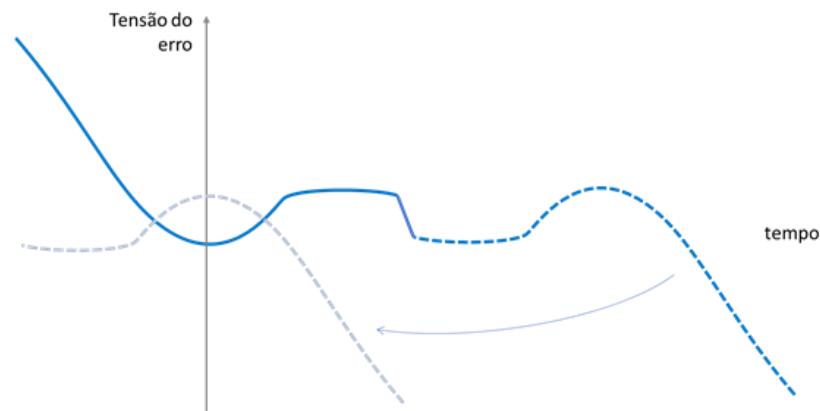


Figura 9.4: Curva do erro.

Outra abordagem mais eficiente e efetiva de controle de posição é controlar a velocidade do motor estabelecendo uma realimentação de velocidade usando o tacho gerador.

Antes de partir para um novo experimento, seria bom ver exatamente o que acontece no sistema quando uma entrada degrau é aplicada como um sinal de referência de tensão para exigir que o eixo de saída do motor assuma uma determinada posição.

Por enquanto realizamos a soma dos sinais de referência e de realimentação da posição (como mostra a fig 9.5) para produzir a tensão de erro para modular o controle de velocidade para o motor.

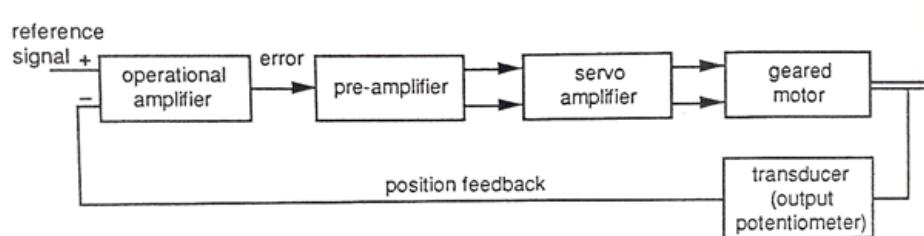


Figura 9.5: Malha de realimentação simples para controle de posição.

De forma a prevenir sobressinais e ainda obter uma resposta rápida, o motor deveria se comportar como mostra a fig 9.6(a).

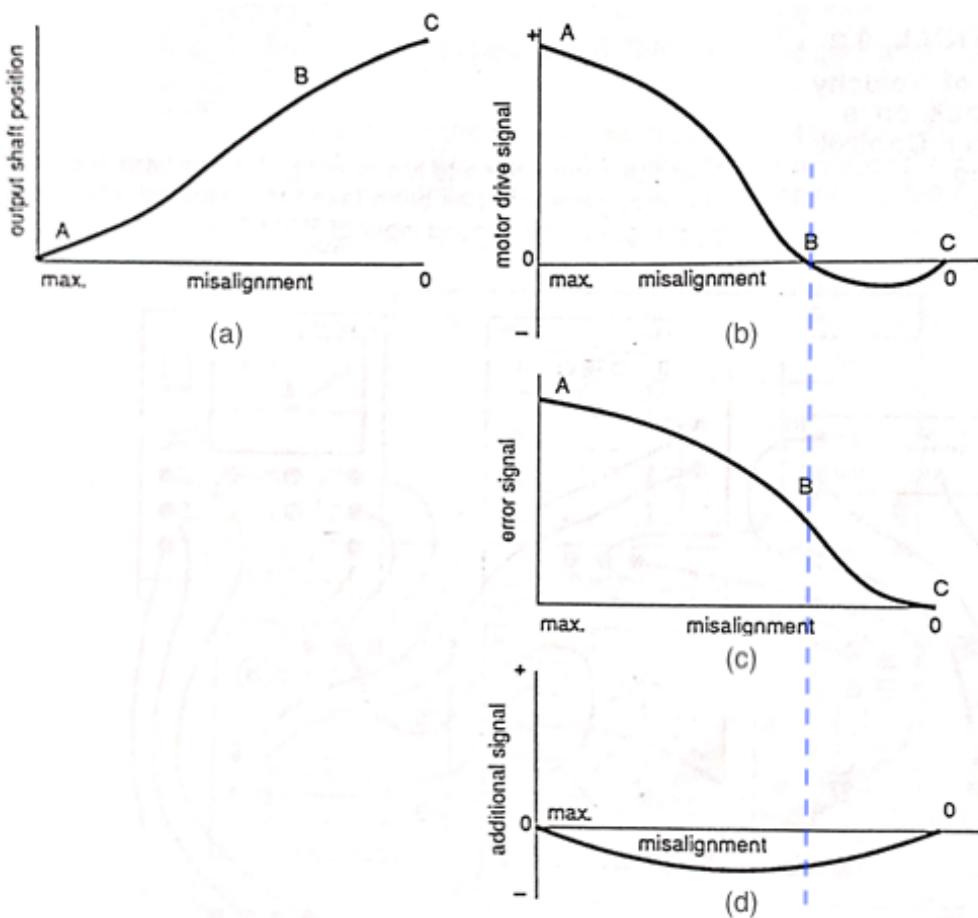


Figura 9.6: Comportamentos do motor próximo da posição desejada.

Inicialmente o motor deve responder tão rápido quanto possível, partindo do ponto A para o ponto B no gráfico. Entretanto, a medida que o desalinhamento se reduz, a velocidade do motor deveria ser reduzida (pontos de B para C), assim, ele poderia atingir o ponto de parada no ponto C.

Um grafo como o da fig 9.6(b) poderia ser desenhado mostrando relação entre a corrente necessária para o motor (*motor drive signal*) e a amplitude do desalinhamento (erro de posição, ou *misalignment*).

O ponto A se refere a posição de máximo desalinhamento. A partir desta posição o motor vai exigir um forte sinal atuador (corrente elevada), que será gradualmente reduzida até a posição B, na qual o motor começa a reverter seu sentido de giro, implicando que a velocidade do motor deveria ser reduzida de forma a permitir que ele alcance o ponto C (e pare). Este comportamento poderia ser traduzido para uma forma gráfica como a mostrada na fig 9.6(c).

Comparando a fig 9.6(b) com a 9.6(c), pode ser percebido que seria necessário um sinal considerando a diferença entre estes 2 gráficos, isto é, algo como:

$$\begin{aligned} \text{Sinal adicional} &= \text{Motor drive signal} - \text{Sinal de erro} \\ (\text{Additional signal}) &\quad \quad \quad (\text{Error Signal}) \end{aligned}$$

mostrado na fig 9.6(d).

Usando o freio eletromagnético se realizou uma tentativa bruta de controle de velocidade. Entretanto, da mesma forma que o freio é efetivo para modular a carga no eixo do motor, ele é ineficiente para contornar o problema dos sobressinais (oscilações) num sistema prático.

Um método melhor que poderia ser adotado é **realizar uma realimentação de velocidade** com base nos dados do taco gerador. Como a saída do taco gerador é proporcional à velocidade do eixo do motor, se apropriadamente conectado, ele pode nos fornecer um sinal cada vez maior na parte inicial do movimento do motor (entre os pontos A e B do gráfico da fig 9.6(c)), e assim reduzir a velocidade do mesmo, de forma a que o motor alcance lentamente a posição de alinhamento (desacelere de modo “gentil”, ou criticamente amortecida).

Esta nova abordagem vai exigir **2 laços de realimentação**. Um para produzir o sinal de erro e o segundo laço para somar os sinais de erro e dados de velocidade para produzir um sinal atuador, ver fig 9.7.

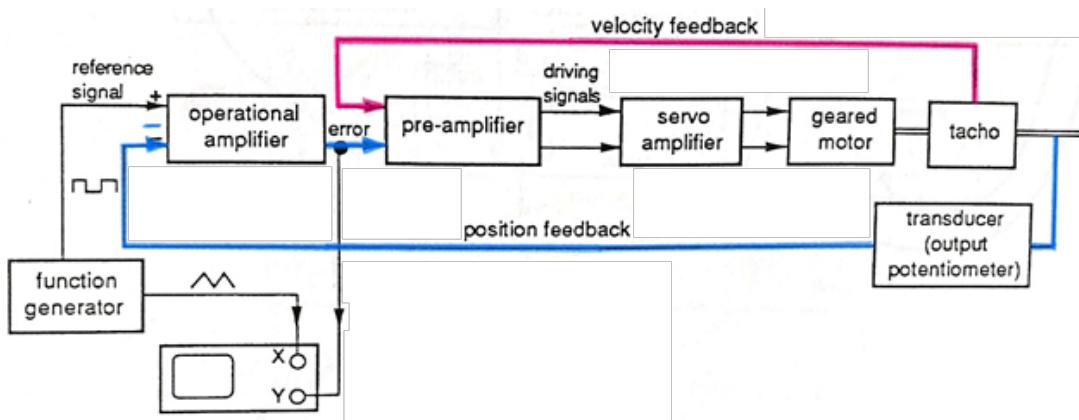


Figura 9.7: Malha de velocidade sobreposta a malha de controle de posição.

9.6 Segunda montagem

A ideia agora é perceber o efeito da realimentação (extra) de velocidade no sistema de controle de posição.

Realizar a montagem proposta na fig 9.8.

Instruções:

1. Ajuste o freio eletromagnético em 0. Ligue o sistema e ajuste o ganho (da malha de posição) em 1.
2. Depois aumente o ganho da malha de realimentação de velocidade, ajustando o segundo potenciômetro (o inferior) do módulo atenuador (AU150B) para as posições 1, 2, 5, e 10 e para cada ajuste, observe na tela do osciloscópio e anote o número de sobre sinais na tabela 9.2.
3. Compare estes resultados com os levantados na tabela anterior. Eles devem ser algo similares.
4. Tente encontrar uma combinação ou mais de ganhos de posição e da realimentação de velocidade que resultem em amortecimento crítico.

Ganho	Posição do Freio:			
	0	2	5	10
	Número de sobressinais (picos positivos):			
0,1				
0,2				
0,3				
0,5				

Tabela 9.2: Resultados obtidos na segunda montagem.

Note que:

- Note que quando muita realimentação de velocidade é aplicada, a velocidade do motor se torna muito lenta e nenhum sobre sinal aparece.
- Com o ganho da realimentação de velocidade ajustado adequadamente, a resposta deve ser mais rápida, mas sem que nenhum sobre sinal seja obtido. Neste caso, dizemos que o sistema está “**criticamente amortecido**”.

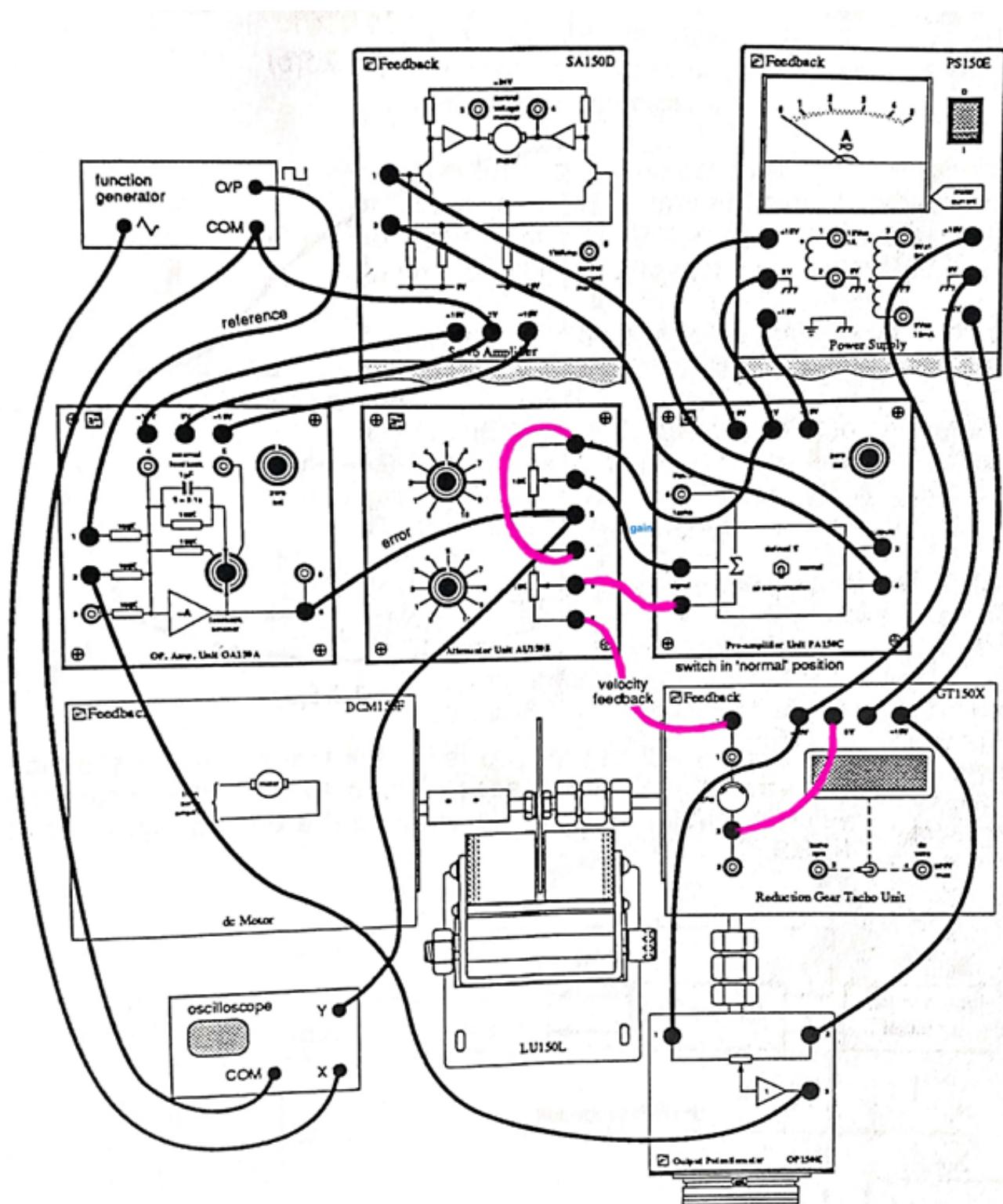


Figura 9.8: Segunda montagem com segunda malha de realimentação, a de velocidade.

Observação: Note na fig 9.8 que a saída do taco gerador foi direcionada também para a segunda entrada do módulo atenuador (AU150B), que continua conectado da mesma forma que na primeira montagem, no módulo pré-amplificador (PA150C).

A fig 9.9 mostra exemplos de várias curvas de resposta que podem ser obtidas para diferentes ganhos adotados na realimentação de velocidade.

