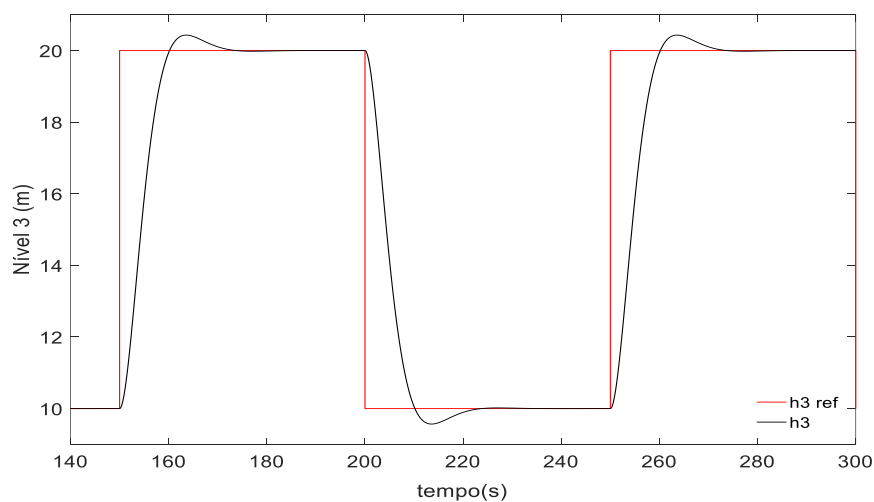
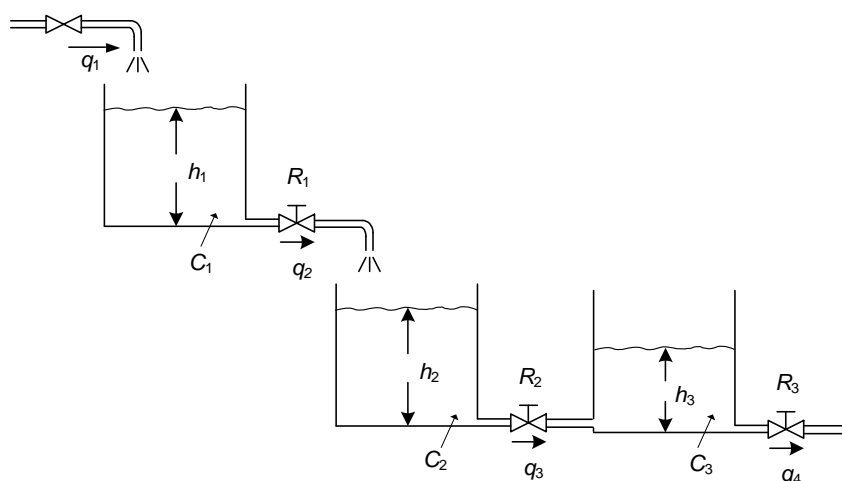



CONTROLO DE SISTEMAS

Guia laboratorial nº 4 – **Simulação de Sistemas (Matlab)**



	ISEL <small>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA</small>	Secção de Automação e Eletrónica - DEEEA Controlo de Sistemas (Laboratório)	T4 – Simulação de Sistemas Data: Abril 2022
---	--	--	--

DESCRIÇÃO E OBJETIVO DESTE TRABALHO LABORATORIAL

Pretende-se com este trabalho laboratorial que os alunos desenvolvam competências em áreas fulcrais do Controlo como, Funções de Transferência, Diagramas de Blocos, Dimensionamento de Controladores, Exatidão e Estabilidade.

O principal objetivo deste trabalho é efetuar o controlo do nível de um sistema hidráulico constituído por 3 tanques, sendo este processo um sistema de 3ª ordem. Para concretizar este objetivo é necessário efetuar a modelização dos vários blocos que constituem o diagrama de blocos em cadeia fechada, entre eles, um sistema hidráulico de 3ª ordem e um dimensionamento de um controlador linear. A evolução deste trabalho laboratorial será feita por vários passos no ambiente *Matlab* e *Simulink*.

REQUISITOS E CONHECIMENTOS PRÉVIOS

- *Ter uma versão de Matlab instalada e a funcionar num portátil ou pc;*
- *Conhecimentos na ótica do utilizador do ambiente Matlab e Simulink;*
- *Modelos de Sistemas (Funções de Transferência , polos, zeros);*
- *Álgebra dos diagramas de blocos;*
- *Dimensionamento de controladores;*
- *Resposta temporal de sistemas.*

INTRODUÇÃO

O sistema de controlo que se pretende implementar no *Matlab-Simulink* está representado na Fig.1. Este diagrama de blocos é constituído por 5 blocos (ou 5 subsistemas). Basicamente o que se pretende é a implementação de cada um dos blocos, seguido da sua interligação e finalizando com o dimensionamento do controlador em função da dinâmica pretendida para a resposta temporal do nível $h_3(t)$.

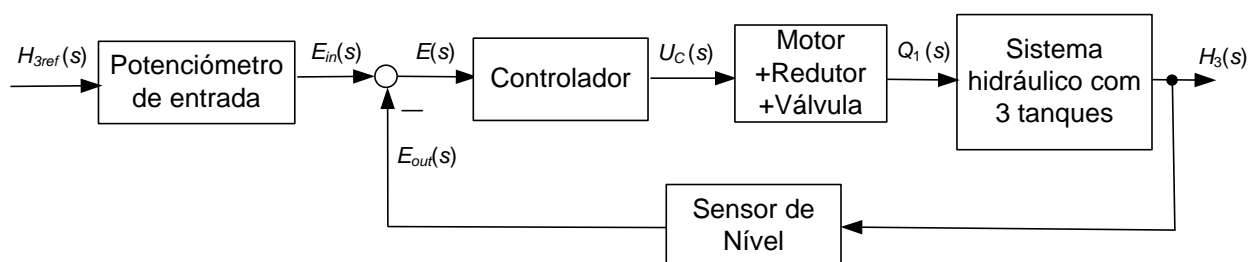


Fig.1 Diagrama de blocos do sistema de controlo do nível h_3 em cadeia fechada

O processo ou o sistema a comandar é um sistema hidráulico com 3 tanques dispostos como apresentado na Fig.2. Este processo é constituído por 1 tanque que alimenta a jusante 2 tanques interativos (ou interligados).

