

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA**

CONTROLE AVANÇADO EM UMA UNIDADE DE
PROCESSAMENTO DE GÁS NATURAL

TÉCNICAS DE CONTROLE APLICADAS A INDÚSTRIA DE ÓLEO
E GÁS

Juliano Ricardo da Silva
Prof. Dr. Julio Normey-Rico

FLORIANÓPOLIS - SC

MARÇO DE 2022

Introdução

Este trabalho tem por objetivo a aplicação de um controle DMC (*Dynamic Matrix Control*) MIMO no controle da Unidade de Processamento de gás natural (UPGN).

Nas próximas seções, será descrito o processo, o modelo obtido por identificação, os requisitos de controle e toda a implementação do algoritmo DMC MIMO, bem como os resultados obtidos.

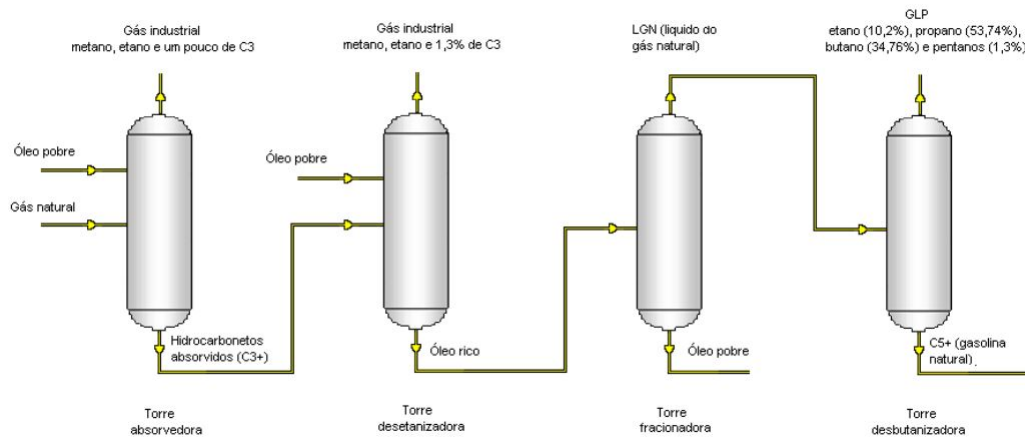
Conteúdo

1	Processo	4
1.a	Módulo de Simulação	6
1.b	Modelo de Simulação	7
2	Objetivos do Controle	9
3	Implementação do Algoritmo de Controle	9
4	DMC MIMO sem perturbação	13
5	DMC MIMO com perturbação	13
6	Conclusão	15

1 Processo

A Unidade de Processamento de Gás Natural de Atalaia, localizada na cidade de Aracaju no estado de Sergipe, foi a primeira planta totalmente projetada pela PETROBRAS e com índice de 99% de nacionalização de equipamentos. Sua capacidade nominal de processamento é de dois milhões m^3 /dia de gás, medidos a 20°C e a 1 atm. O processo de separação utilizado é o de absorção refrigerada com propano gerado na própria unidade. O objetivo é recuperar o propano (C_3), o butano (C_4) e o pentano e hidrocarbonetos mais pesados (C_{5+}), separando-os dos hidrocarbonetos leves (C_1 e C_2). O processamento de gás natural gera três produtos finais: o gás industrial (composto por C_1 e C_2), o GLP (composto por C_3 e C_4) e a gasolina natural (composta por C_{5+}).

Na primeira etapa o gás natural passa pela primeira torre, a torre de absorção, que separa os hidrocarbonetos mais pesados (absorvidos pelo óleo pobre) dos demais. Pelo topo desta torre sai o gás industrial, composto por metano, etano e C_3 . E pelo fundo saem os hidrocarbonetos absorvidos. Como este líquido ainda possui metano e etano em sua composição, ele passa pela segunda torre, a desetanizadora, para que estes hidrocarbonetos leves sejam separados. Pelo topo da coluna desetanizadora sai outro gás industrial também composto por metano (C_1), etano (C_2) e propano (C_3), mas em concentrações diferentes do anterior. O C_3 presente no gás industrial é uma perda que deve ser minimizada. Pelo fundo da torre desetanizadora sai o óleo rico que é destilado na torre fracionadora gerando LGN (líquido do gás natural) e óleo pobre, que retorna ao início do processo. Depois da torre desetanizadora não resta mais metano na mistura de hidrocarbonetos que continua no sistema. O LGN alimenta o sistema de desbutanização. Na torre desbutanizadora o produto é separado em GLP (gás liquefeito de petróleo), composto por etano (10,2%), propano (53,74%), butano (34,76%) e pentanos (1,3%), e C_{5+} (gasolina natural). A Figura 1 mostra um esquema simplificado do processamento de gás natural com as quatro torres e seus respectivos produtos de topo e de fundo.



