

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LEONARDO ÍTALO DE OLIVEIRA

**PROPOSTAS DE EXPERIÊNCIAS UTILIZANDO O MÓDULO 2208 DATAPOOL
PARA O LABORATÓRIO DE CONTROLE LINEAR**

Guaratinguetá

2014

LEONARDO ÍTALO DE OLIVEIRA

PROPOSTAS DE EXPERIÊNCIAS UTILIZANDO O MÓDULO 2208
DATAPOOL PARA O LABORATÓRIO DE CONTROLE LINEAR

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo

Guaratinguetá

2014

O48p

Oliveira, Leonardo Italo de

Propostas de experiências utilizando o módulo 2208 Datapool para o laboratório de controle linear / Leonardo Italo de Oliveira – Guaratinguetá, 2015.

70 f. : il.

Bibliografia : f. 59

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo

1. Sistemas de controle linear 2. Controladores PID 3. Servomecanismos
I. Título

CDU 681.511.2

LEONARDO ÍTALO DE OLIVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. SAMUEL EUZEDICE DE LUCENA
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG

Fevereiro de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela oportunidade de ter nascido em uma família maravilhosa, pelos momentos de felicidade e também pelas tormentas pelas quais passei para me tornar a pessoa que sou hoje e pelas bênçãos concedidas. Agradeço aos meus pais, Ana Angélica e Antonio Carlos, pela educação exemplar concedida a mim, pela paciência que sempre têm comigo, pelo papel fundamental na criação da minha personalidade e concepções, por todo o apoio financeiro, mas principalmente emocional, e pelo amor, carinho, confiança e compreensão incondicionais. Agradeço à minha irmã, Luana, pela companhia, parceria, amizade, amor e apoio. Agradeço aos meus padrinhos, Paulo e Lucília, pelo papel de conselheiros, e pela imensa ajuda durante meu período de graduação. Agradeço à minha avó, Maria, por ser essa segunda mãe, amiga, conselheira, e por me passar seu conhecimento e experiência de vida, de valor inestimável. Agradeço a todos os membros da minha família, que durante todos esses anos, com pequenas ações, tornaram minha luta mais alegre e prazerosa. Por fim, agradeço ao meu orientador, Lotufo, pela enorme paciência empregada, pelo apoio, ensinamentos e disponibilidade.

“Não é preciso ter olhos abertos para ver o sol, nem é preciso ter ouvidos afiados para ouvir o trovão. Para ser vitorioso, você precisa ver o que não está visível.”

Sun Tzu

OLIVEIRA, L. I. Proposta de experiências utilizando o módulo 2208 Datapool para o laboratório de Controle Linear. 2014. 70 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Neste trabalho, fez-se um estudo acerca do módulo servomecanismo modelo 2208 da Datapool, tendo como objetivo fazer o reconhecimento do módulo, do material que o acompanha, e desenvolver as experiências sugeridas em seus roteiros de estudo, a fim de provar e entender o seu funcionamento. A partir desse estudo, foram desenvolvidas três experiências, que visam familiarizar o aluno com o módulo, a calibrar o mesmo, e a controlar velocidade e posição do servo motor, experiências as quais podem vir a fazer parte do laboratório da matéria de Controle Linear, tornando o aprendizado dos conceitos da mesma mais rico, dado que de forma visual, os alunos podem fugir do campo teórico e ver na prática conceitos complexos sendo empregados.

PALAVRAS – CHAVE: Datapool. Laboratório de Controle Linear. Controlador PID.

OLIVEIRA, L. I. Proposal for experiments using the Datapool module 2208 for Linear Control laboratory. 2014. 70 p. Graduation Work (Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

In this work, we carried out a study of the 2208 model servo module Datapool, aiming to make the recognition module and the material that accompanies it, and develop the experiences suggested in their study tours, in order to prove and understand its operation. From this study, three experiments were developed, aimed to familiarizing students with the module, calibrate it, and to control servo motor's speed and position, experiences which can become part of the laboratory of Linear Control, making the learning of concepts just richer, because visually, students can escape the theoretical field and see in practice complex concepts being employed.

KEY – WORDS: Datapool. Linear Control Laboratory. PID Controller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de processo	15
Figura 2 – Módulo 2208 - Servomecanismo	16
Figura 3 – Diagrama de blocos da instrumentação do servomecanismo.....	16
Figura 4 – Potenciômetro	17
Figura 5 – Tacômetro elétrico	18
Figura 6 – Conector de acesso.....	18
Figura 7 – Jumper J ₁ /J ₂	21
Figura 8 – Controlador PI.....	22
Figura 9 – Placa Controle PID Velocidade	22
Figura 10 – Controlador PID	23
Figura 11 – Placa Controle PID Posição	23
Figura 12 – Osciloscópio GwInstek GDS-1152A-U	24
Figura 13 – Multímetro HP 34401A	24
Figura 14 – Gerador de funções HP 33120A	25
Figura 15 – USB-6008.....	25
Figura 16 – Controlador de ação proporcional.....	28
Figura 17 – Banda proporcional para ganhos 1, 2 e 4.....	28
Figura 18 – Controlador integral	29
Figura 19 – Controlador derivativo	30
Figura 20 – Controlador PI.....	31
Figura 21 – Controlador PID	33
Figura 22 – Resposta ao degrau.....	36

Figura 23 - Circuito necessário para calibração	40
Figura 24 – Forma de onda obtida do servopotenciômetro	42
Figura 25 – Observação com relação ao distúrbio	43
Figura 26 - Ligação entre as placas de aquisição e o módulo 2208	45
Figura 27 – Tela de configuração e supervisão de controle de velocidade	46
Figura 28 – Montagem da experiência 2	47
Figura 29 – Comportamento da tensão de rotação	49
Figura 30 – Comportamento da tensão quando inserido o distúrbio	50
Figura 31 - Ligação entre as placas de aquisição e o módulo 2208	52
Figura 32 – Tela de configuração e supervisão de controle de velocidade	53
Figura 33 – Montagem da experiência 3 (via software).....	54
Figura 34 – Montagem da experiência 3 (via placa de controle)	54
Figura 35 – Comportamento do sistema após religamento com ângulo setado	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação tensão de entrada x tensão do taco gerador.....	40
Tabela 2 – Tensões de entrada, do servopotenciômetro e tempo	41
Tabela 3 – Relação ângulo x tensão	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS GERAIS	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	15
2.1 MÓDULO 2208 SERVOMECANISMO	15
2.1.1 Servopotenciômetro	17
2.1.2 Servo motor e tacômetro	17
2.1.3 Conector	18
2.1.4 <i>Protoboard</i>	19
2.1.5 Transdutores e condicionadores	19
2.1.6 <i>Driver</i>	20
2.1.7 <i>Jumper J₁/J₂</i>	20
2.1.8 Placa de Controle PID Velocidade	21
2.1.9 Placa de Controle PID Posição	22
2.2 EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO	24
3 CONCEITOS E MODELAGEM DO SISTEMA SERVOMECANISMO 2208	27
3.1 CONCEITOS SOBRE CONTROLADORES ELETÔNICOS	27

3.1.1	Controlador de ação proporcional (P)	27
3.1.2	Controlador de ação integral (I)	29
3.1.3	Controlador de ação derivativa (D)	30
3.1.4	Controlador proporcional-integral (PI)	31
3.1.5	Controlador proporcional-derivativo (PD)	31
3.1.6	Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)	32
3.2	MODELAGEM DO SERVOMOTOR	33
4	DESENVOLVIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS	38
4.1	EXPERIÊNCIA 1 – CALIBRAÇÃO DO MÓDULO 2208	38
4.1.1	Procedimento de calibração	38
4.1.2	Procedimento para obtenção de tensões referentes à velocidade e posição	40
4.1.3	Observações sobre a experiência 1	42
4.2	EXPERIÊNCIA 2 – CONTROLE DE VELOCIDADE ANGULAR	43
4.2.1	Procedimento de montagem utilizando placa de controle	44
4.2.2	Procedimento de montagem utilizando software de controle	45
4.2.3	Observações sobre a experiência 2	47
4.3	EXPERIÊNCIA 3 – CONTROLE DE POSIÇÃO ANGULAR	50
4.3.1	Procedimento de montagem utilizando placa de controle	51
4.3.2	Procedimento de montagem utilizando software de controle	52
4.3.3	Observações sobre a experiência 3	54

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5 SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE A – SUGESTÃO DE ROTEIRO.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O processo de aprendizagem da matéria de Controle Linear sempre possuiu uma parte experimental atrelada à teoria ensinada em sala de aula, algo que além de um pré-requisito, é extremamente enriquecedor na visão do aluno, pois é quando pode-se ter contato com softwares e equipamentos capazes de simular um ambiente real, onde toda a modelagem matemática pode ser testada e comprovada de forma visual, servindo de estímulo para que o aluno se sinta motivado a entender a teoria, e procurar por formas inovadoras de empregar o conhecimento adquirido. Porém, a prática por muito tempo tem estado presente nos laboratórios de Controle Linear somente de forma computacional, com simulações utilizando softwares complexos, deixando de lado uma importante parcela do aprendizado, a implementação dessas simulações em modelos reais.

Tendo em vista tal fato, faz-se necessário estudar novas formas de enriquecer e tornar mais palatável o conteúdo estudado, através de módulos de experiências, como o servomecanismo 2208 da Datapool, que integra conteúdo, simulações computacionais e implementação das mesmas, deixando a matéria de laboratório mais completa e atrativa.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo o estudo do módulo servomecanismo 2208 da Datapool, para que o mesmo seja utilizado para complementar o ensino do laboratório de Controle Linear.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo e validação do material apresentado pela Datapool;
- Desenvolvimento de experiências baseadas no roteiro do módulo servomecanismo 2208;
- Introduzir o LabVIEW através dessas experiências, como uma linguagem de programação gráfica, que juntamente com o Matlab, oferece ambientes de simulação e desenvolvimento indispensáveis.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído por cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo faz uma breve introdução de como atualmente a matéria de Controle Linear é organizada, as limitações existentes no uso do laboratório da matéria, e as sugestões e objetivos do trabalho em questão.

O segundo capítulo mostra todos os equipamentos utilizados durante o trabalho, uma vez que foram conduzidas experiências que necessitavam de diferentes aparelhos de medição e aquisição de dados, assim como o kit da Datapool, objeto do estudo conduzido.

No terceiro capítulo é onde as experiências citadas no manual são desenvolvidas, acompanhadas da modelagem matemática e conceitos necessários para o desenvolvimento das mesmas, assim como é discutido ao final de cada uma, os resultados obtidos e observações pertinentes.

O quarto capítulo é onde são feitas as considerações finais sobre o trabalho e os principais pontos são discutidos.

No quinto capítulo são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

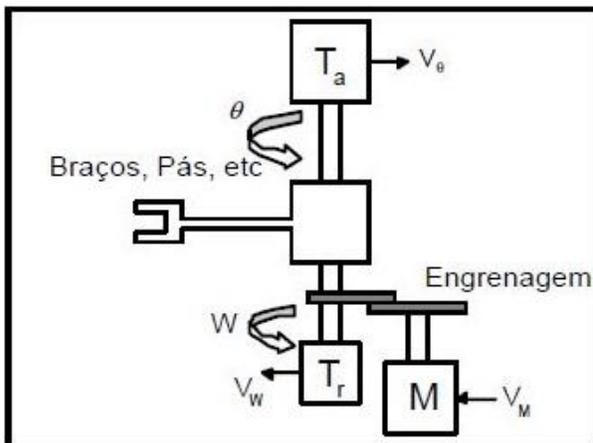
2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A seguir são apresentados os equipamentos utilizados para o estudo e validação do módulo, assim como para o desenvolvimento das experiências propostas.

2.1 MÓDULO 2208 SERVOMECANISMO

O servomecanismo é constituído por dois transdutores (potenciômetro e tacogerador), um servo motor, *driver* de acionamento, conector de acesso, *proto-board* e fontes de alimentação. A Figura 1 mostra o modelo físico do módulo 2208 com seus respectivos componentes.

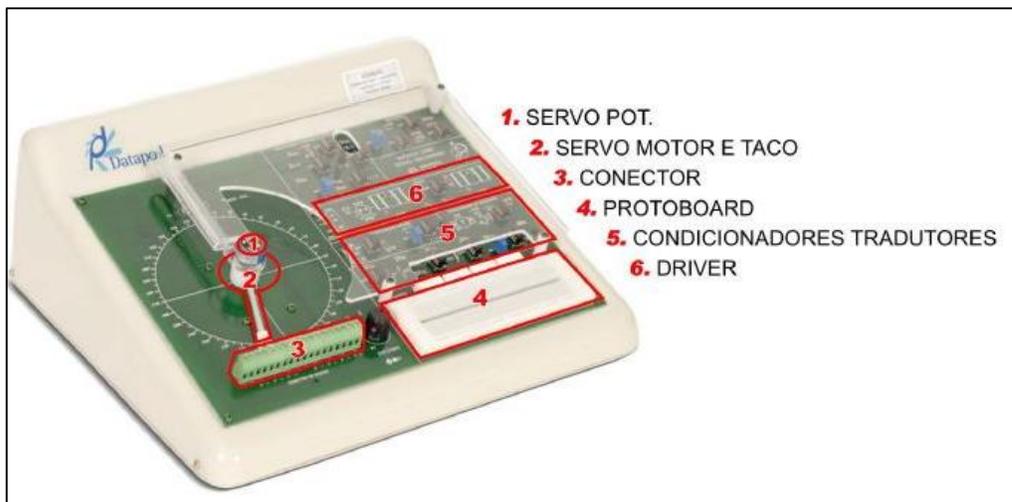
Figura 1 - Exemplo de processo



Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

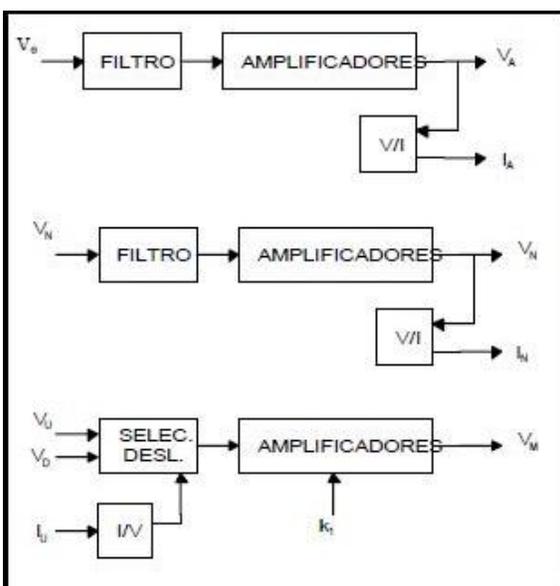
A Figura 2 ilustra a instrumentação embarcada no módulo servomecanismo 2208, e a Figura 3 ilustra na forma de diagrama de blocos essa instrumentação, com suas devidas variáveis de entrada e saída.

