



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Proposta e testes computacionais de um controlador PI-Preditivo

Autor: Leonardo Motter

Orientador: Pedro Rafael Bolognese Fernandes

Porto Alegre, dezembro de 14

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Controlador Preditivo baseado em Modelo	3
2.2 Formulação matemática do MPC	4
2.3 Algoritmo de predição	5
3 Metodologia	8
3.1 Descrição do PI-Preditivo: Controle Preditivo baseado em Modelo com ação PI	8
3.2 Descrição dos Estudos de Caso	11
3.2.1 PI-Preditivo aplicado em planta linear de primeira ordem	12
3.2.2 Variações nos parâmetros do controlador PI-Preditivo	13
3.2.3 PI-Preditivo aplicado em planta de segunda ordem com resposta inversa	13
3.2.4 PI-Preditivo em condição de saturação	14
4 Resultados	16
4.1 PI-Preditivo aplicado ao processo de 1ª ordem	16
4.1.1 Teste de comparação entre os controladores	16
4.1.2 Variações nos parâmetros do PI-Preditivo	17
4.1.3 Teste de saturação dos controladores	22
4.2 PI-Preditivo aplicado ao processo de segunda ordem com resposta inversa	25
4.2.1 Teste de comparação entre os controladores	25
4.2.2 Teste de saturação dos controladores	26
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	27
6 Referências	28
7 Apêndice	30

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional prestado em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes pela imensa ajuda, paciência e atenção prestadas no decorrer não só deste trabalho, mas ao longo das disciplinas cursadas.

Aos meus amigos e colegas, pelo tempo que passamos juntos e pelos momentos de descontração.

Resumo

O controlador MPC está ganhando cada vez mais espaço no âmbito industrial, principalmente por apresentar aplicação tanto para sistemas não lineares quanto lineares, sistemas mono e multivariáveis, limitação das ações de controle e uso de restrições. Porém apresenta baixo desempenho frente a distúrbios não medidos e baixa robustez. Nesse sentido, foi proposta e desenvolvida uma estratégia de controle chamada PI-Preditivo que visa compensar essa deficiência. Nela a trajetória predita é utilizada como referência para o controlador PI de maneira que este contribua, principalmente, para a rejeição de perturbações, enquanto a ação antecipatória mantém a otimização de mudanças de referência. A estratégia preditiva DMC foi utilizada e através de simulações em MATLAB[®] a proposta foi validada frente a uma planta linear de primeira ordem e a um ajuste empírico dos parâmetros. Os resultados obtidos comprovaram que o controle PI-Preditivo é mais eficiente na rejeição de perturbações quando comparado a um MPC isolado e um PI clássico em condições de saturação, sendo possível compensar satisfatoriamente os distúrbios não medidos na entrada do processo.

Palavras chave: Predição, controle preditivo, MPC, DMC, PI-Preditivo, controle preditivo com ação PI.

Abstract

The MPC controller is gaining more space in the industrial field, especially for presenting application for both non-linear as linear systems, mono and multivariable systems, limitation of control actions and use of restrictions. But it provides poor performance against unmeasured disturbances and low robustness. Thus, it was proposed and developed one control strategy called PI-Predictive to compensate for this deficiency. Therein the predicted trajectory is used as a reference for the PI controller so that it contributes principally to disturbance rejection while anticipatory action keeps the optimization of reference changes. Predictive DMC strategy was used and through simulations in MATLAB the proposal was validated against a linear plant first order and an empirical parameter adjustment. The results indicated that the PI-Predictive control is more effective in rejecting disturbances when compared to a single MPC and a classical PI saturation conditions, it is possible to satisfactorily compensate for unmeasured disturbances in the process input.

Keywords: Prediction, predictive control, MPC, DMC, PI-Predictive, predictive control with PI action.

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de funcionamento do MPC (Adaptado de Normey-Rico, 2007).....	3
Figura 2. Obtenção da matriz dinâmica (Adaptado de Ogunnaike e Ray, 1994).....	6
Figura 3. Esquema do PI-Preditivo.....	9
Figura 4. Diagrama de blocos utilizado nas simulações.....	10
Figura 5. Respostas obtidas para os três controladores aplicados na planta de primeira ordem.....	16
Figura 6. Índice ITAE para cada controlador.....	17
Figura 7. Respostas obtidas com a variação do horizonte de predição.....	18
Figura 8. Alterações na reposta com a mudança no horizonte de controle.....	19
Figura 9. Respostas obtidas para diferentes ponderações do erro (δ) na função objetivo.....	19
Figura 10. Respostas obtidas para diferentes fatores de supressão dos movimentos de controle (λ).....	20
Figura 11. Comportamento do PI-Preditivo obtido com variações em T_i	21
Figura 12. Respostas obtidas com alterações em K_p	21
Figura 13. Resposta obtida para os controladores em saturação e PI sem anti <i>windup</i>	22
Figura 14. Resposta obtida para os controladores em saturação e PI com anti <i>windup</i>	23
Figura 15. Índice ITAE para os controladores em condição de saturação - PI sem anti <i>windup</i>	24
Figura 16. Índice ITAE para os controladores em condição de saturação - PI com anti <i>windup</i>	24
Figura 17. Respostas dos controladores para o sistema de segunda ordem.....	25
Figura 18. Comportamento observado para os controladores em saturação.....	26

Lista de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros dos controladores aplicados na planta de primeira ordem.....13

Tabela 2. Parâmetros dos controladores aplicados na planta de segunda ordem.....14

Lista de Símbolos

k	Instante de amostragem
H_p	Horizonte de predição
H_c	Horizonte de controle
m	Intervalo de um a H_p
n	Intervalo de zero a H_c
$\hat{\mathbf{y}}$	Vetor de saídas preditas
\mathbf{w}	Vetor de erros de predição
Δu	Incremento atual de controle
$\Delta \mathbf{u}$	Vetor de incrementos de controle
δ	Ponderação da diferença entre a saída predita e da referência
λ	Fator de supressão dos movimentos de controle
J	Função objetivo
$\boldsymbol{\beta}_u$	Matriz dinâmica
y_m	Saída medida
K_p	Ganho proporcional
T_i	Tempo integral
K	Ganho estático do processo
τ	Constante de tempo característica do processo
θ	Tempo morto
T_s	Período de amostragem
$\hat{y}[k]$	Predição da saída atual
\mathbf{y}_0	Vetor contendo respostas livres
u_{PI}	Ação do controlador PI
u_{MPC}	Ação do controlador MPC
u_{total}	Ação total aplicada ao processo
r	Referência desejada
u_{min}	Limite inferior da ação de controle
u_{max}	Limite superior da ação de controle
K_c	Ganho crítico
T_c	Período crítico

Lista de Abreviaturas e Siglas

MPC	Controle preditivo baseado em modelo (<i>Model Predictive Control</i>)
PI/PID	Controlador Proporcional Integral e Derivativo
DMC	Controle por Matriz Dinâmica (<i>Dynamic Matrix Control</i>)
MAC	Controle Algorítmico baseado em Modelo (<i>Model Algorithm Control</i>)
GPC	Controle Preditivo Generalizado (<i>Generalized Predictive Control</i>)
SISO	<i>Single Input, Single Output</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple output</i>
ITAE	Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (<i>Integral of Time multiplied by Absolute Error</i>)
ISA	Sociedade Internacional de Automação (<i>International Society of Automation</i>)

1 Introdução

Desde a década de 80, novas técnicas de controle têm sido desenvolvidas para atender as demandas da indústria química. Uma vez que esta envolve processos multivariáveis, sujeitos a distúrbios, restrições operacionais, não linearidades e com grandes atrasos de transporte, os típicos controladores com ação Proporcional Integral Derivativa (PID) são adequados para uma faixa restrita de operação, e como alternativa consolidou-se o Controlador Preditivo baseado em Modelo (MPC) (Casillo, 2009).

Este tipo de controle é caracterizado pela utilização de um modelo explícito da planta a fim de prever as saídas do processo dentro de um intervalo futuro pelo cálculo de uma seqüência de ações de controle que minimizem uma função objetivo sujeita a restrições (Silva *et al.*, 2003). A cada instante de amostragem, uma nova seqüência de controle é computada, e apenas o primeiro sinal é aplicado, configurando o princípio conhecido como *horizonte móvel*.

As principais vantagens do MPC incluem a aplicação tanto para sistemas não lineares quanto lineares, sistemas monovariáveis (SISO) e multivariáveis (MIMO), limitação das ações de controle através de restrições e fácil tratamento de atrasos pelos próprios algoritmos que compõe a estratégia (Normey-Rico, 2007).

No entanto, a forte dependência de modelos limita sua utilização, pois, na maioria das vezes, os métodos de identificação de processo não determinam toda a dinâmica da planta assim como a influência de perturbações, degradando o desempenho do controle. Assim, os controladores preditivos geralmente são utilizados em estratégias do tipo cascata, fornecendo as referências ótimas para malhas do tipo PI(D) que asseguram o controle de variáveis sujeitas a distúrbios de dinâmica mais rápida.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo propor, validar e testar uma estratégia de controle por meio de simulações em que ação derivativa de um PID, cuja função é fornecer a direção de variação do erro da planta, seja substituída pela ação de um MPC de tal forma que os benefícios de ambas as configurações sejam combinadas em uma mesma camada.

A estratégia a ser desenvolvida emprega a trajetória de predição como referência para o controlador proporcional-integral e a compara à saída do processo, de modo que haja a compensação de perturbações não medidas, melhorando o desempenho do MPC. Para tanto, além das simulações do comportamento em malha fechada, serão realizados testes para a verificação da influência de cada parâmetro no comportamento do controlador e este, comparado, da mesma forma, a controladores PI e MPC clássicos.

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, apresentando-se na sequência a revisão bibliográfica (Capítulo 2), que trata dos conceitos teóricos e trabalhos já realizados anteriormente dentro da área de interesse; a metodologia (Capítulo 3), onde são descritos os procedimentos adotados para compor e validar a proposta de controle e os testes realizados; os resultados (Capítulo 4), trazendo dados e observações realizadas ao longo do trabalho e por fim, a conclusão (Capítulo 5), juntamente com possibilidades futuras de melhoramento e novos estudos a respeito do tema tratado.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Controlador Preditivo baseado em Modelo

A denominação “controlador preditivo baseado em modelo” não se refere a uma estratégia de controle específica, mas é a designação dada a um conjunto grande de métodos de controle que foram desenvolvidos considerando algumas ideias comuns baseadas no conceito de predição (Camacho e Bordons, 2004).