Do ponto de vista do controle avançado, esse processo tem dez entradas, as variáveis manipuladas, e onze saídas, as variáveis controladas. Além disso, o processo está sujeito a 3 perturbações mensuráveis. As variáveis controladas, manipuladas e perturbações do processo inteiro são mostradas nas tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1 – Variáveis Controladas

ID	Descrição
y_1	Teor de C_3 na torre absorvedora (T01)
y_2	Teor de C_3 na torre absorvedora (T02)
y_3	Teor de C_2 no GLP
y_4	Nível da torre (T02)
y_5	Nível da torre (T02)
y_6	Vazão de refluxo
y_7	Abertura da válvula de pressão da torre T04
y_8	Teor de C_5 na torre T04
y_9	Razão refluxo torre T04
y_{10}	Refluxo mais carga T04
y_{11}	Abertura de válvula

Tabela 2 – Variáveis Manipuladas

ID	Descrição
u_1	Vazão de óleo de absorção para torre T01
u_2	Vazão de óleo de absorção para torre T02
u_3	Vazão de carga fria para torre T02
u_4	Pressão no topo da T02
u_5	Pressão no topo da T04
u_6	Temperatura de fundo da T03
u_7	Temperatura de topo da T03
u_8	Vazão de Refluxo da T04
u_9	Controle de Temperatura da T04
u_{10}	Temperatura de fundo da T02

Tabela 3 – Perturbações

ID	Descrição
w_1	Vazão de gás natural (carga) a ser processada pela unidade
w_2	Riqueza da carga
w_3	Carga na torre T04

Atualmente as variáveis controladas y_5 , y_9 e y_{11} não estão sendo utilizadas no problema de controle. A relação entre as variáveis controladas, as manipuladas e as perturbações é mostrada na tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre variáveis controladas manipuladas e perturbações

Variável controlada	Variáveis manipuladas	Perturbações
y_1	u_1	w_1, w_2
y_2	u_1, u_2, u_3, u_{10}	w_1, w_2
y_3	u_1, u_2, u_{10}	w_1, w_2
y_4	u_6, u_7	w_1, w_2
y_5	u_1, u_3, u_4	w_1, w_2
y_6	u_6, u_7, u_{10}	-
y_7	u_1, u_2, u_5, u_{10}	w_1, w_2
y_8	u_5, u_8, u_9	w_3
y_9	u_8, u_9	w_3
y_{10}	u_8	w_3
y_{11}	$u_1, u_2, u_3, u_4, u_{10}$	w_1, w_2

O controle avançado desse processo tem objetivos como maximizar a carga processada na unidade, minimizar a perda de C3 no gás industrial, manter o teor de C_2 do GLP dentro da especificação, minimizar a perda de hidrocarbonetos para queima e maximizar o teor de C_{5+} na gasolina natural. As variáveis mais difíceis de controlar são o teor de C2 no GLP (y_3), abertura da válvula de pressão (y_7) e teor de C5 na gasolina natural (y_8). As seções seguintes explicam brevemente como algumas das variáveis manipuladas e perturbações influenciam no comportamento dessas controladas.

1.a Módulo de Simulação

Na secção 2 foi apresentado o modelo completo da UPGN-ATA. Neste trabalho foi utilizado um modelo reduzido do sistema, com oito variáveis manipuladas, oito variáveis controladas e três perturbações. Nas tabelas 5, 6, 7, 8 é apresentado o novo conjunto de variáveis:

Tabela 5 – Variáveis Controladas para o modelo reduzido

ID	Descrição
y_1	Teor de C_2 no GLP
y_2	Nível da torre (T02)
y_3	Vazão de refluxo na torre (T03)
y_4	Abertura da válvula de pressão da torre T04
y_5	Teor de C_5 na torre T04
y_6	Refluxo mais carga T04
y_7	Teor de C_3 na torre (T01)
y_8	Teor de C_3 na torre (T02)

