Anexo I – Rotina *Matlab* para linearização do modelo não linear do TC

```
fhi_1=0;
fhi_2=0;
grau=25;
[ei,x0]=rtc_bypass_cold;
u=[fhi_1;fhi_2];
PARA(1)=pert;
PARA(3)=1;
[a_rtc,b_rtc,c_rtc,d_rtc] = linmod('rtc_bypass_cold',x0,u,PARA);
rtc_lin = ss(a_rtc,b_rtc,c_rtc,d_rtc);
[rtc_re,info]=reduce(rtc_lin,grau);
```

Anexo II – Rotina *Matlab* para cálculo do controlador LQR e do observador de estados de ordem plena

```
% Controle LQR

[a_lqr,b_lqr,c_lqr,d_lqr]=ssdata(rtc_re);
A_lqr= [a_lqr zeros(grau,2); c_lqr zeros(2,2)];
B_lqr= [b_lqr ; zeros(2,2];
C_lqr= [c_lqr zeros(2,2)];

R= 1e-2*[1 0;0 1];
Q= 1e-6*eye(grau+2,grau+2);

K= lqr(A_lqr,B_lqr,Q,R);
KX= K(:,1:grau);
KZ= K(:,grau+1:grau+2);

% Observador de Estados

QL = 1e-2*eye(grau,grau);
L = lqr(A_lqr', C_lqr', QL, eye(2,2))';
```

Anexo III – Rotina *Matlab* para cálculo do controlador H-infinito

```
int=tf(1,[1 0]); %adicionando integradores a planta
kint=0.01;
int_m=kint*[int 0; 0 int]; %2 x 2
rtc_re_int=rtc_re*int_m;

[atc_r,btc_r,ctc_r,dtc_r]=ssdata(rtc_re_int);

ag = atc_r;
bg = btc_r;
cg = ctc_r;
dg = dtc_r;

% Matriz P

[a,b,c,d] = linmod('sci2_teste'); %sistema com W1

%Dimensões das Entradas e Saídas

U1 = 2;
U2 = 2;
Y1 = 2;
Y2 = 2;

 b1 = b(:,1:U1);
 b2 = b(:,U1+1:U1+U2);
 c1 = c(1:Y1,:);
 c2 = c(Y1+1:Y1+Y2,:);
d11 = d(1:Y1,1:U1);
d12 = d(1:Y1,U1+1:U1+U2);

if rank(d12)<U2
   d12 = eye(Y1,U2)*1e-2;
end

d21 = d(Y1+1:Y1+Y2,1:U1);

if rank(d21)<Y2
   d21 = eye(Y2,U1)*1e-2;
end

d22 = d(Y1+1:Y1+Y2,U1+1:U1+U2);

TSS_P = mksys(a,b1,b2,c1,c2,d11,d12,d21,d22,'tss'); %Matriz P

[ss_cp,ss_cl] = hinf(TSS_P); %Projeto H infinito

[acp,bcp,ccp,dcp] = branch(ss_cp); %Matrizes Estado do Controlador

KS = ss(acp,bcp,ccp,dcp);
[KSr] = reduce(KS,6);

[acp,bcp,ccp,dcp]= ssdata(KSr); %Controlador de Ordem Reduzida
```

Anexo IV – Rotina *Matlab* para cálculo do erro quadrático

```
% Temperatura Quente

err_th=(thout_sim - thout_2a);
err_th_q=(err_th.*err_th);

figure(3)
plot (err_th_q(:))

title('Evolução do Valor do Erro Quadrático: Th_O_U_T (real) - Th_O_U_T
(simulado) ')
ylabel('Erro Quadrático')
xlabel('Tempo (seg.)')
legend('U=1300')

% Temperatura Fria

err_tc=(tcout_sim - tcout_2a);
err_tc_q=(err_tc.*err_tc);

figure(4)
plot (err_tc_q(:))

title('Evolução do Valor do Erro Quadrático: Tc_O_U_T (real) - Tc_O_U_T
(simulado) ')
ylabel('Erro Quadrático')
xlabel('Tempo (seg.)')
legend('U=1300')
```

Anexo V – Rotina *Matlab* para cálculo desacoplador dinâmico

```
Gt_11=tf(tcs_re11);

G11=Gt_11(1,1);
G12=Gt_11(1,2);
G21=Gt_11(2,1);
G22=Gt_11(2,2);

GI1=-G12/G11;

GI2=-G21/G22;
```

Anexo VI – Características dinâmicas do trocador de calor

Com o objetivo de verificar o comportamento dinâmico do trocador de calor, perturbações nas variáveis de entrada (temperatura, vazão e *bypasses*, das linhas quente e fria) foram aplicadas, individualmente, para que pudessem ser observados os seus efeitos sobre as temperaturas de saída das correntes quente e fria. Apesar do trocador de calor aqui apresentado (HEGGS, 2006), não ser o trocador de calor utilizado no presente trabalho, as características dinâmicas aqui apresentadas são mais fáceis de serem identificadas, com uma maior riqueza de detalhes, em trocadores de calor com área de troca térmica maior.