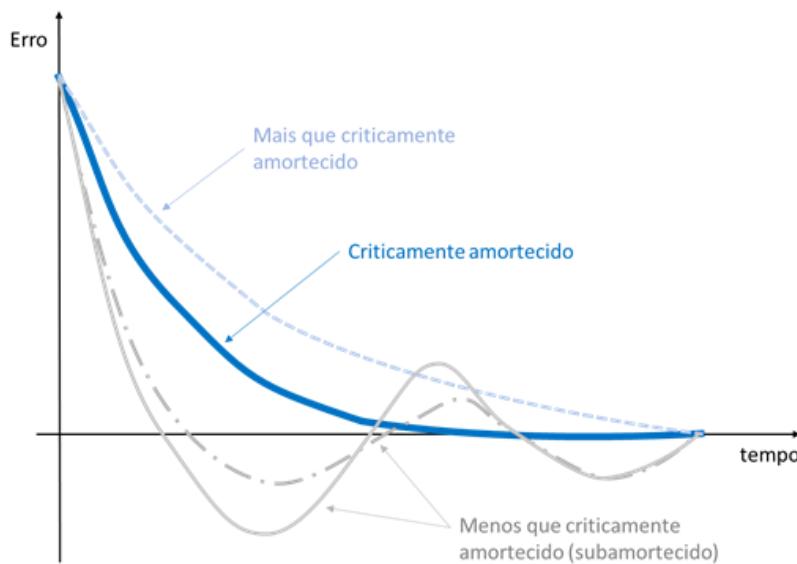


Figura 9.9: Padrões de respostas esperadas.

9.7 Comentários Finais

Em outros laboratórios percebemos a importância do amplificador operacional em ser capaz de, como dispositivo eletrônico, comparar de maneira rápida os estados atuais e desejados para um sistema.

Também vimos que controlador a velocidade de um motor, permite realizar um sistema de controle de posição.

Três pontos foram observados nas práticas. Se é necessário um sistema sensível que deve reagir para pequenas mudanças de sinal, antes que o motor comece a acelerar ou desacelerar rapidamente, teremos como desafio, controlar os sobressinais que irão surgir. O problema do sobressinal foi visto na Lab 8 (“Banda Morta e Resposta ao Degrau”).

O controle de velocidade foi então adicionado para restringir os sobressinais, através da realimentação de uma parte da taxa do sinal do erro (“velocidade” do erro), o qual pode ser somado ao sinal do erro (de posição) para produzir o sinal de atuação sobre o motor. Chamamos a este tipo de sistema, como de **duplo controle**, que como foi visto, ajuda muito a reduzir o problema do sobressinal.

Mas existe uma **desvantagem** prática na realimentação de velocidade atuando sobre a velocidade do motor, que é o fato de que ele aumenta a amplitude do sinal de erro necessário para manter o motor numa velocidade constante de rotação. Assim, se o sinal de referência (entrada) é aumentado de forma constante (taxa de variação = cte ; a derivada resulta nula), a saída vai variar na mesma velocidade (por causa do ganho proporcional sobre o erro), mas mantendo um erro constante de posição. Este sintoma é chamado de “**erro de seguimento**” (*following error*) e pode ser observado se for aplicado uma onda triangular na entrada de referência ao invés da onda quadrada usada neste laboratório.

O erro de seguimento pode ser reduzido usando-se diferentes métodos ou pode ser eliminado usando-se abordagens para redução do sobressinal diferentes da estratégia usando realimentação de velocidade.

9.8 Embasamento teórico

Em sistemas de controle de posição, um aumento no ganho do canal direto implica em um aumento de sobressinal na resposta a degrau. Em outras palavras, um aumento no ganho do canal direto de sistemas em malha fechada diminui a estabilidade relativa e pode levar a instabilidade. Consideraremos o sistema mostrado na Fig. 9.10.

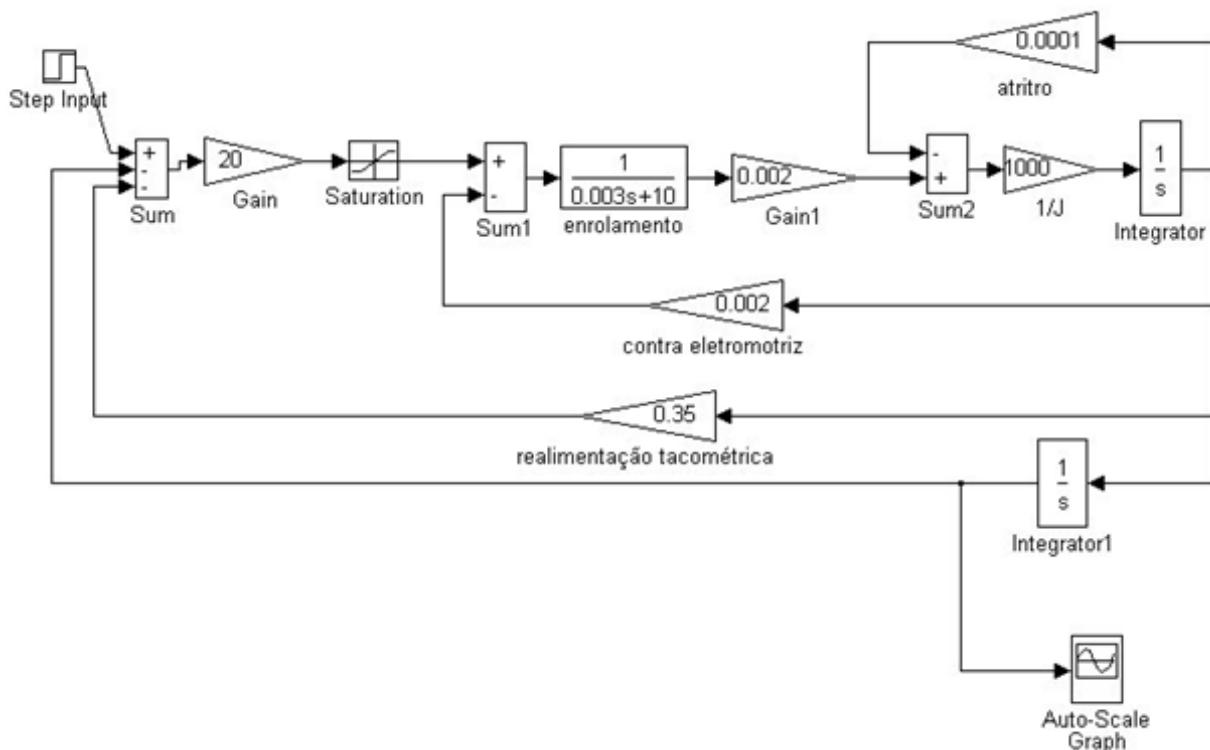


Figura 9.10: Diagrama de blocos do sistema de controle de posição.

O modelo mostrado na Fig. 9.10 corresponde a um sistema de controle de posição à base de módulos MS150 da Feedback. O parâmetro Gain = 20 representa o ganho total do canal direto. A saturação é de ± 27 Volts. A função de transferência "enrolamento" simula a dinâmica do enrolamento do motor; J é o momento de inércia total referido ao eixo do motor; coeficiente "atraito" simula o atrito no mecanismo.

Se ajustarmos o valor da realimentação tacométrica para zero e atrito para 0.00003, o processo transitório em resposta ao degrau unitário é mostrado na Fig. 9.11. O processo é pouco amortecido, o que significa pouca estabilidade relativa.

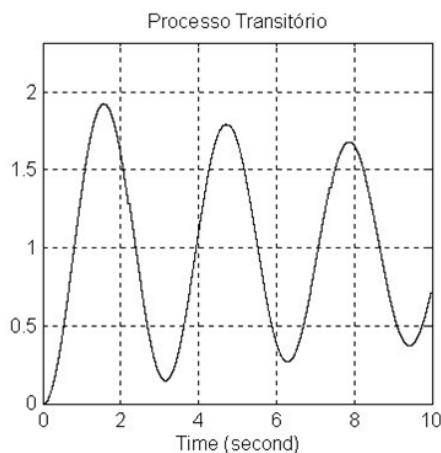


Figura 9.11: Processo transitório do sistema em resposta ao degrau unitário; atrito = 0.00003; realimentação tacométrica = 0.

Na Fig. 9.12 é mostrado o processo transitório do mesmo sistema em resposta ao degrau unitário, mas com atrito = 0.0001. O processo é bem amortecido com um sobressinal de aproximadamente 45%. O sobressinal pode ser diminuído se aumentar o valor de atrito.

Na Fig. 9.13 é mostrado o processo transitório do sistema com atrito=0.00003 e realimentação tacométrica = 0.35. O sobressinal é na faixa de 25% e o processo é bem amortecido, porém bastante rápido.

Comparando entre si esses três processos transitórios, podemos concluir, que um aumento na estabilidade relativa pode ser alcançado ou através de aumento no atrito na parte mecânica do sistema ou através de realimentação tacométrica. O uso de realimentação tacométrica é mais vantajoso, pois não envolve nenhuma grande dissipação de

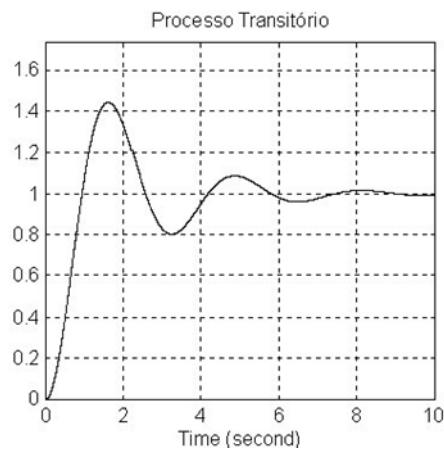


Figura 9.12: Processo transitório do sistema em resposta ao degrau unitário; atrito = 0.0001; realimentação tacométrica = 0.

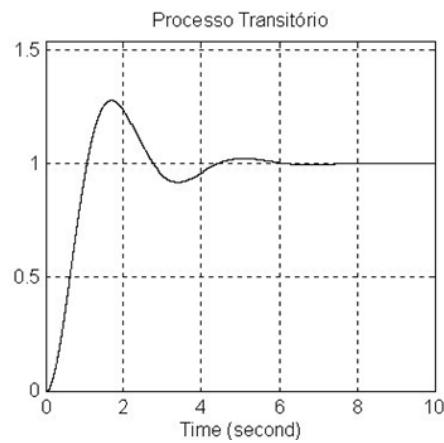


Figura 9.13: Processo transitório do sistema em resposta ao degrau unitário; atrito = 0.00003; realimentação tacométrica = 0.35.

energia o que acontece no caso de utilização de freios eletromagnéticos ou mecânicos.

9.9 Instruções finais

1. Plotar as curvas *Erro* vs. *Tempo*, sendo o sinal de erro medido na saída 6 de OA150A, para o ganho tacométrico de 0,2; 0,3 e 0,5 (se a resposta for muito amortecida, então variar o ganho tacométrico como mostrado na tabela 9.2).
2. Preencher as tabelas.
3. Plotar os gráficos *Número de sobressinais* vs. *Ganho Tacométrico* para os valores de ganho 0,1; 0,2; 0,5 e 1,0 com base na tabela 9.2
4. Analisar os gráficos.
5. Traçar conclusões sobre a experiência.

Parte II

Servo-sistema CA

10 | Erro num sistema síncrono

Neste laboratório, um sistema de controle de posição angular **sem contato mecânico** composto por um transmissor síncrono e seu receptor (transformador) é configurado para gerar um sinal de erro.

Equipamentos usados

- PS150E: Fonte de Alimentação;
- ST150T: Transmissor síncrono;
- ST150R: Transformador (receptor) síncrono;
- Osciloscópio.

10.1 Objetivos

Quando este laboratório for completado, o estudante deverá:

- ter entendido a operação básica de um sistema síncrono;
- saber como um transmissor e motor/transformador (receptor) síncrono podem ser interconectados para gerar um sinal de erro.

10.2 Introdução

Até este laboratório foram realizados experimentos envolvendo o uso do potenciômetro rotativo em sistemas de controle de posição angular em malha fechada. Enquanto que um potenciômetro rotativo é um simples e efetivo transmissor proporcional de informação elétrica da posição angular, ele sofre com a desvantagem do desgaste de seu cursor em contato mecânico com a superfície resistiva, o que pode fazer com que o dispositivo falhe.

Os sistemas síncronos não possuem esta desvantagem, eles são semelhantes a motores, transdutores de indicação de posição operando com tensões CA (alternadas). Eles podem transmitir dados como posição angular de um ponto para outro com muita precisão sem sofrer problemas de contato mecânico.

Nos kits da Feedback existem 3 tipos de módulos síncronos:

- o motor/transmissor síncrono ST150T;
- o transformador (receptor) síncrono ST150R, e;
- o diferenciador síncrono DS150J.

Um motor/transmissor síncrono possui um rotor mecânico devidamente posicionado de forma a transmitir eletricamente a posição angular do rotor em relação ao seu estator.

Um motor/transformador (síncrono), quando alimentado com informação angular, produz uma tensão proporcional ao seno da diferença entre o ângulo elétrico da tensão aplicada e a posição de seu rotor.

Um diferenciador síncrono transmite informação elétrica correspondendo à soma ou a diferença entre o ângulo elétrico de entrada e a posição de seu próprio rotor.

10.3 Operação de um sistema síncrono

Um sistema síncrono contém um motor, cujo enrolamento está conectado a anéis deslizantes. No transmissor (TX), o rotor é constituído por 2 polos como mostra a fig. 10.1.

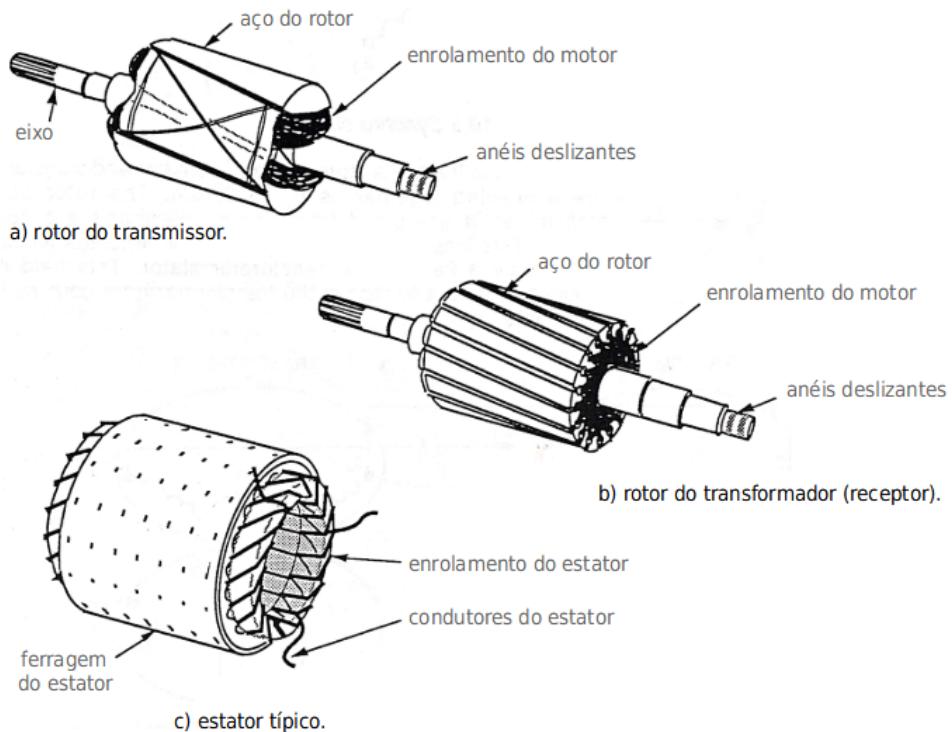


Figura 10.1: Transmissor (motor) síncrono típico.