Tabela 6 – Variáveis Manipuladas para o modelo reduzido

ID	Descrição
u_1	Vazão de óleo de absorção para torre T01
u_2	Vazão de óleo de absorção para torre T02
u_3	Vazão de carga fria para torre T02
u_4	Pressão no topo da T04
u_5	Temperatura de topo da T03
u_6	Vazão de Refluxo da T04
u_7	Controle de Temperatura da T04
u_8	Temperatura de fundo da T02

Tabela 7 – Perturbações para o modelo reduzido

ID	Descrição
w_1	Vazão de gás natural (carga) a ser processada pela unidade
w_2	Riqueza da carga
w_3	Carga na torre T04

Tabela 8 – Relação entre variáveis controladas manipuladas e perturbações para o modelo reduzido

Variável controlada	Variáveis manipuladas	Perturbações
y_1	u_1, u_2, u_8	w_2
y_2	u_5	w_1, w_2
y_3	u_5, u_8	-
y_4	u_1, u_2, u_4, u_8	w_2
y_5	u_4, u_6, u_7	w_3
y_6	u_6	w_3
y_7	u_1	w_1, w_2
y_8	u_1, u_2, u_3, u_8	w_1, w_2

1.b Modelo de Simulação

A simulação do processo é realizada utilizando equações a diferenças, estas foram obtidas a partir das funções de transferências, identificadas com base em dados reais

fornechos pela PETROBRAS. A equação 18 representa de forma matricial o modelo de simulação. Considere amostragem de 1 minuto.

$$\mathbf{Y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{U} + \mathbf{G}_w(z)\mathbf{W}$$

onde G_u é a matriz de funções transferências discretas em relação as variáveis manipuladas, G_w é a matriz para as perturbações e $\mathbf{U} = [u_1 u_2 \dots u_8]^T$, $\mathbf{W} = [w_1 w_2 w_3]^T$. As matrizes G_u e G_w e suas respectivas funções de transferência são apresentadas abaixo:

$$\mathbf{G}_u = \begin{bmatrix} G_{1,1}(z) & G_{1,2}(z) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{1,8}(z) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{2,5}(z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{3,5}(z) & 0 & 0 & G_{3,8}(z) \\ G_{4,1}(z) & G_{4,2}(z) & 0 & G_{4,4}(z) & 0 & 0 & 0 & G_{4,8}(z) \\ 0 & 0 & 0 & G_{5,4}(z) & 0 & G_{5,6}(z) & G_{5,7}(z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{6,6}(z) & 0 & 0 \\ G_{7,1}(z) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_{8,1}(z) & G_{8,2}(z) & G_{8,3}(z) & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{8,8}(z) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} G_{1,1} &= \frac{0.000298z + 0.002566}{z^2 - 1.751z + 0.755} z^{-27} \\ G_{1,8} &= \frac{-0.03856z^2 + 0.009548z + 1.798 * 10^{-5}}{z^2 - 0.9042z + 5.752 * 10^{-7}} z^{-15} \\ G_{3,5} &= \frac{0.007741z + 0.003937}{z^2 - 0.9584z + 1.897 * 10^{-5}} z^{-6} \\ G_{4,1} &= \frac{-0.04949z^2 + 0.01427z + 3.437 * 10^{-5}}{z^2 - 0.968z + 1.17 * 10^{-6}} z^{-28} \\ G_{4,4} &= \frac{5.353}{z - 0.5134} \\ G_{5,4} &= \frac{-0.2807z + 0.01537}{z^2 - 1.469z + 0.5332} z^{-12} \\ G_{5,7} &= \frac{0.04439z - 0.03667}{z^2 - 1.817z + 0.8272} z^{-5} \\ G_{7,1} &= \frac{-0.02409z + 0.0234}{z^2 - 0.9984z + 0.02156} \\ G_{8,2} &= \frac{-0.004995}{0.9445} \\ G_{8,8} &= \frac{-0.0002795z^2 + 0.0003478z + 0.0003198}{z^2 - 1.652z + 0.6869} z^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{1,2} &= \frac{0.007106 + 0.007004}{z - 0.9714} z^{-23} \\ G_{2,5} &= \frac{-0.02269z - 0.0136}{z^2 - 1.112z + 0.2116} \\ G_{3,8} &= \frac{-0.007009}{z - 0.9584} z^{-3} \\ G_{4,2} &= \frac{-0.03625z + 0.007826}{z - 0.9672} z^{-23} \\ G_{4,8} &= \frac{0.02216z - 0.01418}{z^2 - 1.679z + 0.6918} z^{-14} \\ G_{5,6} &= \frac{-0.04508z + 0.03108}{z^2 - 1.249z + 0.3724} z^{-9} \\ G_{6,6} &= \frac{0.2632z + 0.1493}{z^2 - 0.7659z + 0.1859} \\ G_{8,1} &= \frac{0.0009344}{z - 0.9445} \\ G_{8,3} &= \frac{-0.006484z + 0.004228}{z^2 - 1.432z + 0.4647} \end{aligned}$$