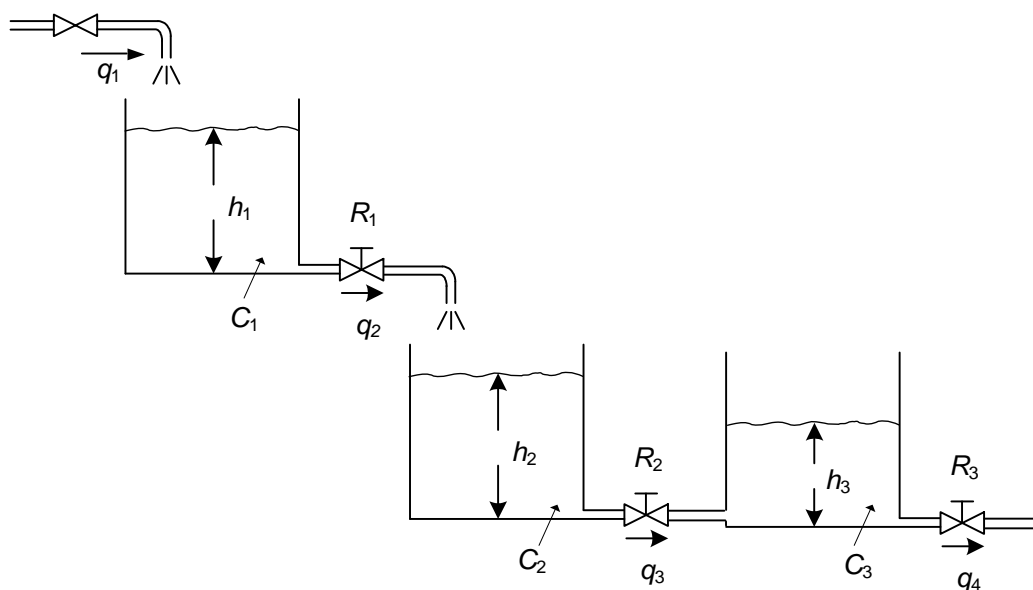



Fig.2 Esquema descritivo do sistema hidráulico com 3 tanques

	ISEL <small>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA</small>	Secção de Automação e Eletrónica - DEEEA Controlo de Sistemas (Laboratório)	T4 – Simulação de Sistemas Data: Abril 2022
---	--	--	--

Este trabalho está dividido em 3 fases:

Fase 1 – Modelização e interligação dos vários blocos no *Simulink*

Fase 2 – Dimensionamento do Controlador

Fase 3 – Registo dos resultados obtidos

Informações para o trabalho 4 - Simulação de Sistemas (Matlab)

- *Este trabalho deve ser implementado de forma crescente pelas 3 fases, onde cada fase é descrita por vários passos (ou tarefas).*
- *Alguns dos passos evolutivos deste trabalho poderão ser feitos previamente fora da aula de modo a poupar algum tempo nos dias do trabalho prático.*
- *O Guia Laboratorial deverá ser lido antes de inicializar o trabalho de Laboratório, de modo que o grupo possa finalizar o trabalho no tempo previsto que é de 3h dividido da seguinte forma de acordo com o planeamento dos trabalhos:*

1ª parte do trabalho (1,5h) \Rightarrow Fase 1 - Modelização e interligação dos vários blocos no *Simulink*;

2ª parte do trabalho (1,5h) \Rightarrow Fase 2 e 3 - *Dimensionamento do controlador e registo de resultados.*

- *A data da apresentação dos trabalhos será afixada na página da disciplina no Moodle.*

Fase 1 – Modelização e implementação dos vários blocos no Simulink

Passo 1 ⇒ Modelo do Tanque 1

Criar o sistema de um tanque no *Simulink* e criar um Subsistema com o nome Tanque 1 (variável de entrada q_1 e variável de saída q_2)

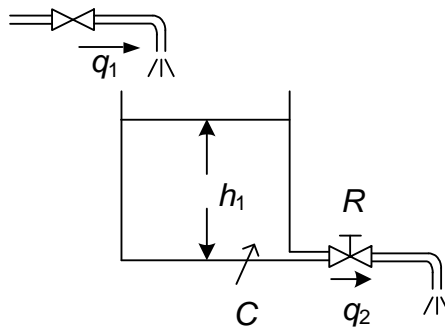
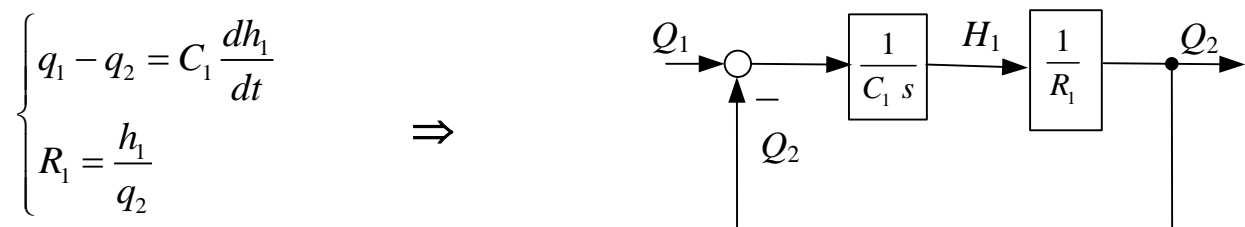
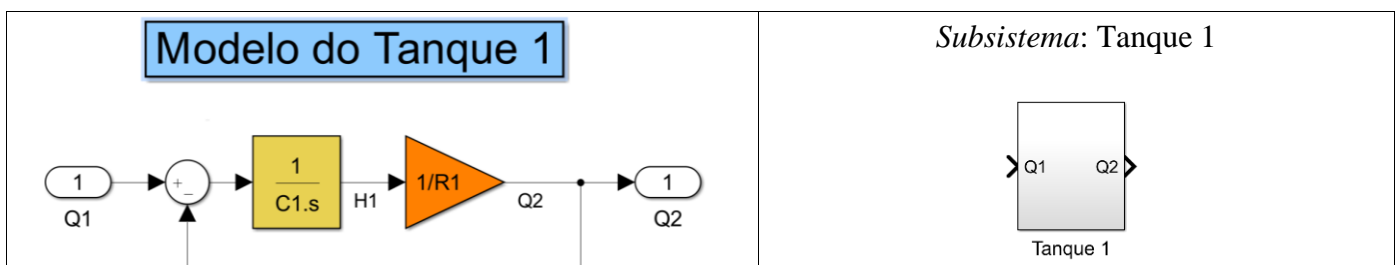