Já o transformador (receptor), fig. 10.1(b), possui 3 polos e se parece mais com a armadura de um motor.

Montado junto ao estator, fig. 10.1(c), existem 3 bobinas cujos eixos estão defasados entre si de 120° .

É comum também se representar um sistema síncrono (ou simplesmente "synchro" em inglês) na forma de um esquema como o mostrado na próxima figura (fig. 10.2). Neste diagrama é mais fácil perceber a defasagem de 120° entre as bobinas do estator e sua conexão na configuração "Y" (ou "estrela").

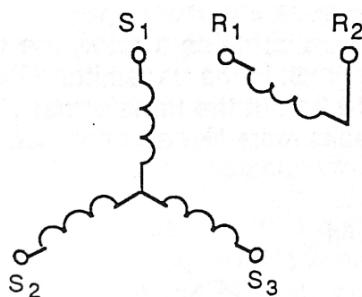


Figura 10.2: Equivalente elétrico do transmissor/motor síncrono.

Normalmente, os estatores do transmissor e do transformador (receptor) estão interconectados, como mostra a fig. 10.3.

Nos próximos experimentos, está previsto examinar as saídas do transmissor e do transformador (receptor) e se certificar de que eles estejam corretamente alinhados para tentar realizar um simples **sistema direto de controle de posição síncrono** (ou *simple direct drive synchro system*).

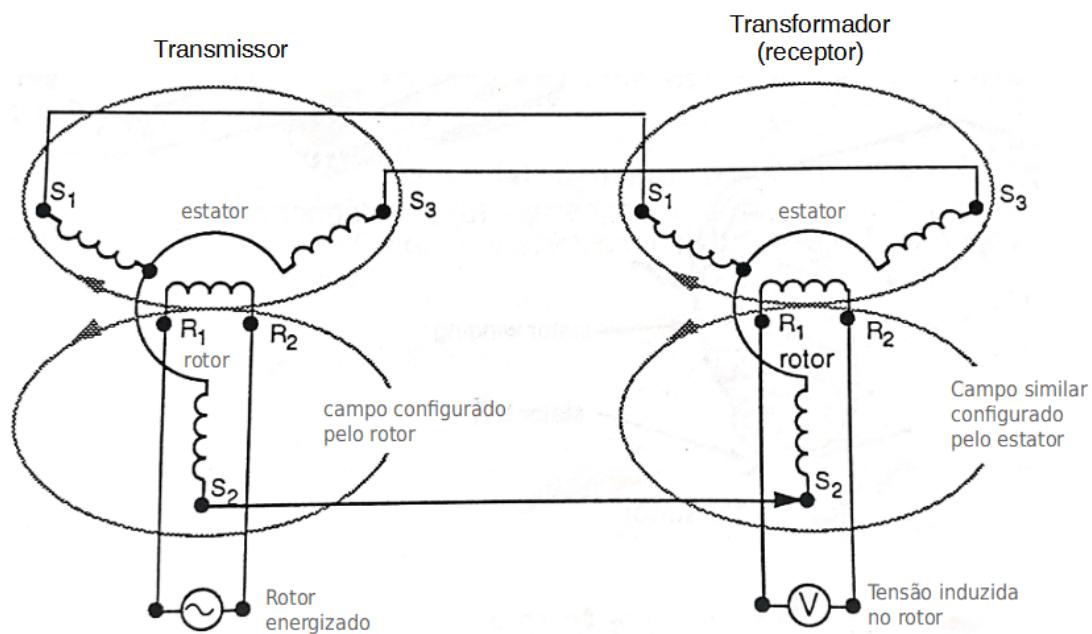


Figura 10.3: Motor/Transmissor (síncrono) energizado conectado a um transformador (receptor).

10.4 Exp. 1) Medição da saída do Transmissor

Instruções:

1. Conectar os módulos como mostrado na fig. 10.4.

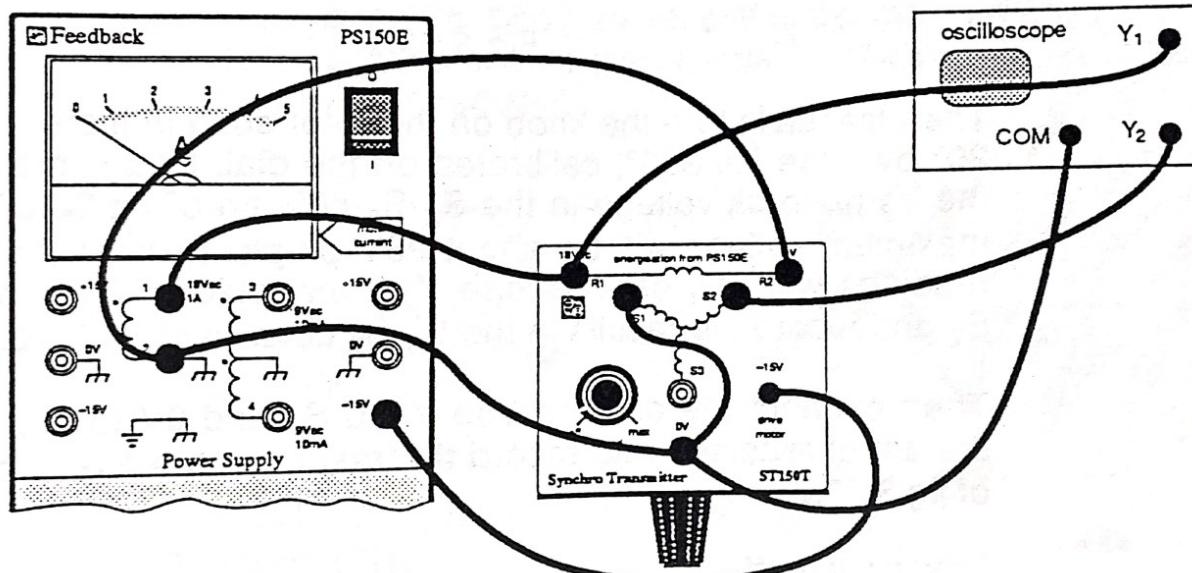


Figura 10.4: Ligações elétricas do primeiro experimento.

2. Ajustar os canais do osciloscópio para 10 Volts/div.
 3. Ajustar a base de tempo (*time base*) para algo como: 50 ms/div.
 4. Ajustar o controle de velocidade do módulo ST150T em “off”.
 5. Ajustar o módulo ST150T (transmissor) para rotacionar aproximadamente 1 volta por segundo, atuando sobre o controle de velocidade do mesmo (potenciômetro), no sentido horário.
Você deve perceber que assim que o eixo rotaciona, o canal Y2 do osciloscópio deve mostrar uma senoide oscilando

em 50 (ou 60) Hz, cuja amplitude varia conforme o grau da rotação efetuada (note o “envelope” formado em torno da onda senoidal destacado na fig. 10.5). Já no canal Y1 deve ser percebida uma onda AC estacionária correspondendo ao sinal de alimentação (este sinal atua como uma “referência”).

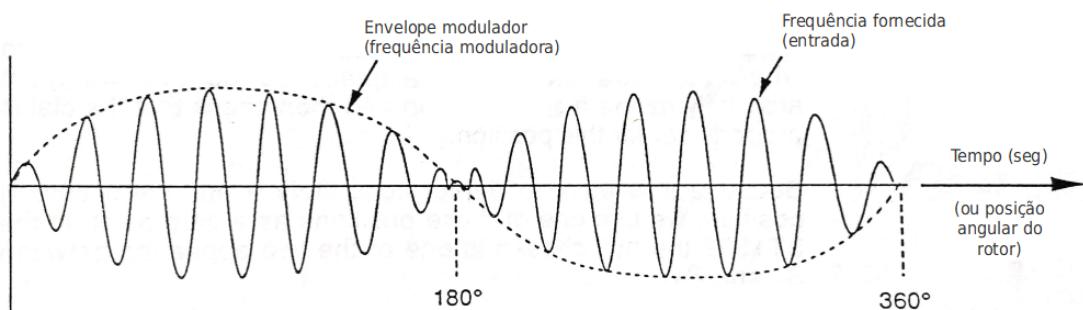


Figura 10.5: Saída esperada do transmissor sob rotação contínua.

- No osciloscópio deverá ser observado um sinal semelhante ao mostrado na fig. 10.6.

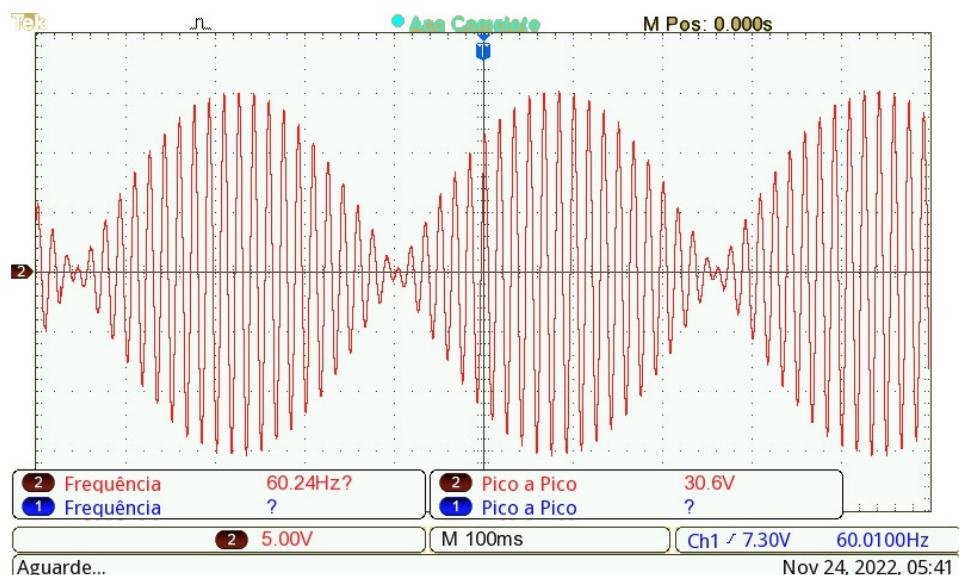


Figura 10.6: Forma de onda esperada

- Agora reduza o controle de velocidade (diminua seu valor) até o disco rotatório do módulo ST150T parar de girar e então manualmente movimente o mesmo até que o canal Y2 do osciloscópio passe por zero. Anote os valores de pico de tensão entre os pontos S1 e S2 do módulo ST150T e comece a completar a tabela 10.1 a seguir.
- Movimento o botão (*knob*) do eixo do rotor de ST150T, em passos de 20° até completar os 360° , conforme indicado no *dial* do módulo. Para cada posição anote a tensão pico-à-pico Y2 (Osciloscópio), completando a coluna $S_2 - S_1$, mostrada na tabela 10.1 (note que S_1 está conectado à 0 Volts). A máxima tensão medida não deve ultrapassar 25 Vpp.
- Repita o conjunto de medidas, como o canal Y2 do Osciloscópio conectado em S_3 e 0 Volts (GND) conectado à S_2 e assim complete a coluna $S_3 - S_2$ da tabela 10.1.
- Realize o mesmo conjunto de medidas conectando a entrada Y2 do Osciloscópio em S_1 e 0 Volts (GND) à S_3 . Registre este conjunto de medidas na coluna $S_1 - S_3$ da tabela 10.1.
- Uma vez completada a tabela, **trace um gráfico** que relate as saídas anteriores com o ângulo do eixo do rotor. Este gráfico vai conter 3 curvas defasadas entre si e deve se assemelhar ao que é mostrado na fig. 10.7.
- Note a diferença de fase (defasagem) entre os zeros das 3 curvas traçadas anteriormente. Perceba a defasagem angular entre as 3 saídas do transmissor síncrono.

Ângulo do eixo	V_{pp} $S_2 - S_1$	V_{pp} $S_3 - S_2$	V_{pp} $S_1 - S_3$
0°			
20°			
40°			
60°			
80°			
100°			
120°			
140°			
160°			
180°			
200°			
220°			
240°			
260°			
280°			
300°			
320°			
340°			
360°			
0°			
20°			

Tabela 10.1: Dados reais capturados referente ao primeiro experimento

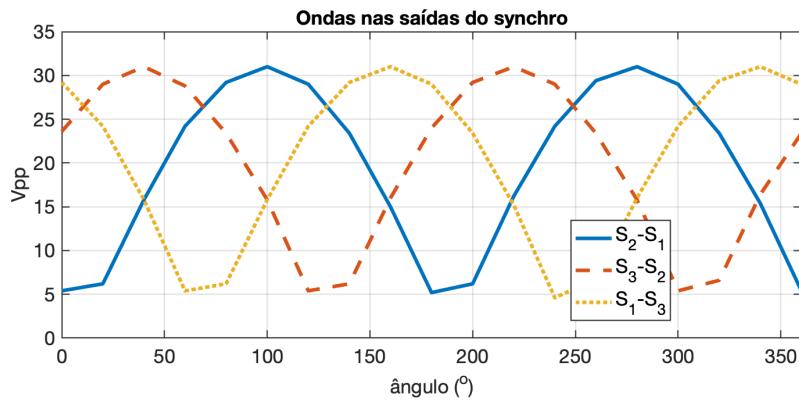


Figura 10.7: Gráfico esperado gerado à partir da tabela 10.1.

10.5 Exp. 2) Identificação do “zero” nulo

Um par de módulos transmissor/receptor dentro de um sistema síncrono necessita que ambos *dials* (discos) de cada módulo, leiam zero quando os mesmos estiverem alinhados. Para fazer isto devemos arbitrariamente definir a posição “zero” e verificar que o *dial* esteja apropriadamente ajustado para esta posição.

Como é fácil detectar com precisão uma posição nula (saída zerada), vamos adotar estas posições como o ponto zero. No módulo ST150T a posição nula escolhida é uma das 2 que surgem entre os conectores S1 e S2.

Instruções:

1. Para determinar o zero correto, use o mesmo procedimento adotado na primeira montagem, conectando S2 na entrada Y2 do Osciloscópio e S1 conectado à 0 Volts (GND).
2. O *dial* (disco/mostrador) deve agora ser ajustado para 0° ou 180°. A diferença entre estes 2 pontos nulos é explicada em seguida.

3. Gire, levemente, no sentido horário, o *dial* (disco) de ST150T e repare na forma de onda que surge em S2 (canal Y2 do Osciloscópio). Esta onda deverá estar adiantada em fase em relação com R1 (fig. 10.8(a)) ou atrasada em fase em relação à R2 (fig. 10.8(b)).

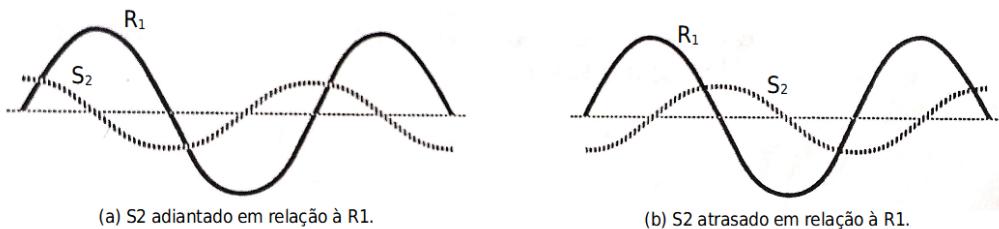


Fig 3.10.8 Detectando o “zero” nulo.