$$\mathbf{G}_w = \begin{bmatrix} 0 & G_{1,2}(z) & 0 \\ G_{2,1}(z) & G_{2,2}(z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{4,2}(z) & 0 \\ 0 & 0 & G_{5,3}(z) \\ 0 & 0 & G_{6,3}(z) \\ G_{7,1}(z) & G_{7,2}(z) & 0 \\ G_{8,1}(z) & G_{8,2}(z) & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_{1,2} = \frac{0.01366z^2 - 0.0128z - 0.01706}{z^2 - 1.915z + 0.9191} z^{-20}$$

$$G_{2,1} = \frac{0.00236z + 0.002173}{z^2 - 0.9518z + 0.1157}$$

$$G_{2,2} = \frac{4.68z - 3.722}{z^2 - 0.8786z + 3.875 * 10^{-5}} z^{-20}$$

$$G_{4,2} = \frac{-0.00611z^2 + 0.005808z + 0.007654}{z^2 - 1.914z + 0.9181} z^{-20}$$

$$G_{5,3} = \frac{0.03646z^2 - 0.006099z - 0.02366}{z^2 - 1.444z + 0.4712} z^{-6}$$

$$G_{6,3} = \frac{0.5015z + 0.2255}{z^2 - 0.3526z + 0.0961}$$

$$G_{7,1} = \frac{0.0004086z - 0.0003754}{z^2 - 1.306z + 0.3331}$$

$$G_{7,2} = \frac{0.07873z - 0.07549}{z^2 - 1.176z + 0.2297}$$

$$G_{8,1} = \frac{3.153 * 10^{-5}z - 2.938 * 10^{-5}}{z^2 - 1.9z + 0.903}$$

$$G_{8,2} = \frac{0.008119}{z - 0.956}$$

$$\mathbf{U} = [u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6 u_7 u_8]^T$$

$$\mathbf{W} = [w_1 w_2 w_3]^T$$

2 Objetivos do Controle

O objetivo do trabalho é realizar um projeto de um DMC de um sistema de grande dimensão e comparar o comportamento do sistema com e sem usar as perturbações medidas no DMC. O controle a ser projetado deve priorizar as variáveis y_1 , y_7 e y_8 que são as mais importantes. Assim, a sintonia deve considerar esta condição. Pode considerar que o ponto de equilíbrio inicial é zero para todas as variáveis pois trata-se de um modelo incremental.

3 Implementação do Algoritmo de Controle

A implementação do algoritmo se deu através do Matlab. Primeiramente, foram inicializadas a matriz das funções de transferência do processo e também da perturbação, colhendo através do ensaio ao degrau os valores dos horizontes de modelo para cada função de transferência. Em seguida, foi programada a função para calcular os horizontes de predição e de controle para cada função de transferência do sistema. Para isso, foram seguidas as recomendações listadas na apostila de Controle Preditivo: Caso SISO. Essa função pode ser vista abaixo:

```

1 function [N1, N2, N, Nu, t_5] = ajuste( FT, d, Ts)
2 h = stepinfo(FT, 'SettlingTimeThreshold', 0.05);
3 t_5 = h.SettlingTime;
4 N1 = d + 1; %hzonte pred minimo (comeca apos atraso de d amostras)
5 N2 = ceil(median([(0.5*t_5)/Ts], (t_5/Ts)])); %hzonte pred max
6 N = (N2 - N1 + 1); %hzonte de predicao
7 Nu = ceil(mean([N/5, N/2])); %Horizonte de controle
8 end