Figura 2 – Módulo 2208 - Servomecanismo



Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

Figura 3 – Diagrama de blocos da instrumentação do servomecanismo



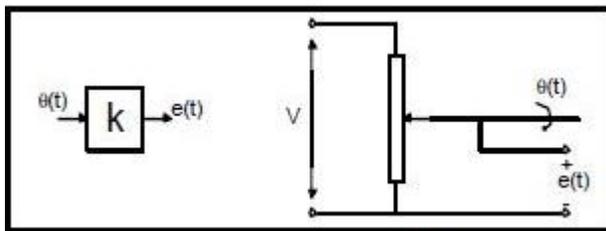
Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

A seguir, são descritos os principais componentes listados do módulo.

2.1.1 Servopotenciômetro

Segundo Datapool (2014b), o servopotenciômetro é um dispositivo que transforma uma variável mecânica (linear ou rotacional) em variável elétrica, através da variação de uma resistência. É frequentemente necessário para comparação de sinais, por exemplo, como comparar a referência de entrada com a variável controlada traduzida pela posição de um eixo de um motor ou pela posição linear de um atuador. A tensão de saída de um potenciômetro rotacional é proporcional ao deslocamento do seu eixo, quando uma tensão é aplicada. A Figura 4 mostra um potenciômetro cuja entrada mecânica é a posição de seu eixo e a saída é a tensão $e(t)$. A função de transferência do servopotenciômetro é dada na equação (1).

Figura 4 – Potenciômetro



Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

$$\frac{E(s)}{\theta(s)} = \frac{V}{\theta_{max}} \quad (1)$$

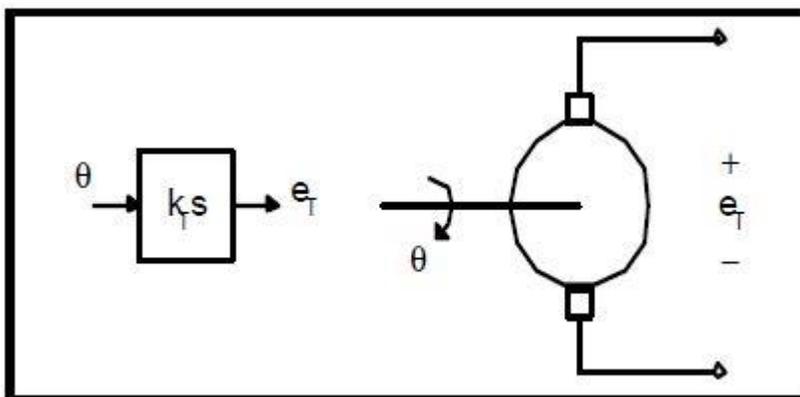
2.1.2 Servo motor e tacômetro

Os servo motores são usados em várias aplicações quando se deseja movimentar algo de forma exata e controlada. Sua característica mais marcante é a sua capacidade de movimentar o seu eixo até uma posição e mantê-lo, mesmo quando sofre uma força em outro sentido (SERVO MOTOR, 2014).

Os tacômetros se dividem em elétricos e mecânicos, porém o módulo 2208 somente possui um tacômetro elétrico DC, comumente chamado de tacogerador, que converte rotação mecânica de um eixo em tensão elétrica. Trata-se de um gerador com tensão de saída proporcional à

velocidade angular de entrada. A função de transferência é dada pela equação (2) e a Figura 5 apresenta o diagrama esquemático de um tacogerador elétrico (DATAPOOL, 2014b).

Figura 5 – Tacômetro elétrico



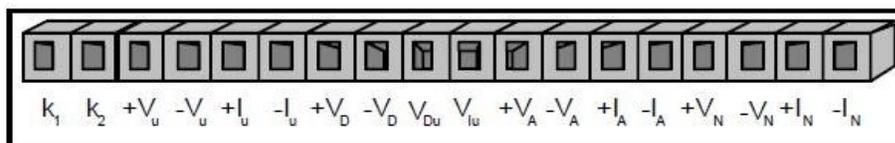
Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

$$\frac{E_T(s)}{\theta(s)} = K_T s \quad (2)$$

2.1.3 Conector

A seleção dos sinais de operação é feita através dos conectores de acesso disponíveis no módulo. O desenho da Figura 6 indica todos os sinais e o respectivo conector de acesso para ligar este módulo a outros equipamentos de medição, controle, dentre outros (DATAPOOL, 2014a).

Figura 6 – Conector de acesso



Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

A descrição dos sinais é a seguinte:

- $+V_N$: Sinal do condicionador de velocidade (vindo do tacogerador), amplificado e ajustado.

- $-V_N$: Terra.

- $+I_N/-I_N$: Sinal de corrente vindo do tacogerador (0-20 mA).

- $+V_A$: Tensão referência de posição.

- $-V_A$: Terra.

- $+I_A/I_A$: Saída de corrente correspondente a $+V_A$ usando o conversor V/I.

- $+V_U$: Sinal de entrada +5 V para alimentação do motor.

- $-V_U$: Sinal de entrada -5 V para alimentação do motor.

- $+V_D$: Sinal de entrada 0 a +5 V para alimentação do motor (entrada do circuito deslocador).

- $-V_D$: Terra.

- $+I_U/-I_U$: Sinal de entrada de corrente 0 a 20 mA.

- V_{DU} : Saída do circuito deslocador.

- V_{IU} : Correntes $+I_U$ e $-I_U$ transformadas em tensão (transdutor I/V).

- k_1 : Terminal central do potenciômetro P1 (distúrbio).

- k_2 : Entrada do circuito amplificador (distúrbio).

2.1.4 Protoboard

O módulo também possui um *protoboard* acoplado, onde componentes discretos podem ser utilizados para complementar as experiências, e também para que seja possível projetar controladores com os mesmos.

2.1.5 Transdutores e condicionadores

O sinal de tensão proveniente do tacogerador precisa ser condicionado, passando por um filtro que visa minimizar eventuais ruídos elétricos devido à comutação dos seus próprios coletores, e também de outros ruídos externos. Este sinal é retificado e amplificado por um amplificador

eletrônico (Amp), visando atender a condições de níveis dos equipamentos que possam usar essa informação resultante, que está disponível na faixa de 0 a +5 V. Esse dado também é apresentado em sinal de corrente na faixa de 0 a 20 mA através de um bloco V/I (DATAPOOL, 2014a).

2.1.6 Driver

Para o acionamento, é empregado um servo motor de corrente contínua de imã permanente, acoplado a um conjunto de engrenagem que aciona a parte mecânica (braço/ponteiro) do sistema de posicionamento e/ou de rotação angular. Um driver linear a transistores modifica a tensão de armadura do motor a partir de sinais de comando em $+V_U$, $+V_D$ ou $+I_U$ de baixa potência. Os sinais de comando podem estar na faixa de -5 a +5 V, 0 a +5 V ou 0 a 20 mA. A seleção das faixas de operação é feita através dos conectores de acesso aos sinais, e também por um circuito eletrônico deslocador de nível e um circuito conversor I/V de corrente para tensão. O driver amplifica estes sinais gerando um outro sinal V_M com capacidade de até ± 12 V e 1,5 A, para acionamento do motor. Um sinal k_1 (junto com k_2) serve para provocar variações de torque no motor, visando introduzir distúrbios no sistema (DATAPOOL, 2014a).

2.1.7 Jumper J1/J2

O módulo apresenta um jumper J_1/J_2 , como mostrado na Figura 7, que funciona como um acionador do circuito causador de distúrbio. Este distúrbio tem a finalidade de simular um aumento de torque no motor, através de um sinal de tensão que é injetado no circuito principal de alimentação, de forma a reduzir o mesmo.

Figura 7 – Jumper J₁/J₂

Fonte: (Autoria Própria)

Na posição J₁, o circuito causador do distúrbio está desligado, sendo que a variação de resistência no potenciômetro P2 não surte efeito algum no circuito.

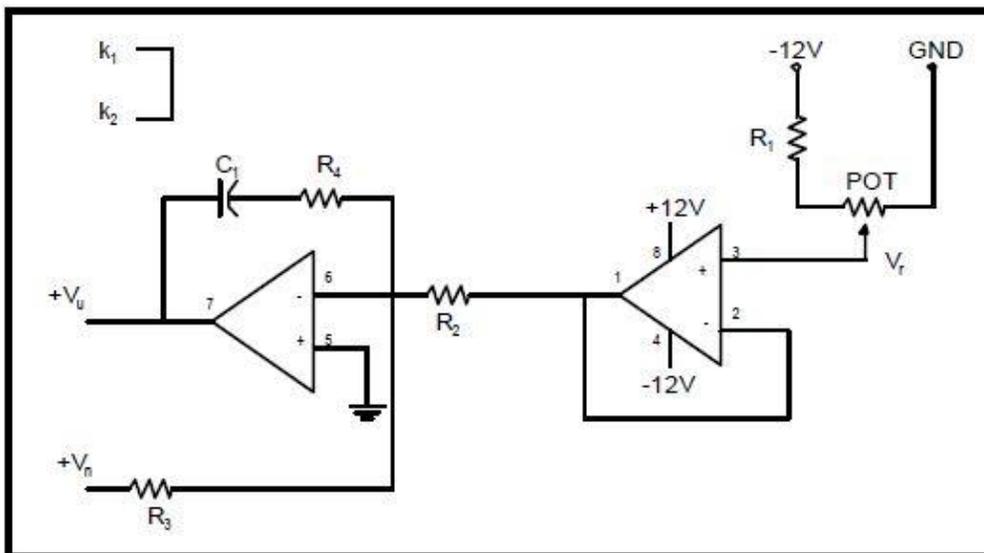
Na posição J₂, o circuito causador do distúrbio está ligado, podendo-se assim observar as variações de tensão no sinal de saída.

2.1.8 Placa de Controle PID Velocidade

O módulo servomecanismo 2208 possui uma placa chamada de Controle PID Velocidade, onde um circuito controlador PI está devidamente configurado, de modo a evitar falhas nos componentes discretos necessários para fazer o controle.

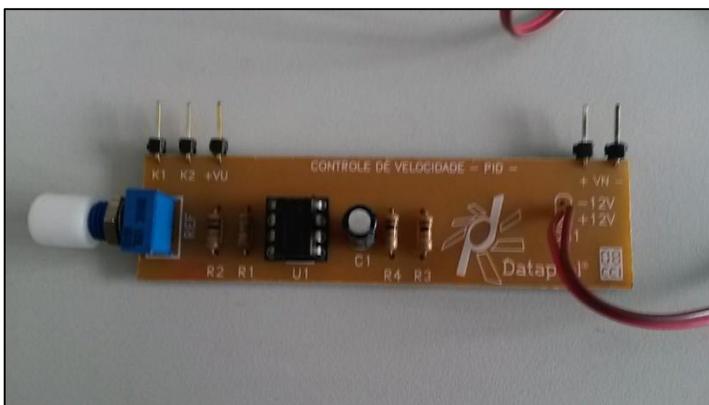
A Figura 8 mostra a configuração do controlador PI e a Figura 9, a placa PID Velocidade, que acompanha o kit da Datapool.

Figura 8 – Controlador PI



Fonte: (Datapool, 2014)

Figura 9 – Placa Controle PID Velocidade



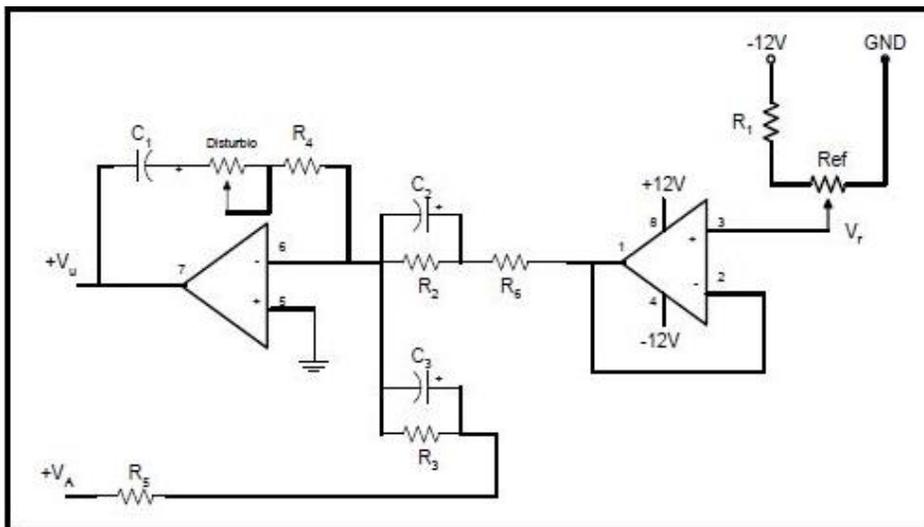
Fonte: (Autoria Própria)

2.1.9 Placa de Controle PID Posição

O módulo servomecanismo 2208 possui também uma placa de Controle PID Posição, onde um circuito controlador PID está devidamente configurado, de modo a evitar falhas nos componentes discretos necessários para fazer os controles necessários.