As diferenças entre os diversos algoritmos existentes devem-se basicamente à forma de escolha dos modelos para o processo e as perturbações, ao tipo de função objetivo e ao procedimento para manipular as restrições e o cálculo do controle (Rossiter, 2003).

Bravo (2010) afirma que a razão para o êxito dos algoritmos MPC consiste, principalmente, na maneira natural de direcionar o problema de controle. Em comparação com o controle convencional, que utiliza uma lei de controle previamente estabelecida, o controle preditivo é construído com base no uso explícito do modelo do processo para o cálculo *on-line* do comportamento futuro da planta, na utilização de otimização e da estratégia de horizonte deslizante.

A estrutura geral de um MPC é apresentada na Figura 1, onde pode ser observado seu funcionamento: com o valor de controle atual e a saída atual do processo, juntamente com um modelo, calcula-se primeiro a predição da saída futura do processo. Com estas informações, um módulo de otimização calcula o sinal de controle a ser aplicado ao processo no próximo passo, considerando a minimização de um determinado índice de desempenho e as restrições nas variáveis e/ou controle (Camacho e Bordons, 2004).

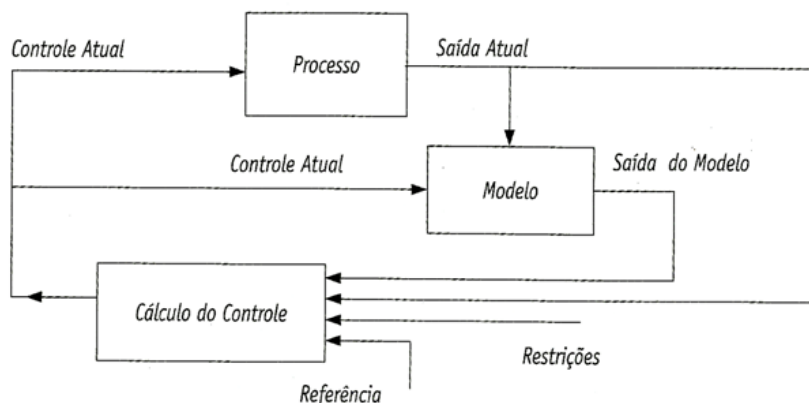


Figura 1. Esquema de funcionamento do MPC (Adaptado de Normey-Rico, 2007)

2.2 Formulação matemática do MPC

Para Rossiter (2003), em todos os algoritmos de controle preditivo baseado em modelo têm-se três elementos em comum: i) o modelo de predição, ii) a função objetivo e a iii) lei de controle. Diferentes opções podem ser escolhidas para cada um destes elementos, dando origem a diferentes algoritmos: Controle por Matriz Dinâmica (*Dynamic Matrix Control – DMC*) (Cutler e Ramaker, 1979), Controle Algorítmico baseado em Modelo (*Model Algorithm Control – MAC*) (Richalet *et al.*, 1976) e Controle Preditivo Generalizado (*Generalized Predictive Controller - GPC*) (Clarke *et al.*, 1987), para citar alguns.

De forma geral, no MPC, a cada instante de amostragem k , usa-se o modelo da planta para simular as futuras saídas em um determinado horizonte de predição H_p . Essas saídas simuladas, $\hat{y}[k + m|k]$ (a notação indica o valor predito de y no instante $k + m$, calculado no instante k), para $m = [1 \dots H_p]$, dependem dos valores conhecidos até o instante k . Com o uso dessas predições e das entradas e saídas passadas, calcula-se uma sequência de variações dos sinais de controle $\Delta u[k + n|k]$, $n = [0 \dots H_c]$, em que H_c é chamado de horizonte de controle ($H_c \leq H_p$), por meio da otimização (minimização) de uma função objetivo (Ottoni *et al.*, 2013).

Esta função objetivo é dada tipicamente por:

$$J = \sum_{j=0}^{H_p} \delta[j] [\hat{y}[k + j|k] - r[k + j]]^2 + \sum_{i=0}^{H_c} \lambda[i] [\Delta u[k + i|k]]^2 \quad (1)$$

onde:

\hat{y} indica a saída predita;

r é a referência ou trajetória de referência;

Δu é a ação (incremento) de controle;

$\delta[j]$ representa a j ponderação dada à diferença da saída predita e da referência;

$\lambda[i]$ é o i fator de supressão dos movimentos de controle;

Como se utiliza o conceito de horizonte móvel (*Receding Horizon Principle*), somente o primeiro movimento de controle $\Delta u[k|k]$ é enviado à planta, enquanto os demais sinais calculados são desprezados. No instante seguinte, $\hat{y}[k + 1]$ se torna conhecido e os passos anteriores são, então, repetidos com esse dado, atualizando os valores de todas as demais sequências.

Os fatores de ponderação utilizados tanto no erro entre a predição e a referência quanto nos movimentos de controle geralmente são considerados constantes ao longo dos horizontes e servem de parâmetros de ajuste do controlador, influenciando diretamente no comportamento da saída (Camacho e Bordons, 2004).

Ainda é possível aplicar restrições ao sinal de saída e de controle a serem calculados, de forma que fiquem dentro de certos limites. Este fato implica em uma solução iterativa para o problema de otimização, enquanto que o problema irrestrito pode ser resolvido analiticamente (Maciejowsky, 2000).

2.3 Algoritmo de predição

Conforme mencionado anteriormente, existem diferentes formulações para o algoritmo de predição, sendo que a grande maioria utiliza modelos do tipo entrada-saída (função de transferência, resposta impulsiva, resposta ao salto) para descrever o processo ao qual se deseja aplicar o controle, sendo possível também o uso da representação por variáveis de estado (Normey-Rico, 2007).

Nesse sentido, o controlador baseado em DMC ganhou destaque e se tornou popular desde que foi desenvolvido em 1979, devido ao fato de ter como base a resposta do sistema ao salto unitário para o modelo de predição, permitir facilmente a inclusão de restrições tanto em sistemas multi ou monovariáveis, além de ser de fácil implementação computacional (Camacho e Bordons, 1999).

No algoritmo, a saída predita $\hat{\mathbf{y}}$ é composta das seguintes contribuições: de uma resposta livre (\mathbf{y}_0), que depende das entradas e saídas em instantes passados, funcionando como condição inicial a cada instante k ; da resposta forçada, dependente das ações futuras de controle ($\Delta \mathbf{u}$) e da chamada matriz dinâmica $\beta_{\mathbf{u}}$ (Camacho e Bordons, 1999).

A Figura 2 ilustra a obtenção dessa matriz a partir dos coeficientes obtidos no truncamento e discretização da resposta do sistema ao degrau unitário, em um número de H_p elementos, de tal forma que estes estejam associados ao vetor de movimentos de controle $\Delta \mathbf{u} = [\Delta u(k) \ \Delta u(k + 1) \ \dots]^T$, resultando em uma matriz de dimensões $H_p \times H_c$.

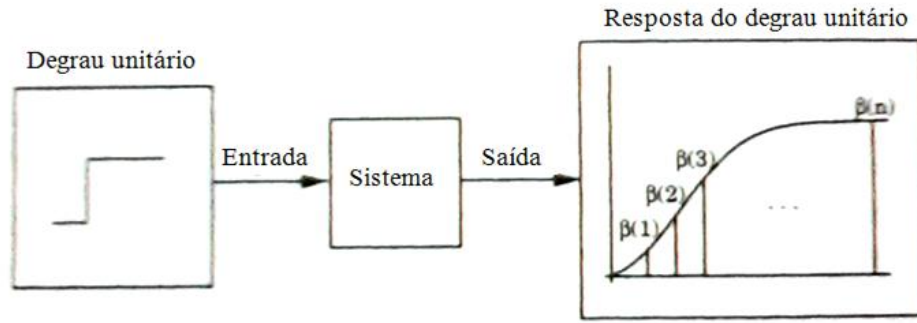


Figura 2. Obtenção da matriz dinâmica (Adaptado de Ogunnaike e Ray, 1994)

Ainda com relação à predição, acrescenta-se uma parcela (\mathbf{w}) referente ao erro de predição, sendo esta responsável por compensar erros de distúrbios não modelados e incluir uma ação de retroalimentação no controlador (Camacho e Bordons, 1999; Ogunnaike e Ray, 1994).

A expressão que define a predição é dada por:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y}_0 + \boldsymbol{\beta}_u \Delta \mathbf{u} + \mathbf{w} \quad (2)$$

com os vetores

$$\hat{\mathbf{y}} = [y[k+1] \ y[k+2] \ \dots \ y[k+H_p]]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_0 = [y_0[k+1] \ y_0[k+2] \ \dots \ y_0[k+H_p]]^T \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{u} = [\Delta u[k] \ \Delta u[k+1] \ \dots \ \Delta u[k+H_c-1]]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{w} = [w[k+1] \ w[k+2] \ \dots \ w[k+H_p]]^T \quad (6)$$

e

$$\boldsymbol{\beta}_u = \begin{bmatrix} \beta(1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta(2) & \beta(1) & 0 & \dots & 0 \\ \beta(3) & \beta(2) & \beta(1) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta(H_c) & \beta(H_c-1) & \beta(H_c-2) & \dots & \beta(1) \\ \beta(H_c+1) & \beta(H_c) & \beta(H_c-1) & \dots & \beta(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta(H_p) & \beta(H_p-1) & \beta(H_p-2) & \dots & \beta(H_p-H_c+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Como não são conhecidos os valores futuros do vetor \mathbf{w} , utiliza-se a hipótese de que ele é constante ao longo do horizonte de predição e igual à diferença entre a saída medida

do processo $y_m[k]$ e a predição realizada no instante anterior $\hat{y}[k]$ (Ogunnaike e Ray, 1994), de forma que a Equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\hat{y} = \mathbf{y}_0 + \boldsymbol{\beta}_u \Delta \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} w \quad (8)$$

onde

$$w = y_m[k] - \hat{y}[k] \quad (9)$$

A partir da Equação (8), resolve-se o problema de controle recursivamente através da minimização da Equação (1) e a cada instante de amostragem todas as variáveis são atualizadas para que o novo cálculo de otimização aconteça.