As condições nominais de operação para a simulação são apresentadas pela Tabela 1. As análises das respostas de saída serão apresentadas individualmente para cada uma das variações das condições nominais de operação.

Tabela 1 – Condições Nominais de Operação do Trocador de Calor (HEGGS, 2006)

Condição Nominal das Variáveis de Entrada e Saída	
Temperatura de Entrada Água Fria (TC_{IN})	133,1ºC
Temperatura de Entrada Água Quente (TH_{IN})	204,4ºC
Temperatura de Saída Água Fria (TC_{OUT})	188,1ºC
Temperatura de Saída Água Quente (TH_{OUT})	150,8ºC
Vazão Mássica de Água Fria (m_C)	4kg.s^{-1}
Vazão Mássica de Água Quente (m_H)	6kg.s^{-1}
Área de Troca Térmica (A_{TC})	220m^2
Posição *Bypass* Fluido Quente (*fhi*)	Totalmente Fechado (=0)
Posição *Bypass* Fluido Frio (*fci*)	Totalmente Fechado (=0)

a) Efeitos sobre TC_{OUT} e TH_{OUT} a uma variação em TH_{IN} de ± 10%:

A Figura 1 indica o comportamento das temperaturas de saída da corrente fria ΔTC_{OUT} (linha contínua) e da corrente quente ΔTH_{OUT} (linha tracejada), frente a um degrau em TH_{IN} de +10ºC a partir do seu valor nominal, no instante t = 300s, mantendo todas as demais variáveis apresentadas na Tabela 1 constantes. O intervalo de simulação foi igual a 3000s.

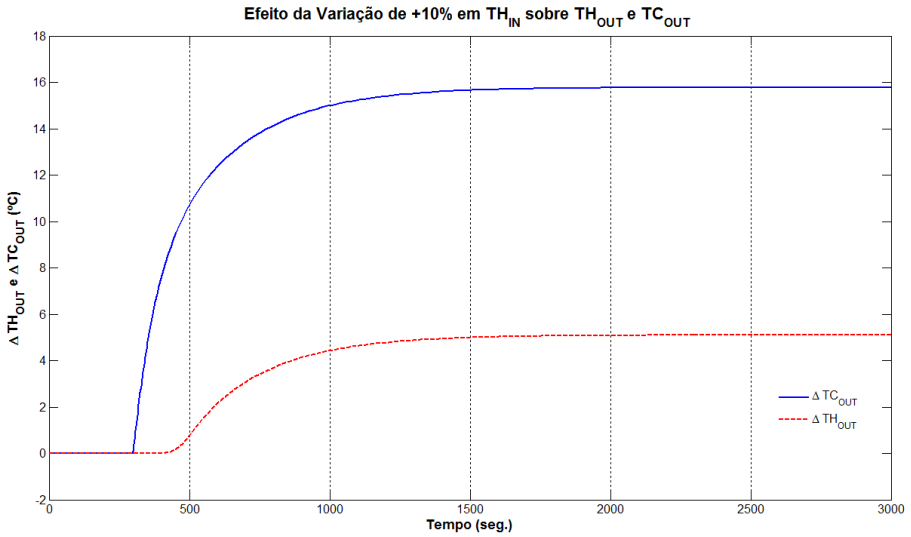

Figura 1 – Variação nas temperaturas de saídas quente e fria – Degrau de +10% em TH_{IN}.

b) Efeitos sobre TC_{OUT} e TH_{OUT} a uma variação em TC_{IN} de ± 10%:

A Figura 2 indica o comportamento das temperaturas de saída da corrente fria ΔTC_{OUT} (linha contínua) e da corrente quente ΔTH_{OUT} (linha tracejada), frente a um degrau em TC_{IN} de +10ºC a partir do seu valor nominal, no instante t = 300s, mantendo todas as demais variáveis apresentadas na Tabela 1 constantes. O intervalo de simulação foi igual a 3000s.