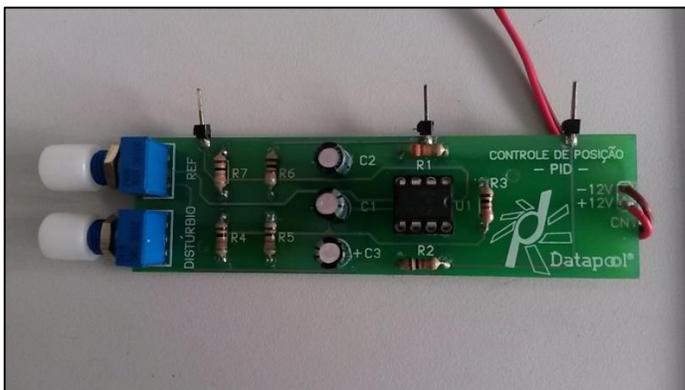
A Figura 10 mostra a configuração do controlador PID e a Figura 11 a placa PID Posição, que acompanha o kit da Datapool.

Figura 10 – Controlador PID



Fonte: (Datapool, 2014a)

Figura 11 – Placa Controle PID Posição



Fonte: (Autoria Própria)

2.2 EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO

O osciloscópio utilizado para fazer todas as medições é um GwInstek modelo GDS-1152A-U, mostrado na Figura 12, que serviu muito bem ao seu propósito.

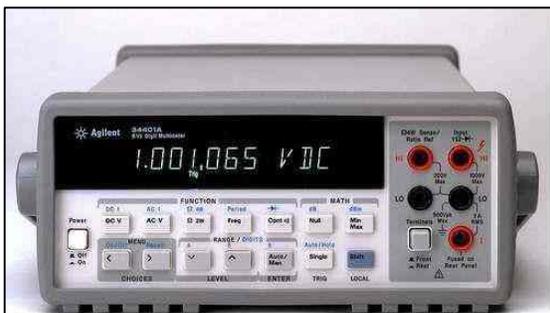
Figura 12 – Osciloscópio GwInstek GDS-1152A-U



Fonte: (GWINSTEK, 2014)

Apesar de todas as medidas de tensão terem sido feitas através do osciloscópio, a fim de obter-se maiores detalhes sobre as mesmas, também foi usado um multímetro HP modelo 34401A, mostrado na Figura 13, para medições dos valores de resistências, necessários para a calibração do módulo estudado, assim como para fazer algumas medições de tensão e corrente.

Figura 13 – Multímetro HP 34401A



Fonte: (DOPLIM, 2015)

Para a reprodução dos resultados obtidos nos guias da Datapool e também para o desenvolvimento das experiências, foi necessário a utilização de um gerador de funções. O gerador usado é da marca HP, modelo 33120A e está mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Gerador de funções HP 33120A



Fonte: (HELMUT, 2015)

As experiências sugeridas neste trabalho também requerem que seja feita a aquisição de dados do módulo. Para tal, utilizou-se o dispositivo de aquisição de dados USB-6008 da National Instruments, mostrado na Figura 15.

Figura 15 – USB-6008



Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)

O USB-6008 oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações simples de *data logging*, medições portáteis e experimentos de laboratórios acadêmicos. Esse dispositivo é acessível aos estudantes, mas suficientemente poderoso para aplicações de medição mais sofisticadas. É possível também programar esse dispositivo com o LabVIEW ou linguagem C e o software de serviços de medição NI-DAQmx Base, para ter um sistema de medição customizado (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)

A National Instruments, fabricante do USB-6008, é uma empresa americana e operação direta em 41 países, fundada em 1976 por James Truchard, Bill Nowlin e Jeff Kodosky. É um fabricante de equipamentos de testes automatizados e software de instrumentação virtual. Seus softwares incluem o LabWindows/CVI, ferramentas e programas em linguagem C, e o LabVIEW. (WIKIPEDIA, 2014).

3 CONCEITOS E MODELAGEM DO SISTEMA SERVOMECANISMO 2208

Neste capítulo, é detalhado o estudo feito acerca das experiências sugeridas no manual da Datapool, assim como os conceitos que envolvem as mesmas. Essas experiências abordam uma utilização total do módulo, desde a sua calibração, até a implementação do controle propriamente dito.

3.1 CONCEITOS SOBRE CONTROLADORES ELETÔNICOS

Uma malha de controle pode ser constituída por certo número de componentes elétricos. Estes elementos geralmente envolvem elementos de sistemas elétricos básicos como resistores e capacitores, juntamente com circuitos ativos a semicondutores. Entre os dispositivos ativos disponíveis podem-se citar os amplificadores operacionais, muito utilizados em instrumentação e sistemas de controle convencionais, onde se destacam os filtros ativos e os controladores ou compensadores tipo PID ou *Lead/Lag* (DATAPOOL, 2014b).

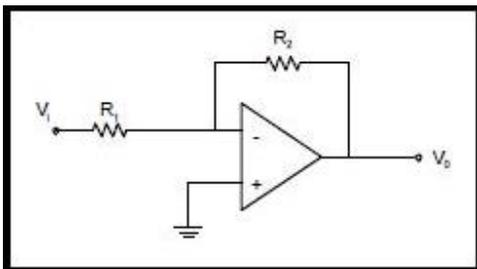
3.1.1 Controlador de ação proporcional (P)

Segundo Pertence (1988), no controlador proporcional existe uma relação linear entre o sinal de erro de entrada e saída da malha, assim, a saída do processo terá uma resposta proporcional ao sinal de comando do atuador. O sistema de equações (3) representa o controlador proporcional.

$$\begin{cases} P = K_P e(t) \\ K_P = \frac{R_2}{R_1} \end{cases} \quad (3)$$

Onde K_P é uma constante de proporcionalidade. A Figura 16 ilustra o diagrama esquemático de um controlador proporcional.

Figura 16 – Controlador de ação proporcional

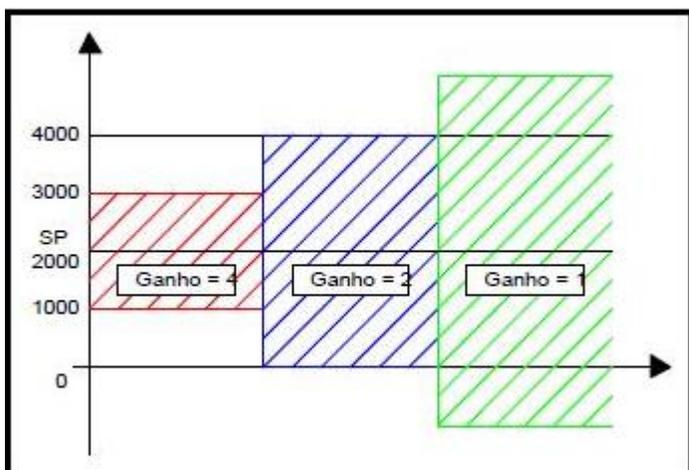


Fonte: (DATAPOOLI, 2014b)

A banda proporcional por definição é expressa em porcentagem e corresponde a variação de 0 a 100% do fundo de escala da variável de processo. Ela se situa acima e abaixo do *setpoint*. A banda proporcional é o inverso do ganho, segundo a equação (4). O gráfico da Figura 17 mostra a posição da banda para ganhos 1, 2 e 4 (DATAPOOL, 2014b).

$$BP = \frac{100\%}{K_P} \quad (4)$$

Figura 17 – Banda proporcional para ganhos 1, 2 e 4.



Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

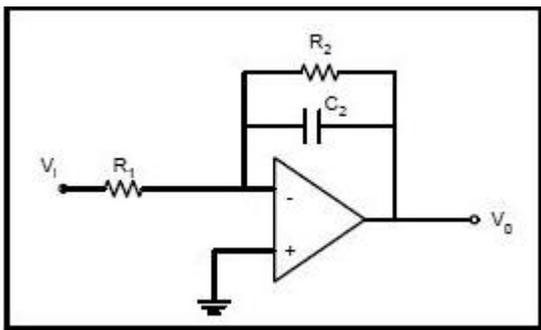
3.1.1 Controlador de ação integral (I)

A ação integral é aquela na qual a saída do controlador aumenta em uma taxa proporcional ao erro da variável controlada. A saída do controlador é a integral do erro ao longo do tempo, multiplicada pela constante de proporcionalidade (PERTENCE JUNIOR, 1988). O sistema de equações (5) mostra a saída do controlador de ação integral.

$$\left\{ \begin{array}{l} I = K_I \int_0^t e(t) dt \Rightarrow I = K_I \sum e(k)T \\ K_I = \frac{1}{T_I} \\ T_I = R_1 C_2 \end{array} \right. \quad (5)$$

Onde K_I é uma constante de proporcionalidade, denominada ganho integrativo, e T_I é chamado tempo integral, o qual ajusta a ação de controle integral. A Figura 18 ilustra o diagrama esquemático de um controlador integral analógico prático, sendo que um controlador ideal teria um valor de R_1 muito grande.

Figura 18 – Controlador integral



Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

No controle integral de um processo, o sinal de controle, o sinal de saída do controlador, em qualquer instante, é igual à área sobre a curva do sinal de erro atuante até aquele instante (DATAPOOL, 2014b).

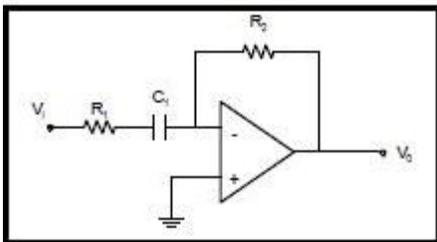
3.1.2 Controlador de ação derivativa (D)

A ação derivativa de um controlador é diretamente proporcional à taxa de variação do erro da variável controlada. Assim sendo, essa ação nunca é utilizada de forma isolada, mas sempre em conjunto com as ações proporcional ou integral, pois, no caso de se ter um erro nulo ou constante, a saída do controlador não irá apresentar nenhuma variação no sinal de saída (PERTENCE JUNIOR, 1988). O sistema de equações (6) mostra a saída do controlador de ação derivativa:

$$\left\{ \begin{array}{l} D = K_D \frac{de(t)}{dt} \Rightarrow D = K_D \frac{\Delta e}{\Delta t} \\ K_D = T_D \\ T_D = R_2 C_1 \end{array} \right. \quad (6)$$

Onde K_D é uma constante de proporcionalidade, denominada ganho derivativo, e T_D é uma constante chamada tempo derivativo. A Figura 19 ilustra um controlador derivativo prático, sendo que um controlador ideal teria um resistor R_1 muito pequeno (DATAPOOL, 2014b).

Figura 19 – Controlador derivativo

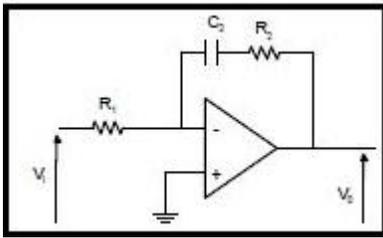


Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

3.1.3 Controlador proporcional-integral (PI)

Os controladores proporcional-integral são empregados em muitos sistemas de controle. A Figura 20 ilustra a estrutura básica desses controladores, quando sua implementação é analógica.

Figura 20 – Controlador PI



Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

A ação de controle proporcional-integral é definida pela equação (7):

$$PI = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

Tanto K_P como T_I são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_P afeta tanto a parte proporcional como a parte integral da ação de controle. O inverso do tempo integral é denominado taxa de restabelecimento. Essa taxa é o número de vezes por minuto que a parte proporcional da ação de controle é duplicada e ela é medida em termos de repetições por minuto (DATAPOOL, 2014b).

3.1.4 Controlador proporcional-derivativo (PD)

A ação de controle de um controlador proporcional-derivativo é definida pela equação (8):

$$PD = K_P e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Tanto K_P como T_D são ajustáveis. O tempo derivativo é o intervalo de tempo pelo qual a ação derivativa avança o efeito da ação de controle proporcional (DATAPOOL, 2014b).

3.1.5 Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)

A combinação do controlador proporcional, do controlador integral e do controlador derivativo, é denominada controlador proporcional-integral-derivativo. Este controlador combinado possui as vantagens de cada um dos três controladores individuais. A equação (9) representa a função básica de um controlador PID contínuo no tempo (implementado através de circuitos analógicos), e a equação (10) de um controlador PID em tempo discreto (implementações com sistemas digitais) (DATAPOOL, 2014b).

$$PID = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum e(k)T + K_D \frac{\Delta e(k)}{T} \quad (10)$$

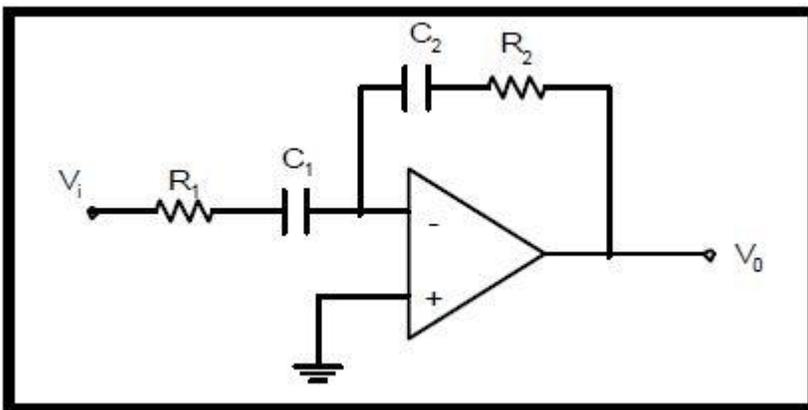
Os parâmetros K_P , K_I e K_D são conhecidos como ganho proporcional, integral e derivativo respectivamente. Nas implementações em tempo discreto, o valor de T define a taxa de amostragem ou de varredura da malha de controle. As equações (9) e (10) expressam o formato *standard* de controladores PID. Outra forma de representação é da ISA (*International Society of Automation*), expressa nas equações (11) e (12) (DATAPOOL, 2014b).

$$PID = K_P \left(e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) + Bias \quad (11)$$

$$u(k) = K_P \left(e(k) + K_I \sum_0^{\infty} e(k) T + T_D \frac{\Delta e(k)}{T} \right) + Bias \quad (12)$$

Onde K_P é o ganho proporcional que multiplica os termos P, I e D, K_I é o ganho integral, T_D tempo do termo derivativo, dt , Δt ou T é o tempo de amostragem, Δe ou de é o erro (erro atual – erro anterior), T_I é o tempo do termo integral (reset time) e Bias é o offset da saída de controle. A Figura 21 ilustra um controlador PID analógico ideal (DATAPOOL, 2014b).