Cabe salientar que a utilização da Equação (9) na predição insere uma parcela de realimentação no modelo, porém faz com que se tenha um baixo desempenho frente às perturbações, uma vez que nada garante que elas sejam efetivamente constantes no decorrer da predição (Maciejowsky, 2000).

É sabido que uma das principais desvantagens dos controladores preditivos, principalmente o DMC, está relacionada justamente ao desempenho apresentado frente a perturbações não medidas (Lundström *et al.*, 1995). Alguns trabalhos já foram realizados no intuito de corrigir esse problema, entre eles pode-se citar Maciejowsky (2000) que propôs utilizar w como um decremento exponencial ao longo do horizonte, Silveira (2009) que fez uso de um observador para estimar os distúrbios não medidos e Bernard *et al.* (2013) que utilizaram uma combinação de controle preditivo e controle proporcional-integral de forma a diminuir as variações de frequência na saída de um sistema de geração de energia.

3 Metodologia

Na configuração de controle proposta, chamada de PI-Preditivo, a trajetória de saída predita pelo MPC será utilizada como referência para o controlador PI, de maneira que este contribua, principalmente, para a rejeição de perturbações não medidas, enquanto a ação antecipatória, própria do MPC, mantém a otimização com relação à mudança de referência e distúrbios medidos.

O objetivo central é fazer uso das vantagens de cada técnica em uma mesma estrutura de controle. Enquanto o controlador PI atua corrigindo diferenças entre a trajetória de predição e a saída atual, o MPC determina a saída de controle ótima, considerando o modelo da planta e as restrições impostas.

De modo mais simplificado, se deseja substituir a ação derivativa de um PID pela ação preditiva do MPC, combinando as características regulatória e antecipativa de cada controlador, de maneira semelhante à proposta de Raimundo (2013), que utilizou a integral do erro de predição juntamente com o MPC para compensação de distúrbios não medidos e erros de modelagem. Porém aqui, o erro de predição será retirado do modelo, uma vez que o controlador PI inserido já garante a realimentação e rejeição de perturbações.

Outra propriedade importante do MPC incluída na proposta é o uso de restrições na função objetivo para os sinais de controle calculados. Com isto, se pretende reduzir a degradação do desempenho devido à saturação e ao fenômeno de *wind-up* que ocorre em controladores PI clássicos.

No PI-Preditivo, os movimentos ótimos calculados pelo MPC funcionam como um desvio para a ação proporcional-integral, sendo possível representar a ação de controle resultante a partir das Equações (10) e (11), onde $\hat{y}[k]$ denota a saída predita, $y_m[k]$ a saída atual, $u_{MPC}[k]$ a ação computada pelo MPC e u_{total} o sinal aplicado ao processo.

$$u_{PI}[k] = K_p(\hat{y}[k] - y_m[k]) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (\hat{y}[k] - y_m[k]) dt \quad (10)$$

$$u_{total}[k] = u_{PI}[k] + u_{MPC}[k] \quad (11)$$

A Figura 3 representa um esquema simplificado da estratégia proposta. O bloco *MPC* recebe a referência desejada e a leitura da saída atual, por meio do algoritmo implementado, o incremento de controle é calculado. A predição da saída é enviada ao bloco *PI* e comparada à saída do sistema, de forma que, se houver algum erro entre as

duas, o controlador proporcional-integral passa a atuar. Então, as ações de controle são somadas e enviadas à planta (sistema).

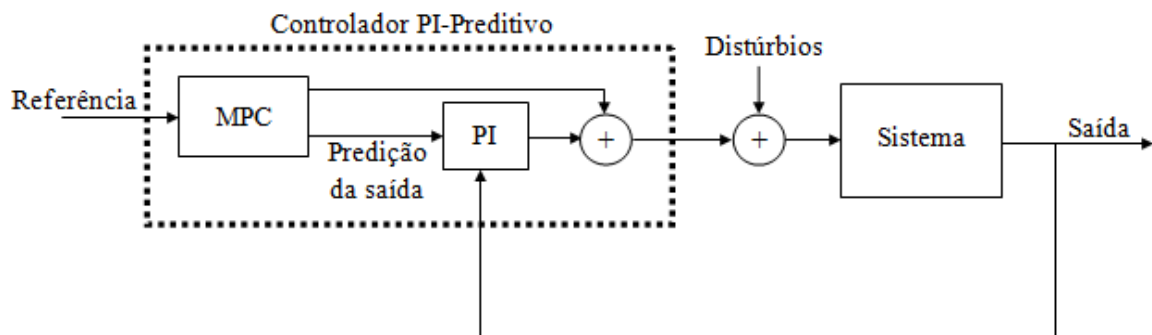


Figura 3. Esquema do PI-Preditivo

O algoritmo de controle desenvolvido é semelhante ao utilizado por Raimundo (2013), sendo baseado no DMC clássico com o modelo de predição representado pela Equação (8), porém retirando-se a parcela correspondente ao erro de predição. O código consta no Apêndice e seu funcionamento pode ser descrito nos seguintes passos:

1. Primeiramente, inicializa-se a resposta livre e a saída com valores nulos;
2. Faz-se a leitura da referência e da saída atuais;
3. Calcula-se o incremento de controle Δu , através da otimização da função objetivo com restrições e com ele, a predição da saída \hat{y} para o próximo instante;
4. Atualiza-se a resposta livre e a saída por meio do primeiro movimento de controle calculado $\Delta u[k]$;
5. Envio da predição e da saída de controle $u(k) = \Delta u[k] + u[k - 1]$ para serem utilizadas pelo PI;
6. Aplicação da ação de controle total ao processo;
7. Espera-se o próximo instante de amostragem, repetindo os passos a partir do segundo.

Em função da combinação de ambas as leis de controle, a estratégia proposta possui sete elementos a serem configurados, sendo eles: o período de amostragem (T_s), horizonte de controle (H_c), horizonte de predição (H_p), fator de supressão dos movimentos (λ), ponderação do erro (δ), ganho proporcional (K_p) e por fim, o tempo integral (T_i). Como o objetivo principal deste trabalho é descrever e testar a configuração do controlador, não foi

proposto um método formal de ajuste, sendo utilizada tentativa e erro para a determinação destes parâmetros. Aqueles que forneceram o melhor desempenho frente ao seguimento de referência e à perturbação foram selecionados.

A metodologia apresentada é testada através de simulações computacionais no MATLAB®/SIMULINK®. O diagrama de blocos utilizado é apresentado na Figura 4 e onde *PI* indica um subsistema que engloba os ganhos K_p e T_i dispostos no padrão ISA e o subsistema *MPC* contém a chamada da *S-function* desenvolvida para a realização do algoritmo de controle, juntamente com a função de otimização *fmincon*. A função *fmincon* permite a inclusão de restrições lineares, na forma de inequações e de equações, assim como restrições não-lineares.

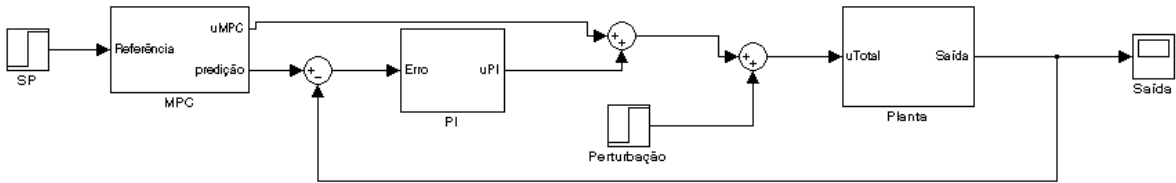


Figura 4. Diagrama de blocos utilizado nas simulações

As restrições de desigualdade consideradas na função são do tipo $AX \leq B$, sendo X o vetor de variáveis de decisão, A a matriz que relaciona cada variável com sua restrição e B a matriz dos valores das restrições. No problema tratado aqui, se quer garantir que em todo o horizonte de controle as restrições sejam obedecidas. A variável que efetivamente é restringida é o sinal de controle \mathbf{u} , porém, como o incremento $\Delta \mathbf{u}$ é a variável de decisão, as matrizes da desigualdade utilizadas foram arranjadas na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} A \\ -A \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \leq B \quad (12)$$

sendo

$$A_{H_c \times H_c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } B_{2H_c \times 1} = \begin{bmatrix} u_{max,1} - u[k-1] \\ u_{max,2} - u[k-1] \\ \vdots \\ u_{max,H_c} - u[k-1] \\ -u_{min,1} + u[k-1] \\ -u_{min,2} + u[k-1] \\ \vdots \\ -u_{min,H_c} + u[k-1] \end{bmatrix}$$

com u_{max} indicando o limite superior da restrição, u_{min} o limite inferior e $u[k - 1]$ a saída de controle no instante anterior.

Visando a efetividade da proposta, será analisado o comportamento do controlador PI-Preditivo frente a um PI e a um MPC/DMC utilizando-se um sistema linear de primeira com tempo morto e um sistema de segunda ordem hiperamortecido com resposta inversa. Como índice de desempenho será utilizado a Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (*Integral of Time multiplied by Absolute Error - ITAE*), uma vez que este apresenta boa seletividade, penalizando os elevados erros iniciais (Ogata, 1985).

3.2 Descrição dos Estudos de Caso

Foram realizados testes em uma planta linear de primeira ordem com tempo morto e em um sistema de segunda ordem com resposta inversa considerando-se variações nos parâmetros do controlador e operação em condições de saturação a fim de se observar a aplicabilidade da proposta e seu desempenho em diferentes situações.

Para o ajuste dos parâmetros do MPC/DMC que será utilizado para comparação, utilizou-se o método de tentativa e erro. Já para o projeto do PI clássico, foi utilizado o método de Ziegler e Nichols (1942) baseado no modelo do processo, onde o ganho proporcional (K_p) e o tempo integral (T_i) do controlador são calculados respectivamente por:

$$K_p = \frac{0,9\tau}{K\theta} \quad (13)$$

$$T_i = 3,33\theta \quad (14)$$

com τ sendo a constante de tempo característica, K o ganho estático da planta e θ o tempo morto.