```

Calculados todos os horizontes N_2 , N e N_u , foi criada uma nova função para o cálculo da matriz dinâmica baseada nos coeficientes da resposta ao degrau colhidos na primeira etapa. Então, para cada função de transferência, é calculada uma matriz \mathbf{G} , com dimensão $N \times N_u$.

```

1 function [ G ] = matrizDin( N, Nu, d, gi)
2 % Calculo da Matriz G
3 G = zeros(N,Nu);
4 G(:,1) = gi(d+1:N+d);
5 for i =2:Nu
6     for j = 2:N
7         G(j,i) = G(j-1,i-1);
8     end
9 end

```

Em seguida, visando o empilhamento de todas as matrizes G em uma só, foi necessário reformatar as dimensões das matrizes G tomando como critério sempre o maior valor do horizonte de predição e de controle. Ao final disto, é obtida uma matriz G composta por todas as matrizes G redimensionadas.

Com a matriz dinâmica G do sistema calculada, parte-se para o cálculo das matrizes Q_u e Q_y , respectivamente, matriz do peso δ , para ponderação do erro de seguimento, e matriz do peso λ , para ponderação do esforço de controle.

Finalmente, com todas as matrizes obtidas, partiu-se para o cálculo da matriz K , cuja expressão é:

```

1 K = inv(G'*Qy*G + Qu)*G'*Qy;

```

Para terminar a parte *offline* do algoritmo, criou-se uma função para cálculo da chamada matriz \mathbf{H} , para cada função de transferência, que irá futuramente compor a resposta livre do sistema, estando mostrada abaixo:

```

1 function [ H ] = calculoH( nss, nro, h, n )
2
3 H = [ ] ;
4 N = n;
5 Nss = nss(nro);
6 z = 1 + N + Nss;
7
8 if(z > length(h))
9     sprintf("Valor %d", z);
10    h = [h, h(end)*ones(1,z-length(h))];
11 end
12
13 for i = 1:Nss
14     g(i) = h(1+i) - h(i);
15 end
16 H(1,:) = g;
17
18 for k = 1:N-1
19     for j = 1:Nss
20         g(j) = h(1+j+k) - h(j);
21         H(k+1,:) = g;
22     end
23 end

```

Novamente, para empilhar todas as matrizes H calculadas, foi necessário reformatar àquelas levando como parâmetro os maiores valores dos horizontes de modelo e de controle. Pensando na perturbação, os passos descritos para o cálculo da matriz \mathbf{H} do processo, foram novamente seguidos para o cálculo da matriz \mathbf{H} da perturbação.

Antes de iniciar o *loop* do controlador DMC, foram inicializados os vetores dos incrementos de controle passados, dos incrementos de controle futuro, dos sinais de controle e das saídas. Além disso, foram também inicializados os vetores das referências e das perturbações.

O *loop* de controle começa com a simulação do processo, o que é feito através do uso da função **lsim** do Matlab, salvando em um vetor a parte o valor de todas saídas obtidas a cada passo da simulação. Então, levando em conta os valores obtidos a cada passo da simulação, é computado o vetor de predições da saída e, em seguida, é feita a atualização dos valores dos incrementos de controle passados, dos incrementos de controle futuros e dos sinais de controle atuais.

```

1  for k=2:iters
2
3  inputs = [u' q'];
4  %inputs = [u'];
5  out = lsim(Guw, inputs, t);
6  ysim(:,k) = out(k,:)';
7
8  %delta Q passados
9  if k < Nssd(1)+1
10     dq_pass1 = q1(k)*ones(Nssd(1),1);
11  else
12     dq_pass1 = q1(k-Nssd(1)+1:k)';
13  end
14
15  if k < Nssd(2)+1
16     dq_pass2 = q2(k)*ones(Nssd(2),1);
17  else
18     dq_pass2 = q2(k-Nssd(2)+1:k)';
19  end
20
21  if k < Nssd(3)+1
22     dq_pass3 = q3(k)*ones(Nssd(3),1);
23  else
24     dq_pass3 = q3(k-Nssd(3)+1:k)';
25  end
26
27  dq_passados = [dq_pass1; dq_pass2; dq_pass3];
28
29  %sem feedforward
30  y = G*deltaU + H*du_passados + I*ysim(:,k);
31
32  %com feedforward
33  %y = G*deltaU + H*du_passados + I*ysim(:,k) + Hq*dq_passados;
34
35  %atualizacao deltaUs passados
36  du_passados=[deltaU(1,1);
37               du_passados(1:Nss(1)-1,1);
38               deltaU(Nu(1)+1,1);
39               du_passados(Nss(1)+1:Nss(1)+Nss(2)-1,1);
40               deltaU(Nu(1)+Nu(2)+1,1);
41               du_passados(Nss(1)+Nss(2)+1:Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)-1,1);
42               deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+1,1);