Figura 21 – Controlador PID



Fonte: (DATAPOOL, 2014b)

3.2 MODELAGEM DO SERVOMOTOR

Sistemas de controle devem apresentar características de resposta previamente especificadas. Para esta finalidade, é necessário ajustar os parâmetros dos controladores empregados. Isso pode ser realizado de maneira eficiente se forem conhecidos algumas informações básicas sobre o processo a ser controlado, em outras palavras é necessário conhecer o modelo dinâmico do sistema (DATAPOOL, 2014a).

A modelagem matemática de sistemas dinâmicos é realizada através de leis físicas que representem os processos e plantas reais de forma mais exata possível, e/ou através de medidas experimentais das entradas e saídas de interesse dos sistemas. Os modelos matemáticos resultantes

geralmente são expressos através de equações diferenciais, equações a diferenças, funções de transferência ou variáveis de estado (DATAPOOL, 2014a).

O servomecanismos e processos similares podem ser representados matematicamente levando em consideração algumas características físicas. As partes móveis do sistema podem ser representadas através de um momento de inércia J e de um coeficiente de atrito B equivalentes às partes mecânicas do processo que estão girando, e são associadas a um torque dado pela equação (13):

$$T_C = J\dot{\omega} + B\omega \quad (13)$$

Este valor é o torque mecânico T_M desenvolvido pelo motor descontando um torque de distúrbio ocasionado por variações que aparecem em sistemas reais tais como: modificações de atrito nas pás de um misturador devido a alterações de densidades dos produtos misturados; resistência provocada pelo deslocamento da ferramenta de um torno automático em um bloco ou peça sendo desgastada; esforço do vento batendo na estrutura de uma antena de radar, dentre outros. O torque gerado pelo motor é proporcional a corrente do mesmo, ou seja: $T_M = c_2 I_M$. Esta corrente depende da tensão aplicada no motor, da tensão E induzida internamente, da resistência R_a e da indutância L_a de armadura, apresentados na equação (14):

$$\begin{cases} V = V_M - E \\ V = L_a \dot{I}_M + R_a I_M \end{cases} \quad (14)$$

A tensão induzida é proporcional a velocidade angular do eixo do motor: $E(s) = c_1 \omega(s)$. Aplicando a transformada de Laplace nestas equações e juntando-as, obtém-se a função de transferência que relaciona a rotação do sistema com a tensão aplicada no motor, a equação (15). Para outros exemplos ver Ogata (2003).

$$\frac{\omega(s)}{V_M(s)} = \frac{c_2}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B) s + R_a B + c_1 c_2} \quad (15)$$

Outra função de transferência possível para este sistema é aquela que relaciona o deslocamento (ou posição) angular θ do processo pela tensão aplicada. Conhecida a relação entre a velocidade e o deslocamento angular, dado pela equação (16):

$$\omega = c_3 \dot{\theta} \quad (16)$$

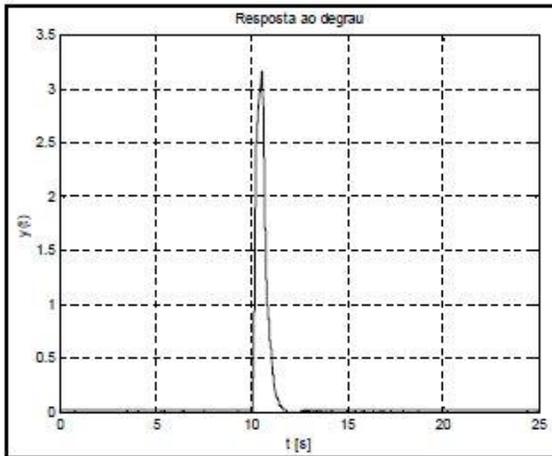
E aplicando a transformada de Laplace à equação (16), obtém-se a equação (17). Os parâmetros de sistema práticos podem ser obtidos através de medições, ensaios e dos dados dos fabricantes dos elementos constituintes do processo.

$$\frac{\theta(s)}{V_M(s)} = \frac{c_2}{s(L_a J s^2 + (R_a J + L_a B)s + R_a B + c_1 c_2) c_3} \quad (17)$$

Outra maneira de se obter modelos de sistemas dinâmicos é empregar métodos de identificação, ver Aguirre (2000). Através de medidas experimentais das entradas e saídas de interesse de um sistema é possível computar estas medidas e obter um modelo aproximado expresso através de equações matemáticas.

Para o sistema de controle de velocidade, no servomecanismo, foi realizado um ensaio aplicando um degrau na entrada de comando $+V_U$ do driver do motor, e mediu-se o sinal resultante $+V_N$ da informação de velocidade. Foram utilizados valores de sinais na entrada de comando do sistema de maneira que ele respondesse na sua faixa de operação linear. A Figura 22 ilustra o gráfico obtido pela Datapool no ensaio de resposta ao degrau.

Figura 22 – Resposta ao degrau



Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

Os comandos do Matlab para obter a identificação são:

- $V=[y(1000:2500) \text{ DU}(1000:2500)];$ <Enter>
- $V=[y' \text{ DU}'];$
- $\text{Modelo}=\text{arx}(v,[4 \ 4 \ 1]);$ <Enter>
- $[Nz,Dz]=\text{th2tf}(\text{modelo})$ <Enter>
- $[Ns,Ds]=\text{d2cm}(Nz,Dz,0.01, \text{'zoh'})$

Através do comando `arx` (Toolbox/ident) é gerado o modelo a partir dos dados medidos de entrada e saída do sistema, os valores entre colchetes representam respectivamente o número de zeros, polos e atrasos da representação do modelo.

O comando `th2tf` retorna os coeficientes da equação a diferenças do sistema modelado. Portanto, a função de transferência contínua no tempo equivalente é obtida pelo comando `d2cm` e expressa pela equação (18), que é o modelo aproximado que relaciona a tensão que corresponde à velocidade da ponteira/haste em forma de braço à tensão que alimenta o motor, ou seja, tensão de armadura. A validação da identificação pode ser feita simulando a equação do modelo com os dados medidos.

$$G(s) = \frac{V_n(s)}{V_u(s)} = \frac{15,8}{0,058s^2 + 5,51s + 7,97} \quad (18)$$

No caso do sistema de controle de posição, tem-se a função de transferência $\theta(s)/V_M(s)$ que é a função $w(s)/V_M(s)$ adicionada de um polo na origem, com um novo ganho, expressa pela equação (19).

$$G(s) = \frac{V_A(s)}{V_u(s)} = \frac{13,77}{s(0,058s^2 + 5,51s + 7,97)} \quad (19)$$

Segundo Datapool (2014a), o tacogerador opera de maneira bem linear na faixa de rotação operacional do conjunto servo motor elétrico e conjunto de engrenagem que movimentam o braço/ponteira do sistema. O servopotenciômetro gira continuamente operando de forma bem linear de 35° até aproximadamente 320°, de 0 até 35° e de 320° até 360° existe uma zona morta na qual o mesmo não responde. A parte elétrica, eletrônica e mecânica de acionamento do conjunto servo motor e engrenagem, apresenta uma zona morta para sinais de comando V_U de aproximadamente +/- 0,5 V, mais uma saturação na tensão de acionamento do motor V_M em torno de +/- 9 V.

4 DESENVOLVIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

4.1 EXPERIÊNCIA 1 – CALIBRAÇÃO DO MÓDULO 2208

De acordo com DATAPOOL(2014a), o módulo de servomecanismo 2208 já vem devidamente calibrado, e os ensaios contidos no manual de experiências podem ser executados independentemente dos procedimentos de calibração. Porém, é conveniente ressaltar que nas experiências, os parâmetros fazem o módulo funcionar fora da sua faixa linear de operação, podem causar problemas no sistema do servomecanismo, placas de aquisição, ou programas desenvolvidos com base nos parâmetros previstos.

A fim de minimizar esses problemas, em busca de resultados coerentes com os esperados para o módulo, e principalmente para familiarizar o usuário com o mesmo, é importante seguir os passos descritos a seguir, que são procedimentos de calibração sugeridos em diferentes manuais da Datapool, customizados para que se tenha uma melhor experiência com o módulo e obtenha-se resultados satisfatórios.

4.1.1 Procedimento de calibração

Segundo Datapool (2014a), o procedimento de calibração deve ser o seguinte:

1. Verificar se o *jumper* “J₁/J₂” está na posição J₁. Ligar a chave do módulo, o LED deve acender. Caso contrário, deve-se verificar o fusível que se encontra na parte posterior do módulo.
2. Verificar os níveis de tensão nos blocos do *protoboard* com as indicações +12, -12, +5 e Gnd, e também nos pontos de solda +12, -12 e Gnd próximos da indicação “Motor”, na placa de circuito impresso do módulo. Se ocorrerem valores muito diferentes dos indicados (em relação a referência de terra), verificar as fontes de alimentação do sistema.

3. Para verificar se o servo motor está funcionando basta ligar o ponto de +5 (no bloco do *protoboard*) ao ponto + V_U do conector de acesso, o motor deve girar no sentido horário. Caso isto não ocorra verificar os circuitos associados aos blocos (amplificador e *driver*).

4. Para verificar o funcionamento do transdutor de velocidade basta ligar o servo motor (como no item 3) e medir se no ponto + V_N (em relação a $-V_N$ ou Gnd) do conector de acesso tem-se uma tensão em torno de +5 V. Se não, verificar o estado do tacogerador e os circuitos associados a parte do condicionador de velocidade.

5. Para verificar o funcionamento do transdutor de posição, basta ligar o servomotor (como no item 3) e medir se no ponto + V_A (em relação a $-V_A$ ou Gnd) do conector de acesso tem-se uma tensão que varia de 0 até próximo de +4 V, na medida que a haste/ponteiro do sistema gira. Se não, verificar o estado do servopotenciômetro e o circuito condicionador de posição associado. Desconectando a tensão do bloco *protoboard* +5 do ponto + V_U e movendo a haste manualmente também é possível verificar que a tensão + V_A varia proporcionalmente. Por exemplo, para a haste/ponteiro na posição de 90° essa tensão deve ser de aproximadamente +1,1 V. Caso este valor esteja muito diferente é necessário ajustar mecanicamente a posição do servopotenciômetro. Para tal, retire o servopotenciômetro da parte central da haste/ponteiro, puxando-o para cima, vire a haste, e reconecte-o, verificando o valor de tensão.

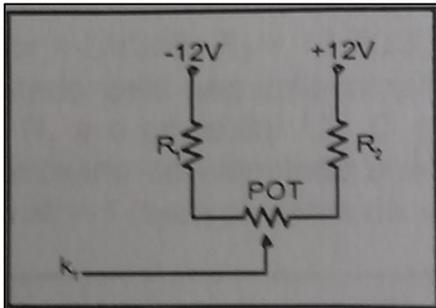
6. Calibrações nos circuitos conversores (V/I e I/V) podem ser realizadas com o módulo desligado e com o auxílio de um multímetro na escala de medição de resistência. Para o bloco I/V ligar as pontas do multímetro nos pontos + I_U e $-I_U$ e ajustar no trimpot P2 um valor de 250 Ω . Para o bloco V/I de velocidade, conectar o medidor entre $-I_N$ e Gnd e ajustar no trimpot P6 um valor de 250 Ω . Para o bloco V/I de posição, conectar o medidor entre $-I_A$ e Gnd e ajustar no trimpot P5 um valor de 250 Ω .

7. O circuito deslocador é testado ligando o ponto +5 do *protoboard* ao ponto V_D do conector de acesso. Medir com um voltímetro a tensão no ponto V_{DU} ; deve-se ter um valor em torno de +5 V. Desfazendo a ligação do ponto +5 do *protoboard* ao ponto V_D , deve-se ter agora no ponto V_{DU} um valor em torno de -5 V. Se essas condições não ocorrerem, ajustar esses valores através do trimpot P3 ou verificar o circuito associado ao bloco deslocador.

4.1.2 Procedimento para obtenção de tensões referentes à velocidade e posição

1. Com a chave do módulo desligada, colocar o *jumper* J₁/J₂ na posição J₂ (direita).
2. Montar o circuito indicado na Figura 23, no *protoboard* do módulo, com os valores de R₁ e R₂ iguais a 15 k Ω e um potenciômetro de 1 M Ω .

Figura 23 - Circuito necessário para calibração



Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

3. Conectar o canal CH1 do osciloscópio em k₁ e o canal CH2 em +V_N e os terras dos canais em Gnd.
4. Ligar a chave do módulo. Se o braço estiver girando (em qualquer sentido), ajuste o potenciômetro até que o mesmo pare.
5. Preencher a Tabela 1, para os valores de tensão de entrada indicados.