Fig.3 Esquema do sistema de nível de um tanque

Com base na equação da dinâmica e da relação da resistência hidráulica, obtêm-se o seguinte diagrama no domínio de s (Laplace)



Implementando este diagrama de blocos no *Simulink* e depois criando um subsistema com o nome Tanque 1:



Passo 2 \Rightarrow Modelo dos 2 tanques interativos (ou acoplados ou interligados)

A partir das equações iniciais (ou equações da dinâmica) criar o sistema de dois tanques interligados no *Simulink* e criar um Subsistema com o nome Tanques 2 e 3 (variável de entrada q_2 e variável de saída h_3).

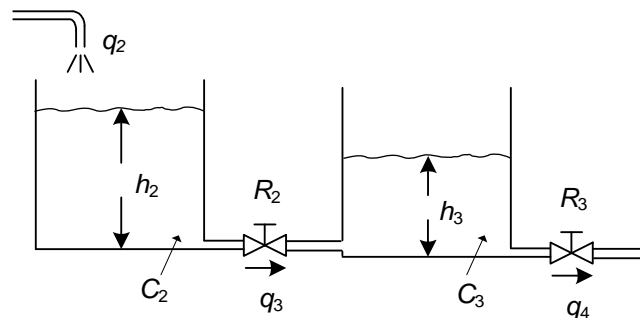
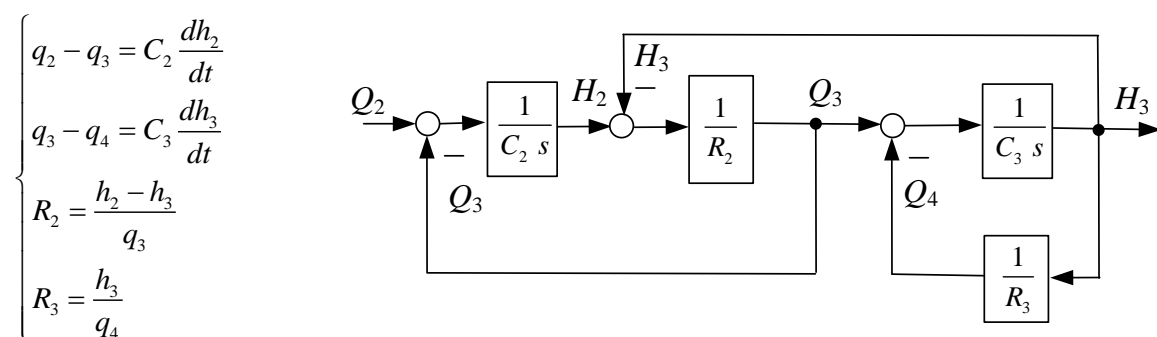
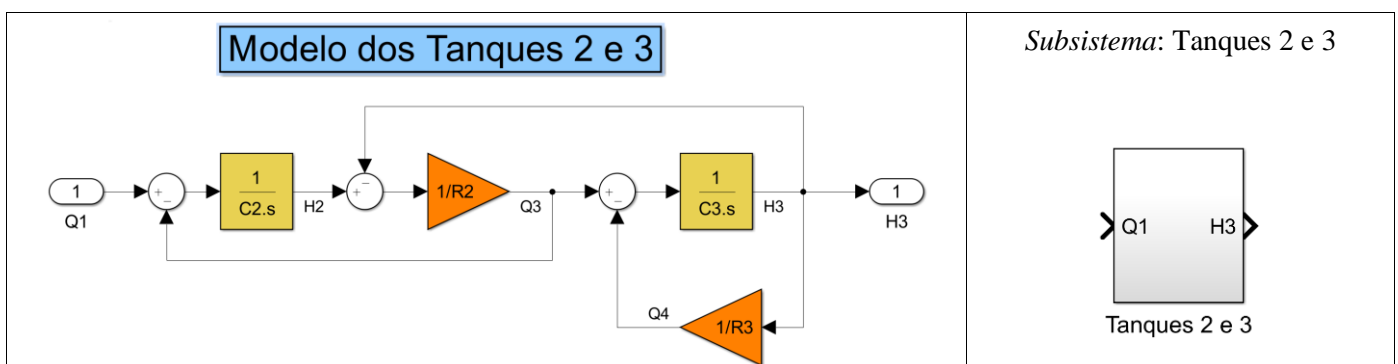


Fig.4 Esquema do sistema de nível de 2 tanques interativos

Com base nas equações da dinâmica e das relações das resistências hidráulicas, obtêm-se o seguinte diagrama no domínio de s (Laplace)