Figura 10.8: Detectando o “zero” nulo.

4. Se o *dial* estiver apropriadamente ajustado, o 0° nulo deverá resultar num sinal em fase ou 180° defasado (polaridades entre sinais de entrada e saída invertidos) entre S2 e R1. Verifique estas 2 condições experimentalmente e ajuste precisamente o 0° nulo.
5. Se persistir um desalinhamento entre o zero elétrico e a posição zero do *dial*, ajuste o corpo do módulo ST1250T para gerar a indicação correta (eventualmente afrouxe os parafusos de fixação de seu *dial*).

Um gráfico semelhante ao mostrado na fig. 10.9 deve ser obtido.

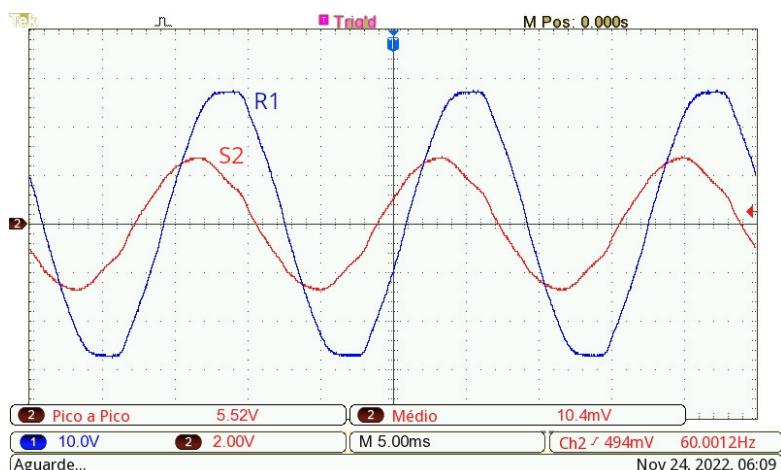


Figura 10.9: Formas de onda esperadas para 2o-experimento.

10.6 Exp. 3) Medição da saída do Transformador (receptor)

Instruções:

1. Conecte (eletricamente) os módulos PS150E, ST150T e ST150R e o osciloscópio da forma mostrada na fig. 10.10.

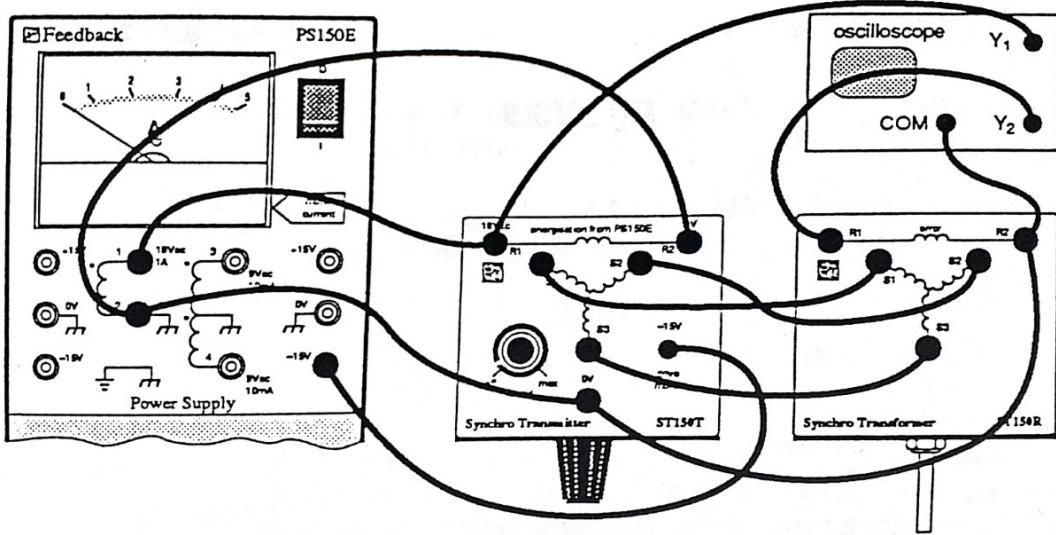


Figura 10.10: Ligações para terceiro experimento.

2. Ajuste o osciloscópio para:

- Y1 para: 10 Volts/div;
- Y2 para: 2 Volts/div;
- a base de tempo para algo como: 2 ms/div.

3. Ajuste o controle de velocidade do módulo ST150T em "off".

4. Alimente o conjunto.

5. Ajuste o transmissor de forma a que dê 1 volta por segundo e observe (no osciloscópio) as formas de onda na entrada Y1 e na saída Y2. **Esboce ou capture as formas de onda obtidas neste ponto do experimento.** Elas devem resultar algo semelhantes às mostradas na fig. 10.11.

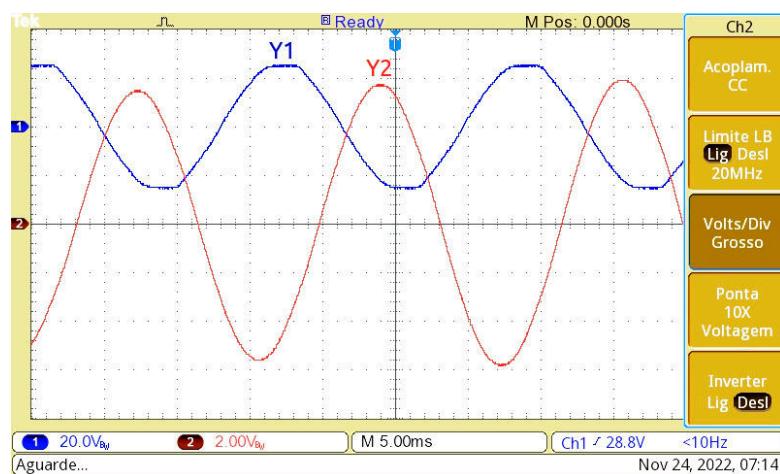


Figura 10.11: Formas de onda esperadas no início do Exp. 3.

6. **Questão 1)** Como varia a forma de onda na saída do Transformador (receptor) quando se varia a rotação do rotor do Transmissor?

7. Agora, pare o motor do transmissor e zere ambos os rotores (*dials*) dos módulos síncronos para 0° . Então, manualmente gire o botão (*knob*) do módulo transmissor (ST150T) em passos de 20° até completar a faixa de giro de 360° marcada no seu dial. A cada incremento, anote os resultados obtidos na tabela 10.2 a seguir.

Posição do eixo do Transmissor θ°	Tensão de Saída (Vpp) no Transformador $R_2 - R_1$
0°	
20°	
40°	
60°	
80°	
100°	
120°	
140°	
160°	
180°	
200°	
220°	
240°	
260°	
280°	
300°	
320°	
340°	
360°	

Tabela 10.2: Dados do terceiro experimento.

8. Zere os 2 *dials* e ajuste o canal Y2 do osciloscópio para 0,1 Volts/div. Então **gentilmente** faça mover o *dial* do ST150T (módulo Transmissor) girando manualmente o eixo do motor (do módulo Receptor ST150R).
9. **Questão 2)** Qual é a menor mudança angular que pode ser realizada sem que nenhuma alteração seja perceptível na forma de onda de Y2?
10. Note: Usando a alta sensibilidade do osciloscópio, é possível verificar uma mudança mesmo para os menores movimentos angulares, demonstrando que a resolução de um sistema síncrono é muito boa.
11. **Apresente um gráfico** relacionando a posição do eixo do transmissor versus a saída verificada (medida) no transformador (receptor). Este gráfico deve resultar semelhante ao mostrado na fig. 10.12.

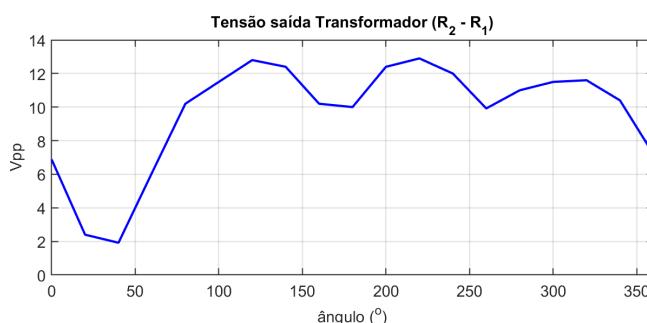


Figura 10.12: Gráfico esperado para final do Exp. 3.

10.7 Exp. 4) Identificação do “zero” no Transformador (receptor)

O “zero” elétrico do transformador é definido exatamente da mesma forma que foi realizado para o caso do transmissor. Isto significa que quando os 2 rotores são configurados para a mesma posição relativa (em relação aos enrolamentos de seus estatores) e conectados da forma mostrada na fig. 10.10, os rotores devem assumir semelhantes tensões entre os mesmos. Isto é, quando o rotor de ST150T for energizado, o rotor de ST150R (módulo Transformador/Receptor) deve acusar uma máxima tensão induzida sobre o mesmo.

Entretanto, estamos interessados em usar a saída de tensão do rotor para perceber o **erro** ou **diferença** de alinhamento entre os *dials* (discos) dos módulos ST150T (Transmissor) e ST150R (Receptor). É desejado que esta tensão seja nula enquanto os 2 *dials* coincidem na mesma posição. Para isto, o *dial* do ST150R (Receptor) **não deve** estar na posição 0° no ponto elétrico considerado nulo; ponto no qual, a saída do rotor do módulo ST150R (Receptor) é máximo. Ao invés disto, ele deve ser ajustado para estar em 0° numa posição defasada de 90° em relação a medição elétrica, quando então a saída deve ir para zero.

Para testar isto, usa-se a mesma montagem do experimento anterior (fig. 10.10).

Instruções:

1. Ajustar o *dial* do módulo receptor (ST150R) para 0° e girar (manualmente) o *dial* do módulo transmissor (ST150T) até que a saída medida em Y2 (no osciloscópio) seja máxima.
2. O *dial* deve registrar então 90° ou 270° .
3. Uma destas posições, a dos 270° , corresponde ao “zero elétrico” buscado para o módulo receptor (ST150R), conforme definido no parágrafo anterior.
4. Agora ajuste o *dial* do módulo Receptor (ST150R) para 0° quando a saída do rotor de ST150R deve ser zero.
5. Se alguma discrepância for observada, ajuste o corpo do módulo ST150R de forma a eliminar esta discrepância.

10.8 Exp. 5) Sistema de posicionamento sincronizado usando acionamento direto

Este experimento visa testar um Sistema de posicionamento sincronizado usando acionamento direto ou *direct drive synchro positioning system*.

Instruções:

1. Mantenha as conexões já realizadas no Exp. 3 e mostradas na fig. 10.10 (pág. 113), exceto que:
2. remova a ligação entre R2 e 0 Volts no módulo receptor (ST150R).
3. conecte R1 e R2 do módulo transmissor (ST150T) nos mesmos pontos R1 e R2 do módulo receptor (ST150R).
4. Agora ajuste o *dial* do módulo transmissor (ST150T) para zero (isto é, para o **zero elétrico**).
5. **Questão 3)** Em que posição o *dial* do módulo receptor (ST150R) “descansa” (atinge $0=$ zero) ?
6. Agora gire levemente (e manualmente) o *dial* do SR150R (receptor) para fora da posição de “descanso”, com um leve giro de 5° .
7. **Questão 4)** O dial do módulo receptor (ST150R) retorna para sua posição anterior?
8. Deve ter sido percebido que para pequenos deslocamentos, o torque restaurador resulta muito reduzido (insuficiente) para realinhar os 2 rotores, confirmando que este controle de posição não é tão bom.
9. Gire o *dial* do módulo transmissor (ST150T) lentamente com a mão e então o *dial* do módulo receptor (ST150R) também deve girar, em sincronismo aproximado.

Note que: um controle de posição muito simples, mas bastante ineficiente, pode ser definido energizando tanto os rotores de ST150T (transmissor) e ST150R (receptor) enquanto seus estatores estiverem conectados como nos experimentos anteriores. Os dois campos magnéticos dos módulos síncronos dos 2 rotores tentarão se manter alinhados de forma a minimizar a corrente que flui pelos seus estatores. Isto ocorre enquanto ambos rotores permaneçam em posições relativas similares entre seus estatores.

10.9 Comentários Finais

Ao final destes experimentos, deve ter sido percebido que:

- 1) A saída do transformador é um sinal de 60 (ou 50) Hz CA cuja amplitude varia de forma sinusoidal à medida que o transmissor rotaciona com uma reversão de fase (troca de amplitude) a cada vez que (a senoide) passa por zero.
- 2) Você deve ter sido capaz de detectar uma mudança na saída para movimentos angulares consideravelmente menores que 1° .
- 3) O rotor do módulo ST150R (transformador) deve alcançar o ponto zero nos 90° ou 270° , como deve ter sido percebido no Exp. 4.
- 4) O *dial* do módulo ST150R deve se mover na direção da sua posição original mas não deve alinhar exatamente.

Obs.: Cada comentário anterior está associado com uma questão feita anteriormente.

10.10 Aspectos Práticos

Embora seja possível, via montagem realizada no experimento 5, um sistema de controle de posição sincronizado direto, um certo valor de erro é necessário para gerar o torque suficiente no transmissor de forma a tentar manter o alinhamento conforme ajustado no módulo transmissor.

Conjuntos síncronos (motores de torque síncronos) especiais são construídos, completamente auto-contidos, e feitos para tornar a conexão elétrica flexível e facilitada entre 2 pontos. Eles são frequentemente adotados em situações nas quais ligações mecânicas não são possíveis ou aceitáveis, como no caso de um sistema apontador. O erro de posicionamento fica tipicamente na faixa de 1° enquanto estes motores estiverem sem carga.

Adicionalmente se poderia examinar o comportamento deste sistema síncrono na posição nula. Devido a problemas de design no sistema eletromagnético, uma tensão de saída residual permanece quando os componentes estão em fase e ajustados para o seu “zero”. Esta tensão residual é composta em parte pela **tensão residual** gerada pela fonte de alimentação e suas harmônicas (ruído) mas não se espera que exceda uns 30 milivolts.

Como o transformador gera um sinal de saída cuja magnitude está relacionada com o desalinhamento entre os eixos de entrada e de saída, em parte temos as condições necessárias para estabelecer um sistema de controle em malha fechada. Note que o sinal de controle está baseado na defasagem de um sinal AC entre os módulos transmissor e receptor. Isto significa que enquanto se puder garantir somente a presença do sinal AC dentro deste sistema (sem nenhum “offset DC”), temos condições de estabelecer um sistema de controle de posição bem preciso.

Um sistema de controle simplificado para a transmissão de uma configuração de bússola de giroscópio mostrado na fig. 10.13(a) pode usar tal abordagem. O transformador neste caso, produz um sinal de erro que um servo amplificador usa para acionar um motor de indução AC.

Na fig. 10.13(a), como o enrolamento de controle do motor está propositalmente 90° defasado em relação ao enrolamento de referência, a direção do campo de rotação consequentemente dependerá da diferença de fase entre os 2 enrolamentos. Assim que o motor se aproxima do ponto de alinhamento, ele reduz sua velocidade conforme o sinal de comando se reduza. Se ocorre um sobressinal, o motor vai girar em sentido reverso alinhado com a fase reversa do sinal de erro.