Tabela 1 – Relação tensão de entrada x tensão do taco gerador

Tensão de Entrada [V]	Tensão do taco gerador [V]	Tensão de entrada [V]	Tensão do taco gerador [V]
* 0,323	0,57	*-0,475	0,78
0,5	0,74	-0,5	0,81
1	1,81	-1	1,81
1,5	2,6	-1,5	2,41
2	3,4	-2	3,2
2,5	4,45	-2,5	4,2
3	5,6	-3	4,4
2,5	4,6	-2,5	4,1

2	3,48	-2	3,12
1,5	2,5	-1,5	2,28
1	1,76	-1	1,79
0,5	-	-0,5	-
*0,403	0,62	*-0,316	0,55

***marcar a tensão final e inicial e final de rotação**

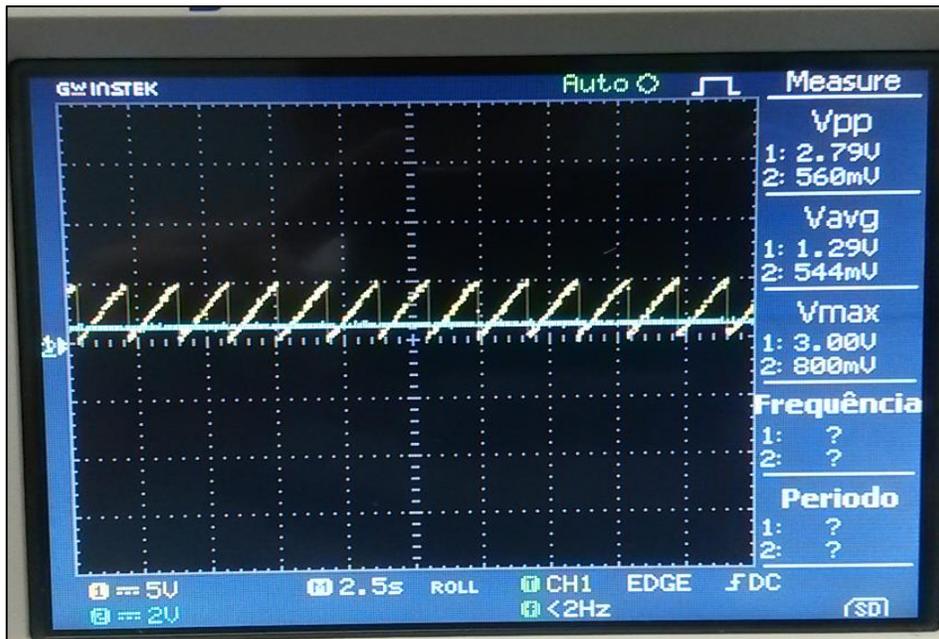
6. Acoplar o canal CH2 do osciloscópio em $+V_A$ e preencher a Tabela 2, para os dados valores de tensão de entrada. Observar a forma de onda advinda do servo potenciômetro. Obs: o período pode ser obtido diretamente pela leitura no osciloscópio.

Tabela 2 – Tensões de entrada, do servopotenciômetro e tempo

Tensão de Entrada [V]	Tensão do servopotenciômetro [V]	Tempo [ms]	Tensão de entrada [V]	Tensão do servopotenciômetro [V]	Tempo [ms]
0,5	2,35	2600	-0,5	2,82	1540
1	2,58	800	-1	2,79	815
1,5	2,59	600	-1,5	2,75	538
2	2,57	480	-2	2,83	434
2,5	2,56	360	-2,5	2,85	320
3	2,62	272	-3	2,8	297

7. Esboçar na Figura 24 a forma de onda obtida do servopotenciômetro para a tensão máxima de entrada da Tabela 2.

Figura 24 – Forma de onda obtida do servopotenciômetro



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Observações sobre a experiência 1

Após realizar todos os procedimentos de calibração e obtenção de tensões referentes à velocidade e posição, verificou-se que a experiência em questão é de enorme importância, já que os dois módulos estudados apresentavam necessidade de calibração.

Apesar de o distúrbio parecer algo um pouco confuso no começo, principalmente quando citado no manual que o mesmo simula um aumento de torque no motor, ele ajuda a entender o funcionamento dos controladores, introduzindo eletricamente um pequeno sinal que diminui o sinal de entrada do circuito, e deste modo, causando uma diminuição na velocidade angular do módulo. No manual mais novo da Datapool encontra-se a informação relativa ao distúrbio, mostrada na Figura 25:

Figura 25 – Observação com relação ao distúrbio

OBSERVAÇÃO:

Para visualizar a influência do circuito distúrbio, coloque o jumper de seleção J1/J2 do lado direito, executando experiência controle de velocidade baixo rotação, através do potenciômetro P1 (distúrbio) rapidamente sentido horário e anti-horário, várias vezes.

Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

Realmente, quando se aumenta gradativamente o potenciômetro P1, não é possível observar grande diferença na velocidade de rotação, sendo que quando o potenciômetro P1 é movimentado rapidamente no sentido horário e anti-horário, evidencia-se uma diferença na mesma.

Na Tabela 1 estão os dados obtidos do taco gerador, e como observado, a tensão máxima de entrada é 3 V, para que a tensão medida no taco gerador fique em torno de 5 V, valor recomendado pela Datapool. Observa-se também que tanto para a rotação no sentido horário (positivo) quanto anti-horário (negativo), a haste começa a girar com uma tensão um pouco menor que $\pm 0,5$ V.

O item 5 do procedimento de calibração deve ser feito com cautela, medindo-se a tensão em $+V_A$ e deslocando-se manualmente (retirando e recolocando) o potenciômetro do ponteiro, de modo a obter-se a tensão de 1,1 V em 90° . Caso essa calibração não seja feita como sugerido, a experiência de controle de posição pode não ter resultados satisfatórios.

No item 6 do procedimento de calibração, não tem sentido que o aluno faça alterações no potenciômetro P2, já que o mesmo encontra-se protegido com a tela de vidro do módulo, não sendo acessível sem a retirada desse vidro.

4.2 EXPERIÊNCIA 2 – CONTROLE DE VELOCIDADE ANGULAR

A experiência de controle de velocidade angular sugerida por DATAPOOL (2014) visa de maneira simples e rápida familiarizar o aluno com o módulo, integrando a placa controle PID velocidade com o mesmo, de modo a controlar a velocidade da haste que gira a uma velocidade angular constante, sendo possível inserir distúrbios ao sistema, tanto mecanicamente, quanto através de um distúrbio que simula eletricamente um aumento de torque, enquanto faz-se medições com o mesmo.

Uma segunda etapa para essa experiência, sugerida como uma experiência adicional pelo manual da Datapool, é controlar a velocidade angular do módulo através da aquisição de dados utilizando a placa de aquisição de dados USB-6008 e fazer o controle PI via software, utilizando o LabVIEW. O programa com o controlador foi desenvolvido pela Datapool e apresentado ao usuário como um executável (.exe), não sendo possível ter acesso ao seu diagrama de blocos dentro do LabVIEW.

Neste trabalho pode-se encontrar também um apêndice com uma sugestão de roteiro para esta experiência.

O procedimento de montagem e resultados obtidos em ambas as configurações são apresentados a seguir.

4.2.1 Procedimento de montagem utilizando placa de controle

Segundo Datapool (2014a), o procedimento de calibração deve ser o seguinte:

1. Inserir a placa controle PID velocidade no conector de acesso do módulo servomecanismo 2208, de tal forma que o primeiro pino da placa seja conectado no pino do conector identificado por k_1 . O esquema elétrico da placa de controle está ilustrado na Figura 8.
2. Alimentar o circuito da placa ligando o fio vermelho no +12 V e o fio marrom em -12 V, conforme identificação do conector C_{N1} da placa controle PID velocidade.
3. O *jumper* de seleção J_1/J_2 deve estar do lado esquerdo, para desabilitar o circuito de distúrbio.
4. Ligar a chave de energia do módulo, atuar em V_{REF} da placa para definir uma rotação no sistema. Monitorar com dois voltímetros (escalas em tensões contínuas) as tensões V_R (valor de referência da velocidade desejada), no pino 3 do CI da placa de controle PID velocidade e $+V_N$ (informação da rotação medida do sistema), no conector do módulo 2208 e observar que este valor tende a ser igual ao da referência, comprovando o funcionamento da malha de controle de velocidade. O controlador PI é implementado pelo segundo amplificador operacional do circuito integrado LM358, pelos resistores R_2 , R_3 , R_4 e o capacitor C_1 . O ganho proporcional é dado pela equação (20), assim $K_P = 1$ (próximo do valor calculado pela Datapool para que o circuito fosse

estável). O ganho integral é expresso pela equação (21), logo $K_I = 1$ (próximo do valor calculado pela Datapool para que o circuito fosse estável).

$$\frac{R_4 R_4}{R_2 R_3} \quad (20)$$

$$R_2 C_1 (R_3 C_1) \quad (21)$$

4.2.2 Procedimento de montagem utilizando software de controle

1. Instalar o software da National Instruments de aquisição de dados (2 discos NI-DAQmx).
2. Instalar o software executável de aquisição de dados (CD Datapool). Programas “PID Veloc.” e “PID Pos.”.
3. Conectar o sistema de aquisição (USB 6008) entre o PC e o módulo 2208.
4. Efetuar as ligações indicadas na Figura 26, mantendo o módulo com a chave de alimentação (na parte de trás) do mesmo, desligado. Manter o *jumper* J₁/J₂ na posição esquerda.

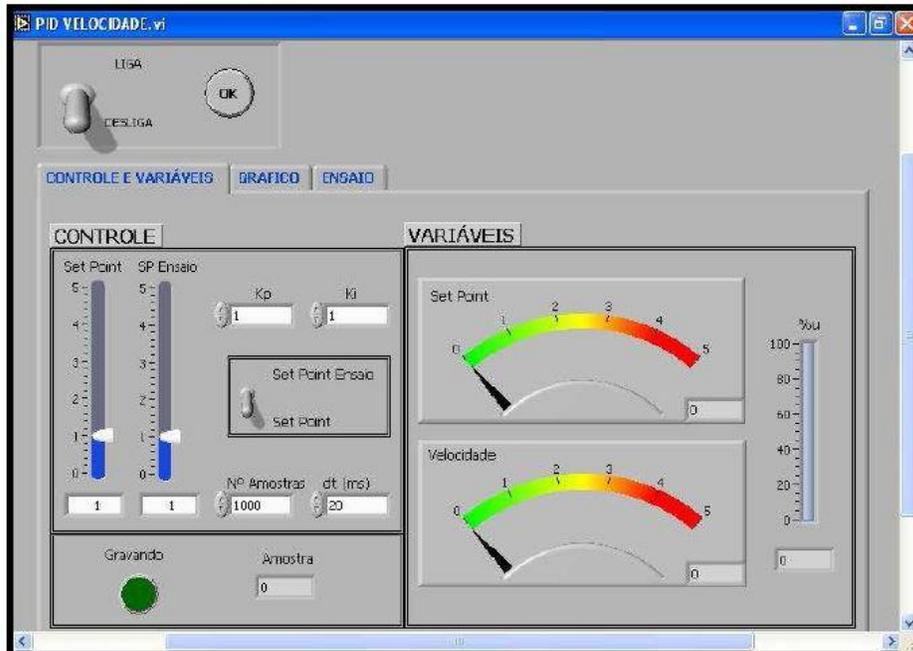
Figura 26 - Ligação entre as placas de aquisição e o módulo 2208

CONECTOR DE ACESSO	SISTEMA DE AQUISIÇÃO - SAD
+VN	A11 (pino 5)
+Vu	AO0 (pino 14)
-VN	GND (pino 1)

Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

5. Na pasta “INSTALLER”, localizada dentro da pasta PID VELOCIDADE, dar duplo clique em “setup.exe” para instalar o aplicativo. Após instalação abrir o aplicativo “PID VELOCIDADE.exe”. Deverá aparecer uma tela semelhante a da Figura 27.

Figura 27 – Tela de configuração e supervisão de controle de velocidade



Fonte: (DATAPOOL, 2014a)

6. Entrar com os ganhos: $K_P = 1$; $K_I = 1$.
7. O valor de referência pode ser digitado no campo SET POINT ou simplesmente deslocar a barra até o valor desejado, por exemplo, 2.
8. Ligar o módulo na rede elétrica de 127 V, 60 Hz, e sua chave geral, localizada na parte de trás do equipamento. Esperar alguns segundos até o LED indicador do módulo acender.
9. No software, acionar a chave LIGA/DESLIGA, colocando na posição LIGA, do programa de controle. A malha de controle deve começar a operar e o indicador VELOCIDADE deve indicar o valor da rotação (em volts) atual (depois de certo tempo este valor deve estar próximo do dado da referência). Outros valores de referência podem ser digitados e o sistema deve responder aos mesmos. As perturbações introduzidas pelo potenciômetro, distúrbio ou tentativas suaves em tentar segurar a haste com uma caneta, por exemplo, serão compensadas adequadamente pela malha de controle.
10. Na janela GRÁFICO, pode-se observar a entrada e a saída do sistema.
11. Para visualizar o distúrbio do sistema, mude J_1/J_2 na posição direita, e curto circuitar k_1 e k_2 . Colocar o set point do programa em 0,5 V, e plotar o gráfico atuando o potenciômetro P_1

distúrbio e observar a correção. A escala do gráfico e ensaio pode ser mudada, entrando com o valor desejado na escala do próprio gráfico.

12. A chave SET POINT ENSAIO serve para realizar o registro da dinâmica do sistema, com o valor do SET POINT, no bloco identificado por VARIÁVEIS, mudando o valor do campo SET POINT para o valor SET POINT ENSAIO. Os ensaios realizados podem ser visualizados na janela ENSAIO. O número de amostras da experiência e o período de varredura da malha de controle podem ser ajustados para se obter a escala de tempo do ensaio. Durante o ensaio, o LED GRAVANDO ficará aceso, desligando no término do mesmo.