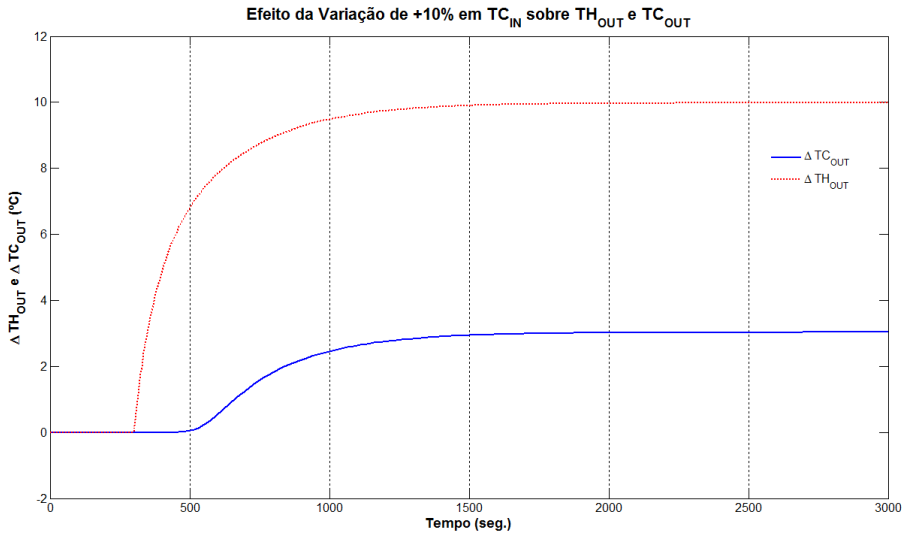

Figura 2 – Variação nas temperaturas de saídas quente e fria – Degrau de +10% em TC_{IN}.

Analisando as Figuras 1 e 2 percebe-se que as dinâmicas envolvidas são de primeira ordem para as variáveis que não foram diretamente perturbadas. Já para as linhas que foram diretamente perturbadas, a dinâmica envolvida é de primeira ordem com tempo morto, sendo este justificado pela duração da passagem do fluido pelo trocador de calor.

c) Efeitos sobre TC_{OUT} e TH_{OUT} a uma variação em m_H de ± 10%:

A Figura 3 mostra o comportamento das temperaturas de saída ΔTH_{OUT} e ΔTC_{OUT} a partir do aumento de +10% do valor nominal da vazão do fluido quente. O intervalo de simulação foi de aproximadamente 3000s, com o degrau ocorrendo em t = 300s.

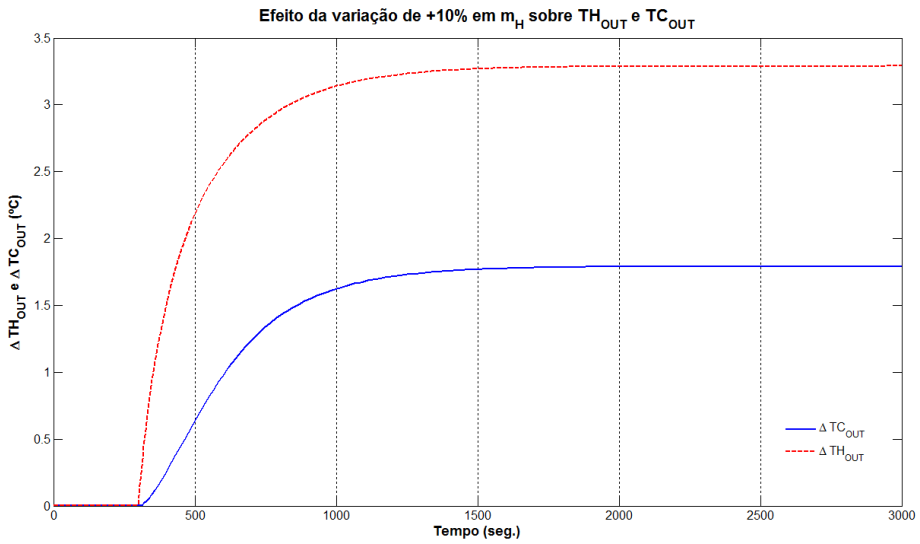

Figura 3 – Variação nas temperaturas de saídas quente e fria – Degrau de +10% em m_H.

d) Efeitos sobre TC_{OUT} e TH_{OUT} a uma variação em m_C de ± 10%:

A Figura 4 mostra o comportamento das temperaturas de saída ΔTH_{OUT} e ΔTC_{OUT} a partir do aumento de +10% do valor nominal da vazão do fluido frio, mantendo todas as demais variáveis constantes. O intervalo de simulação é novamente de 3000s, com o degrau ocorrendo no instante t = 300s. Observando as Figuras 3 e 4, percebe-se que as respostas apresentadas têm a característica de um sistema de primeira ordem, sem tempo morto. Além disso, percebe-se que a resposta das temperaturas de saída apresenta uma relação direta com a variação das vazões quente e fria:

- ✓ Com o aumento/diminuição da vazão do fluido quente, as temperaturas de saída aumentam/diminuem (relação direta);
- ✓ Com o aumento/diminuição da vazão do fluido frio, as temperaturas de saída diminuem/aumentam (relação inversa);

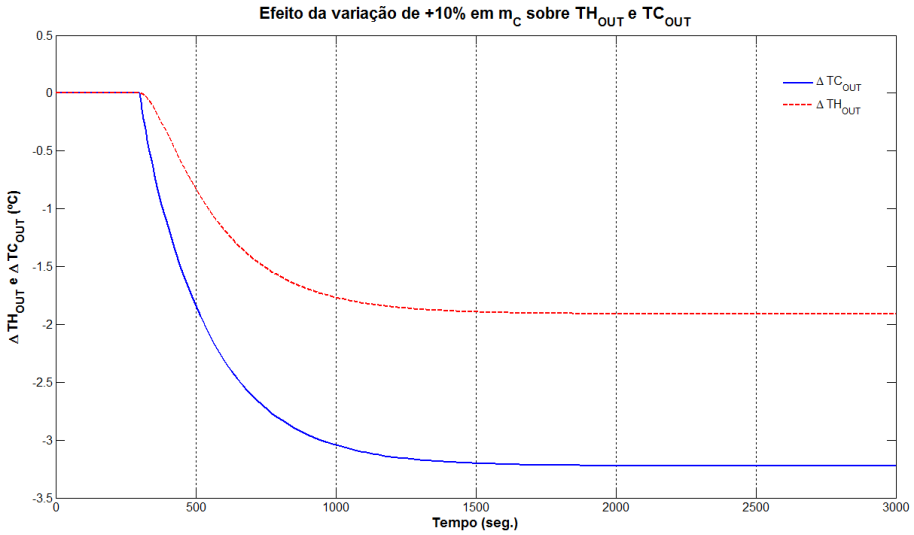

Figura 4 – Variação nas temperaturas de saídas quente e fria – Degrau de +10% em m_C.

e) Efeitos sobre TC_{OUT} e TH_{OUT} a uma variação em fh_i e fc_i

"Em redes de trocadores de calor, existem correntes que não possuem aquecedores ou resfriadores no término da linha, devendo ter suas necessidades térmicas satisfeitas unicamente pela troca de calor com outras correntes de processo. Nesse caso, as temperaturas de saída dessas correntes podem ser controladas pela manipulação das frações desviadas f_H e f_C" (NOVAZZI 2006).

Os *bypasses* na prática são representados por válvulas proporcionais, que provocam um desvio das correntes quentes ou frias, fazendo com que a carga térmica do trocador de calor se modifique, aumentando ou diminuindo em função da quantidade que está sendo desviada, podendo no modelo, assumir valores entre 0 (fechado) e 1 (aberto).

As simulações apresentadas nos itens anteriores mostraram como as temperaturas de saída de cada corrente, que serão as variáveis controladas, se comportaram sob a ação da variação das variáveis de entrada de vazão e temperatura, que adiante serão consideradas como os distúrbios para a análise do desempenho do controlador a ser projetado. Agora, o estudo estará direcionado

justamente para a verificação dos efeitos da mudança dos valores dos *bypasses* sobre as temperaturas de saída de cada uma das correntes quente e fria.

As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas das temperaturas de saída para uma alteração dos valores de fh_i (*bypass* quente) e fc_i (*bypass* frio), respectivamente, impondo uma variação de +10% a partir do valor nominal em cada um dos valores.