No caso de um sistema de servo controle, estamos mais interessados na possível diferença de alinhamento entre 2 rotores que pode ocorrer antes que um sinal de erro possa ser detectado. Neste sentido, um sistema síncrono pode se tornar um dispositivo bastante preciso devido às necessidades rigorosas da indústria aeroespacial por exemplo. Um padrão (*standard*) estabelecido pode estar baseado num erro máximo de ± 7 minutos de defasagem tolerável entre o ângulo elétrico medido e o ângulo de rotação de um motor síncrono para dada posição angular. No experimento 3 você deve ter percebido o quanto pequeno pode ser o movimento necessário para produzir uma mudança na saída do sistema.

Originalmente o sistema síncrono foi desenvolvido para ser usado pelas forças armadas em sistemas de radares e armas. Um sistema completo pode incluir um transmissor diferencial e também um **resolver**, cujas bobinas estão propositalmente defasadas de 90° para gerar tensões de saída que sejam proporcionais ao seno ou cosseno do ângulo entrada de um eixo. Um sistema síncrono completo permite um sistema de controle de posição altamente preciso e flexível, especialmente no caso de sistemas multi-coordenados. Exemplos de uso seriam em simuladores de voo,

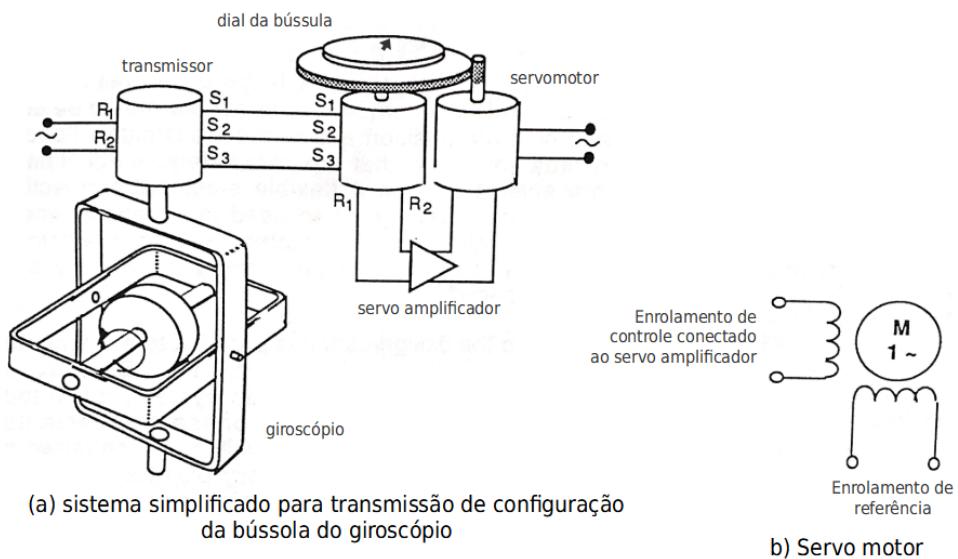


Figura 10.13: Exemplos de simples sistemas de controle de posição síncronos.

estabilizadores de aeronaves (ou foguetes), sistemas de controle de engrenagem de um laminador, sistema de controle da posição da haste de controle de reatores nucleares e sistemas leitores de zeros de bússolas giroscópicas.

O diagrama de blocos da fig. 10.14 mostra um sistema de controle de posição de ligação síncrona, com realimentação de velocidade que até pode ser construído usando o módulo MS150 e que será usado como base para os futuros laboratórios.

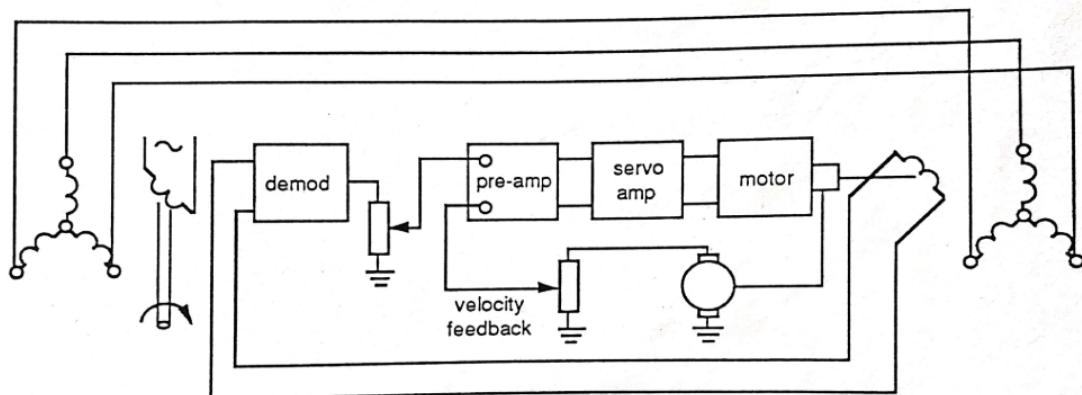


Figura 10.14: Controle de posição com “link” de sincronização.



11 | O Demodulador (MD150S)

O objetivo geral neste laboratório é perceber como um demodulador sensível à fase, produz uma saída CC em resposta à uma entrada CA sendo averiguada.

Equipamentos Usados

- PS150E: Fonte de Alimentação;
- ST150R: Transformador/motor síncrono;
- MS150S: Unidade Moduladora/Demoduladora;
- ST150T: Transmissor Síncrono;
- Osciloscópio;
- Voltímetro (pode ser usado o do módulo GT150X).

11.1 Objetivos

Quando este laboratório for completado, você será capaz de:

- Perceber que um demodulador sensível para fase pode produzir um sinal CC em resposta à um sinal CA;
- Reconhecer o termo K_e , referente ao canal de erro;
- Perceber como um demodulador pode ser usado num simples sistema síncrono.

11.2 Introdução

Para usar um sistema síncrono básico com um servo-motor CC, será necessário retificar a saída do motor/transformador primeiro.

Necessitamos também um meio para determinar a fase (ângulo) do sinal com relação a uma referência de tensão aplicada no rotor/transmissor. Note que uma amplitude desejada de saída pode surgir em mais posição e um dos métodos para diferenciar qual é o caso, é essencial. O problema é ilustrado na fig. 11.1.

O módulo demodulador MD150S é composto por um circuito retificador de onda completa eletricamente configurado de modo que, quando a entrada estiver em certa uma fase, a saída tenha uma certa polaridade. Se existe uma reversão de fase, a polaridade de saída também se modifica (alterna).

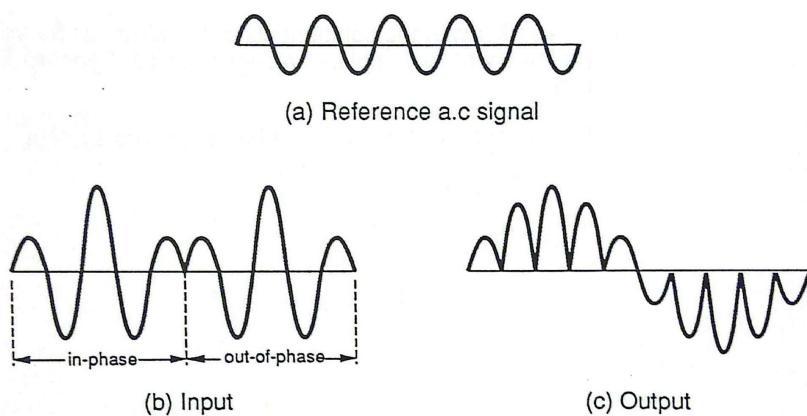


Figura 11.1: Ação de um demodulador sensível à fase.

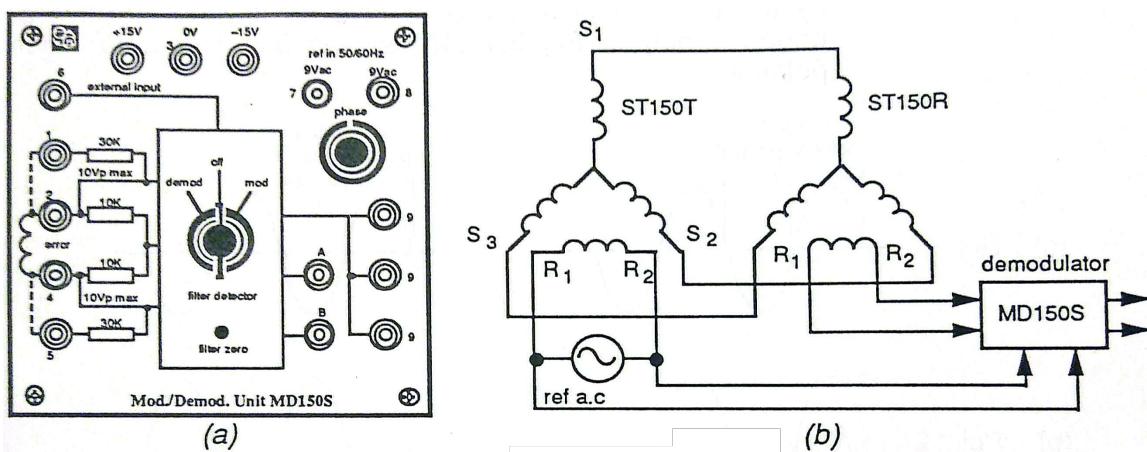


Figura 11.2: Link de ligação síncrona mostrando módulos transmissor (ST150T), receptor (ST150R) e demodulador (MD150S).

A fig. 11.2(a) mostra o *layout* do painel do módulo MD150S e a fig. 11.2(b) mostra a conexão à um sistema (de conexão) síncrono, usando os módulos ST150T (transmissor) e ST150R (receptor). Repare que o mesmo sinal (referência) CA que alimenta o rotor do módulo ST150T (transmissor), também segue para o demodulador.

Um circuito simplificado do demodulador é mostrado na fig. 11.3.

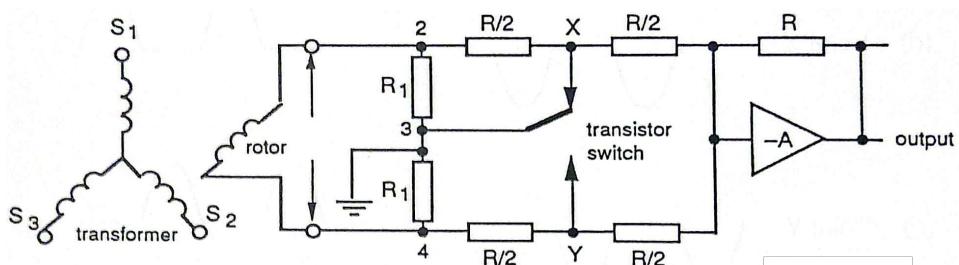


Figura 11.3: Circuito simplificado do demodulador.

O rotor do transformador é conectado ao demodulador através de duas resistências de mesmo valor, R_1 . O valor de R_1 é pequeno em comparação com os resistores R . Como o ponto comum de conexão (referência) dos 2 resistores R_1 é o terra. haverá potenciais iguais porém em contra-fase nos pontos 2 e 4 do circuito.

A fig. 11.4(b) e (c) mostra a aparência de 2 sinais de entrada diferentes: a) em fase e b) defasados.

Os pontos X e Y são conectador à uma chave, na realidade um circuito transistorizado. Esta “chave” opera na mesma frequência do sinal usado como referência. Ela é projetada para comutar do nó X para o nó Y no exato instante em que o sinal de entrada passa por zero. E esta “chave” voltará a comutar no final de cada meio-ciclo do sinal de entrada. Os nós X e Y serão então alternadamente curto-circuitados ao terra como mostra a fig. 11.4(a). Este processo resultará nas formas de onda mostradas para os pontos 2 e 4 surgindo nos pontos X e Y (respectivamente), como mostra a fig. 11.4(d) e (e).

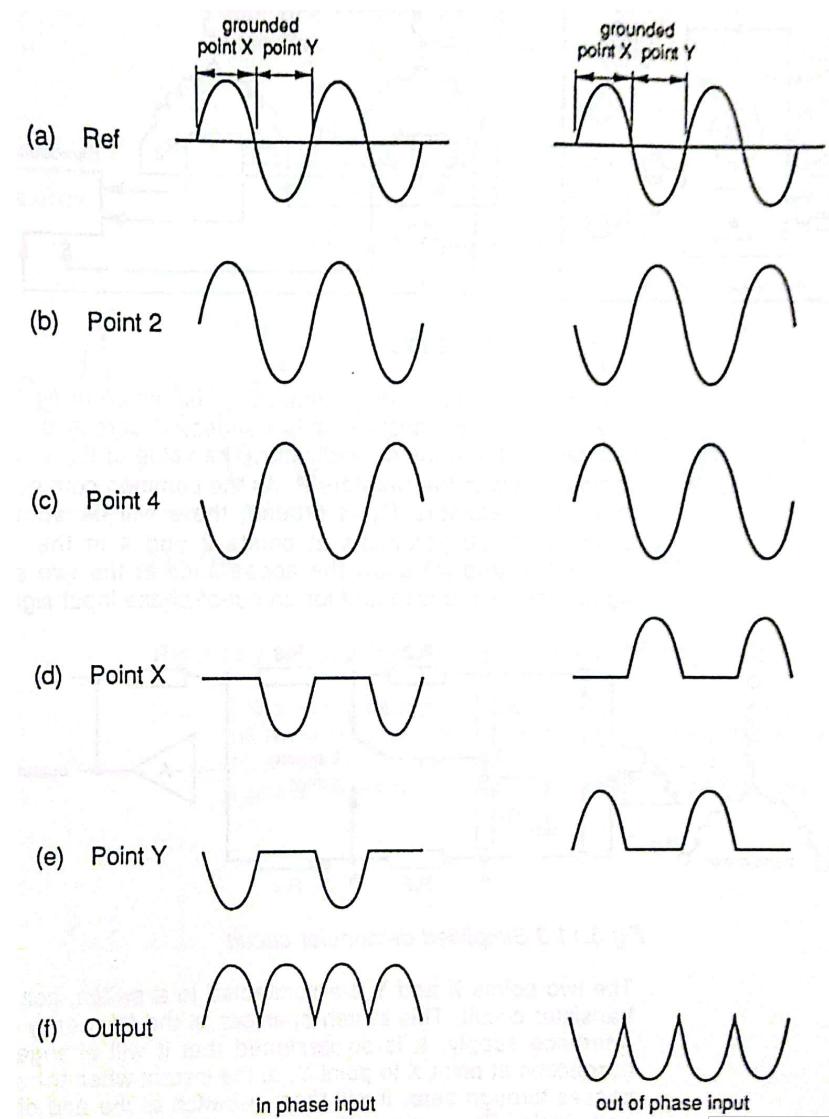


Figura 11.4: Comportamento de um demodulador sensível à fase.

Os meio-ciclos que ocorrem nos pontos X e Y representam a fase do sinal do rotor e podem ser somados e invertidos pelo módulo do amplificador operacional de forma a resultar numa forma de onda de saída com apenas ciclos positivos ou apenas ciclos negativos da onda de entrada. A fig. 11.4(f) mostra a saída para cada polaridade de entrada.