13. Os gráficos dos ensaios também são gravados em um arquivo “velocidade.xls” na unidade C, o qual pode ser visto, posteriormente, em um gráfico do Excel.

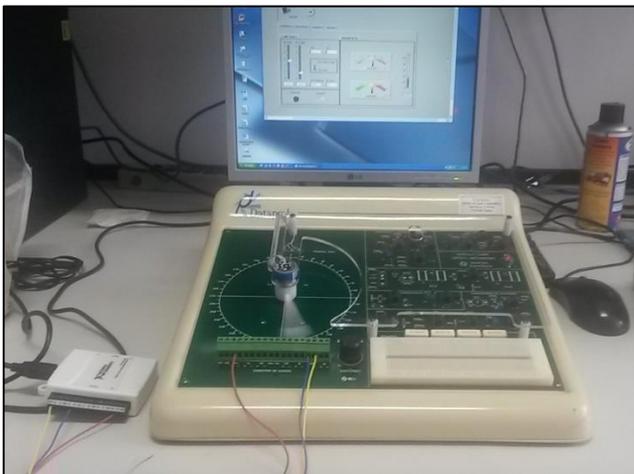
14. Para encerrar o controle, colocar a chave LIGA/DESLIGA na posição DESLIGA e pressionar o botão OK.

15. O programa é encerrado, mas o módulo manterá a última informação.

4.2.3 Observações sobre a experiência 2

A Figura 28 mostra a montagem da experiência 2 que, como um todo, obteve os resultados esperados, apesar de alguns detalhes inerentes ao módulo atrapalharem a execução da mesma.

Figura 28 – Montagem da experiência 2



Fonte: Autoria Própria

Observou-se que a velocidade, mesmo que controlada, possui uma certa oscilação, que provavelmente é proveniente da arquitetura do módulo, que faz com que a haste diminua a sua velocidade quando a mesma está em seu quadrante de ascensão.

É possível inserir o distúrbio através do potenciômetro P1, fazendo com que o mesmo gire em sentido horário e anti-horário rapidamente, causando uma mudança na velocidade angular do módulo, que logo é estabilizada pela malha de controle.

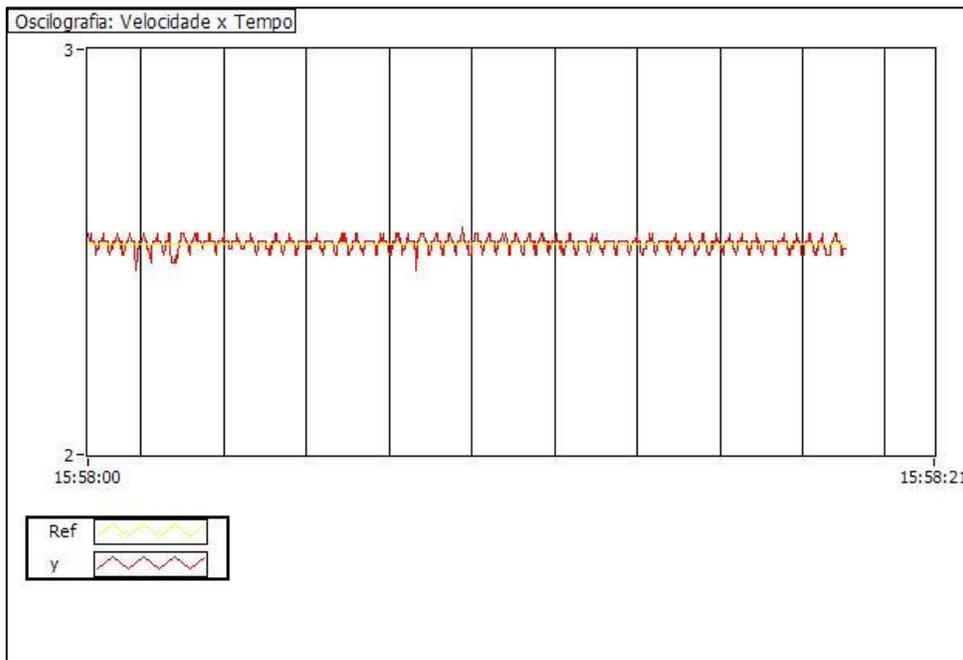
Outra maneira de se causar um distúrbio ao sistema, enquanto se mede a tensão relativa à rotação, é impedir o movimento de rotação com uma tampa de caneta, ou mesmo, com as mãos, tomando o devido cuidado. Quando é feita essa oposição ao movimento, a velocidade diminui e a tensão aumenta, a fim de manter a velocidade constante, de acordo com a referência, mostrando um ganho alto logo que se para de fazer a oposição, e estabilizando logo depois.

O procedimento para que a mesma experiência, agora utilizando a aquisição de dados e controle via software, mostrou-se muito intuitivo e fácil de configurar, sendo que o programa de controle de velocidade desenvolvido pela Datapool não possui funções complexas.

Um detalhe importante é que é imprescindível que se curte-circuite k_1 e k_2 durante a aquisição dos dados, para que o distúrbio funcione.

A Figura 29 mostra o gráfico com o comportamento da tensão de rotação do módulo, quando utilizado o programa PID VELOCIDADE para controlar a velocidade angular do módulo.

Figura 29 – Comportamento da tensão de rotação



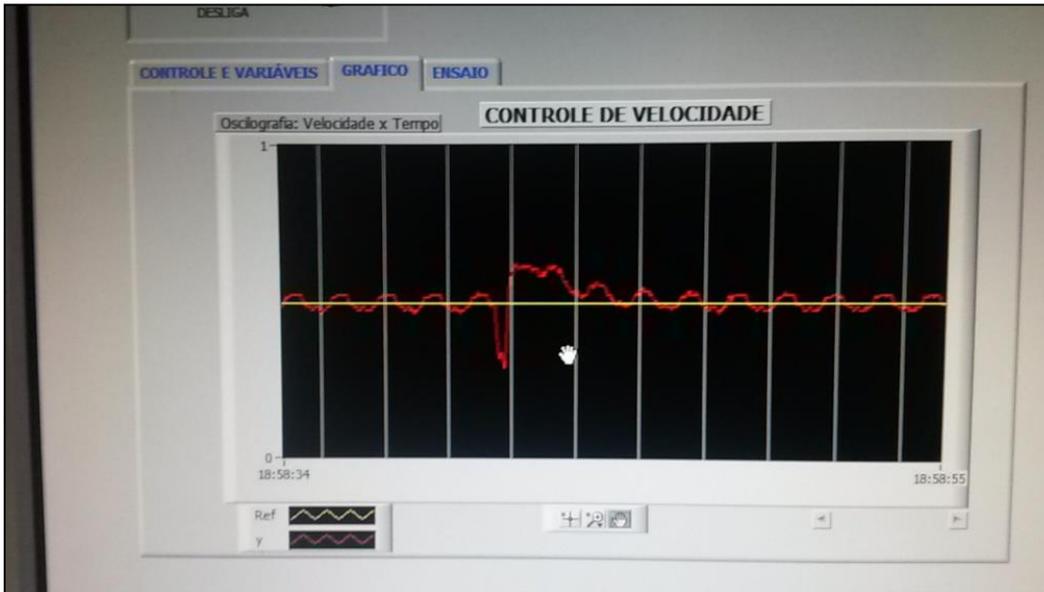
Fonte: (Autoria Própria)

O resultado obtido via software é exatamente igual àquele obtido com a placa de controle. A linha amarela representa o valor de referência escolhido, enquanto a linha vermelha representa a velocidade angular do módulo.

Como citado anteriormente, a tensão possui um comportamento oscilante, devido à sua desaceleração nos quadrantes 1 e 3, e sua reaceleração nos quadrantes 2 e 4, mantendo uma média muito próxima da tensão de referência.

Na Figura 30 é possível observar o comportamento da tensão, quando submetida ao distúrbio com o potenciômetro P1.

Figura 30 – Comportamento da tensão quando inserido o distúrbio



Fonte: (Autoria Própria)

O distúrbio causa uma alteração no valor da tensão, que logo é compensada pelo controlador.

Um ponto a ser ressaltado, é que a Datapool não disponibiliza em seu CD de instalação os diagramas de bloco desenvolvidos no LabVIEW, tornando o programa desenvolvido uma caixa preta, impedindo que o aluno possa fazer uma engenharia reversa e utilizar desse meio para entender os passos necessários para que seja concebido um controlador com o LabVIEW.

4.3 EXPERIÊNCIA 3 – CONTROLE DE POSIÇÃO ANGULAR

A experiência de controle de posição angular sugerida pelo manual da Datapool, assim como a de velocidade angular, visa integrar a placa controle PID posição com o módulo, de modo a controlar a posição da haste em um determinado *range*.

Esta experiência também possui uma segunda etapa, sugerida como uma experiência adicional pelo manual da Datapool, que é controlar a posição angular do módulo através da aquisição de dados utilizando a placa de aquisição de dados USB-6008 e fazer o controle PID via software, utilizando o LabVIEW. O software com o controlador foi desenvolvido pela Datapool e

apresentado ao usuário como um executável (.exe), não sendo possível ter acesso ao seu diagrama de blocos dentro do LabVIEW.

O procedimento de montagem e resultados obtidos em ambas as configurações são apresentados a seguir.

4.3.1 Procedimento de montagem utilizando placa de controle

Segundo Datapool (2014a), o procedimento de calibração deve ser o seguinte:

1. Inserir a placa controle PID posição no conector de acesso do módulo servomecanismo 2208, de tal forma que o primeiro pino da placa seja conectado no pino do conector identificado por $+V_U$. O esquema elétrico da placa de controle está ilustrado na Figura 10. A placa deverá ser inserida nos conectores $+V_U$, $+V_A$ e $-V_N$.
2. Alimentar o circuito da placa ligando o fio vermelho no +12 V e o fio marrom em -12 V, conforme identificação do conector C_{N1} da placa controle PID posição.
3. O *jumper* de seleção J_1/J_2 deve estar do lado esquerdo, para desabilitar o circuito de distúrbio.
4. Ligar o módulo e variar o potenciômetro REF da placa PID POSIÇÃO. Verificar visualmente que o ângulo do braço do servomecanismo altera-se de forma proporcional na faixa de aproximadamente 35° até 320° . Isto também pode ser verificado monitorando a tensão $+V_A$ para a informação de ângulo no conector de acesso de sinais do módulo (o valor dessa tensão está relacionado com valores angulares segundo relações já descritas anteriormente, sendo aproximadamente 1 V para cada 90°). Para um determinado ângulo ajustado no potenciômetro de referência, tentar deslocar suavemente a haste do mecanismo visando causar um distúrbio mecânico no sistema. Verificar que a malha de controle tende a voltar a haste na posição ajustada, comprovando assim a atuação do controlador. Desligando o módulo, deslocando a haste de posição e ligando novamente a chave de alimentação do sistema, verifica-se que a mesma volta na posição definida pelo valor de referência. Pode-se usar osciloscópios digitais para registrar a dinâmica da malha de controle.

5. Rotacionar o cursor do potenciômetro DISTURBIO da placa, para inserir distúrbio no sistema. Neste caso a haste se move continuamente, devido à instabilidade do sistema provocada pelo distúrbio inserido. Voltar o cursor do potenciômetro DISTURBIO para a posição inicial tornará o sistema estável novamente.

4.3.2 Procedimento de montagem utilizando software de controle

1. Efetuar as ligações indicadas na Figura 31, mantendo o módulo com a chave de alimentação (na parte de trás) do mesmo, desligada. Manter o *jumper* J₁/J₂ na posição esquerda.

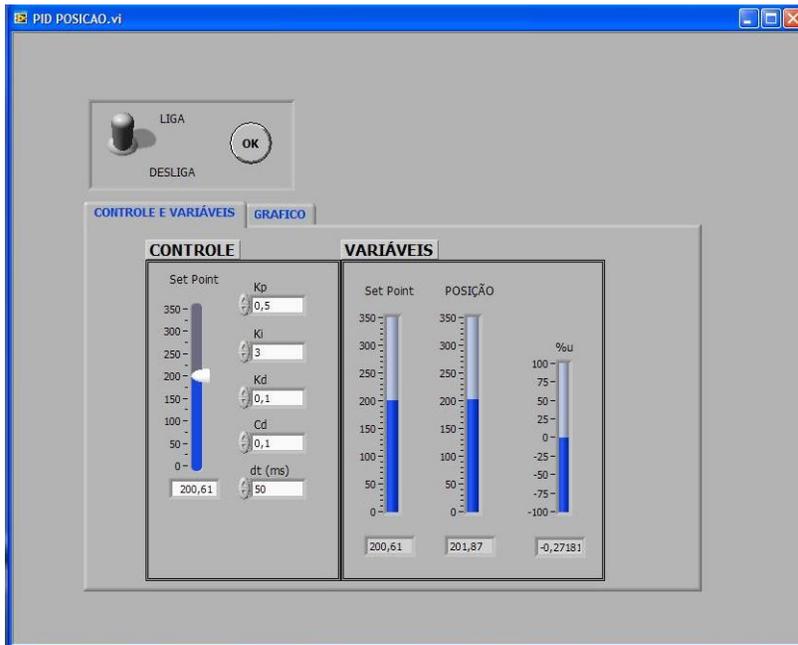
Figura 31 - Ligação entre as placas de aquisição e o módulo 2208

CONECTOR DE ACESSO	PLACA DE AQUISIÇÃO
+VA	A10 (pino 2)
+VD	AO0 (pino 14)
-VN	GND (pino 1)

Fonte: (DATAPOOL, 2014)

2. Na pasta “INSTALLER”, localizada dentro da pasta PID POSICAO, dar duplo clique em setup.exe para instalar o aplicativo. Após instalação abrir o aplicativo “PID POSICAO.exe”. Deverá aparecer uma tela semelhante a da Figura 32.

