

Capítulo 1

Controle Proporcional de um Motor de Corrente Contínua

1.1 Objetivo

O objetivo desta prática é introduzir ao estudante as noções básicas de realimentação e controle, implementando um sistema de controle proporcional para posicionar o eixo de um motor de corrente contínua. Serão desenvolvidos os conceitos de modelagem da planta e de implementação de um controlador através de uma plataforma de instrumentação virtual baseada em LabVIEW.

1.2 Modelo matemático

Um motor elétrico de corrente contínua é composto por uma parte móvel (rotor), definida por um conjunto de espiras (bobina), e uma parte fixa (estator), geradora de campo magnético. O seguinte esquema eletromecânico, Figura 1.1, representa o motor elétrico de corrente contínua:

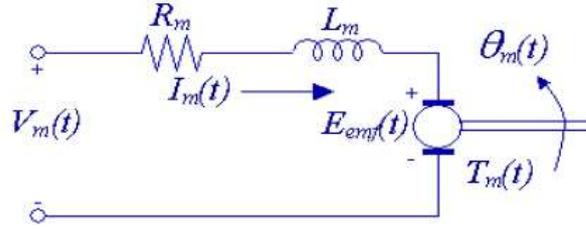


Figura 1.1: Diagrama eletromecânico do motor de corrente contínua.

sendo $V_m(t)$ a tensão aplicada à bobina, $I_m(t)$ a corrente, R_m a resistência de armadura, L_m a indutância característica do rotor, E_{emf} a força contraeletromotriz induzida na bobina pelo campo magnético do estator, $T_m(t)$ o torque desenvolvido pelo motor e $\theta_m(t)$ a posição angular do eixo do motor.

Usando a lei de Kirchhoff de tensão, obtém-se a equação abaixo:

$$V_m - R_m I_m - L_m \frac{dI_m}{dt} - E_{emf} = 0. \quad (1.1)$$

Como geralmente $L_m \ll R_m$, pode-se desprezar a indutância do motor, assim:

$$I_m = \frac{V_m - E_{emf}}{R_m}. \quad (1.2)$$

Sabe-se que a força contraeletromotriz gerada pelo motor é proporcional à velocidade do rotor, ω_m , tem-se:

$$I_m = \frac{V_m - K_m \dot{\theta}_m}{R_m} \quad (\dot{\theta}_m = \omega_m), \quad (1.3)$$

sendo K_m a constante contraeletromotriz.

Do ponto de vista mecânico, aplicando a segunda lei de Newton ao movimento do rotor do motor:

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - \frac{T_l}{\eta_g K_g}, \quad (1.4)$$

sendo T_l o torque na carga, K_g a relação de engrenagens entre o motor e a carga, e η_g a eficiência da caixa de engrenagens; e ao movimento da carga acoplada ao eixo do motor:

$$J_l \ddot{\theta}_l = T_l - B_{eq} \dot{\theta}_l, \quad (1.5)$$

sendo B_{eq} o coeficiente viscoso de amortecimento.

Obtém-se a equação dinâmica do movimento dada por:

$$J_l \ddot{\theta}_l = \eta_g K_g T_m - \eta_g K_g J_m \ddot{\theta}_m - B_{eq} \dot{\theta}_l. \quad (1.6)$$

Utilizando as transformações $\theta_m = K_g \theta_l$ e $T_m = \eta_m K_t I_m$ (sendo η_m a eficiência do motor e K_t a constante de torque do motor), a equação (1.6) pode ser reescrita como:

$$J_l \ddot{\theta}_l + \eta_g K_g^2 J_m \ddot{\theta}_l + B_{eq} \dot{\theta}_l = \eta_g \eta_m K_g K_t I_m. \quad (1.7)$$

Finalmente, combinando as equações elétrica, (1.3), e mecânica, (1.7), temos:

$$J_{eq} R_m \ddot{\theta}_l + (B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_m K_t K_g^2) \dot{\theta}_l = \eta_g \eta_m K_t K_g V_m, \quad (1.8)$$

sendo $J_{eq} = J_l + \eta_g J_m K_g^2$.