Para o sistema de segunda ordem e resposta inversa, o ajuste foi realizado da mesma maneira em relação ao MPC/DMC, porém utilizou-se para o PI clássico o ajuste de Ziegler e Nichols (1942) baseado em critérios marginais de estabilidade, onde são levados em consideração o ganho (K_c) e período (T_c) críticos do processo, conforme indicado por (Ogunnaike e Ray, 1994).

As expressões para obtenção dos ganhos do controlador neste caso são representadas por:

$$K_p = 0,45K_c \quad (15)$$

$$T_i = T_c/1,2 \quad (16)$$

Em ambos os casos, para realizar-se uma comparação mais efetiva, o PI foi discretizado com o mesmo período de amostragem dos demais controladores utilizando-se do método *Euler Forward* para aproximação discreta da ação integral.

3.2.1 PI-Preditivo aplicado em planta linear de primeira ordem

Com a finalidade de avaliação do desempenho da estratégia proposta frente a um PI e ao MPC, será utilizado o sistema de primeira ordem com tempo morto (Eq. 17).

$$G(s) = \frac{2}{2s + 1} e^{-1s} \quad (17)$$

O modelo utilizado no algoritmo de controle pelo MPC/DMC para a planta (Equação 17) foi obtido aplicando-se a ela um degrau unitário por meio da função *step*. A partir deste degrau, foram amostrados os pontos para formar a matriz dinâmica β_u de acordo com o horizonte de predição escolhido.

Para a determinação dos parâmetros que compõem o PI-Preditivo, foram realizados alguns testes preliminares e aqueles que proporcionaram a melhor resposta em relação à rejeição da perturbação e ao seguimento de referência foram escolhidos como padrão e compõe a Tabela 1, assim como aqueles empregados para os controladores PI e MPC clássicos.

Tabela 1. Parâmetros dos controladores aplicados na planta de primeira ordem

Controlador	Parâmetros	
PI	K_p	0,60
	T_i	3,00
	T_s	1,00s
MPC	H_P	15,00
	H_C	2,00
	δ	3,00
	λ	1,50
	T_s	1,00s
PI-Preditivo	K_p	0,75
	T_i	3,00
	δ	3,00
	λ	1,50
	H_P	15,00
	H_C	2,00
	T_s	1,00s

O parâmetro K_p encontrado para o controlador PI não corresponde ao valor dado pela Equação (13), pois, em função da grande oscilação apresentada pela resposta durante as simulações iniciais ele foi reduzido, fornecendo um comportamento adequado.

Na realização dos testes, foi utilizada a aplicação de um degrau na referência de três unidades no instante de tempo equivalente a 4 segundos e de uma perturbação do tipo degrau na carga com amplitude unitária no instante igual a 25 segundos.

3.2.2 Variações nos parâmetros do controlador PI-Preditivo

Realizou-se também o estudo da influência de cada parâmetro da estratégia proposta, considerando-se variações de -50% e 100% com relação à sintonia sugerida (Tabela 1). Para isso, foi utilizada a planta de primeira ordem (Equação 17) com as mesmas entradas descritas no item 3.2.1. Como o período de amostragem está relacionado ao esforço computacional empenhado nos cálculos, esse foi mantido constante e igual a um segundo em todos os casos.

3.2.3 PI-Preditivo aplicado em planta de segunda ordem com resposta inversa

O sistema de segunda ordem e resposta inversa utilizado nas simulações é dado por

$$G(s) = \frac{-3s + 1}{10s^2 + 7s + 1} \quad (18)$$

A resposta inversa é causada pela presença do zero da Equação (18) estar localizado no semiplano direito do plano complexo e ao se aplicar um degrau positivo na entrada, o transitório observado será negativo. Além disso, encontrando-se as raízes do denominador vê-se que elas são reais e, portanto a resposta não será oscilatória, caracterizando um sistema hiperamortecido.

Da mesma forma realizada no item 3.2.1, o modelo utilizado para os controladores preditivos foi obtido por meio da amostragem do sinal da resposta ao salto com a função *step* presente no MATLAB. Os parâmetros de ajuste utilizados estão compondo a Tabela 2 abaixo e aqueles relacionados ao controlador PI foram obtidos através das Equações (15) e (16).

Para as simulações foi utilizada a aplicação de um degrau na referência de três unidades no instante de tempo equivalente a 4 segundos e de uma perturbação do tipo degrau na carga com amplitude unitária no instante igual a 40 segundos.

Tabela 2. Parâmetros dos controladores aplicados na planta de segunda ordem

Controlador	Parâmetros	
PI	K_p	1,00
	T_i	7,925
	T_s	1,00s
MPC	H_P	30,00
	H_C	2,00
	δ	1,50
	λ	1,00
	T_s	1,00s
PI-Preditivo	K_p	1,00
	T_i	7,925
	δ	1,50
	λ	1,00
	H_P	30,00
	H_C	2,00
	T_s	1,00s

3.2.4 PI-Preditivo em condição de saturação

Esse teste foi realizado com o objetivo de verificar a efetividade da consideração de restrições por parte dos controladores preditivos MPC e PI-Preditivo. Para uma comparação mais adequada foi utilizado um mecanismo de anti *windup* no controlador PI.

Ambas as plantas foram testadas nessa condição e como entrada foi aplicado um degrau na referência de nove unidades no instante de tempo igual a 3 segundos e de uma perturbação do tipo degrau na carga com amplitude unitária no instante de 25 segundos na planta de primeira ordem, enquanto que na outra a perturbação foi inserida no instante de 40 segundos.

O limite inferior da restrição inserida no sinal de controle foi 0 e o limite superior 5.

4 Resultados

4.1 PI-Preditivo aplicado ao processo de 1ª ordem

4.1.1 Teste de comparação entre os controladores

A Figura 5 apresenta a resposta obtida para os três controladores considerando a planta representada pela Equação 17. Nota-se que o desempenho do PI-Preditivo frente ao distúrbio é consideravelmente melhor do que aquele desenvolvido pelo MPC, além de apresentar menor sobrepasso (cerca de 40%), fornece uma rápida rejeição em aproximadamente 6 segundos.

Quanto à mudança de referência, o PI-Preditivo tem praticamente o mesmo comportamento do MPC, estabilizando em 10 segundos sem *overshoot*, uma vez que os parâmetros de ajuste foram mantidos iguais. Já em relação ao PI clássico a estratégia proposta é mais rápida em termos da perturbação e não apresenta oscilação na mudança de referência.

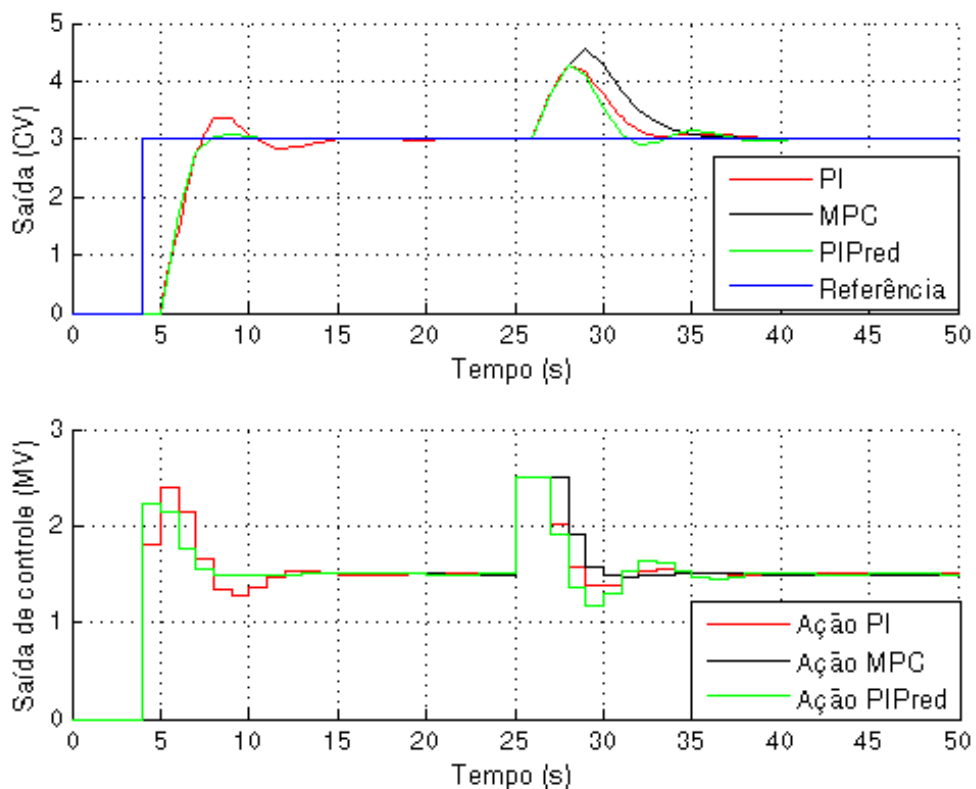


Figura 5. Respostas obtidas para os três controladores aplicados na planta de primeira ordem

Através das ações de controle desenvolvidas ao longo da simulação, é possível notar que o ajuste do PI clássico utilizado é o mais agressivo e que a ação do controlador proposto é a mesma que o MPC nos instantes iniciais, porém quando a perturbação é aplicada, toma amplitudes maiores, demonstrando a contribuição da porção integral-proporcional na rejeição do distúrbio.

Para quantificar as diferenças observadas, fez-se uso do índice ITAE, o qual representa a integral do erro ao longo do tempo, ponderada pelo próprio tempo de simulação. Na Figura 6 é apresentado o índice para cada controlador em função do tempo.