Figura 32 – Tela de configuração e supervisão de controle de velocidade



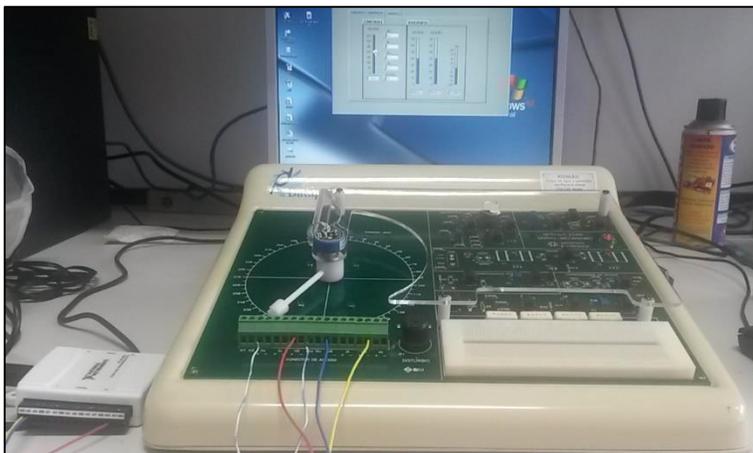
Fonte: Autoria Própria

3. Entrar com os ganhos: $K_P = 0,5$; $K_I = 3$; $K_D = 0,1$; $C_D = 0,1$; $dt \text{ (ms)} = 50$.
4. O valor de referência pode ser digitado no campo SET POINT ou simplesmente deslocar a barra até o valor desejado, por exemplo, 90.
5. Ligar o módulo na rede elétrica de 127 V, 60 Hz, e sua chave geral, localizada na parte de trás do equipamento. Esperar alguns segundos até o LED indicador do módulo acender.
6. Acionar a chave LIGA/DESLIGA, colocando na posição LIGA, do programa de controle. A malha de controle deve começar a operar e o indicador POSICAO deve indicar o valor da posição atual (depois de certo tempo este valor deve estar próximo do dado da referência). Outros valores de referência podem ser digitados e o sistema deve responder aos mesmos. Perturbações introduzidas pelo potenciômetro, distúrbio ou tentativas suaves em tentar segurar a haste mecanicamente, serão compensadas adequadamente pela malha de controle.
7. Na janela GRÁFICO, pode-se observar a entrada e a saída do sistema.
8. Para encerrar o controle, colocar a chave LIGA/DESLIGA na posição DESLIGA e pressionar o botão OK.
9. O programa será encerrado, mas o módulo manterá a última informação.

4.3.3 Observações sobre a experiência 3

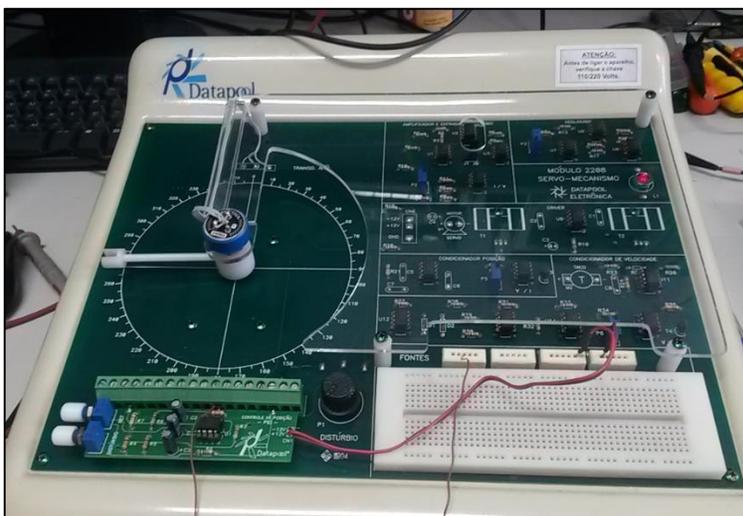
As Figuras 33 e 34 mostram as montagens da experiência de controle de posição, que funcionou como esperado e de forma bem simples foi possível verificar a atuação do controlador.

Figura 33 – Montagem da experiência 3 (via software)



Fonte: Autoria própria

Figura 34 – Montagem da experiência 3 (via placa de controle)



Fonte: Autoria Própria

Variando o potenciômetro REF da placa PID POSIÇÃO, pode-se escolher um ângulo para que a haste se mantenha, e o range de funcionamento de 35° a 320° foi verificado, dando origem à Tabela 3.

Tabela 3 – Relação ângulo x tensão

Ângulo (°)	Tensão (V)
35	0,344
90	0,896
180	2,123
320	3,911

Analisando os dados da tabela 3, percebe-se que a relação esperada de aproximadamente 1 V a cada 90° mostrou-se válida.

Apesar de a haste ser controlada, ela não mantém-se totalmente imóvel no ângulo requerido. Observa-se uma tendência a ficar setada em um determinado ângulo, mas de tempos em tempos há uma variação de cerca de 10°.

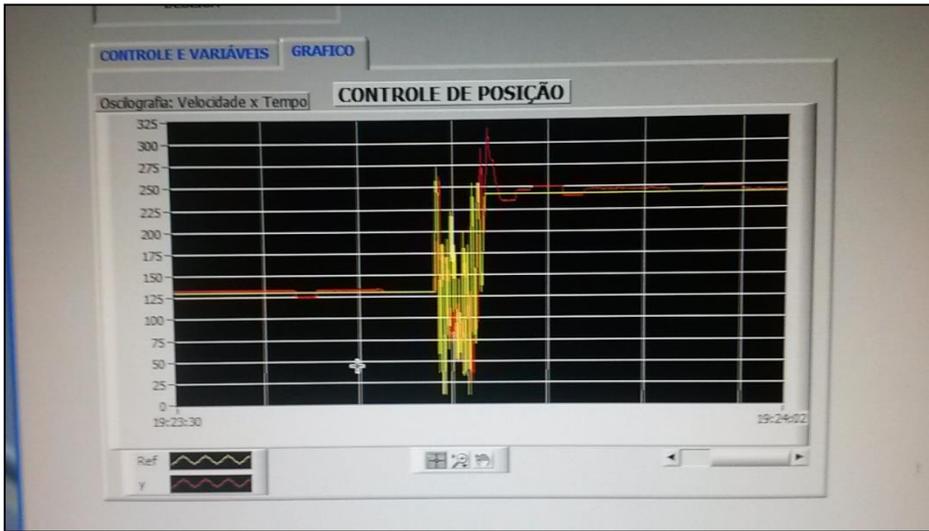
O distúrbio no caso dessa experiência pode ser causado manualmente, tentando mover a haste para cima ou para baixo, quando a mesma está fixada em um determinado ângulo. O sistema de controle percebe esse movimento e logo realiza o controle necessário para que a haste volte à posição requerida.

Uma outra maneira de perceber o controle é desligando o módulo e mudando a haste de lugar. Ao religar-se o módulo, a haste começa a girar e após um período de cerca de 3 segundos, voltará ao seu estado de equilíbrio, no ângulo setado anteriormente.

Com relação ao controle de posição via software, utilizando o programa PID POSIÇÃO, desenvolvido pela Datapool, assim como o de velocidade, é de fácil manuseio e apresentou os mesmos resultados obtidos pela placa de controle PID POSIÇÃO.

A Figura 35 mostra o gráfico gerado pelo programa, quando o sistema encontra-se setado em um ângulo, é desligado e mudando-se a posição da haste, e religado.

Figura 35 – Comportamento do sistema após religamento com ângulo setado



Fonte: (Autoria Própria)

A linha amarela representa o valor de referência, enquanto a linha vermelha representa o valor da tensão de posição, onde é possível observar o período instável após o módulo ser religado, e sua estabilização no ângulo de referência escolhido.

O mesmo erro obtido na experiência com a placa de controle, cerca de 10° também foi observado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando-se os resultados obtidos no Capítulo 3 deste trabalho, observa-se que as experiências sugeridas no manual da Datapool apresentaram os resultados esperados, sendo possível comprovar o funcionamento, assim como entender melhor as características do Kit Servomecanismo 2208, para que o mesmo possa vir a ser utilizado nas experiências de laboratório de controle linear.

Um ponto observado com a leitura do material oferecido pela Datapool e com as experiências realizadas, é que o distúrbio descrito nos manuais é empregado de maneira confusa, sendo que no material mais antigo da Datapool, ele é descrito somente como um aumento de torque no motor, quando na verdade, ele é um sinal que alterando o potenciômetro de maneira a aumentar e diminuir o seu valor rapidamente, percebe-se uma alteração no circuito que precisa ser contornado pela ação dos controladores.

A experiência de calibração do módulo mostrou-se ser de extrema importância, dado que o módulo apresenta resultados bastante discrepantes se não estiver devidamente configurado, afetando todo o desenvolvimento das experiências de controle de velocidade e posição.

As experiências de controle de velocidade e de posição, tanto utilizando as placas de controle PI, PD e PID, quanto através dos softwares, obtiveram os resultados esperados, sendo possível perceber claramente a necessidade e como são utilizados os diferentes tipos de controladores. De maneira visual, foi possível entender melhor os conceitos por trás dos controladores, assim como verificar o funcionamento do módulo, que se mostrou uma ferramenta de qualidade para o ensino.

5 SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS

Durante esse trabalho, ficou evidenciado que é possível ir além das experiências sugeridas no manual da Datapool, e criar diferentes experiências, principalmente envolvendo o LabVIEW.

Os softwares utilizados para introduzir o funcionamento dos controladores foram desenvolvidos pela Datapool, e são executáveis, não sendo possível visualizar seu diagrama de blocos, tornando os mesmos “caixas pretas”. Seria interessante, após a introdução do LabVIEW aos alunos, utilizar o software para que os mesmos possam desenvolver seus próprios controladores e os testem utilizando o equipamento de aquisição de dados, com o kit servomecanismo 2208.

Outro ponto seria desenvolver toda a modelagem do sistema, utilizando dados de entrada e saída do módulo, para que posteriormente a mesma possa ser comparada com a função de transferência do sistema, obtida pela Datapool.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L.A. **Introdução a Identificação de Sistemas**. Editora UFMG, 2000.

DATAPOL. **Servomecanismo 2208: Manual de Experiências e Calibração**. 2014a

DATAPOL. **Sistema de Controle Servomecanismo 2208: Manual Teórico**. 2014b

DOPLIM. **Multímetro HP modelo 34401A**. Disponível em: <<http://areal.doplim.pt/multimetro-agilent-hp-34401a-id-3981.html>> Acesso em 05 de fevereiro de 2015

GWINSTEK. **Osciloscópio GwInstek modelo GDS-1152A-U**. Disponível em: <http://202.39.218.46/en-global/products/Oscilloscopes/Digital_Storage_Oscilloscopes/GDS-1000A-U> Acesso em: 16 de novembro de 2014.

HELMUT. **Gerador de funções HP 33120A**. Disponível em: < <http://www.helmut-singer.de/imgg/hp33120a.jpg>> Acesso em 5 de fevereiro de 2015.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2003.

PERTENCE JUNIOR, A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. McGraw-Hill, 1988.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em: < <http://brasil.ni.com/>> Acesso em: 15 de novembro de 2014.

SERVO MOTOR. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula-4---servo-motor-13-03-2013-final.pdf>> Acesso em 15 de novembro de 2014

WIKIPEDIA. **National Instruments**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/National_Instruments>. Acesso em: 12 de dezembro de 2014.

APÊNDICE A – SUGESTÃO DE ROTEIRO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LCL-311 - Laboratório Controle Linear

LAB. 1 – UTILIZANDO O MÓDULO SERVOMECANISMO 2208 PARA CONTROLAR A VELOCIDADE DE UM SERVO MOTOR

INSTRUÇÕES

- 1 - As atividades de laboratório deverão ser feitas individualmente, e os relatórios, quando houver, em grupos de 4 (quatro) alunos, e entregue no prazo máximo de 1 semana após a realização do EXPERIMENTO;
- 2 - As soluções deverão ser de forma clara, simples e organizadas. Se houver figuras, tabelas e equações, essas deverão ser numeradas e referenciadas. Não deverá ser utilizado no relatório material já apresentado na introdução;
- 3 - Sempre que houver listagens de sessões do Matlab, estas deverão ser incluídas.
- 4 - A folha de rosto do relatório será a página que contém as atividades.

PROPOSTA

Neste laboratório será introduzido o conceito de controladores, associado ao servomecanismo 2208 da Datapool, de modo a controlar a velocidade de rotação do servo motor.

OBJETIVOS

Fazer o controle de velocidade de um servo motor, utilizando o kit da Datapool, de modo a entender melhor como é empregado um controlador PI, assim como familiarizar-se com dispositivos de aquisição de dados e com o LabVIEW.

REFERÊNCIAS

- 1 - OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice Hall do Brasil, 5a. Ed., 2010.
- 2 - DATAPOOL ELETRÔNICA. **Servomecanismo 2208: Manual de Experiências e Calibração**.
- 3 - DATAPOOL ELETRÔNICA. **Sistema de Controle Servomecanismo 2208: Manual Teórico**.

INTRODUÇÃO

Conceitos sobre controladores eletrônicos

Uma malha de controle pode ser constituída por certo número de componentes elétricos. Estes elementos geralmente envolvem elementos de sistemas elétricos básicos como resistores e capacitores, juntamente com circuitos ativos a semicondutores. Entre os dispositivos ativos disponíveis podem-se citar os amplificadores operacionais, muito utilizados em instrumentação e sistemas de controle convencionais, onde se destacam os filtros ativos e os controladores/compensadores tipo PID ou *Lead/Lag*.