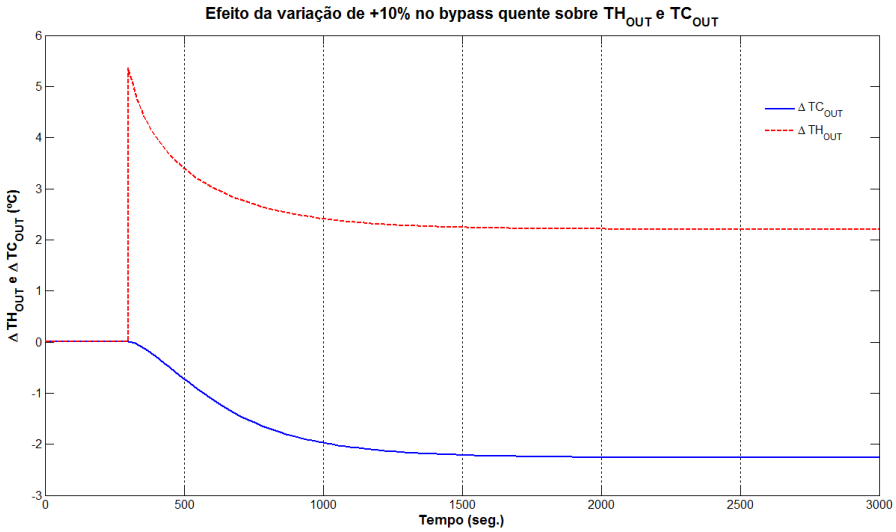

Figura 5 – Variação nas temperaturas de saídas quente e fria – Degrau de +10% em fh_i.

Observando as repostas apresentadas, os valores de regime estacionário das temperaturas de saída são alterados de formas distintas, mas com a mesma característica dinâmica para ambas as respostas. Tomando como exemplo a Figura 5, o desvio inicialmente provocado pelo *bypass* quente na vazão faz com que uma alteração na temperatura de saída seja notada imediatamente, daí o aumento do valor de ΔTH_{OUT} no instante em que o degrau é aplicado, pois a quantidade de energia disponível internamente no trocador foi alterada em função do desvio de uma fração da vazão principal da entrada para a saída do trocador diretamente.

Conforme o tempo passa, a temperatura de saída fria diminui seguindo uma curva exponencial. Devido à presença de uma quantidade menor de fluido quente no trocador de calor, a temperatura de saída ΔTC_{OUT} resulta mais fria que o seu valor nominal (-2,5ºC aproximadamente).

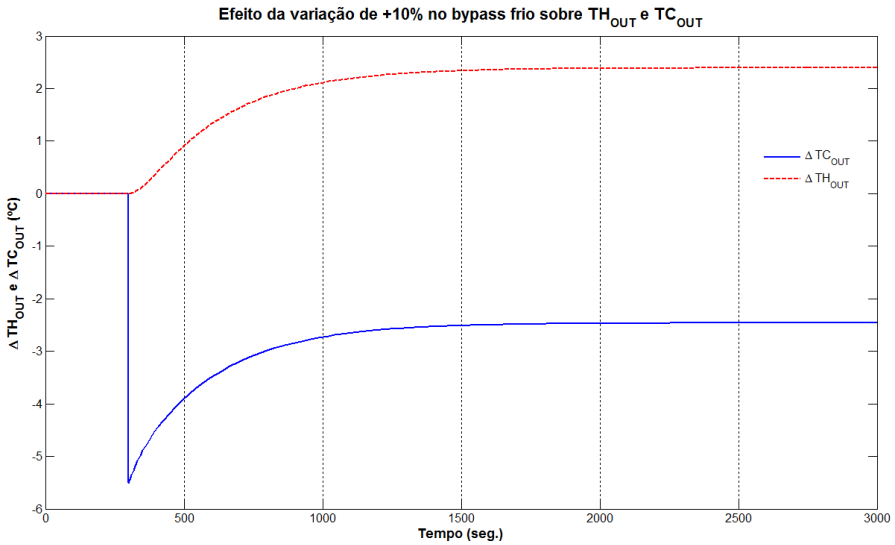

Figura 6 – Variação nas temperaturas de saídas quente e fria – Degrau de +10% em fc_i.

Inversamente, a temperatura de saída quente aumentou, pois essa corrente trocou menos calor com a corrente fria. Além disso, o fato da temperatura ΔTH_{OUT} apresentar um valor maior que o seu valor nominal (+2.5ºC aproximadamente) é explicado por dois motivos:

1. Existe uma parcela da corrente quente de entrada sendo somada à temperatura de saída quente TH_{OUT}, parcela essa que é desviada pelo *bypass*.
2. Como existe uma quantidade menor de fluido quente no interior do trocador de calor, uma quantidade menor de energia é trocada com a corrente quente, fato esse que gera a diminuição do valor de TC_{OUT}. Esse comportamento é devido ao fato de que o balanço de massa e energia no sistema deve ser satisfeito.

Anexo VII – Esquemas do painel elétrico, de ligação dos transmissores / bombas / atuadores, do circuito eletrônico da RTC