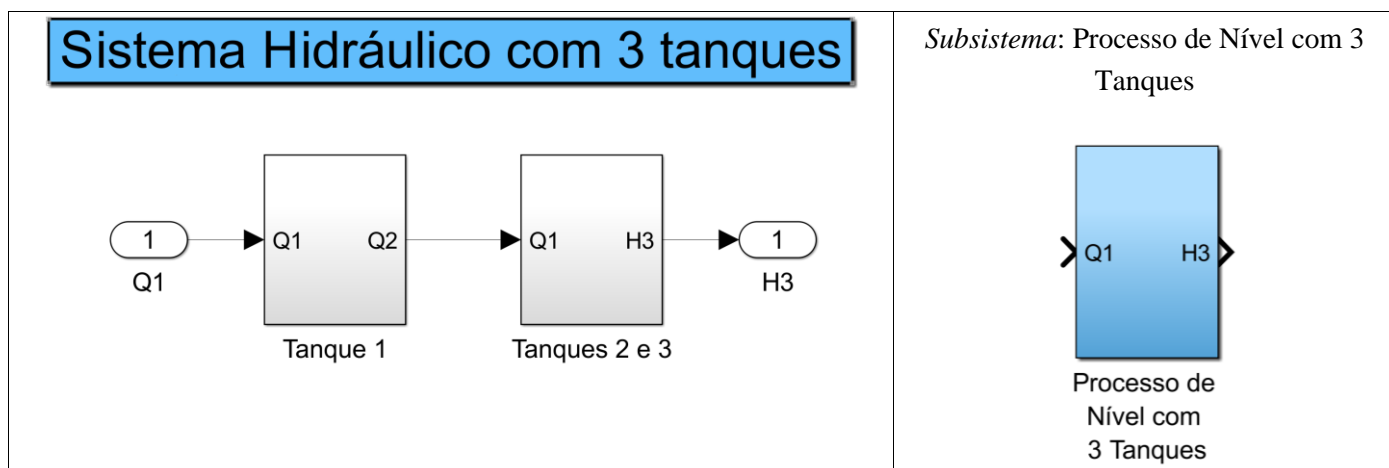


Implementando este diagrama de blocos no *Simulink* e depois criando um subsistema com o nome Tanques 2 e 3:



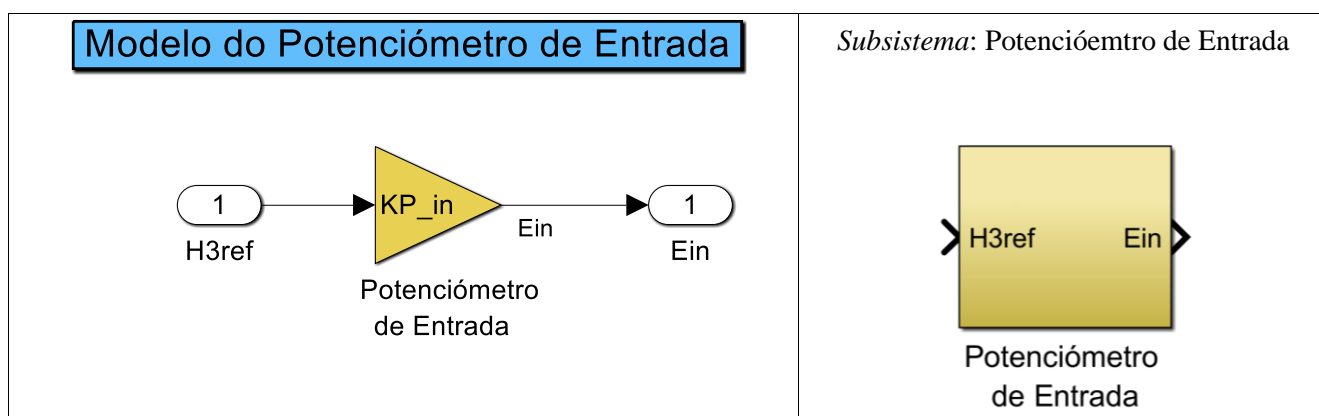
Passo 3 ⇒ Modelo do Processo – Sistema hidráulico com 3 tanques

Interligar os dois subsistemas em cascata (Sistema Hidráulico com 3 tanques) e criar um subsistema com o nome Processo de Nível (variável de entrada q_1 e variável de saída h_3)



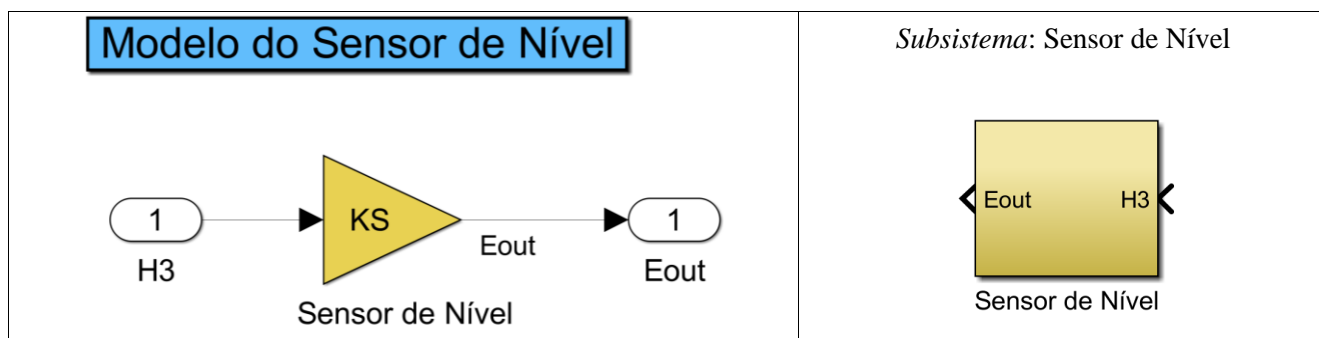
Passo 4 ⇒ Modelo do Potenciómetro de Entrada

Considerar um bloco de ganho para representar o potenciómetro de entrada com ganho K_{P_in} (variável de entrada h_{3ref} e variável de saída E_{in})