```

```

43     du_passados(Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)+1:Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)+Nss(4)-1,1);
44     deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+1,1);
45     du_passados(Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)+Nss(4)+1:Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)+Nss(4)
46         +Nss(5)-1,1);
47     deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+Nu(5)+1,1);
48     du_passados(Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)+Nss(4)+Nss(5)+1:Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)
49         +Nss(4)+Nss(5)+Nss(6)-1,1);
50     deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+Nu(5)+Nu(6)+1,1);
51     du_passados(Nss(1)+Nss(2)+Nss(3)+Nss(4)+Nss(5)+Nss(6)+Nss(7)+1:Nss(1)
52         +Nss(2)+Nss(3)+Nss(4)+Nss(5)+Nss(6)+Nss(7)+Nss(8)-1,1);
53 ];
54 %set point
55 %considera ref futura cte
56 ref1 =w1(k)*ones(1,N(1))';
57 ref2 =w2(k)*ones(1,N(2))';
58 ref3 =w3(k)*ones(1,N(3))';
59 ref4 =w4(k)*ones(1,N(4))';
60 ref5 =w5(k)*ones(1,N(5))';
61 ref6 =w6(k)*ones(1,N(6))';
62 ref7 =w7(k)*ones(1,N(7))';
63 ref8 =w8(k)*ones(1,N(8))';
64
65 ref = [ref1 ; ref2 ; ref3 ; ref4 ; ref5 ; ref6; ref7; ref8];
66
67 %calcula o controle
68 deltaU = K*(ref-y);
69
70 %atualiza controle
71 u(1,k) = u(1, k-1) + deltaU(1,1);
72 u(2,k) = u(2, k-1) + deltaU(Nu(1)+1,1);
73 u(3,k) = u(3,k-1) + deltaU(Nu(1)+Nu(2)+1,1);
74 u(4,k) = u(4,k-1) + deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+1,1);
75 u(5,k) = u(5,k-1) + deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+1,1);
76 u(6,k) = u(6,k-1) + deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+Nu(5)+1,1);
77 u(7,k) = u(7,k-1) + deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+Nu(5)+Nu(6)+1,1);
78 u(8,k) = u(8,k-1) + deltaU(Nu(1)+Nu(2)+Nu(3)+Nu(4)+Nu(5)+Nu(6)+Nu(7)+1,1);
79
80 end