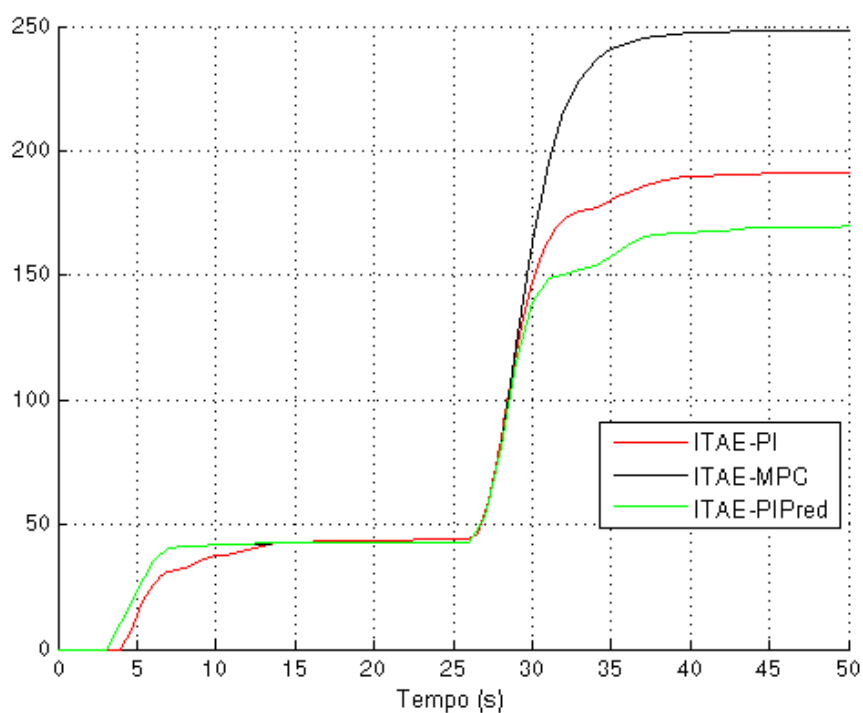


Figura 6. Índice ITAE para cada controlador

Observa-se que as curvas dos três controladores praticamente se sobrepõem na região onde ocorre a mudança de referência, evidenciando o comportamento semelhante apresentado na Figura 5 e tendo o mesmo índice. A principal diferença está na região onde atua a perturbação, sendo o pior índice aquele desenvolvido pelo MPC (248,17), seguido pelo PI clássico (191,16) e, por fim o PI-Preditivo (169,63).

4.1.2 Variações nos parâmetros do PI-Preditivo

A Figura 7 mostra o comportamento observado pela variação do horizonte de predição H_p . Nota-se que o aumento desse parâmetro não altera significativamente o comportamento da resposta, permanecendo quase igual ao o caso padrão ($H_p = 15$). Por outro lado, sua redução altera a resposta inicial, mantendo o sobrepasso por mais tempo e apresentando oscilações.

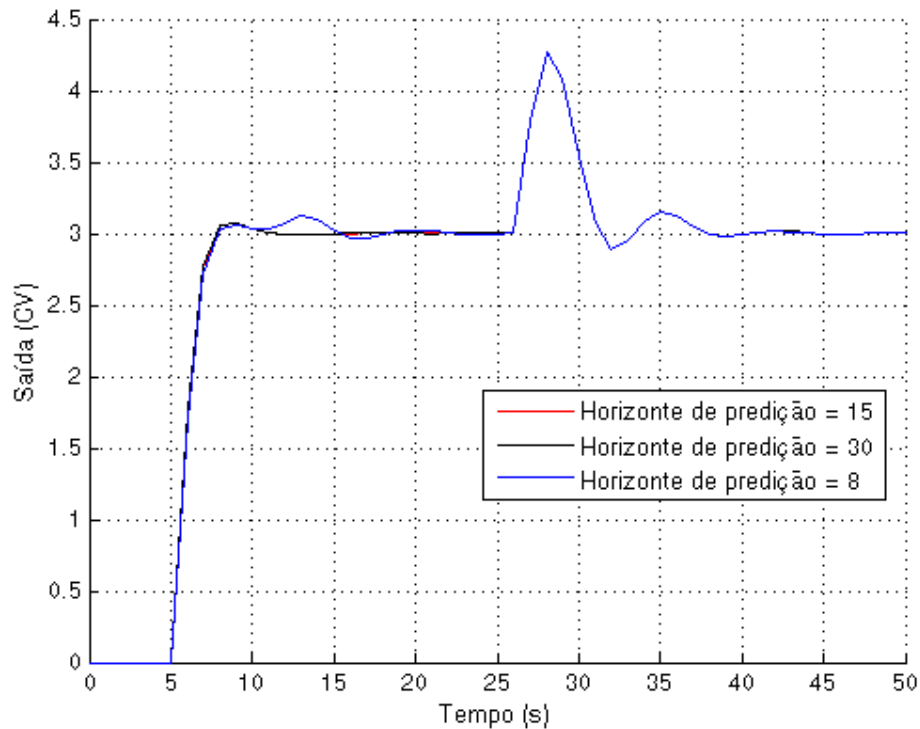


Figura 7. Respostas obtidas com a variação do horizonte de predição

Na Figura 8 observam-se as mudanças ocorridas na resposta frente às alterações no horizonte de controle H_c . Como é possível verificar, a influência desse parâmetro está relacionada com a velocidade de resposta, de forma que, ao diminuí-lo, tem-se um comportamento semelhante à malha aberta. Porém, aumentá-lo em demasia não traz tantos benefícios, somente o aumento da carga computacional.

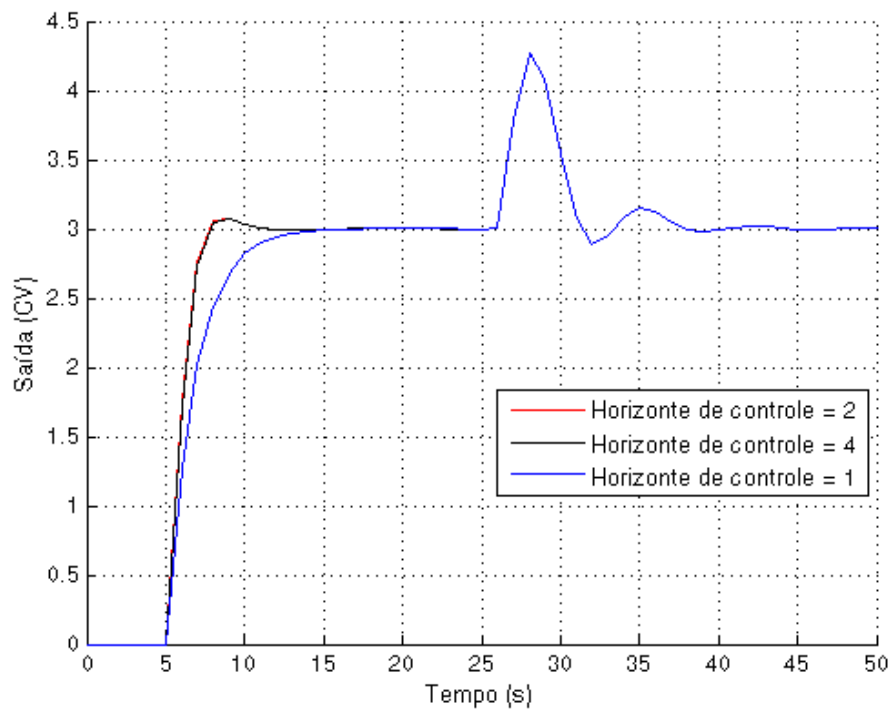


Figura 8. Alterações na reposta com a mudança no horizonte de controle

Os resultados observados para as mudanças na ponderação do erro (δ) e no fator de supressão dos movimentos (λ) são apresentados nas Figuras 9 e 10.

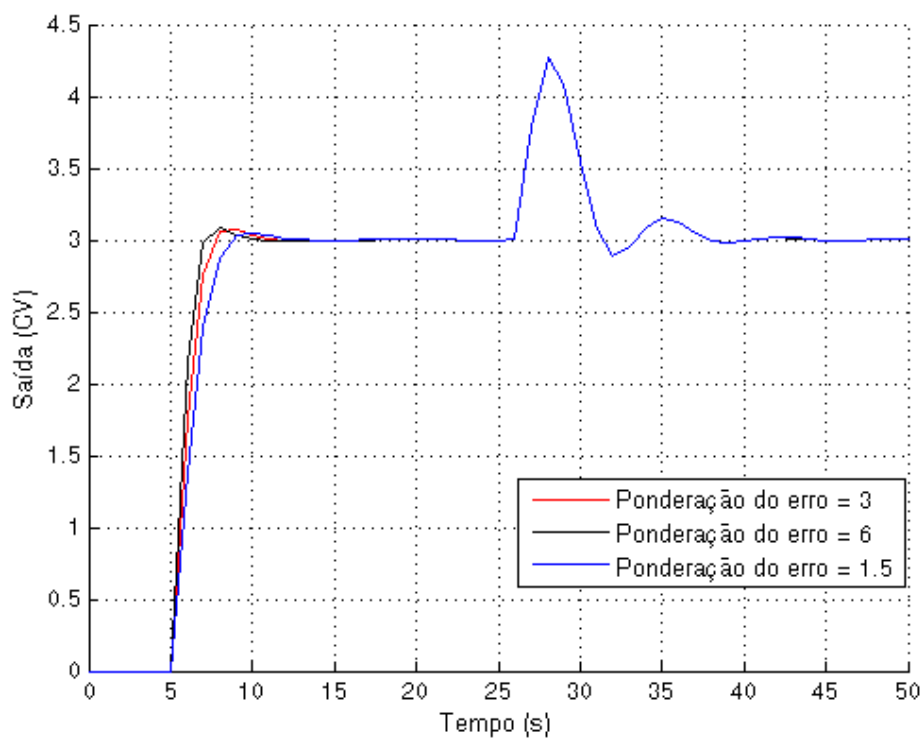


Figura 9. Respostas obtidas para diferentes ponderações do erro (δ) na função objetivo