A função de transferência que estabelece a relação entre a posição angular da carga acoplada ao eixo, θ_l e a tensão aplicada ao motor, V_m , é dada por:

$$\frac{\theta_l(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g \eta_m K_t K_g}{J_{eq} R_m s^2 + (B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_m K_t K_g^2) s}. \quad (1.9)$$

1.3 Pré-laboratório

Considerando os parâmetros descritos no Apêndice A, a função de transferência do motor CC utilizado nesta prática é dada por (Obs.: Atenção à transformação de unidades: radianos \rightarrow graus.):

$$G(s) = \frac{\theta_l(s)}{V_m(s)} = \frac{3674}{s^2 + 37s}. \quad (1.10)$$

O controlador proporcional, Figura 1.2, é implementado no controle do motor pela equação:

$$V_m = K_P(\theta_l^d - \theta_l) \quad (1.11)$$

sendo θ_l^d o valor desejado para o ângulo da carga.

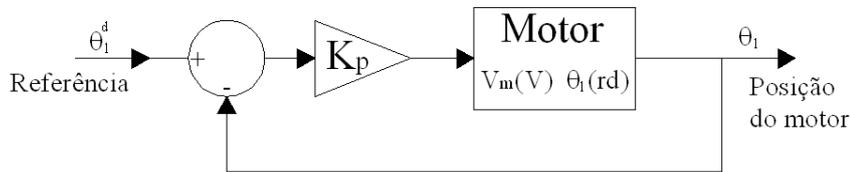


Figura 1.2: Planta do controlador proporcional.

1. Calcule K para $t_r < 0.065$ s e $MP < 10\%$.
2. Calcule o erro de regime para o sistema em malha fechada.

1.4 Procedimento de laboratório

1.4.1 Ligações e conexões

A primeira tarefa é assegurar que todo o sistema está ligado corretamente. Se você está inseguro com a ligação, chame o professor. Com todos os sinais ligados corretamente você estará pronto para iniciar o laboratório.

1.4.2 Implementação

Segue abaixo os passos para a construção do programa de controle proporcional no LabVIEW para o motor de corrente contínua.

1. No diagrama de blocos do LabVIEW, adicione um ciclo **Timed Loop** (**Programming >> Structures >> Timed Structures**).
2. Em seguida clique com o botão direito do mouse em **Loop Condition** (canto inferior direito do quadro **Timed Loop**), e clique em **Create >> Control**.
3. Para controlar o tempo de amostragem do programa, clique com o botão direito do mouse em **dt** e selecione **Create >> Control**. Em seguida, ajuste o valor para *30ms* no Painel Frontal.

LEITURA DO ENCODER:

4. Na lateral esquerda e exterior ao ciclo **Timed Loop** adicione o bloco **Create Channel** (**MeasurementI/O >> NI-DAQmx**). Em seguida, selecione a opção **Count Edges** (**CI Cnt Edges>>Counter Input**). No mesmo bloco adicione uma constante na entrada **Count Direction** e selecione a opção **Externally Controlled**. Na entrada **Counter**, adicione uma constante e selecione a opção **I/O Dev/ctr0**.
5. Adicione o bloco **Start** (**MeasurementI/O >> NI-DAQmx**). Conecte a saída **task out** do bloco **CI Cnt Edges** em **task/channels in** do bloco **Start**, e a saída **error out** do bloco **CI Cnt Edges** à entrada **error in** do bloco **Start**.
6. Agora, dentro do ciclo **Timed Loop**, adicione um bloco **Read** (**MeasurementI/O >> NI-DAQmx**). Selecione o modo **Counter U32 1 Samp** (**Analog BBL >> Counter >> Single Sample >> U32**). Em seguida conecte-o ao bloco **Start** inserido na etapa anterior. Esse bloco realiza a leitura dos sinais do encoder.
7. Na lateral direita e externa ao bloco **Timed Loop**, adicione um bloco **Stop** (**Measurement I/O >> NI-DAQmx**) e conecte as entradas **task/channels in** e **error in** às saídas **task out** e **error out**, respectivamente, do bloco **Read** adicionado no passo anterior. Em seguida, adicione o bloco **Clear** (**Measurement I/O >> NI-DAQmx**) e conecte-o ao bloco **Stop** da mesma forma.
8. Dentro do ciclo **Timed Loop**, uma conversão numérica torna-se necessária para identificar a direção de rotação do encoder, positiva ou negativa. Assim, conecte

o bloco **I32 (Programming >> Numeric >> Conversion)** à saída **Data** do bloco **Read**.