```

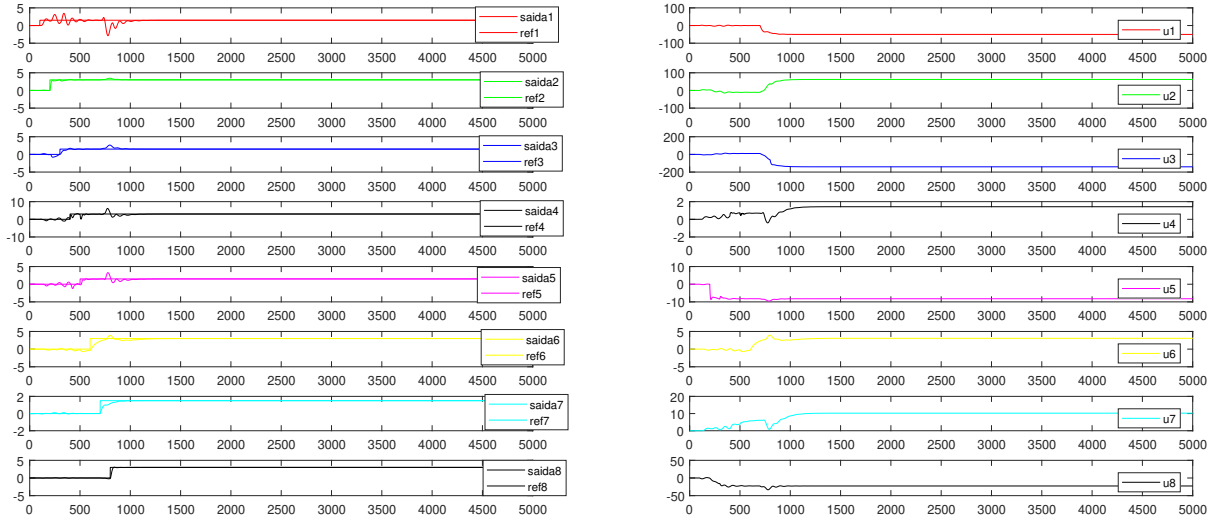
4 DMC MIMO sem perturbação

Com o algoritmo de controle completamente implementado, foram definidos três cenários de simulação: o primeiro, sem levar em conta a presença das perturbações externas, a segunda, com as perturbações externas e, por último, com as perturbações externas e com controle antecipativo.

O ajuste do controlador, isto é, a definição dos valores dos pesos δ e λ , foi obtido após diversas simulações, levando em conta a necessidade premente de priorizar as variáveis de saída y_1, y_2 e y_8 . Com isso, chegou-se aos valores:

$$\begin{array}{cccccccc} \lambda_1 = 100 & \lambda_2 = 100 & \lambda_3 = 10 & \lambda_4 = 100 & \lambda_5 = 100 & \lambda_6 = 100 & \lambda_7 = 500 & \lambda_8 = 100 \\ \delta_1 = 10 & \delta_2 = 100 & \delta_3 = 100 & \delta_4 = 1 & \delta_5 = 10 & \delta_6 = 1 & \delta_7 = 500 & \delta_8 = 100 \end{array}$$

A figura 1 mostram as saídas obtidas e também os sinais de controle:



(a) Saídas obtidas.

(b) Sinais de controle obtidos.

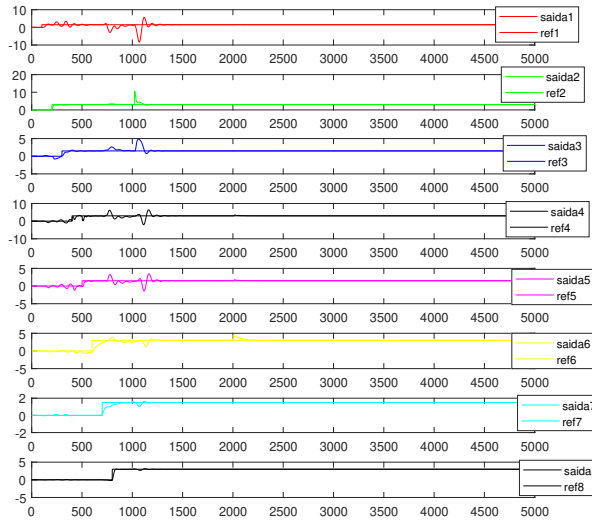
Figura 1: Simulação do sistema MIMO sem perturbações externas.

Nota-se, portanto que houve seguimento de referência bastante satisfatório, com todas as saídas atingindo os valores das referências passadas. Entretanto, devido ao acoplamento entre as saídas, nota-se que há uma certa oscilação no comportamento das saídas na ocorrência dos degraus de referências, mais notavelmente, para a primeira saída.

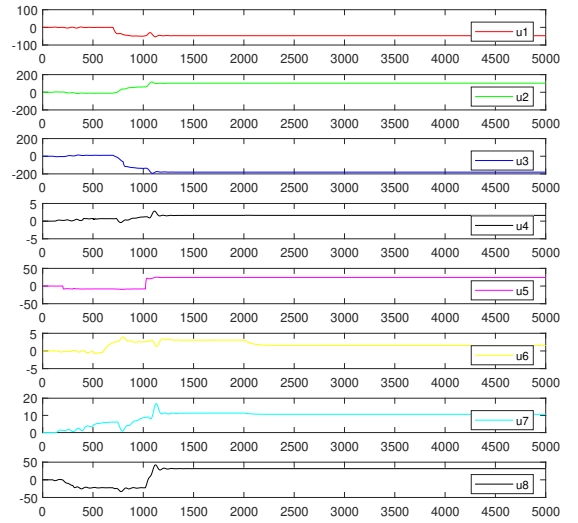
Este acoplamento entre saídas é inerente ao sistema e, portanto, seu efeito não pode ser desprezado. Porém, em todos os casos, este problema não causou uma oscilação preocupante nos valores das saídas, o que é importante, haja vista a natureza também econômica do processo.