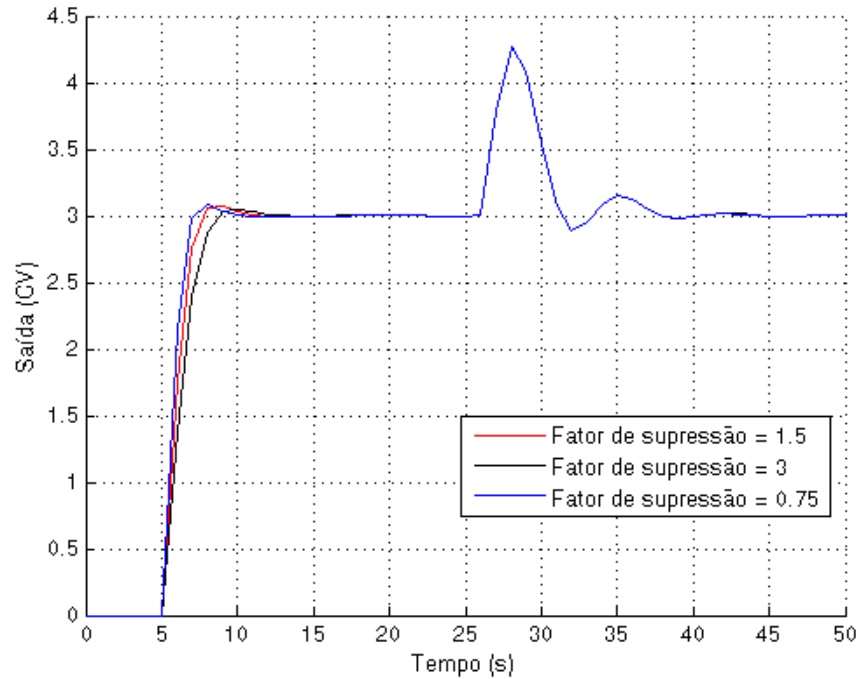


Figura 10. Respostas obtidas para diferentes fatores de supressão dos movimentos de controle (λ)

Como se observa nas figuras acima, esses parâmetros tem efeitos opostos. Enquanto valores altos são atribuídos a ponderação do erro, se tem uma resposta mais rápida e com *overshoot* maior, já para altos valores do fator de supressão, tem-se uma resposta mais lenta. Este resultado é esperado e está diretamente ligado à função objetivo utilizada no algoritmo de controle, na qual é possível escolher a característica dominante da resposta por meio destes dois parâmetros.

A Figura 11 mostra as respostas obtidas através da variação do tempo integral T_i . É possível observar que para baixos valores, tem-se um comportamento extremamente oscilatório, uma vez que há maior ação integral. Para valores mais elevados (acima de 3) de T_i , tem-se um ganho pequeno na ação integral e um aumento considerável do tempo de rejeição, sendo que no tempo da simulação (50 segundos) praticamente não é conseguida a rejeição.

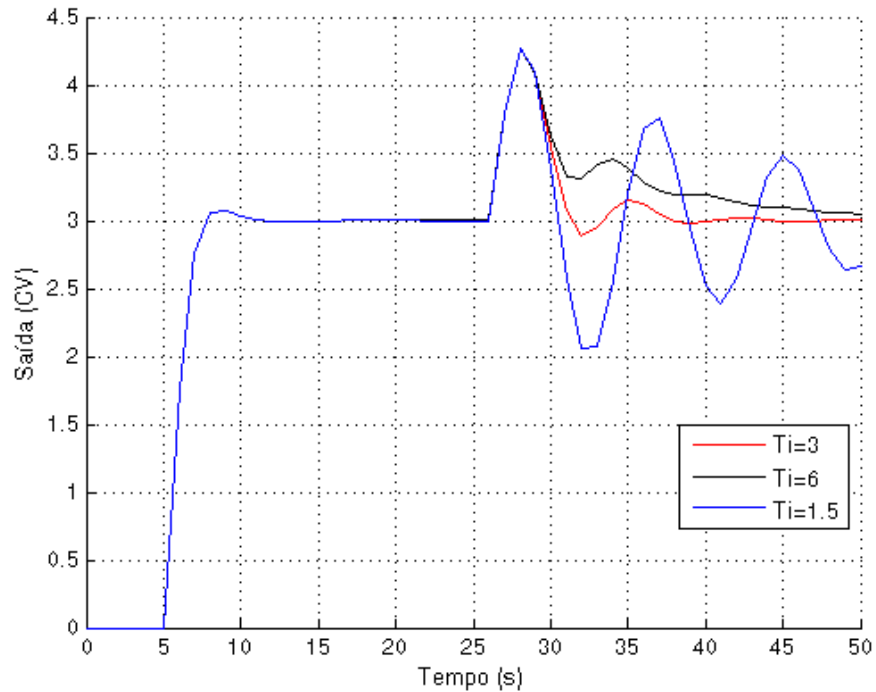


Figura 11. Comportamento do PI-Preditivo obtido com variações em T_i

As respostas obtidas com a variação de K_p no controlador proposto são mostradas na Figura 12. Percebe-se que a redução desse parâmetro prejudica a rejeição da perturbação, deixando a resposta mais lenta quando comparada ao caso padrão ($K_p = 0.1$). Além disso, valores mais altos, tendem a deixar a resposta extremamente oscilatória.

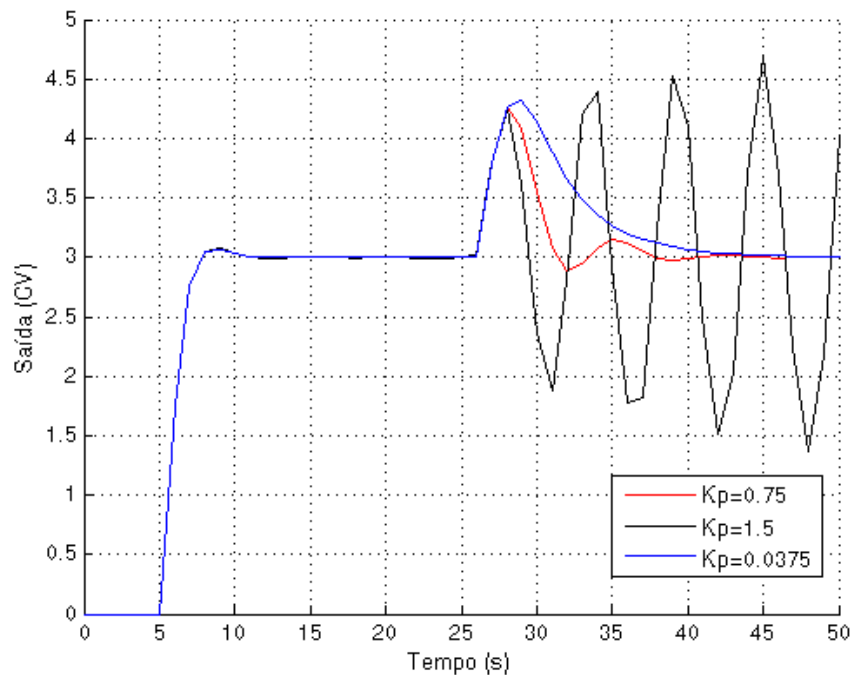


Figura 12. Respostas obtidas com alterações em K_p

Analisando-se as Figuras de (7) a (12) é possível notar o desacoplamento que existe entre os dois tipos de controladores que compõe o PI-Preditivo. Enquanto alterações são realizadas nos parâmetros do MPC, somente a resposta à mudança de referência é afetada, permanecendo inalterado o modo de rejeição. Da mesma forma, uma vez definido o comportamento servo para o sistema, pode-se fazer o ajuste regulatório de maneira direta, apenas alterando os ganhos proporcional e integral.

Essa independência ente os elementos é conseguida, pois a proposta sugerida não leva em consideração o erro de predição w no algoritmo utilizado, porque a inclusão desse termo acrescentaria outro caminho de realimentação, prejudicando de certa forma, a ligação entre os controladores.

4.1.3 Teste envolvendo a saturação do sinal de controle

Na Figura 13 são mostradas as respostas obtidas quando os controladores foram submetidos a uma grande variação na referência (degrau de nove unidades), forçando-os à saturação. Observa-se que o PI-Preditivo, assim como o MPC mantiveram seu comportamento mesmo nessa condição, porém o PI clássico sem anti *windup* apresentou perda de desempenho, com uma resposta muito lenta.

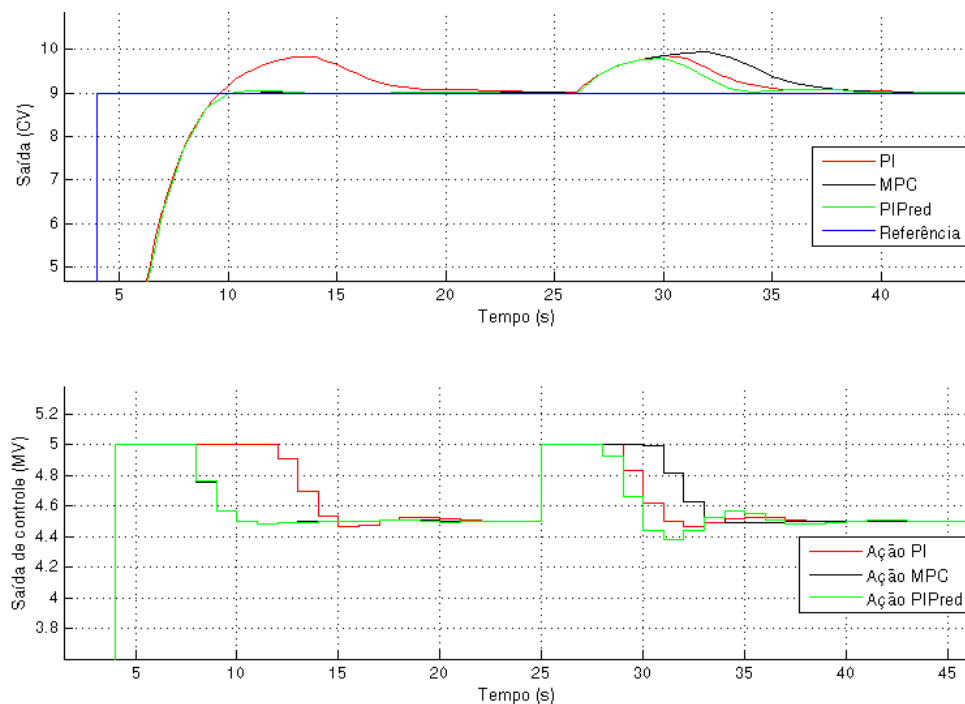


Figura 13. Resposta obtida para os controladores em saturação e PI sem anti *windup*

Com base nas ações de controle desenvolvidas por cada controlador para este caso, nota-se o grande esforço produzido pelo PI clássico no instante que ocorre a mudança de referência, permanecendo cerca de oito segundos saturado e demonstrando o comportamento agressivo característico do ajuste pelo método de Ziegler e Nichols (1942).