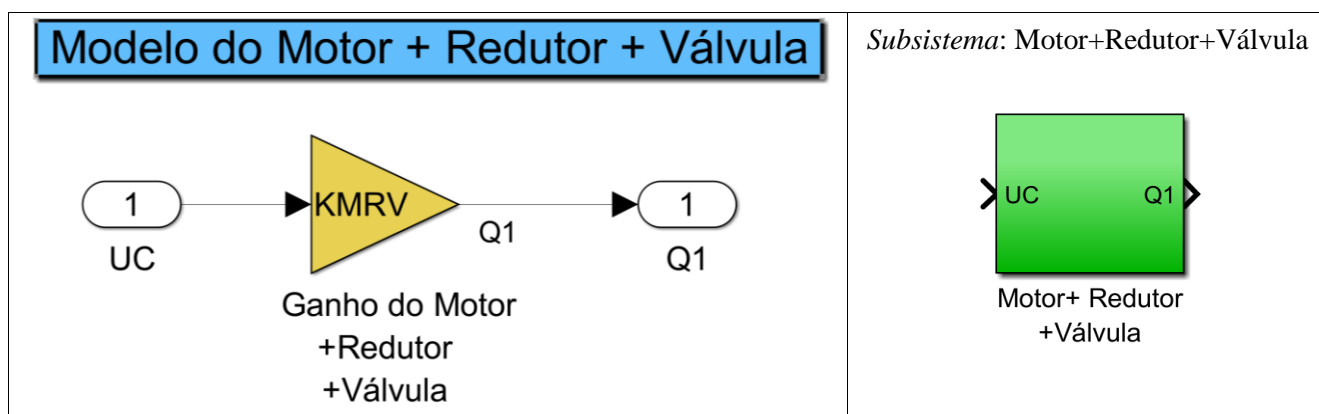
Passo 5 \Rightarrow Modelo do Sensor de Nível

Considerar um bloco de ganho (modelo linear simplificado) para representar o sensor de nível do tanque 3, com ganho K_S (variável de entrada h_3 e variável de saída E_{out})



Passo 6 \Rightarrow Modelo do Motor + Redutor + válvula

Este bloco representa o conjunto do motor + redutor de velocidades + válvula (por vezes, este conjunto é designado de válvula motorizada) e relaciona a tensão do controlador (u_c) com o caudal de entrada no tanque 1 (q_1). Apesar de este bloco ter dinâmica (1ª, 2ª ou 3ª ordem), neste trabalho, essa dinâmica vai ser desprezada e vai ser representado por uma constante K_{MRV} (modelo linear simplificado), em que variável de entrada é u_c e a variável de saída q_1 .

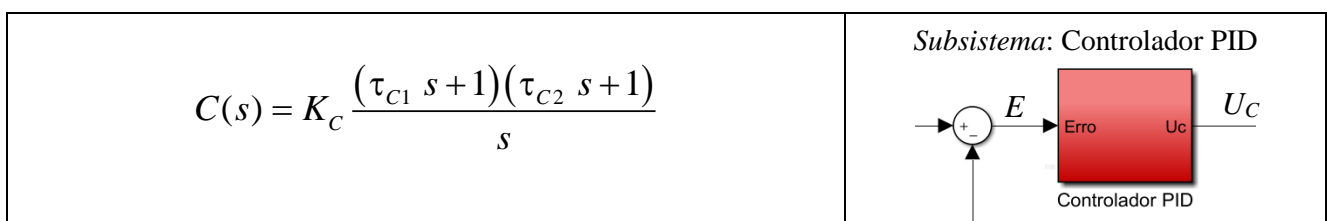


Passo 7 ⇒ Modelo do Controlador

Tendo em conta a dinâmica dos vários subsistemas, o controlador escolhido para controlar o nível do tanque 3 é um controlador PID (Proporcional, integral e derivativo). Na 2ª fase deste guia laboratorial, será explicado o dimensionamento do controlador PID.

Existem várias formas de implementar um PID, entre elas está o controlador PID de ajuste independente de ganho que apresenta a seguinte função: $C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$. Para este trabalho optou-se por usar o controlador PID de ajuste dependente de ganho, o qual apresenta a seguinte função: $C(s) = K_c \frac{(\tau_{c1} s + 1)(\tau_{c2} s + 1)}{s}$.

A variável de entrada deste bloco é o sinal de erro (*Erro* ou *e*) e a variável de saída é a tensão U_C .



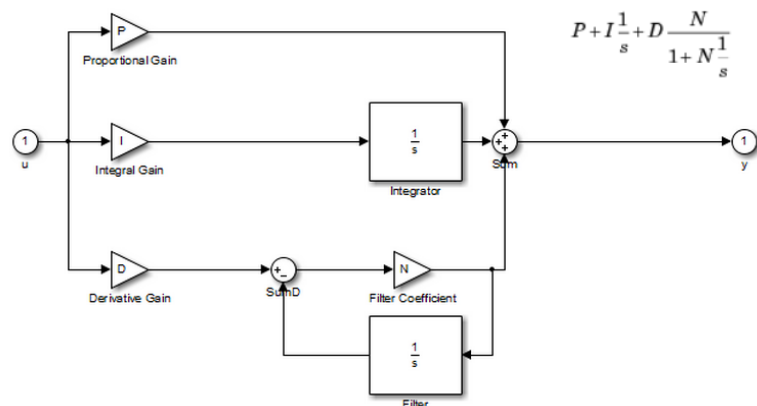
Nota para implementar este PID no Simulink: Como a função deste controlador apresenta um grau do numerador (2ª ordem) superior ao do denominador (1ª ordem) vai existir problemas de convergência e normalmente o Matlab gera um sinal de erro. De seguida são apresentadas quatro possíveis soluções para resolver este tipo de problema:

Solução 1 (recomendada): Utilizar o Bloco do Simulink **PID Controller** e adaptar os valores da função $C(s) = K_c \frac{(\tau_{c1} s + 1)(\tau_{c2} s + 1)}{s}$ (calculados no mfile), para o formato $C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$ que é o forma apresentada neste Bloco do Simulink, bastando para isso usar as seguintes relações de ganhos apresentados na seguinte figura, (*N* corresponde ao coeficiente do filtro necessário na implementação do derivador, este valor deve ser atualizado em função das constantes de tempo RC do processo hidráulico):



PID Controller This block implements continuous- and reset, and signal tracking. You can tune	
Controller: PID	
Time domain:	
<input checked="" type="radio"/> Continuous-time $P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$ <input type="radio"/> Discrete-time	
Main	PID Advanced Data Types
Controller parameters	
Source:	internal
Proportional (P):	$K_C(TC1 + TC2)$
Integral (I):	K_C
Derivative (D):	$K_C \cdot TC1 \cdot TC2$
Filter coefficient (N):	100000

Parallel PID Controller



Figuras adaptadas do Help do Bloco **PID Controller** do Matlab R2016b

Solução 2) Acrescentar à função do controlador existente, um polo com uma constante de tempo muito pequena. A dimensão desta constante de tempo deve ser cerca 1000 vezes mais pequena que a constante de tempo da FT de um tanque, por exemplo, se a constante de tempo do tanque hidráulico for $\tau = RC = 100s$ então, a constante de tempo a introduzir na função do controlador PID poderá ser de 0.1s e neste caso a FT do controlador ficaria com o seguinte aspecto:

$$C(s) = K_c \frac{(\tau_{c1} s + 1)(\tau_{c2} s + 1)}{(0.1 s + 1)s}$$

Solução 3) Construir o controlador PID por blocos, ou seja, efetuar a multiplicação das funções no numerador e depois reproduzir essas operações aritméticas no Matlab/Simulink. Esta técnica é muito usada na implementação do controlador PID de ajuste independente de ganho.

Solução 4) Colocar um dos zeros do controlador noutra bloco que esteja na cadeia de ação que seja de ordem igual ou superior a 1 (exemplo: a FT de 1 tanque ou a FT dos 2 tanques).

Passo 8 ⇒ Interligar os vários blocos em cadeia fechada

Depois da criação dos vários subsistemas é necessário efetuar as ligações típicas de um sistema de controlo em cadeia fechada, tal como apresentado na Fig. 5.

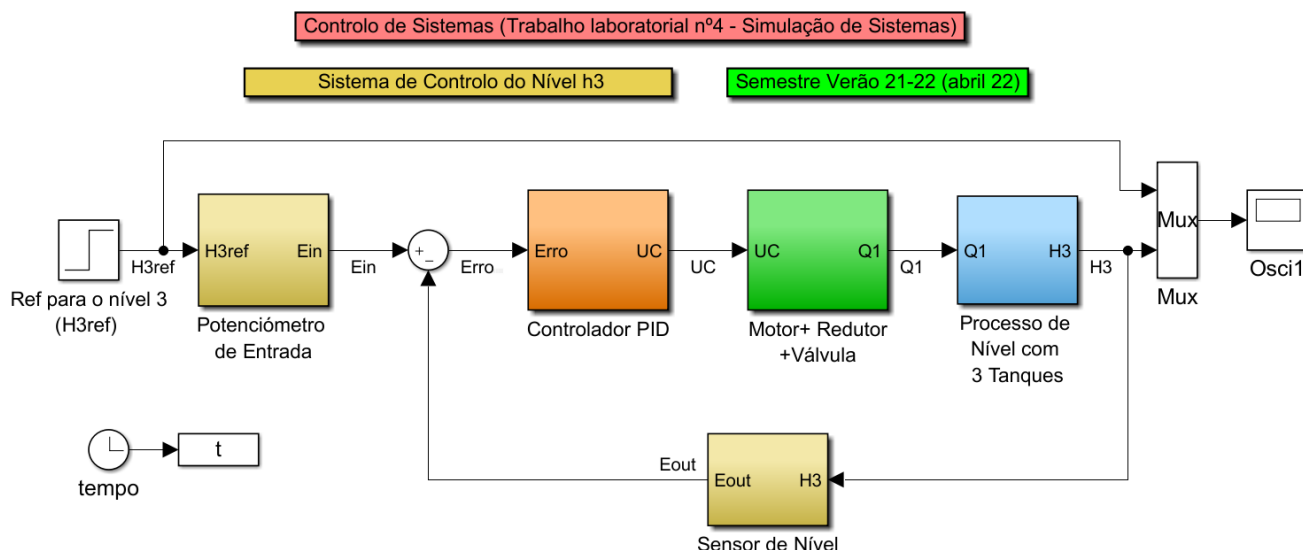
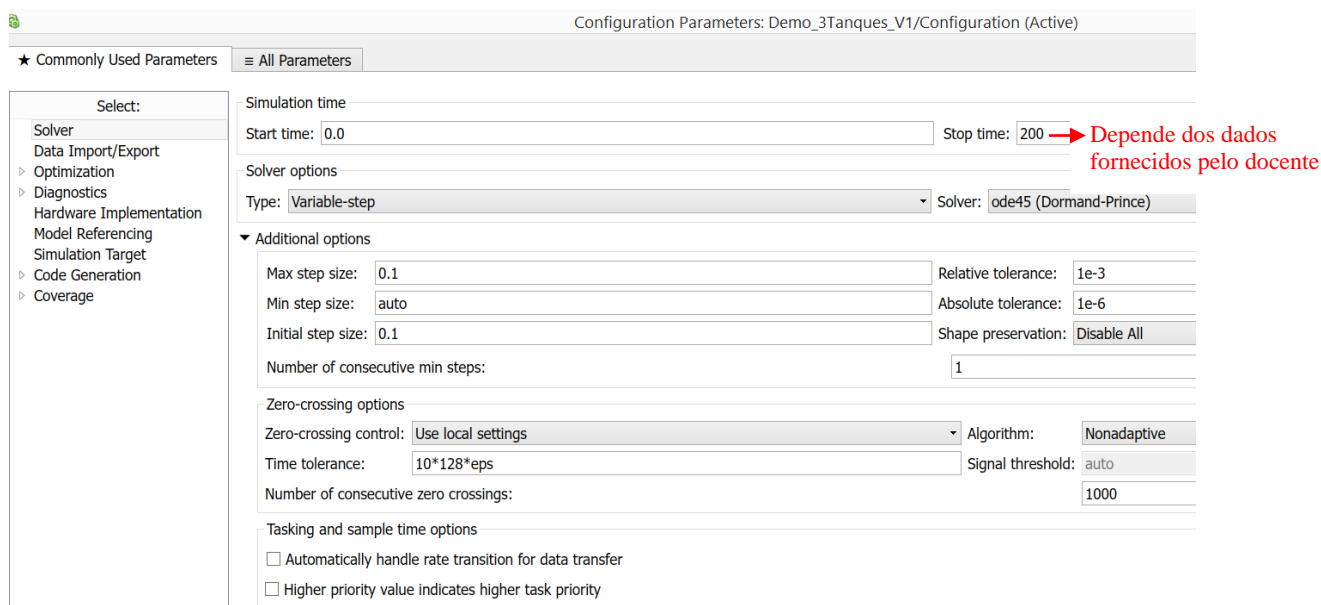