5 DMC MIMO com perturbação

No segundo cenário da simulação, foi simulado o sistema com perturbações externas, cujos resultados são mostrados na figura 2:



(a) Saídas obtidas.

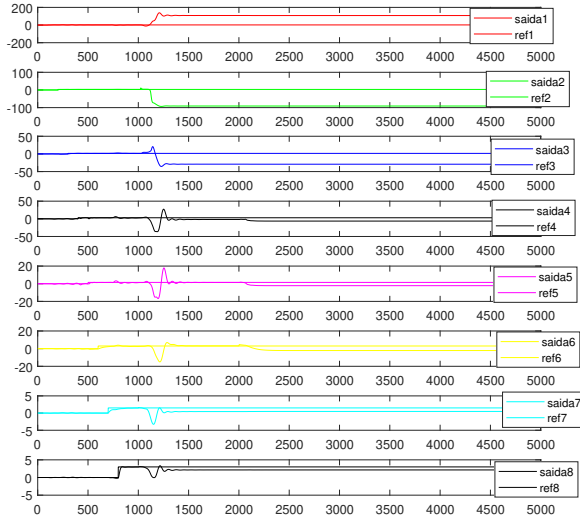


(b) Sinais de controle obtidos.

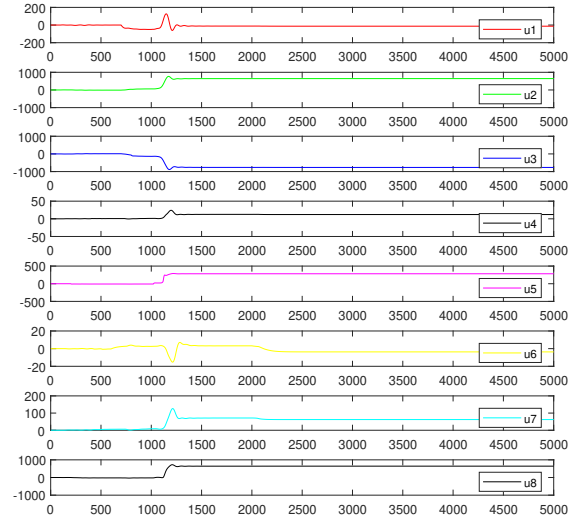
Figura 2: Simulação do sistema MIMO com perturbações externas.

Com a presença das perturbações, nota-se que o sistema foi capaz de rejeitar com erro nulo todas elas, mostrando a eficácia do sistema de controle programado.

Por último, foi simulado o sistema com perturbações mas, desta vez, com a inclusão do controle antecipativo que, em tese, deveria melhorar bastante a rejeição das perturbações. Os resultados obtidos são mostrados na figura 3:



(a) Saídas obtidas.



(b) Sinais de controle obtidos.

Figura 3: Simulação do sistema MIMO com feedforward e perturbações externas.

É notável que a inclusão do controlador feedforward piorou o desempenho do sistema, levando a um erro razoável em regime permanente de algumas saídas. Isto desperta a ideia de que talvez faltou algum detalhe técnico na implementação do controlador antecipativo que, infelizmente, não foi solucionado até o momento.

6 Conclusão

Este trabalho proporcionou uma melhor assimilação prática dos conceitos de controle preditivo multivariável passados nas aulas teóricas. Com isso, a partir de um problema industrial baseado na Unidade de Processamento de Gás Natural de Atalaia, foi desenvolvido um algoritmo de controle MPC-DMC MIMO que atinge as especificações de controle.

Desta maneira, a importância do controle preditivo, principalmente, aplicado a processos multivariáveis onde há muito acoplamento entre as saídas do sistema, algo muito comum em plantas da área de óleo & gás, foi ressaltado e mesmo tratando-se de um controlador sem restrição, observou-se a grande dificuldade existente no ajuste do controlador, haja vista que o acoplamento entre as saídas colocam o projetista em uma situação de *trade-off*, ou seja, escolher aquilo que é mais economicamente e operacionalmente viável para a empresa.