9. Na sequência, acrescente um bloco de divisão (**Programming>>Numeric**), conectando a saída do bloco **I32** na entrada do numerador e uma constante com valor **1** na entrada do denominador. Essa transformação aplica a relação da redução mecânica à leitura de posição do eixo caso o encoder esteja posicionado antes do sistema de engrenagens.
10. Adicione agora um bloco de multiplicação (**Programming>>Numeric**), conectando a saída do bloco anterior a uma das entradas e adicione uma constante com valor **360** na outra entrada. Esse bloco matemático transforma a unidade dos dados lidos no encoder para graus ($^{\circ}$).
11. Em seguida, adicione outro bloco de divisão (**Programming>>Numeric**), conectando a saída do bloco matemático anterior à entrada do numerador e uma constante com valor **4096** na entrada do denominador. Esse valor é referente à resolução do encoder utilizado.

SISTEMA DE CONTROLE PROPORCIONAL:

12. Agora, adicione no **Painel Frontal** um Pointer Slide (**Num Ctrls**) para colocar o valor do ângulo de referência.
13. Para visualizar graficamente a evolução da posição do eixo do motor e a referência desejada, adicione no **Painel Frontal** um **Waveform Chart (Graph Indicators)**. Na janela de **Diagrama de Blocos**, adicione um bloco **Bundle (Programming >> Cluster & Variant)**, conecte a saída do ângulo de referência e a leitura do encoder às entradas **element 0** e **element 1**, respectivamente. Conecte a saída **output cluster** do bloco **Bundle** à entrada do bloco criado pelo **Waveform Chart**.
14. Em seguida, calcule o erro entre o ângulo de referência e o ângulo medido pelo encoder. Adicione um bloco de subtração (**Programming>>Numeric**) para calcular o erro. Conecte na entrada superior (+) do bloco de subtração o valor do ângulo de referência (saída do controlador numérico adicionado no passo 12),

e na entrada inferior (-) do bloco de subtração o valor do ângulo obtido a partir do encoder (saída do bloco de divisão adicionado no passo 10).

15. Adicione no **Painel Frontal** um controle numérico (**Num Ctrls**) para colocar o valor do ganho Proporcional K_p .
16. Multiplique o ganho proporcional K_p com o valor de erro do ângulo, adicionando um bloco de multiplicação (**Programming>>Numeric**). Em uma das entradas do bloco conecte o valor do erro do ângulo (saída do bloco de subtração), e na outra entrada conecte o valor do ganho Proporcional. O valor que sai deste bloco de multiplicação é o valor de tensão que deve ser aplicado ao motor para que seja alcançada a posição desejada.

ACIONAMENTO DO MOTOR CC:

17. Para que o motor não receba valores de tensão acima do permitido, adicione o bloco **In Range and Coerce** (**Programming >> Comparison**) para que o mesmo opere na faixa de 6 à -6 V. Desse modo, adicione um constante com valor **6** na entrada de **upper limit**, uma constante com valor **-6** na entrada de **lower limit** e na entrada **x** conecte a saída do bloco de multiplicação adicionado no passo anterior.
18. Para controlar a habilitação de envio de tensão para o motor, inicialmente adicione no **Painel Frontal** um **Push Button** (**Buttons**). Agora, na janela de **Diagrama de Blocos**, adicione o bloco **Select** (**Programming >> Comparison >> Select**). Conecte a saída do bloco **In Range and Coerce**, adicionado no passo 17, na entrada **t**, adicione uma constante com o valor 0 na entrada **f**, e por fim, conecte o **Push Button** na entrada **s**. Assim, se o controlador não estiver habilitado, o sistema enviará tensão nula ao motor.
19. Crie uma variável local do **Push Button** (**Create >> Local Variable**) e coloque-a do lado externo da estrutura **Timed Loop**. Adicione à sua entrada uma constante com o valor **F** (**Create >> Constant**). Esse procedimento faz com que o controlador esteja sempre desabilitado quando o instrumento virtual é reiniciado.