Fig.5 Diagrama de blocos principal do sistema de controlo de nível em cadeia fechada (*Simulink*)

Passo 9 ⇒ Configuração do software Simulink

Apesar de existirem muitas configurações possíveis para simular este processo, é apresentado de seguida uma de muitas opções de configuração do *Simulink*.



Passo 10 ⇒ Criar um m-file com os dados da simulação e correr o software

De modo a ir percebendo se o modelo de simulação apresenta erros, sugere-se a criação de um *m-file* com todas as variáveis a terem valor unitário. Depois de carregar estes dados para a *Workspace* correr o programa de modo a observar se o estudo vai no bom caminho, ou seja, se a simulação funciona e se não existem erros. Na Fase 2 vai ser efetuado o dimensionamento do controlador PID.

```
% Declaração de variáveis
clear % limpa as variáveis da workspace
clc % Limpa o ecrã de comandos do Matlab

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Mensagem inicial para a linha de comandos
disp(' '); disp(' ');
disp('ISEL / DEEEA - Controlo de Sistemas - Semestre Verão 2021/2022')
disp(' ');
disp('Nome do mfile: mf_dados_3Tanques')
disp(' ');
disp('Data última atualização (15-março-2022)')
disp(' ');
disp('Objetivo: Carregar as variáveis do trabalho nº 4 - Simulação de Sistemas (Controlo do Nível 3)')
disp(' '); disp(' '); disp(' '); disp(' '); disp(' '); disp(' '); disp(' ');

%Parâmetros do Tanque 1
R1=1; % Resistência Hidráulica do tanque 1 (s/m^2)
C1=1; % Capacitância hidráulica do tanque 1 ou area do tanque 1 (m^2)

%Parâmetros do Tanque 2
R2=1; % Resistência Hidráulica do tanque 2 (s/m^2)
C2=1; % Capacitância hidráulica do tanque 2 ou área do tanque 2 (m^2)

%Parâmetros do Tanque 3
R3=1; % Resistência Hidráulica do tanque 3 (s/m^2)
C3=1; % Capacitância hidráulica do tanque 3 ou área do tanque 3 (m^2)

% Potenciômetro de entrada
KP_in=1; % Ganho do potenciômetro de entrada (V/m)

% Sensor de Nível
KS=1; % Ganho do sensor de nível (V/m)

% Motor + Redutor + Válvula
KMRV=1; % Ganho do Motor + Redutor + Válvula (m^3/(s V))

% Parâmetros do controlador PID
TC1=0.5;
TC2=0.5;
KC=2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fim da Mensagem inicial para a linha de comandos
disp('Variáveis do Trabalho 4 carregadas para a workspace:')
who
disp(' '); disp(' '); disp(' ');
```

Fase 2 – Dimensionamento do Controlador

Passo 11 ⇒ Dimensionamento de um controlador PID em sistemas de 3ª ordem

Devido ao fato da dinâmica do processo (sistema hidráulico com 3 tanques) ser de 3ª ordem e considerando que a dinâmica do motor + redutor + válvula foi desprezada, optou-se por utilizar um controlador PID (que é constituído por 2 zeros e um polo na origem).

A sugestão de dimensionamento para este controlador PID consiste em cancelar os dois polos dominantes do processo (ou seja, os dois polos do processo mais próximos da origem), utilizando para isso os dois zeros do controlador, tal como mostrado na Fig. 6:

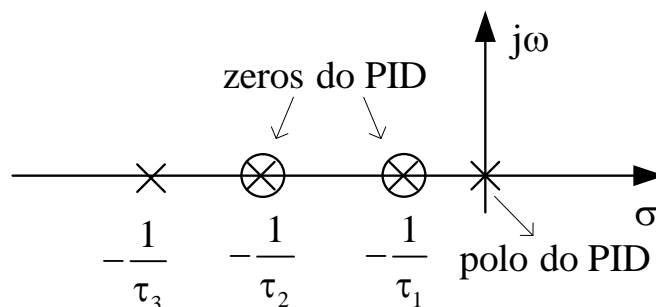


Fig.6 Mapa polos zeros com a estratégia de dimensionamento para o controlador PID

Depois do cancelamento, associa-se as restantes funções em cascata e depois em retroação e obtém-se um sistema de 2ª ordem, sem zeros. Com esta nova função de transferência de 2ª ordem, parametriza-se o ganho do controlador K_C , para um valor desejado do coeficiente de

amortecimento ξ , de acordo com a função de transferência standard, $\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$.