Na Figura 14 é apresentado novamente o comportamento observado dos controladores em saturação, porém agora com anti *windup* no controlador PI.

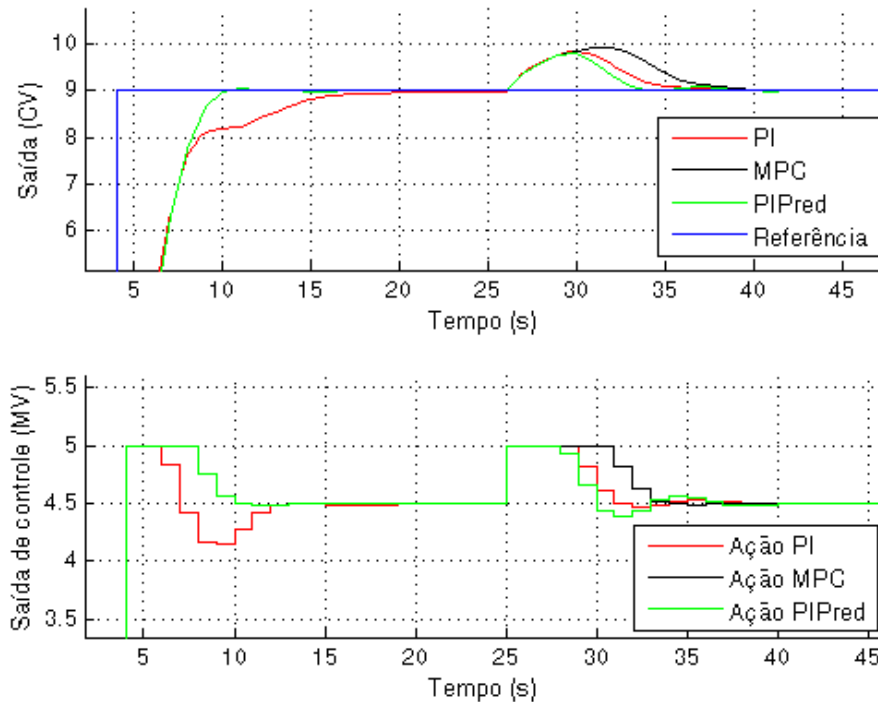


Figura 14. Resposta obtida para os controladores em saturação e PI com anti *windup*

Como esperado, tem-se uma melhora no desempenho do controlador PI, não apresentando elevado sobrepasse, mas ainda tem-se uma resposta muito lenta. Diferentemente disso, os outros controladores conservaram suas ações dentro da restrição, sendo capazes de manter suas performances uma vez que os cálculos de controle já incluem a limitação do sinal.

Nas Figuras 15 e 16 são apresentados os índices ITAE para os três controladores ao longo da simulação realizada para as duas situações tratadas. Nota-se que em ambos os casos o controlador PI-Preditivo obteve o melhor desempenho quanto à rejeição da perturbação, apresentando o menor valor do índice ITAE.

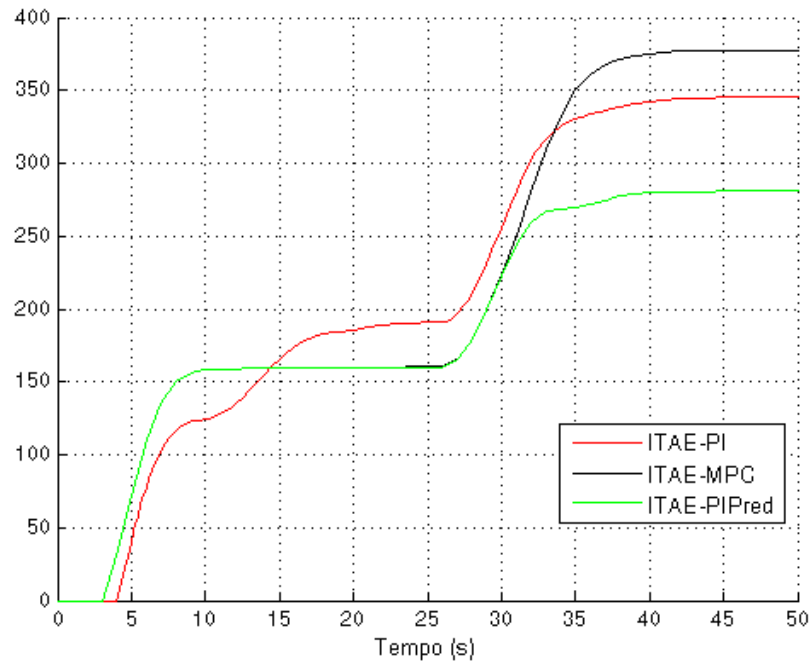


Figura 15. Índice ITAE para os controladores em condição de saturação - PI sem anti *windup*

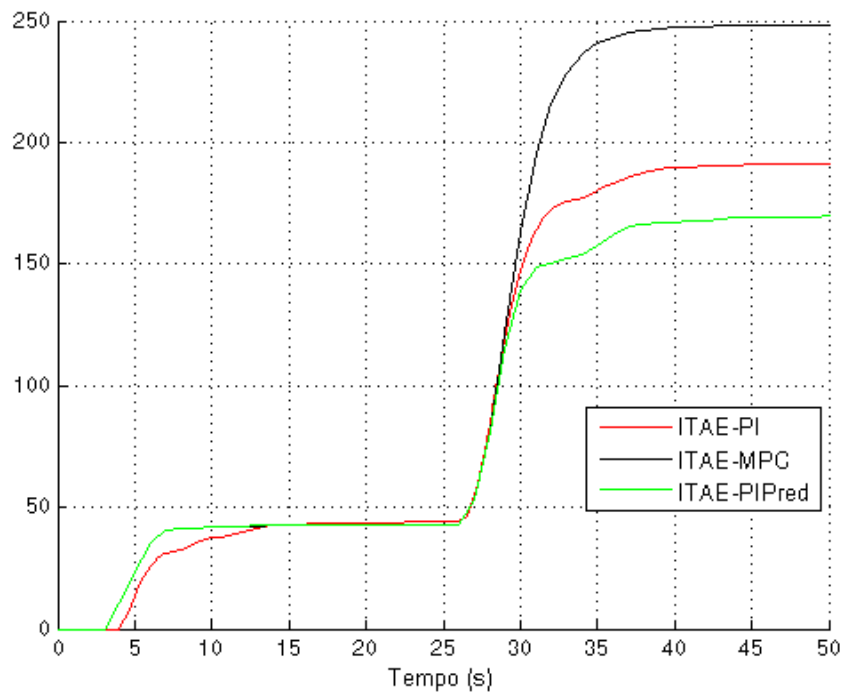


Figura 16. Índice ITAE para os controladores em condição de saturação - PI com anti *windup*

4.2 PI-Preditivo aplicado ao processo de 2ª ordem com resposta inversa

De maneira análoga ao produzido para o sistema de primeira ordem, serão apresentados os mesmos testes e simulações, porém efetuados com a planta de segunda ordem com resposta inversa. Somente não será realizada a variação dos parâmetros do PI-Preditivo, uma vez que estes são características do controlador e independem do sistema.

4.2.1 Teste de comparação entre os controladores

Na figura 17 são mostradas as respostas obtidas para os três controladores, quando aplicados ao sistema representado pela Equação (18). Nota-se que os comportamentos apresentados pelos controladores preditivos são semelhantes, inclusive na faixa de rejeição da perturbação. Já o controlador PI apresenta sua resposta com características oscilatórias e maior sobrepasso quando comparado à mudança de referência.

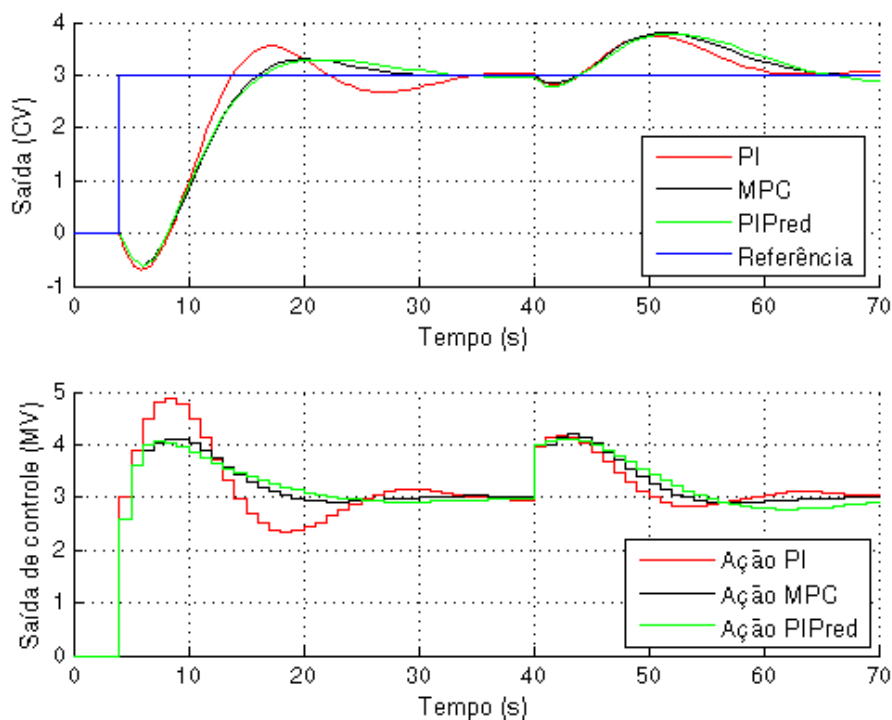


Figura 17. Respostas dos controladores para o sistema de segunda ordem

4.2.2 Teste envolvendo a saturação dos controladores

Na Figura 18 é apresentado o comportamento do sistema quando os controladores estão em saturação. Como o ganho estático da planta escolhida é unitário e a restrição imposta ao sinal foi cinco, para provocar a saturação um degrau de amplitude 4,5 foi aplicado. Neste teste, o controlador PI já estava com a ação de anti *windup*.