20. Na lateral esquerda e externa ao bloco **Timed Loop**, adicione outro bloco **Create Channel (MeasurementI/O >> NI-DAQmx)** e selecione o modo **Voltage (AO Voltage>>Analog output>>Voltage)**. Em seguida adicione duas constantes a esse bloco: **minimum value** e **maximun value**, com os valores **-6** e **+6**, que são as limitações da tensão enviada ao motor CC. Na entrada **Physical channels** desse mesmo bloco adicione outra constante, selecionando-a como **I/O Dev1/ao0**.
21. Ainda no exterior do bloco **Timed Loop**, adicione outro bloco **Start (Programming >> MeasurementI/O >> NI-DAQmx)** e conecte-o ao bloco **Voltage** através dos sinais **task out**→**task/channels in** e **error out**→**error in**.
22. Agora, dentro da estrutura **Timed Loop**, adicione um bloco **Write (Measurement I/O >> NI-DAQmx >> Write)**. Selecione o modo **Analog DBL 1Chan 1Samp (Analog >> Single Channel >> Single Sample >> DBL)**. Conecte as entradas **task/channels in** e **error in** às saídas **task out** e **error out**, respectivamente, do bloco **Start**, adicionado no passo anterior. Em seguida conecte a saída do bloco **Select**, adicionado no passo 18, na entrada **data**.
23. Para visualizar graficamente a evolução da tensão no motor, adicione no **Painel Frontal** um **Waveform Chart (Graph Indicators)**. Na janela de **Diagrama de Blocos**, conecte a saída do bloco **Select**.
24. Na lateral direita e externa ao bloco **Timed Loop**, adicione outro bloco **Stop (Measurement I/O >> NI-DAQmx)** e conecte as entradas **task/channels in** e **error in** às saídas **task out** e **error out**, respectivamente, do bloco **Write**, adicionado no passo anterior. Em seguida, adicione outro bloco **Clear (Measurement I/O >> NI-DAQmx)** e conecte-o ao bloco **Stop** da mesma forma.

Seguindo estes passos, o **Painel Frontal** e o **Diagrama de Blocos** deverão ficar similares às Figuras 1.3 e 1.4.

Dica: Configure o **Waveform Chart** no **Painel Frontal** para melhor visualização das curvas. Clique com o botão direito no gráfico e selecione para exibir a barra de rolagem no eixo x (**Properties >> Appearance >> [show x scroll bar]**). Em (**Properties >> Scales**), defina o **grid style** para os eixos **x** e **y** selecionando a 3ª

opção. Retire a seleção no item **autoscale** e defina a escala fixa para o eixo **x** de **0** a **10000** e para o eixo **y** de **-10** a **30**. Selecione o item **scale x ticks**. Novamente clicando com o botão direito no gráfico, em (**Chart History Length**), insira o valor 10000 para determinar o tamanho do buffer de dados do gráfico. Em (**Y scale**), tire a seleção da opção **Loose Fit**.