Para efetuar o dimensionamento do controlador PID é necessário:

- Ter os valores das constantes do sistema a controlar.

Estes valores serão dados pelo docente da aula laboratorial previamente a cada grupo, de acordo a folha anexa a este guia laboratorial (valores diferentes para cada grupo);

- b) O dimensionamento do controlador PID pode ser feito de forma manual ou de forma automática. A vantagem de ser feito de forma automática é que para quaisquer valores de parâmetros do sistema, através de um *m-file*, o Matlab calcula sempre corretamente os parâmetros do controlador para um determinado coeficiente de amortecimento (ξ);
- c) Usar o comando do Matlab (*eig* → valores característicos) para obter a localização dos polos do processo e depois usar o comando *sort* para colocar os polos de forma descendente;
- d) Depois com base neste vetor de polos ordenados, as constantes de tempo do controlador (τ_{C1} e τ_{C2}) são obtidas de forma automática, ficando só por determinar o ganho K_C ;
- e) O ganho K_C deve ser calculado em função do coeficiente de amortecimento ξ , ou seja, $K_C = f(\xi)$. Estas expressões de dimensionamento devem ser colocadas num *m-file* de modo que quando seja necessário mudar o coeficiente de amortecimento, todos os parâmetros do controlador sejam calculados de forma automática.

Numa primeira fase do dimensionamento pode ser usado $\xi = 1$;

- f) No fim da fase 2 deste trabalho, o objetivo é ter os parâmetros do controlador PID (τ_{C1} , τ_{C2} e K_C) devidamente dimensionados para $\xi = 1$, ou seja, o *m-file* deverá gerar uma FT com o seguinte especto: $C(s) = K_C \frac{(\tau_{C1} s + 1)(\tau_{C2} s + 1)}{s}$.

Fase 3 – Registo dos resultados obtidos

Passo 12 \Rightarrow ***Criar um m-file para gerar os resultados de simulação***

Um aspeto importante no estudo da Simulação de um Sistema é o registo dos resultados obtidos e a sua passagem para outros programas como o *Word* ou o *Power Point*. De modo a evitar os “*print screen*”, por diversas razões (ambientais, económicas e estéticas), pretende-se neste ponto que o aluno desenvolva um m-file que faça a leitura das variáveis da *workspace* e posteriormente sejam gerados os gráficos solicitados para serem analisados. De seguida são apresentadas as figuras pretendidas para esse m-file.

Tarefa 1: Apresentar um gráfico temporal com o nível $h_3(t)$ e com o sinal h_{3ref} ;

Tarefa 2: Apresentar um gráfico temporal com as curvas de nível: $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$;

Tarefa 3: Apresentar um gráfico temporal com as curvas dos caudais: $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ e $q_4(t)$;

Tarefa 4: Apresentar um gráfico temporal com os sinais de erro e de saída do controlador $u_C(t)$;

Tarefa 5: Apresentar 3 mapa pólos zeros (em 3 figuras separadas): 1º Mapa com o processo hidráulico (3ª ordem), 2º Mapa com a FTCA e por fim o 3º Mapa de polos e zeros com a FTCF;

Mudança do sinal de Referência para Onda Quadrada (usar o bloco *Repeating Sequence* do Simulink)

Tarefa 6: Usar um sinal sequencial na referência h_{3ref} , de acordo com os valores dados pelo Docente.

Apresentar um gráfico temporal com a referência h_{3ref} e com o sinal de saída $h_3(t)$;

Tarefa 7: Para esta alteração de referência, apresentar as curvas de nível $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$;

Tarefa 8: Para esta alteração de ref.^a, apresentar as curvas dos caudais: $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ e $q_4(t)$;

Tarefa 9: Para esta mudança de ref.^a, apresentar os gráficos do sinal de erro $e(t)$ e da saída do controlador $u_C(t)$.

Tarefa 10: Mudar no m-file o valor do coeficiente de amortecimento para $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ e voltar a apresentar as Tarefas 6, 7, 8 e 9.

Fim do Guia Laboratorial T4 – Simulação de Sistemas

(Pedir ao docente durante a aula laboratorial para preencher esta folha)

Valores para serem usados no Trabalho T4 –Simulação de Sistemas (Matlab)

Para o grupo _____ (_____)

```

%Parâmetros do Tanque 1
R1=      ; % Resistência Hidráulica do tanque 1 (s/m^2)
C1=      ; % Capacitância Hidráulica do tanque 1 ou área do tanque 1 (m^2)

%Parâmetros do Tanque 2
R2=      ; % Resistência Hidráulica do tanque 2 (s/m^2)
C2=      ; % Capacitância Hidráulica do tanque 2 ou área do tanque 2 (m^2)

%Parâmetros do Tanque 3
R3=      ; % Resistência Hidráulica do tanque 3 (s/m^2)
C3=      ; % Capacitância Hidráulica do tanque 3 ou área do tanque 3 (m^2)

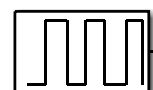
% Potenciómetro de entrada
KP_in=   ; % Ganho do potenciómetro de entrada (V/m)

% Sensor de Nível
KS=      ; % Ganho do sensor de nível (V/m)

% Motor + Redutor + Válvula
KMRV=    ; % Ganho do sensor de nível (m^3/(s V))
  
```

Definição do sinal de comando h_{3_ref} (ou referência para o nível do tanque 3):

- Da Tarefa 1 à Tarefa 5 $\Rightarrow h_{3_ref} =$ _____ m
- Da Tarefa 6 à Tarefa 9 $\Rightarrow h_{3_ref} =$ onda quadrada com offset



Referência
para nível 3
(H_{3_ref})

Parâmetros a usar no bloco *Repeating Sequence* para aplicar uma onda quadrada como referência:

Time values: [_____]

Output values: [_____]