No próximo experimento prático, nós vamos **verificar com auxílio do osciloscópio** como a polaridade de saída é afetada conforme a posição relativa do eixo do motor síncrono se altera. Na prática, as formas de onda observadas não são exatamente sinusoidais como mostrado na fig. 11.4 mas isto não altera o princípio do seu funcionamento.

11.3 Exp 1) Operação do Demodulador

A fig. 11.5 mostra o esquema e a fig. 11.6, as conexões elétricas que devem ser realizadas entre os módulos neste experimento.

Instruções:

1. Conecte os módulos conforme mostra a fig. 11.6.
2. Ajuste os *dials* dos módulos ST150R (receptor) e ST150T (transmissor) para 0° .
3. Ajuste o seletor de **filtro** do módulo MD150S (Demodulador) para a posição “off”.
4. Coloque o controle de **velocidade** do módulo ST150T (transmissor) na posição “off”.
5. Ajuste o canal Y1 do osciloscópio para algo como 1 Volt/div e do canal Y2 para algo como 2 Volts/div.

6. Ajuste a base de tempo do osciloscópio para algo como 5 mili-segundos/div.

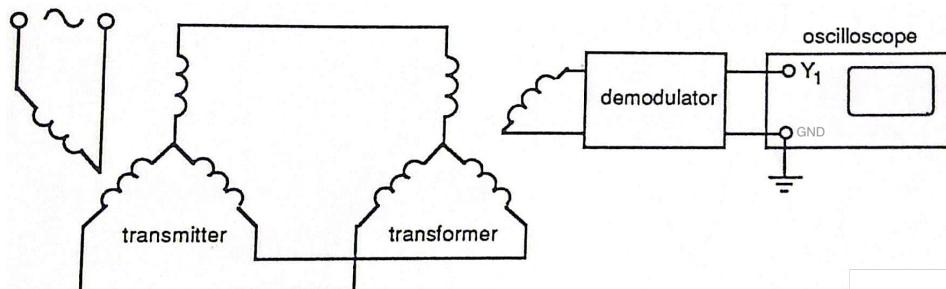


Figura 11.5: Esquema simplificado do circuito para testar o demodulador.

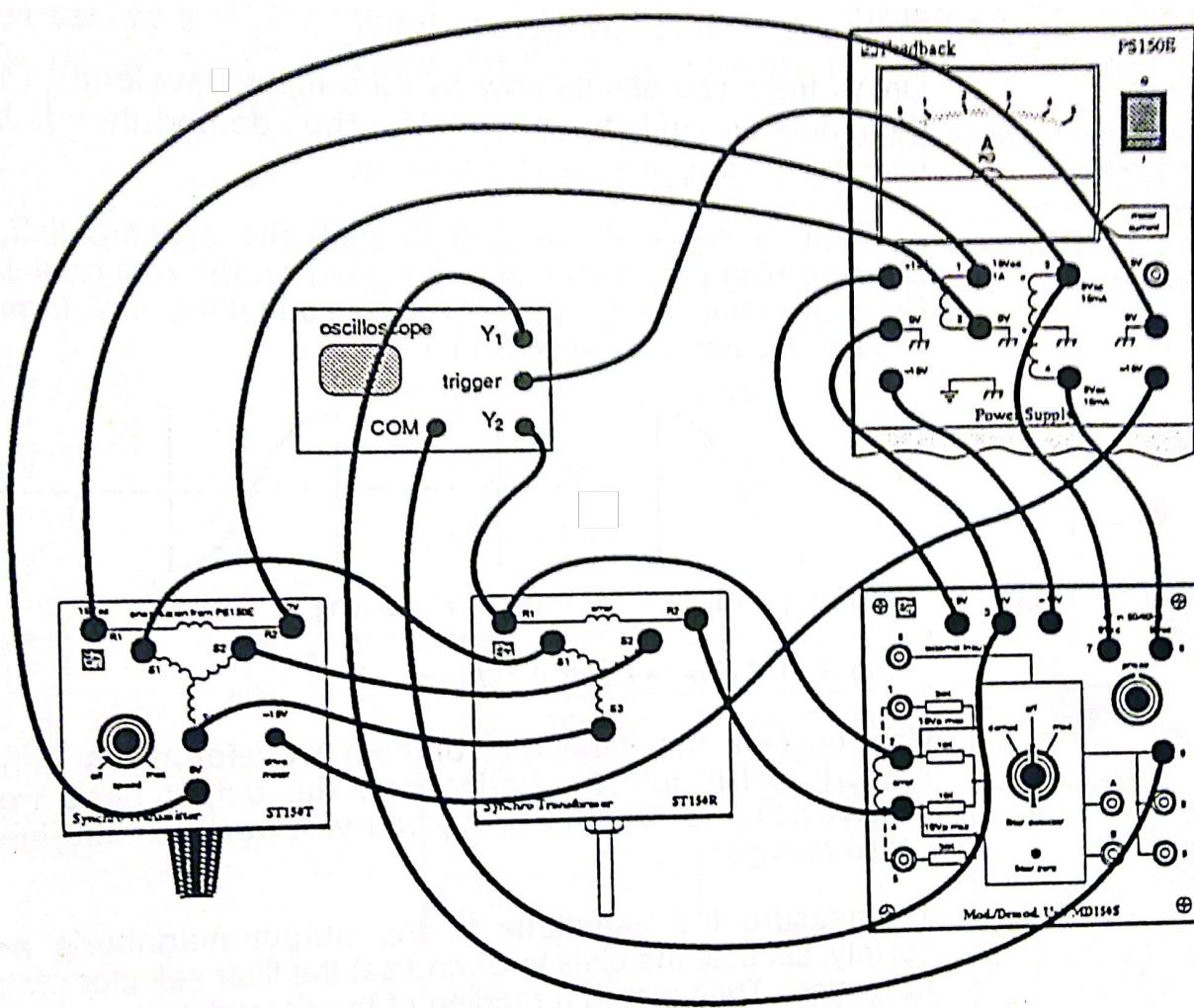
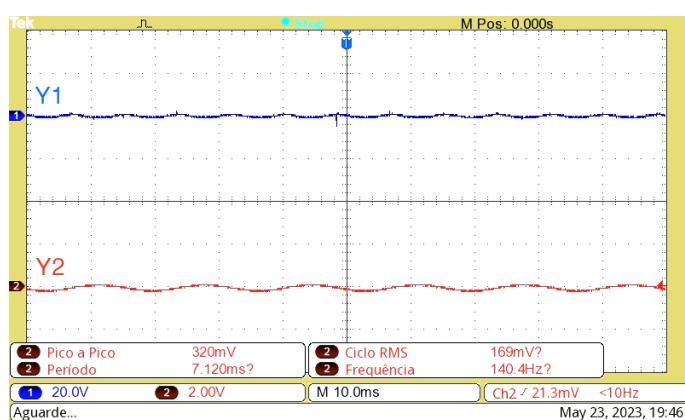
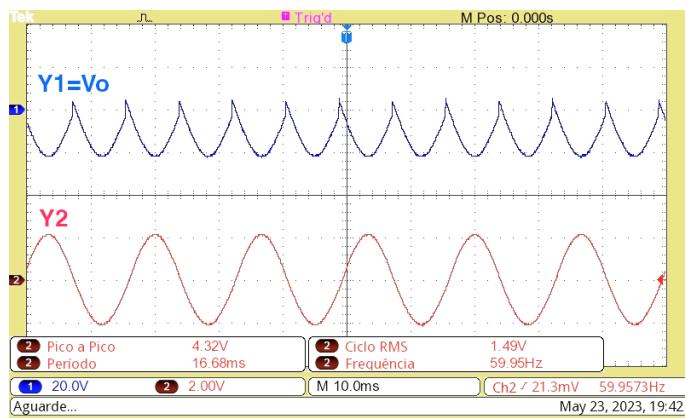


Figura 11.6: Ligações elétricas dos módulos para testar o demodulador.

- Ative a fonte de alimentação (módulo PS150E) e o osciloscópio. Neste ponto as seguintes formas de onda devem ser observadas no osciloscópio – ver fig. 11.7.
 - Ajuste o *dial* do módulo ST150T (transmissor) de tal forma que uma defasagem de 90° ocorra entre o mesmo e o rotor do motor síncrono. Agora deverá ser notada uma diferença angular entre o transmissor e o receptor, de aproximadamente 90° ; neste caso, as tensões observadas nos 2 canais do osciloscópio praticamente se anulam – ver fig 11.8.
- Obs.:** Eventualmente a forma de onda Y1 pode se apresentar “invertida” (polaridade contrária), neste caso, se o estudante desejar, pode ser efetuada a troca entre si, dos terminais ligados à entradas 2 e 4 do Demodulador (módulo MD150S).



9. No canal Y2 do osciloscópio deverá ser observada a forma de onda de entrada no demodulador e no canal Y1 deverá aparecer a saída demodulada mas não suavizada. **Capturar ou esboçar estas formas de onda.**
10. Como pode existir um deslocamento de fase através da ligação síncrona, um circuito de controle de compensação da defasagem está previsto no módulo demodulador (“compensating phase control”). Gire o seletor de controle de fase (“phase”) do demodulador de tal forma que a forma de onda resultante esteja corretamente “balanceada” conforme mostra a fig. 11.9.

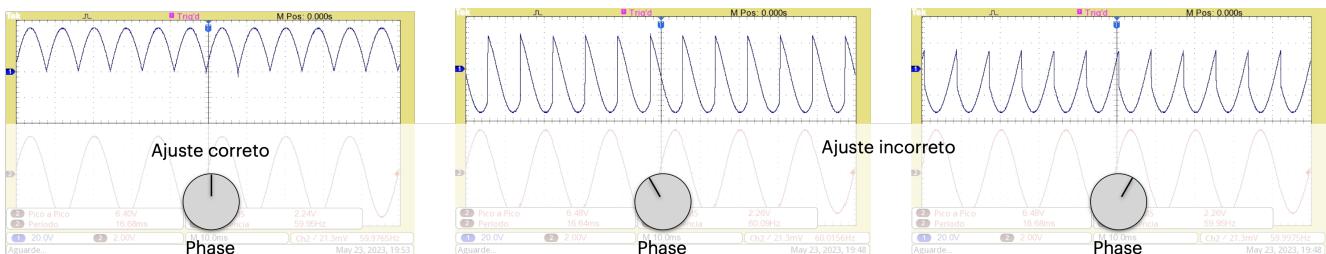


Figura 11.9: Ajuste do controle de fase ($\Delta\theta \approx 0^\circ$).

11. Agora perceba como variam ambas as formas de onda Y1 e Y2 conforme o *dial* do motor síncrono (transmissor) é rotacionado. Perceba particularmente como a saída se torna “apenas (semi-ciclos) positivos” ou “apenas (semi-ciclos) negativos” conforme a fase de entrada (defasagem) varia.
12. **Atenção agora:** para medir as variações de magnitude e polaridade da saída, ajuste os 2 *dials* para 0° e comute a chave seletora do filtro para “*demod*”. Deve ser percebido que o sinal no canal Y1 do osciloscópio passa a assuir níveis DC (está sendo retificado). Registre na tabela 11.1 à seguir, a saída do módulo demodulador para cada 15° de incremento na posição do *dial* do módulo transmissor. Complete as leituras até completar os 360° de varredura.
13. Plote um gráfico relacionando a diferença angular do rotor \times saída do demodulador com os dados levantados na tabela 11.1. Deve ser gerado um gráfico semelhante à fig. 11.10.

Diferença Angular do rotor (graus)	Saída do Demodulador Volts de pico (V_o)	"+'': apenas positivo ou "-'': apenas negativo
0°		
15°		
30°		
45°		
60°		
75°		
90°		
105°		
120°		
135°		
150°		
165°		
180°		
195°		
210°		
225°		
240°		
255°		
270°		
285°		
300°		
315°		
330°		
345°		
360°		

Tabela 11.1: Valores capturas na saída do demodulador.

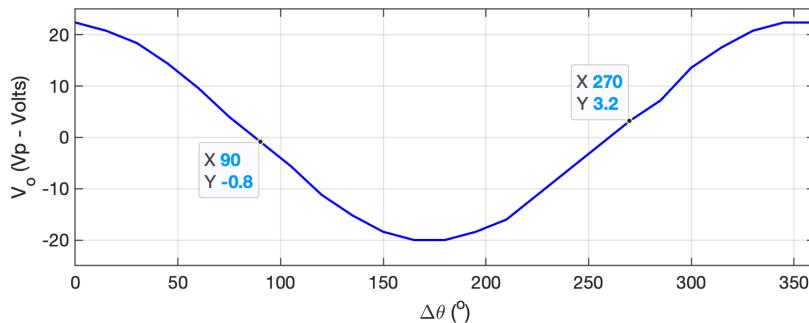


Figura 11.10: Gráfico esperado com dados levantados na tabela 11.1.

Segunda parte do experimento...

Questão 1) O que acontece se a **saída do demodulador** for usada de forma **não-filtrada** para operar a malha-direta de controle?

Deverá ser percebido que, a saída não filtrada (do demodulador), para o driver de potência do motor CC deve causar uma oscilações ("jitter") de alta frequência no driver/motor o que pode implicar em sobre-correntes (sobrecarga) no driver de potência do motor, junto com uma possível instabilidade no laço de controle. Por este motivo, um filtro passa-baixas é incorporado na saída do módulo MD150S de forma a remover estes componentes frequentais, resultando apenas um sinal de saída CC.

Para perceber o efeito do filtro na saída do demodulador, faça:

14. Ajuste os *dials* dos síncronos (transmissor e receptor) para 0°.
15. No módulo demodulador MD150S coloque a chave seletora do filtro na posição "*off*".

16. Meça e registre o *ripple* (sua tensão) pico-a-pico com auxílio do osciloscópio aproveitando a sensibilidade máxima (ganho) do mesmo. Complete a tabela 11.2 à seguir, girando o eixo do (motor) síncrono em incrementos de 15° até completar a varredura completa dos 360° .

Diferença Angular do rotor (graus)	Saída do Demodulador Volts de pico (V_o)	"+": apenas positivo ou "-": apenas negativo
0°		
15°		
30°		
45°		
60°		
75°		
90°		
105°		
120°		
135°		
150°		
165°		
180°		
195°		
210°		
225°		
240°		
255°		
270°		
285°		
300°		
315°		
330°		
345°		
360°		

Tabela 11.2: Valores capturas na saída do demodulador.

17. Plote um gráfico da diferença angular do rotor \times a saída do demodulador com os dados obtidos na tabela 11.2. Uma figura semelhante à fig. 11.11 deve ser obtida.