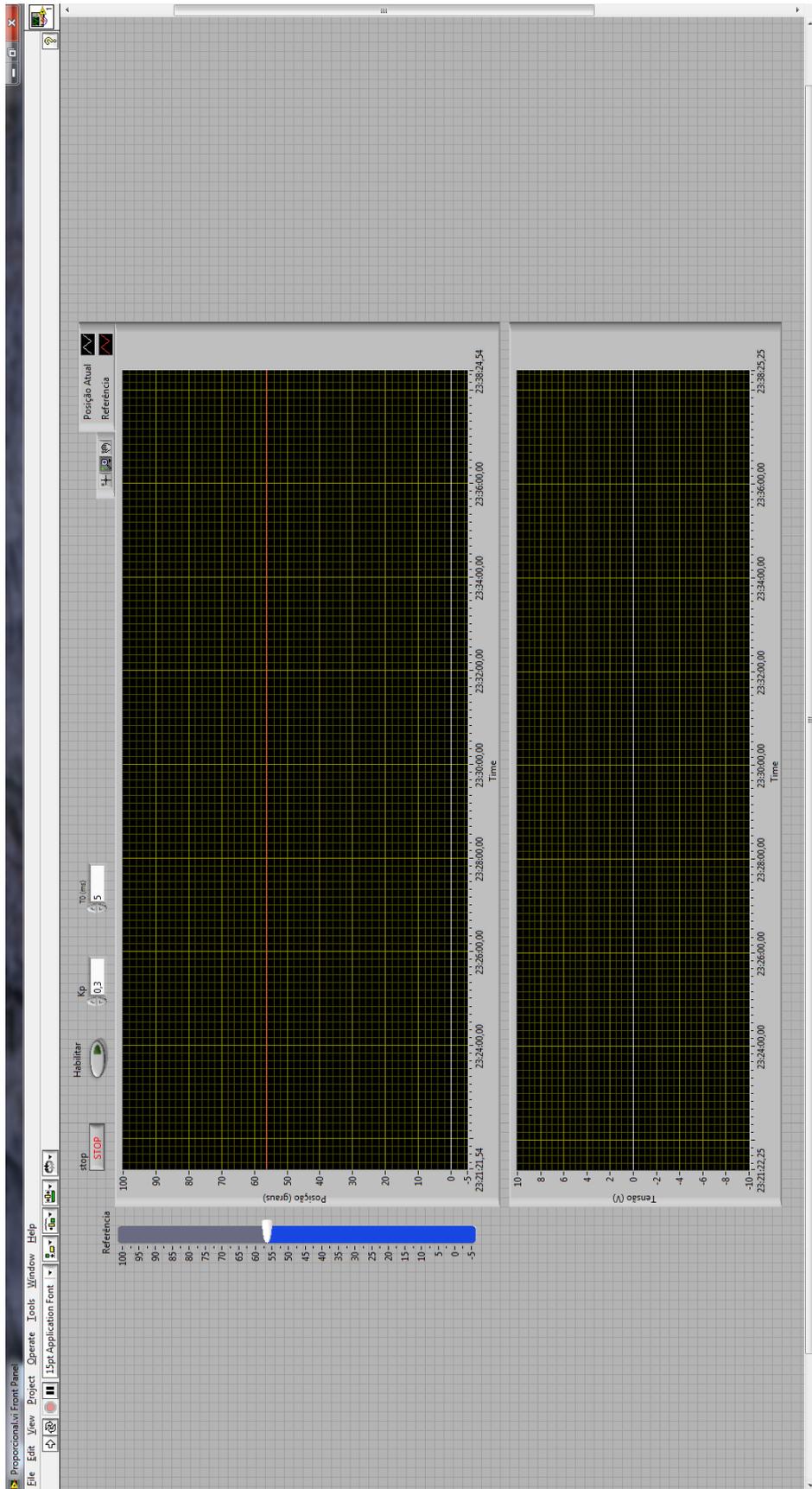


Figura 1.3: Painel Frontal do controlador proporcional.