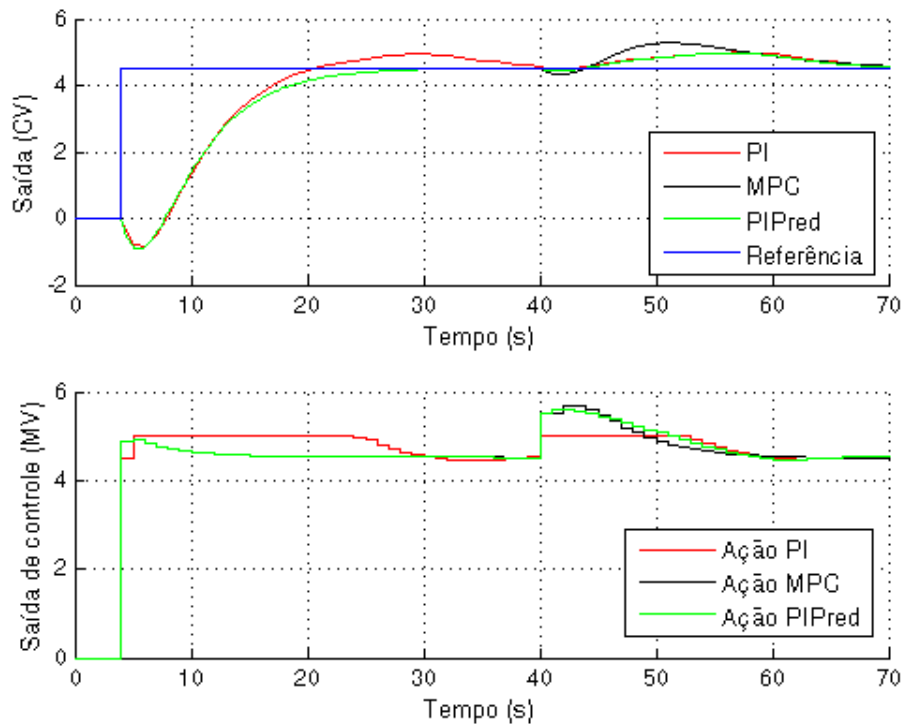


Figura 18. Comportamento observado para os controladores em saturação

Como se percebe o comportamento é semelhante para os três. Uma vez que os parâmetros de ajuste do PI-Preditivo foram mantidos iguais aos do MPC, o comportamento frente à mudança de referência é o mesmo para os dois. Da mesma forma, os ganhos proporcional e integral da proposta, foram mantidos iguais aos do PI clássico e a resposta à perturbação é praticamente a mesma para ambos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Diante das simulações realizadas, a estratégia proposta de um PI-Preditivo se mostrou adequada para a rejeição de perturbações não medidas, principalmente quando comparada a um MPC isolado. A utilização da trajetória de predição como referência para o controlador proporcional-integral fornece as correções necessárias para manter a saída o mais próximo das predições, mesmo que na presença de distúrbios.

Em uma primeira análise, a estratégia de um controlador PI clássico apresenta melhores resultados levando-se em consideração a velocidade de resposta, tempo de assentamento e rejeição de perturbações, porém é necessário se considerar alguns dos benefícios que a utilização de um controlador MPC/DMC fornece principalmente no que diz respeito ao uso de restrições como foi observado.

A maior dificuldade encontrada na aplicação da estratégia está no grande número de parâmetros resultante, que correspondem àqueles do MPC (em número de cinco) e da ação PI (em número de dois). Como já era esperado, as simulações exemplificaram que cada elemento de ajuste tem um efeito diferente no sistema, como a ponderação do erro e o fator de supressão que tem efeitos opostos. Porém, por afetarem características diferentes da resposta do sistema – funções servo e regulatória – os dois conjuntos parâmetros podem ser ajustados de forma independente, tendo pequena interação.

Como sugestões de trabalhos futuros, pode-se citar a formalização de um método de ajuste através de expressões analíticas, um estudo sobre a aplicabilidade da estratégia em sistemas não lineares e multivariáveis, além de testes práticos em plantas industriais.

6 Referências

BERNARD, M. Z.; MOHAMED, T. H.; ALI, R.; MITANI, Y.; QUDAIH, Y.S. *PI-MPC Frequency Control of Power System in the Presence of DFIG Wind Turbines*. Engineering Scientific Research. v. 5, p. 43-50, 2013.

BRAVO, C. O.A; *Uma proposta de controle preditivo não linear baseado em modelos locais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis, 2010.

CAMACHO, E.F.; BORDONS, C. *Model Predictive Control*. 1 ed. Great Britain. Ed. Springer-Verlag, 1999, 280p.

CAMACHO, E.F.; BORDONS, C. *Model Predictive Control*. 1 ed. Great Britain. Ed. Springer-Verlag, 2004.

CASILLO, D. S. S; *Controle preditivo não linear baseado no modelo de Hammerstein com prova de estabilidade*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, 2009.

CLARKE, D.W.; MOHTADI, C. *Properties of Generalized Predictive Control*. Proc. 10th IFAC World Congress, Munich, 1987.

CUTLER, C. R.; RAMAKER, B.L. *Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm*. 86th National Meeting of The American Institute of Chemical engineers, Houston, 1979.

LUNDSTRÖM, P.; LEE, J.H.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. *Limitations of Dynamic Matrix Control*. Computers Chemical Engineering. v. 19, n. 4, p. 409-421, 1995.

MACIEJOWSKI, J. M. *Predictive Control with Constraints*. 1 ed. Ed. Prentice Hall, 2000, 331p.

NORMEY-RICO, J. E. *Controle preditivo baseado em modelo*. Enciclopédia de Automática: controle & automação. 1ed, v.2, São Paulo: Ed. Blucher, 2007.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro, RJ: Prentice-Hall do Brasil, 1985.

OGUNNAIKE, B. A., RAY, W.H. *Process Dynamics, Modeling and Control*. Ed. Oxford University Press, 1994.

OTTONI, A. G. S.; BARBOSA, A. M.; TAKAHASHI, R. H. C.; AGUIRRE, L. A. *Controle preditivo baseado em modelo linear com incerteza intervalar: formulação e análise de estabilidade*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

RAIMUNDO, A. S. *Simulação de um Controlador Preditivo Baseado em Modelo com Termo Integral*. Trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

RICHALET, J.; RAULT, A.; TESTUD, J. L.; PAPON, J. *Model predictive heuristic control: applications to industrial processes*. Automatica, v.14, p. 413-428, 1976.

ROSSITER, J. *Model-Based Predictive Control: A practical Approach*, CRC Press. 2003.

SILVA, C. H. F.; HENRIQUE, H. M.; GOMES, L. R. *Controle preditivo robusto baseado em inequações matriciais lineares aplicado a máquinas síncronas*. Revista Ciências Exatas. Taubaté, v. 13, n. 1, p. 121-129, 2007.

SILVEIRA, R. P., *Melhoria do Desempenho regulatório do MPC Através de Observadores de Distúrbios*, Monografia, Departamento de Engenharia Química – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. *Optimum settings for automatic controllers*. Transactions. ASME, v. 64, p. 759–768, 1942.

7 Apêndice

O código desenvolvido em MATLAB[®] para o algoritmo DMC juntamente com a função objetivoutilizados para implementar a estratégia do PI-Preditivo são apresentados a seguir.

```
function [sys, x0, str, ts] = BlocoMPC(t, x, u, flag)

%---inicialização-----

if flag == 0
    estados_contínuos = 0;
    estados_discretos = 2;
    saidas = 2;
    entradas = 2;
    x0 = [0 0];
    str = [ ];
    ts = [1];

sys = [estados_contínuos estados_discretos saidas entradas 0 1 1];

%-----Calcula próximo instante de amostragem-----
elseif flag == 4
    sys=[];

%---Atualiza os estados discretos e envia o vetor de estado-----

elseif flag == 2
    diretorio=cd;
    load(strcat(diretorio,'variaveis'));
    load(strcat(diretorio,'estacionario'));

    Y1Set = u(2); %leitura da referência

    W(1)= u(1)-Y1a(1); %atualização do erro de predição

save(strcat(diretorio,'estacionario'),'Y1a','U1','Y1Set','W');

option=optimset('Algorithm','interior-point','TolX',1e-4,'TolFun',1e-4,'display','off','MaxIter',60); % opções de otimização

DU = fmincon('MPC',zeros(HorizonteControle,1),[a;-a],[b*(u_max-saidaU(1))';(b*(-u_min+saidaU(1)))'],[],[],[],[],[],option) %função de otimização com restrições de saída no controle

Y1Simulado=Su11*DU(:,1)+z*Y1a+W(1);
%predição da saída: resposta forçada: Su11*DU(:,1); resposta livre: z*Y1a; erro de predição: W(1)

Y1a=z*Y1a+Y1f'*DU(1,1); %atualização da resposta livre

% atualizada o vetor de sinais de controle
U1=[DU(1,1);U1(1:end-1)];

saidaU(1)=x(2)+U1(1) %Atualiza a saída de controle: u(k) = u(k-1)+Du(k)
```



```
save(strcat(diretorio,'estacionario'),'Y1a','U1','saidaU');

sys=[Y1Simulado(1) saidaU(1)]; %Envio das saídas: predição da saída e
ação de controle

elseif flag == 3

sys=[x(2) x(1)];

%default
else
sys = [ ];
end

%Funçãoobjetivo J:

function J=MPC(deltaU)

diretorio=cd;
addpath(diretorio)
load(strcat(diretorio,'variaveis'));
load(strcat(diretorio,'estacionario'));

Y1=Su11*deltaU(:,1)+z*Y1a+W(1); %saida predita

J=sum((p_erro*((Y1Set-Y1).^2)))+(sum(p_controle*(deltaU(:,1).^2)));
```