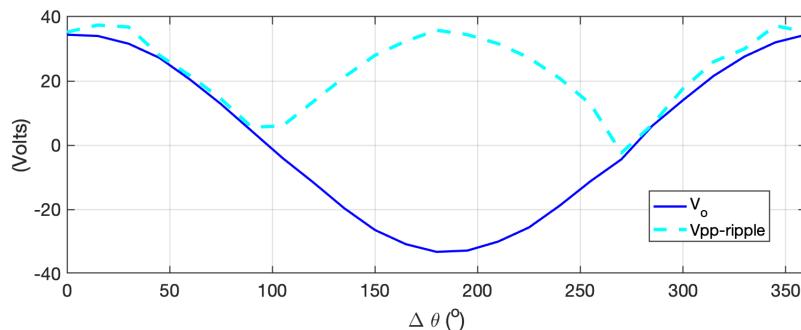


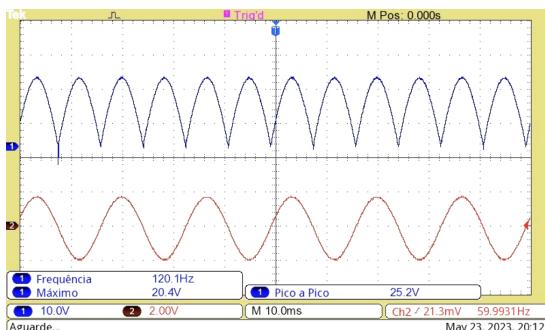
Figura 11.11: Gráfico dos resultados esperados capturados na tab. 11.2.

18. No Lab. 4, "Estudo do Canal de Erro" (pág. 45) o fator sensibilidade do canal de erro, K_e foi determinada usando o amplificador operacional. Um cálculo semelhante pode ser realizado para a ligação síncrona. Usando o filtro "*demod*", a saída máxima que corresponde agora a uma diferença angular de 90° ou $\pi/2$ radianos, será considerado o valor de pico V_{max} da saída demodulada filtrada. Esta saída varia sinusoidalmente com a diferença angular, assim a inclinação do ganho, representando o fator K_e , não será constante. Entretanto, em condições normais de uso, o erro não se afastará muito de zero, assim podemos determinar o fator K_e à partir da inclinação do valor de pico sinusoidal V_{max} no ponto de cruzamento. Isto resultará na relação V_{max} por radiano., ou:

$$K_e = V_{max} \text{ (Volts/radiano)}$$

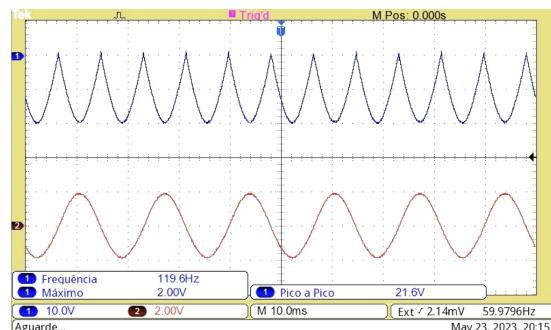
19. Registre o Valor pico-à-pico do *ripple* observado: _____.

20. Qual foi o valor obtido para K_e ? _____.



$$\Delta\theta \cong 60^\circ; V_o = 20,4 \text{ Volts}; V_{pp-ripple} = 21,6 \text{ Volts}$$

(a) semi-ciclos positivos



$$\Delta\theta \cong 135^\circ; V_o = -19,6 \text{ Volts}; V_{pp-ripple} = 21,2 \text{ Volts}$$

(b) semi-ciclos negativos

Figura 11.12: Ondas obtidas com saída não-filtrada do Demodulador.

11.4 Comentários finais

Em resposta às questões formuladas neste laboratório:

- 1) Adicionalmente a um retificador, uma forma de detectar a fase do sinal é necessária.
- 2) A saída não-filtrada do demodulador irá causar oscilações (*jitter*) de altas frequências no motor e provavelmente sobrecarga no driver de potência do motor.



12 | Servo-sistema com link síncrono

A operação e comportamento transitório de um sistema de controle (*servo system*) usando link síncrono será investigado.

Equipamentos Usados

- AU150B: Unidade Atenuadora;
- PA150C: Unidade de pré-amplificação;
- SA150D: Servo-Amplificador;
- PS150E: Fonte de Alimentação;
- DCM150F: Motor CC;
- OP150K: Potenciômetro sensor;
- LU150L: Unidade de Carga (freio eletromagnético), acompanhado de seu disco de inércia;
- ST150R: Receptor Síncrono;
- MD150S: Unidade Moduladora/Demoduladora;
- ST150T: Transmissor Síncrono;
- GT150X: Unidade de Redução com Taco-gerador;
- Osciloscópio;
- Gerador de Sinais, de 0,1 à 1 Hz, onda quadrada.

12.1 Objetivos

Quando este laboratório for concluído o estudante será capaz de:

- Haver construído um simples sistema de controle de posição (*servo-system*) baseado em link síncrono;
- Haver observado a operação de um servo-sistema com link síncrono;
- Saber como incorporar um malha de realimentação de velocidade ao sistema;
- Haver observado o efeito da variação do ganho (de posição) e da malha de realimentação de velocidade (e seu ganho) na resposta transitória do sistema.

12.2 Introdução

Uma vez que o comportamento dos transmissores e receptores síncronos e do demodulador tenham sido entendidos, podemos agora incorporá-los num sistema de controle de motor CC, substituindo o potenciômetro rotativo que antes era usado como sensor de posição (angular).

A fig. 12.1 mostra na forma de um diagrama de blocos, um sistema síncrono de controle de posição. Neste laboratório vamos examinar o diferente desempenho que pode ser alcançado, variando-se o ganho do controlador e usando-se ainda um laço extra de velocidade, de forma conjunta, observando especialmente a resposta transitória do sistema.

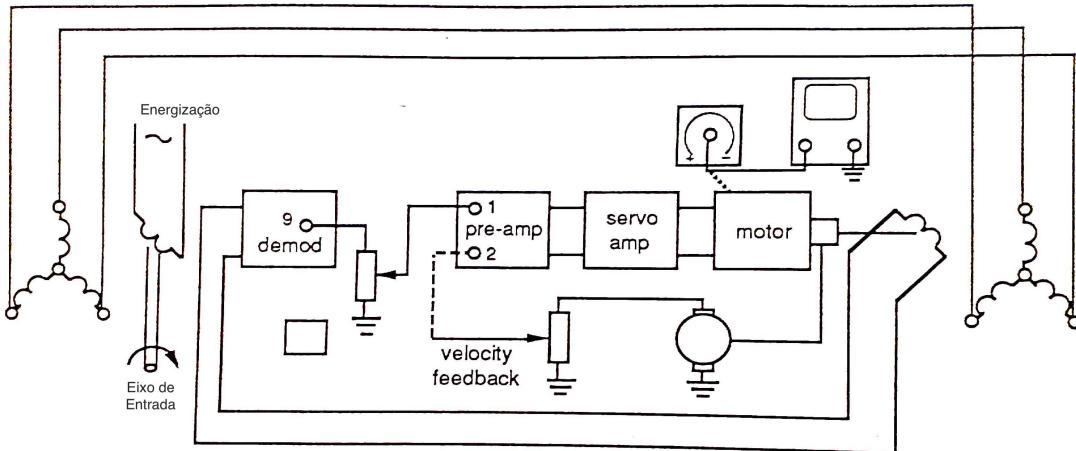


Figura 12.1: Sistema síncrono de controle de posição.

12.3 Exp. 1) Seguimento Contínuo e Zona-Morta

Arranje os módulos AU150B, PA150C, SA150D, PS150E, DCM150F, GT150X, ST150R, MD150S e ST150 sobre a base magnética e conecte os mesmos da forma mostrada na fig. 12.2.

Instruções:

1. Retire o disco de freio ("Eddy-current" disk) do motor (se estiver acoplado).
2. Ajuste o osciloscópio para algo como: Canal 1: 1 Volt/div; base de tempo = 5 ms/div.
3. Fixe o eixo do módulo ST150R (receptor) à saída reduzida (eixo com saída reduzida) do módulo GT150X.]
4. Comute a chave do módulo PA150C para "*a.c. compensation*" (compensação CA).
5. Remova as 2 entradas do módulo PA150C e ajuste seu "*zero set*" até que o motor permaneça estacionário. Depois reconecte as entradas.
6. No módulo AU150B ajuste o **ganho da malha de posição para 5** (potenciômetro superior) e o **ganho da malha de velocidade para 2** (potenciômetro inferior, associado com o tacho-gerador).
7. Conecte e gire manualmente o *dial* do módulo ST150T (transmissor).
8. Se o módulo ST150R (receptor) acabar posicionado 180° desalinhado em relação ao módulo ST150T (transmissor), inverta entre si, as entradas (de erro) no módulo MD150S.

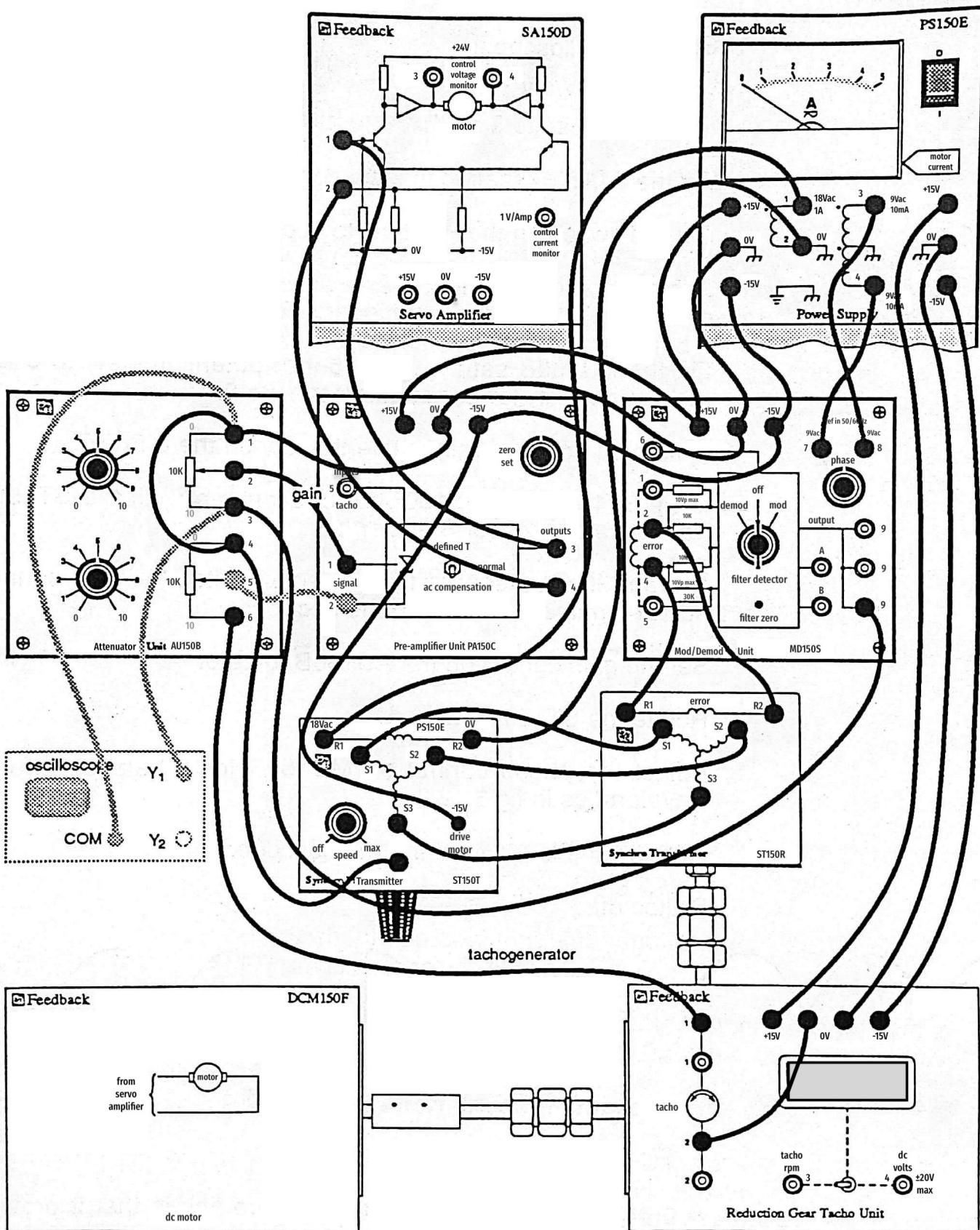


Figura 12.2: Esquema de conexões para o servo-sistema de controle de posição síncrono.

9. Ajuste a chave do **filtro** do módulo MD150S para “off” e conecte seu terminal de saída 9 ao terra (0 Volts). Este último nó será usado como referência de tensão (*ground*) para o canal Y1 do osciloscópio.
10. Ajuste o **ganho da malha de posição para 0** (potenciômetro superior no módulo AU150B).
11. Gire o *dial* do módulo ST150T (transmissor).
12. Ajuste o controle de fase (botão “*phase*”) do módulo ST150S para obter uma saída balanceada (correta) como a mostrada na fig. 12.3.

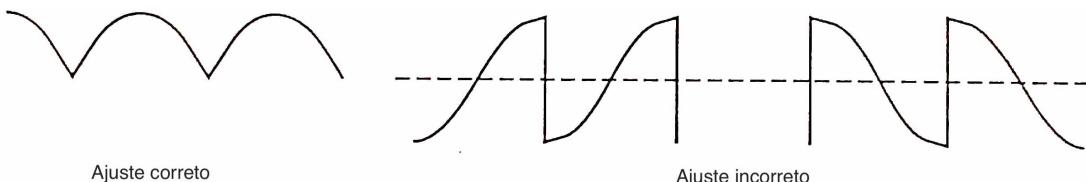


Figura 12.3: Ajuste do controle de fase do módulo MD150S.

13. Remova as ponteiras do osciloscópio.
14. Desligue a fonte de energia (módulo PS150E).

Deve ter sido percebida a grande vantagem do servo-sistema síncrono, que é proporcionar seguimento de posição mesmo com rotação contínua.

Continuando o experimento...

15. De forma a compreender a resposta do receptor (transformador) síncrono em função da rotação contínua do transmissor síncrono, ajuste o **ganho da malha de posição para 1** (potenciômetro superior de AU150B), o **ganho da malha de velocidade para 0** (potenciômetro inferior de AU150B) e por fim ajuste o potenciômetro de “*speed*” do módulo ST150T (transmissor) para que o motor gire 0,5 rotações/segundo.
16. **Questão 1)** O que você foi capaz de perceber à respeito da ação de seguimento de trajetória do módulo ST150R (receptor)?
Anotação: _____

17. Varie o ganho da malha de posição (potenciômetro superior do módulo AU150B).
18. **Questão 2)** Que efeito gerou a variação deste ganho?
Anotação: _____

19. Retorne o **ganho da malha de posição para 1** (potenciômetro superior de AU150B) e coloque o botão *speed* do módulo ST150T na posição “off”.
20. Determine o tamanho da zona-morta, girando manualmente e gentilmente o disco acoplado ao eixo de saída rápida no motor (sem redução) até que a ação do servo resista ao deslocamento que você aplicou e apenas evite qualquer deslocamento adicional quando o disco não for mais segurado com a mão. A zona-morta constitui-se na diferença angular percebida no módulo ST150R entre os 2 pontos de resistência. Anote as discrepâncias encontradas na tabela 12.1, para diferentes valores de ganho para a malha de posição.
21. Você deve ter percebido uma certa “aspereza” (*roughness*) do motor devido à saída não-filtrada do modulador.

Controle do Motor (Speed de ST150T)	Ajuste do filtro (MD150S)	Ganho do Controlador (malha de posição)	Ganho do Taco-gerador (malha de velocidade)	Zona-morta (graus)
	Off		0 (nulo)	
	Off		0 (nulo)	
	Off		0 (nulo)	
	Off		0 (nulo)	
	Off		0 (nulo)	

Tabela 12.1: Zona-morta percebida na prática (usando saída não filtrada no MD150S).