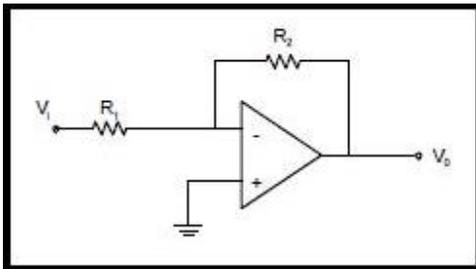
Controlador de ação proporcional (P)

No controlador proporcional existe uma relação linear entre o sinal de erro de entrada e a saída da malha, assim, a saída do processo terá uma resposta proporcional ao sinal de comando do atuador. O sistema de equações (1) representa o controlador proporcional.

$$\begin{cases} P = K_p e(t) \\ K_p = \frac{R_2}{R_1} \end{cases} \quad (1)$$

Onde K_p é uma constante de proporcionalidade. A Figura 1 ilustra o diagrama esquemático de um controlador proporcional.

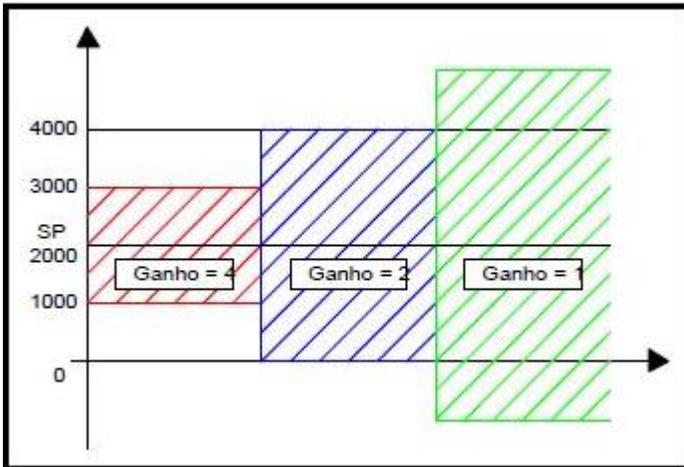
Figura 1 – Controlador de ação proporcional



A banda proporcional por definição é expressa em porcentagem e corresponde a variação de 0 a 100% do fundo de escala da variável de processo. Ela se situa acima e abaixo do *setpoint*. A banda proporcional é o inverso do ganho, segundo a equação (2). O gráfico da Figura 2 mostra a posição da banda para ganhos 1, 2 e 4.

$$BP = \frac{100\%}{K_p} \quad (2)$$

Figura 2 – Banda proporcional para ganhos 1, 2 e 4.



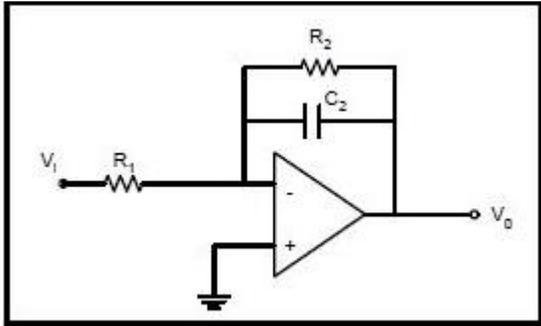
Controlador de ação integral (I)

A ação integral é aquela na qual a saída do controlador aumenta em uma taxa proporcional ao erro da variável controlada. A saída do controlador é a integral do erro ao longo do tempo, multiplicada pela constante de proporcionalidade. O sistema de equações (3) mostra a saída do controlador de ação integral.

$$\left\{ \begin{array}{l} I = K_I \int_0^t e(t) dt \Rightarrow I = K_I \sum e(k)T \\ K_I = \frac{1}{T_I} \\ T_I = R_1 * C_2 \end{array} \right. \quad (3)$$

Onde K_I é uma constante de proporcionalidade, denominada ganho integrativo, e T_I é chamado tempo integral, o qual ajusta a ação de controle integral. A Figura 3 ilustra o diagrama esquemático de um controlador integral analógico prático, sendo que um ideal teria um valor de R_1 muito grande.

Figura 3 – Controlador integral



No controle integral de um processo, o sinal de controle, o sinal de saída do controlador, em qualquer instante, é igual à área sobre a curva do sinal de erro atuante até aquele instante.

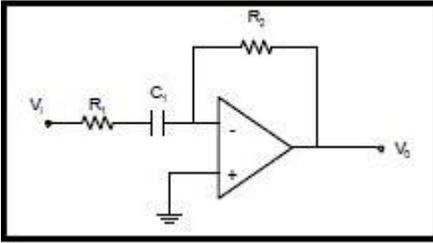
Controlador de ação derivativa (D)

A ação derivativa de um controlador é diretamente proporcional à taxa de variação do erro da variável controlada. Assim sendo, essa ação nunca é utilizada de forma isolada, mas sempre em conjunto com as ações proporcional ou integral, pois, no caso de se ter um erro nulo ou constante, a saída do controlador não irá apresentar nenhuma variação no sinal de saída. O sistema de equações (4) mostra a saída do controlador de ação derivativa:

$$\left\{ \begin{array}{l} D = K_D \frac{de(t)}{dt} \Rightarrow D = K_D \frac{\Delta e}{\Delta t} \\ K_D = T_D \\ T_D = R_2 * C_1 \end{array} \right. \quad (4)$$

Onde K_D é uma constante de proporcionalidade, denominada ganho derivativo, e T_D é uma constante chamada tempo derivativo. A Figura 4 ilustra um controlador derivativo prático, sendo que um ideal teria um resistor R_1 muito pequeno.

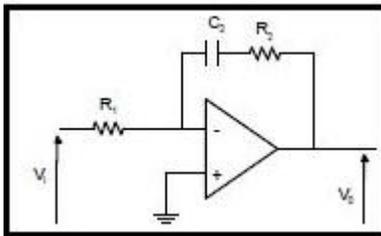
Figura 4 – Controlador derivativo



Controlador proporcional-integral (PI)

Os controladores proporcional-integral são empregados em muitos sistemas de controle. A Figura 5 ilustra a estrutura básica desses controladores, quando sua implementação é analógica.

Figura 5 – Controlador PI



A ação de controle de controle proporcional-integral é definida pela equação (5):

$$PI = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Tanto K_P como T_I são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_P afeta tanto a parte proporcional como a parte integral da ação de controle. O inverso do tempo integral é denominado taxa de restabelecimento. Essa taxa é o número de vezes por minuto que a parte proporcional da ação de controle é duplicada e ela é medida em termos de repetições por minuto.

Sistema de aquisição de dados (SAD) USB-6008

Para que seja feita a aquisição de dados, faz-se necessário o uso do SAD USB-6008 da National Instruments, mostrado na Figura 6.

Figura 6 – USB-6008



O USB-6008 oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações simples de *data logging*, medições portáteis e experimentos de laboratórios acadêmicos. Esse dispositivo é acessível aos estudantes, mas suficientemente poderoso para aplicações de medição mais sofisticadas. É possível também programar esse dispositivo com o LabVIEW ou linguagem C e o software de serviços de medição NI-DAQmx Base para ter um sistema de medição customizado.

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LCL-311 - Laboratório Controle Linear

**LAB. 1 - UTILIZANDO O MÓDULO SERVOMECANISMO 2208 PARA
CONTROLAR A VELOCIDADE DE UM SERVO MOTOR**

Aluno: _____ N°: _____

Aluno: _____ N°: _____

Aluno: _____ N°: _____

Controle de Velocidade do Servomecanismo 2208

Nesta experiência, será feito o controle do servomecanismo 2208 da Datapool, utilizando dois métodos. Primeiro através da placa de controle PID Velocidade, e posteriormente via software através de um programa feito no LabVIEW, utilizando o sistema de aquisição de dados USB-6008.

Procedimento de montagem utilizando placa de controle

1. Inserir a placa controle PID velocidade no conector de acesso do módulo servomecanismo 2208, de tal forma que o primeiro pino da placa seja conectado no pino do conector identificado por k_1 . O esquema elétrico da placa de controle está ilustrado na Figura 8.
2. Alimentar o circuito da placa ligando o fio vermelho no +12 V e o fio marrom em -12 V, conforme identificação do conector C_{N1} da placa controle PID velocidade.
3. O *jumper* de seleção J_1/J_2 deve estar do lado esquerdo, para desabilitar o circuito de distúrbio.
4. Ligar a chave de energia do módulo, atuar em V_{REF} da placa para definir uma rotação no sistema. Monitorar com dois voltímetros (escalas em tensões contínuas) as tensões V_R (valor de referência da velocidade desejada), no pino 3 do CI da placa de controle PID velocidade e $+V_N$ (informação da rotação medida do sistema), no conector do módulo 2208 e observar que este valor tende a ser igual ao da referência, comprovando o funcionamento da malha de controle de velocidade. O controlador PI é implementado pelo segundo amplificador operacional do circuito integrado LM358, pelos resistores R_2 , R_3 , R_4 e o capacitor C_1 . O ganho proporcional é dado pela relação $R_4/R_2(R_4/R_3)$, assim $K_P = 1$ (próximo do valor calculado pela Datapool para que o circuito fosse estável). O ganho integral é expresso pelo inverso de $R_2C_1(R_3C_1)$, logo $K_I = 1$ (próximo do valor calculado pela Datapool para que o circuito fosse estável).
5. Observar a ação do controle no servomecanismo e anotar o seu comportamento. A haste gira a uma velocidade constante?
6. Esboçar o gráfico da velocidade real x velocidade referência utilizando o osciloscópio

Procedimento de montagem utilizando software de controle

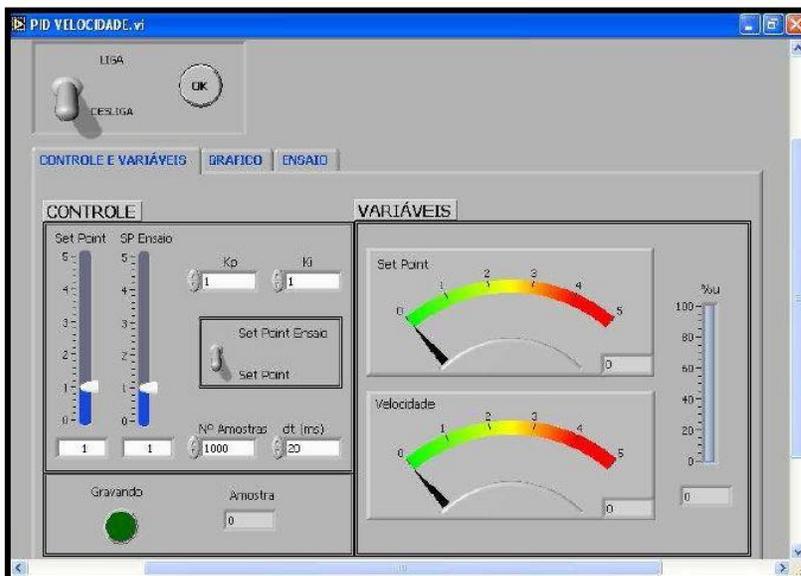
1. Conectar o sistema de aquisição (USB 6008) entre o PC e o módulo 2208.
2. Efetuar as ligações indicadas na Figura 7, mantendo o módulo com a chave de alimentação (na parte de trás) do mesmo, desligado. Manter o *jumper* J_1/J_2 na posição esquerda.

Figura 7 - Ligação entre as placas de aquisição e o módulo 2208

CONECTOR DE ACESSO	SISTEMA DE AQUISIÇÃO - SAD
+VN	AI1 (pino 5)
+Vu	AO0 (pino 14)
-VN	GND (pino 1)

3. No menu Iniciar do PC, abrir o programa “PID VELOCIDADE”. Deverá aparecer uma tela semelhante a da Figura 8.

Figura 8 – Tela de configuração e supervisão de controle de velocidade



4. Entrar com os ganhos: $K_P = 1$; $K_I = 1$.
5. O valor de referência pode ser digitado no campo SET POINT ou simplesmente deslocar a barra até o valor desejado, por exemplo, 2.
6. Ligar o módulo na rede elétrica de 127 V, 60 Hz, e sua chave geral, localizada na parte de trás do equipamento. Esperar alguns segundos até o LED indicador do módulo acender.

7. Acionar a chave LIGA/DESLIGA, colocando na posição LIGA, do programa de controle. A malha de controle deve começar a operar e o indicador VELOCIDADE deve indicar o valor da rotação (em volts) atual (depois de certo tempo este valor deve estar próximo do dado da referência). Outros valores de referência podem ser digitados e o sistema deve responder aos mesmos. Perturbações introduzidas pelo potenciômetro, distúrbio ou tentativas suaves em tentar segurar a haste com uma caneta, por exemplo, serão compensadas adequadamente pela malha de controle.

8. Na janela GRÁFICO, pode-se observar a entrada e a saída do sistema.

9. Para visualizar o distúrbio do sistema, mude J_1/J_2 na posição direita, e curto circuitar k_1 e k_2 . Colocar o set point do programa em 0,5 V, e plotar o gráfico atuando o potenciômetro P_1 distúrbio e observar a correção. A escala do gráfico e ensaio pode ser mudada, entrando com o valor desejado na escala do próprio gráfico.

10. A chave SET POINT ENSAIO serve para realizar o registro da dinâmica do sistema, com o valor do SET POINT, no bloco identificado por VARIÁVEIS, mudando do valor do campo SET POINT para o valor SET POINT ENSAIO. Os ensaios realizados podem ser visualizados na janela ENSAIO. O número de amostras da experiência e o período de varredura da malha de controle podem ser ajustados para se obter a escala de tempo do ensaio. Durante o ensaio, o LED GRAVANDO ficará aceso, desligando no término do mesmo.

11. Os gráficos dos ensaios também são gravados em um arquivo “velocidade.xls” na unidade C, o qual pode ser visto, posteriormente, em um gráfico do Excel.

12. Para encerrar o controle, colocar a chave LIGA/DESLIGA na posição DESLIGA e pressionar o botão OK.

13. O programa será encerrado, mas o módulo manterá a última informação.

14. Utilize o programa para analisar o comportamento gráfico da velocidade, utilizando o distúrbio e comente sobre o observado.