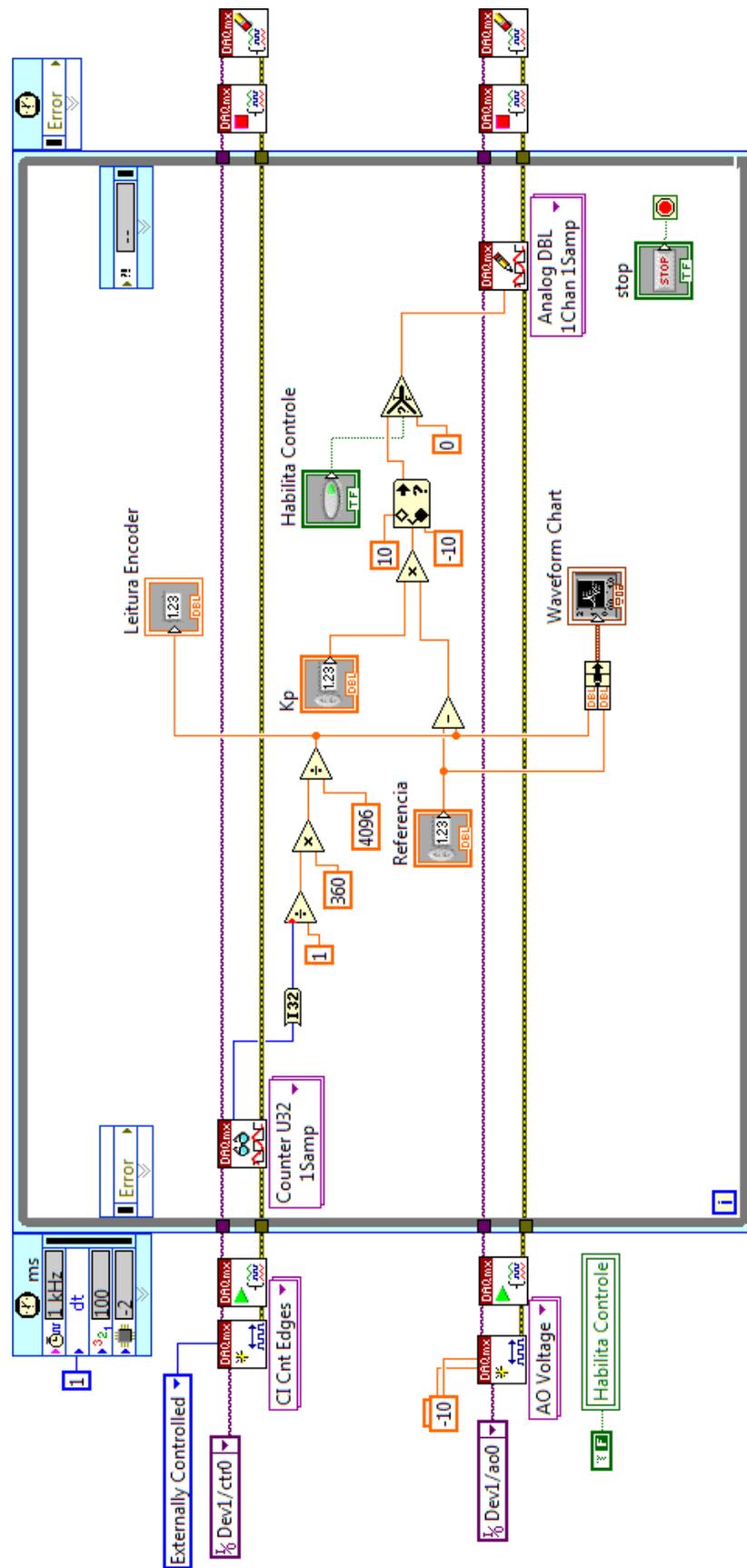


Figura 1.4: Diagrama de Blocos do controlador proporcional.

1.5 Apêndice A: Parâmetros do motor (SRV02 - Quanser)

Símbolo	Nome	Valor	Unidades
K_t	Constante de Toque do Motor	0.00767	$N.m$
K_m	Constante da Força Contra Eletromotriz	0.00767	$V/(rad/s)$
R_m	Resistência da Armadura	2.6	Ω
K_g	Redução	70	
B_{eq}	Coefficiente Viscoso de Amortecimento	$4e^{-3}$	$N.m.s$
J_m	Momento de Inércia do Rotor	$3.87e^{-7}$	$kg.m^2$
J_{eq}	Momento de Inércia Equivalente da Carga	$2e^{-3}$	$kg.m^2$
η_m	Eficiência do Motor	0.69	
η_g	Eficiência da Redução	0.9	

Prática 01 - Controle Proporcional

Data: _____

Integrantes do Grupo:

1: _____

2: _____

3: _____

4: _____

5: _____

1. Preencha a tabela abaixo com valores obtidos do gráfico de posição do Painel Frontal.

K	MP (%)	t_r (ms)	Erro de regime (°)
0,05			
0,1			
0,3			
0,5			
0,7			

2. Analise o efeito do ganho K no sobre-sinal ($MP\%$) e no tempo de subida (t_r).