22. Comute agora o **filtro** do módulo MD150S para “*demod*”; ajuste o **ganho da malha de posição para 10** e ajuste o botão **speed** do módulo ST150T (transmissor) para que o motor gire aproximadamente 0,5 rotações/segundo.

23. **Questão 3**) A redução no ganho (do controlador) melhora o sistema de controle?

Anotação: _____

Deverá ser percebido que com o ganho (do controlador) próximo do máximo, o sistema estará próximo da instabilidade e a ação de seguimento de posição será irregular. Se por outro lado, o ganho for muito reduzido, o sinal de erro necessita ser muito grande para acionar o sistema, de modo que, em vez de seguir o receptor (transformador), ele seja acionado na direção reversa e desta forma o sistema se torne completamente instável.

24. Observe (anote) a zona-morta para diferentes valores de ganho (malha de posição) como realizado anteriormente – complete a tabela 12.2, variando o valor do ganho da malha de posição.

Controle do Motor (Speed de ST150T)	Ajuste do filtro (MD150S)	Ganho do Controlador (malha de posição)	Ganho do Taco-gerador (malha de velocidade)	Zona-morta (graus)
	demod		0 (nulo)	
	demod		0 (nulo)	
	demod		0 (nulo)	
	demod		0 (nulo)	
	demod		0 (nulo)	

Tabela 12.2: Zona-morta percebida na prática (usando saída filtrada no MD150S).

Note (respostas para algumas questões):

- 1) O módulo ST150R (receptor) deve acompanhar o módulo ST150T (transmissor) na mesma velocidade e pode haver uma ação irregular evidente como um ruído devido ao efeito de um sinal não filtrado.
- 2) O aumento no ganho da malha de posição pode eventualmente causar instabilidade.
- 3) A operação do motor deve se tornar mais suave como resultado do sinal filtrado no demodulador, mas o deslocamento de fase causado pelo filtro pode incorrer em instabilidade a partir de certo valor mais elevado para o ganho da malha de posição (potenciômetro antes da posição 10).

12.4 Exp. 2) Efeito da malha de velocidade

A ideia agora é perceber o efeito estabilizador da malha (extra) de velocidade.

Instruções:

1. Ajuste o **ganho da malha de posição em 5** (potenciômetro superior do módulo AU150B na fig. 12.2, pág. 129); ajuste o **ganho da malha de velocidade em 2** (potenciômetro inferior no módulo AU150B, associada com o tacogerador); e então ajuste o botão “*speed*” do módulo ST150T (transmissor) para fazer o motor girar a aproximadamente 0,5 rotações/segundo.
2. Agora varie apenas o ganho da malha de velocidade (potenciômetro inferior no módulo AU150B) e observe os efeitos.
3. **Questão 4)** Como o sistema se comporta agora variando o ganho da realimentação de velocidade?

Anotação: _____

4. Determine a zona-morta novamente, completando a tabela 12.3, mas desta vez, variando apenas o ganho da malha de velocidade.

Controle do Motor (<i>Speed</i> de ST150T)	Ajuste do filtro (MD150S)	Ganho do Controlador (malha de posição)	Ganho do Taco-gerador (malha de velocidade)	Zona-morta (graus)
<i>demod</i>		5		

Tabela 12.3: Zona-morta percebida na prática (variando ganho da malha de velocidade).

5. Note como o sinal do erro (no osciloscópio) varia quando se varia tanto o “*speed*” do módulo ST150T (transmissor) quanto o ganho da malha de velocidade (sugere-se captura de telas). O aumento de um destes fatores, aumenta a amplitude do sinal de erro. Este sinal é causado pelo desalinhamento entre os módulos ST150T (transmissor) e ST150R (receptor) à medida que os mesmos rotacionam.
6. Note que os módulos ST150T e ST150R tendem para a mesma velocidade, mas não exatamente seguindo o mesmo passo. Este “desvio” é chamado de **erro de velocidade** ou **erro de seguimento**. E reflete uma das efeitos negativos ao se optar por uma malha (extra) de velocidade num servo-sistema de controle de posição.

Note (resposta para algumas questões):

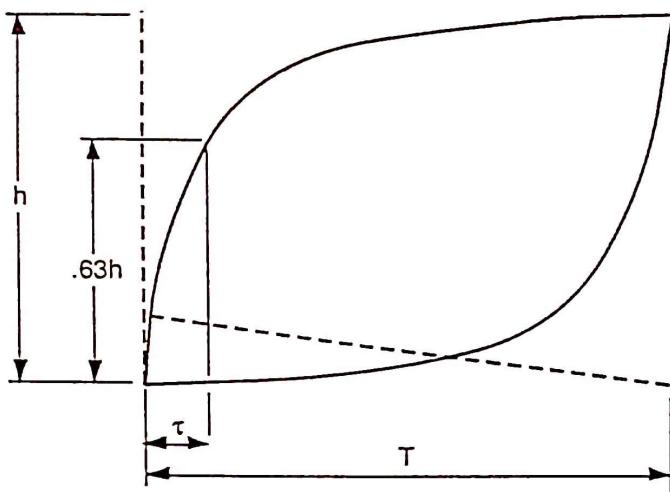
- 4) Com uma malha (de realimentação) de velocidade, fica impossível se estabelecer um ganho elevado de posição sem que seja presenciada instabilidade. Entretanto o erro de seguimento não deve ficar menor e pode até mesmo aumentar.

12.5 Exp. 3) Resposta Transitória

Neste experimento vamos examinar a resposta transitória do sistema de controle para diferentes níveis de realimentação de velocidade e também para diferentes condições de carregamento mecânico.

Para tanto, será necessário o uso de um gerador de sinais para injetar uma onda quadrada (perturbação) no laço, aproveitando-se a entrada externa (*external input*) disponível no módulo MD150S, enquanto um potenciômetro de saída (módulo OP150K) é usado para gerar uma tensão indicativa da movimentação do eixo de XXXX(!?). Ao mesmo tempo, a saída auxiliar triangular do gerador de funções excitará a entrada X do osciloscópio de forma a produzir uma forma de onda similar à mostrada na fig. 12.4.

Instruções:



T é encontrando, fazendo-se:

$$\begin{aligned} \text{Frequência do eixo Horizontal} &= f \text{ (Hz)} \\ \text{Período Horizontal} &= \frac{1}{f} \text{ (segundos)} \\ T &= \frac{1}{2P} \text{ (segundos)} \end{aligned}$$

Para encontrar τ :

Se o comprimento τ é medido como x (cm),
e o comprimento T é medido como y (cm),
então:

$$\tau = \frac{x}{y} \cdot T = \frac{x}{y} \cdot \frac{1}{2f} \text{ (segundos)}$$

Figura 12.4: Resposta transitória exponencial.

1. Não altere as ligações já realizadas e mostradas na fig. 12.2 (pág. 129).
2. Encaixe o potenciômetro de saída OP150K e o freio magnético LU150L na base magnética.
3. Acople o disco do freio magnético ao eixo do motor como mostrado na fig. 12.5. Assegure-se que o módulo do freio LU150L pode ser ajustado ao disco sem que ocorra contato físico entre os mesmos.
4. Alinhe o freio magnético LU150L na posição 10 (máxima carga) de maneira que o disco do freio rotacione livremente sem contato entre as peças.
5. Ajuste o **ganho da malha de posição em 10** (potenciômetro superior de AU150B) e o **ganho da malha de velocidade também em 10**.
6. Acople o eixo do potenciômetro sensor OP150K na saída de rotação reduzida do módulo GT150X (redutor e de tacho-gerador).
7. Conecte os módulos PS150E, OP150K, o osciloscópio e o gerador de sinais conforme mostra a fig. 12.6.
8. **Ainda não** ligue a alimentação do sistema.
9. Ajuste o gerador de sinais para: onda quadrada de saída, frequência de 0,4 Hz e amplitude de 2 Vpp.
10. Ajuste o botão seletor do filtro do MD150S na posição "**demod**".
11. Ajuste o freio magnético LU150L para a posição 0 (sem freio).
12. Ajuste o botão "**speed**" de ST150T (transmissor) para "**off**".
13. Verifique se:
 - O osciloscópio está ajustado para operar em modo X – Y;

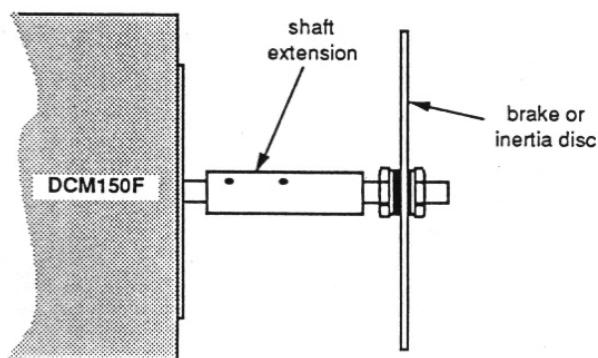


Figura 12.5: Acomplamneto do disco de freio ou disco de inércia.

- Ganho da malha de posição = 10;
- Ganho da malha de velocidade = 10;
- Gerador de sinais na frequência de 0,4 Hz;
- Gerador de sinais gerando amplitude de 2 Vpp.

14. Agora, ligue a fonte de alimentação do sistema.
15. Ajuste o osciloscópio para obter uma forma de onda limpa no centro da sua tela. Se forem verificadas deflexões abruptas, o potenciômetro sensor OP150K necessita ser ajustado para longe dos seus limites de posição angulares ($\pm 160^\circ$). Para fazer isto, rotacione o transmissor ST150T manualmente até que seu dial (marcação dos ângulos) se torne simétrica em relação ao seu zero.
16. Agora você deve estar vendo uma forma de onda como a mostrada na fig. 12.4, mostrando uma resposta aproximadamente exponencial para a perturbação gerada pela onda quadrada. A constante de tempo τ corresponde ao período de tempo necessário para o sinal alcançar os 63% do seu valor final e pode ser medido na forma mostrada na fig. 12.4. Capture o sinal obtido no osciloscópio.
17. Com base nos dados medidos via osciloscópio, determine a constante de tempo τ . Esta constante de tempo corresponde a constante de tempo da resposta do sistema. $\tau = \underline{\hspace{2cm}}$
18. Agora perceba, sem necessidade de medições precisas, o efeito na resposta do sistema quando:
 - a) Diminui o ganho da malha de posição gradualmente até o valor 5;
 - b) Ajusta o ganho da malha de posição até 10 e reduz o ganho da malha de velocidade, de forma gradual, até o ponto aproximado 3.
19. Questão 5) Em que ponto do ajuste de ganho da malha de velocidade, você obteve uma resposta mais rápida do sistema, sem perceber sobre-sinal?
Anotação:

Note: o sobre-sinal ocorre quando a saída ultrapassa brevemente a posição final e depois retorna.

20. Ajuste o ganho da malha de velocidade para o ponto encontrado na Questão 5 e então faça:
 - a) Acople progressivamente o freio magnético no disco de freio, percebendo o efeito gerado.
 - b) Remova o freio e disco de freio. Acople agora o **disco de inércia** (mais pesado) no eixo de saída do motor (de mais alta velocidade) e perceba o que acontece.

Note (respostas para algumas questões):

- 5) A melhor ajuste de ganho para a malha de velocidade deve ter ficado em torno de 4 mas pode variar consideravelmente de um servo-sistema para outro.

Fim.

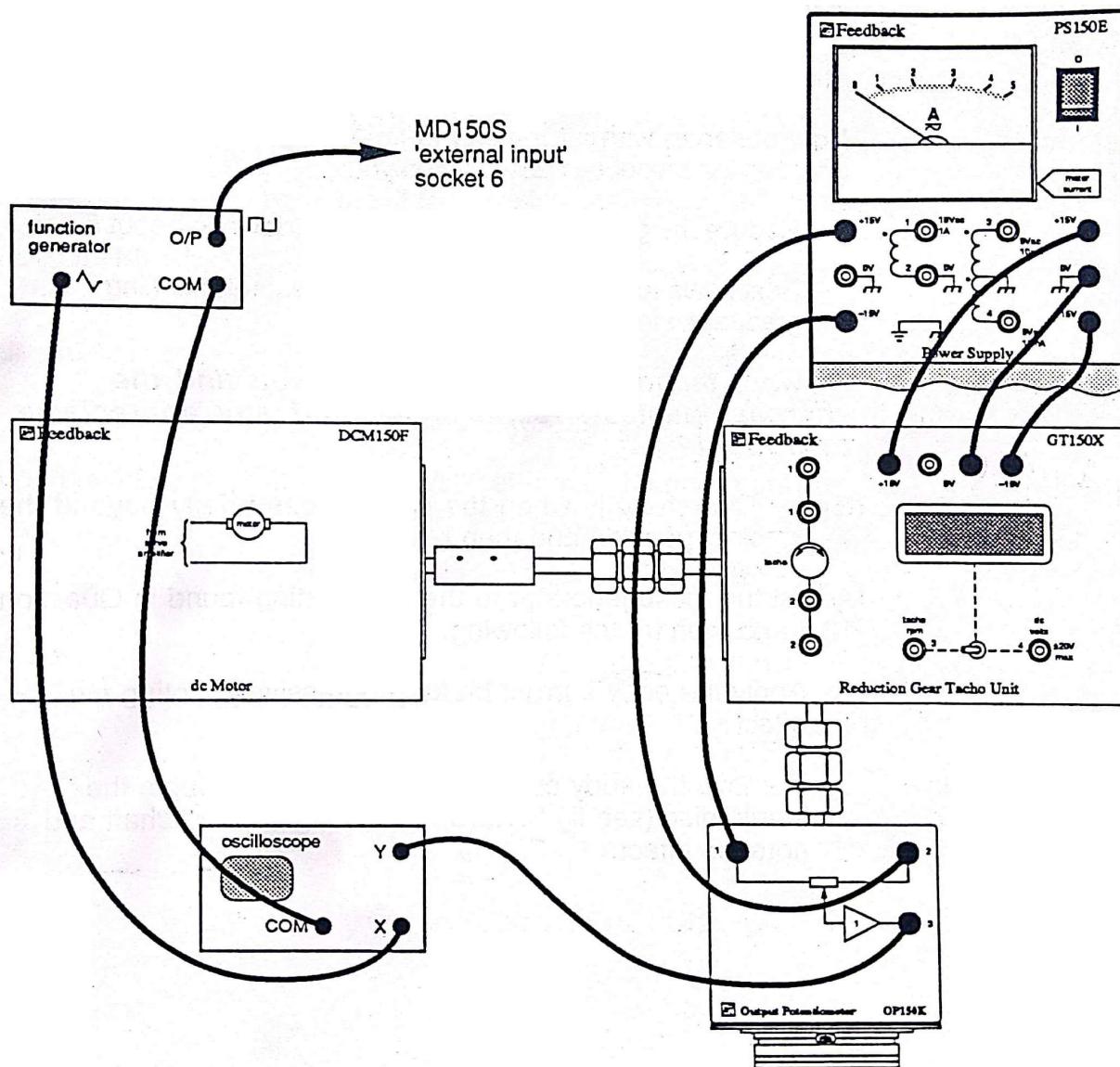


Figura 12.6: Alteração no servo-sistema síncrono para medir a resposta transitória.