



ELABORAÇÃO DE UM TOOLBOX DE CONTROLE PREDITIVO DO TIPO CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO (GPC) NO SCILAB

Marcos Henrique Santos – marcos.hrq.santos@gmail.com

Gustavo Maia de Almeida – gmaia@ifes.edu.br

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo – Unidade Serra

Rodovia ES-010 - Km 6,5 - Manguinhos

29173-087 - Serra – ES

Resumo: *Este trabalho apresenta uma implementação de uma toolbox de controle preditivo do tipo Controle Preditivo Generalizado no ambiente SCILAB. O SCILAB é um poderoso software distribuído gratuitamente para a execução de cálculos e simulações em diversas áreas do ensino. A toolbox de controle preditivo desenvolvida visa a difusão desta tecnologia de controle avançado cada vez mais usada na indústria devido a sua robustez e estabilidade na academia e centros de pesquisa.*

Palavras-chave: *Software Livre, Scilab, Controle Preditivo.*

1. INTRODUÇÃO

Em 1979, Cluter e Ramaker apresentaram um algoritmo de controle preditivo, o controle preditivo generalizado (GPC), como uma metodologia capaz de manipular restrições operacionais nas variáveis de controle e saída de forma sistemática. Este algoritmo é adequado para o controle de processos com alto grau de interação entre as variáveis, ordens elevadas e atrasos dominantes. Estas características tem garantido a utilização bem sucedida deste algoritmo tanto na indústria quanto em ambiente acadêmico.

O desenvolvimento de soluções com controle GPC depende de programas de computação numérica, tais como o Scilab ou Matlab. No entanto, o elevado valor desse último software, inviabiliza o estudo deste algoritmo em algumas instituições de ensino, não como o Scilab, que é distribuído gratuitamente via Internet desde 1994. Esse é um software que fornece um poderoso ambiente computacional aberto para aplicações científicas, atualmente usadas em diversos ambientes industriais e educacionais pelo mundo (GOMEZ, 1994).

A criação de um *toolbox*, ou biblioteca, de GPC em SCILAB reunirá as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de aplicações baseadas nesse tipo de controle sem qualquer ônus, pois, na Disciplina de Controle Avançado do Curso de Engenharia de Controle e Automação do IFES-SERRA, tem-se um dificuldade de se implementar este tipo de controle, uma vez que o software que apresenta esta metodologia de controle é o



MATLAB que é um *software* proprietário e de elevado custo, sendo assim, este projeto tende a disseminar o estudo da técnica de Controle Preditivo Generalizado no curso de Engenharia de Controle e Automação .

Para verificar a eficiência da *toolbox* desenvolvida, foram selecionadas classes de modelos *benchmark* que segundo (ASTROM & HAGGLUND, 2011) podem ser caracterizados como representativos da maioria dos processos industriais mais comuns.

Este trabalho é uma continuação de trabalhos anteriores, onde se utilizou o SCILAB para o desenvolvimento de uma *toolbox* de Controle Preditivo por Matriz Dinâmica DMC (NETO & ALMEIDA, 2012) e está dividido da seguinte forma: A seção 1 foi apresentada uma introdução do trabalho, na seção 2 será mostrada uma descrição sobre o controle preditivo generalizado. Na seção 3 uma breve descrição do Scilab é apresentada, na seção 4 a estrutura da *toolbox* implementada é mostrada, na seção 5 mostra-se os resultados obtidos e na seção 6 serão mostrados as conclusões do trabalho bem como as perspectivas de trabalhos futuros.

2. CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO (GPC)

O Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) originou-se nos 70 e, desde então, tem sido bastante estudado no meio acadêmico e aplicado no controle de diversas plantas industriais (QUIN & BADGWELL, 2003). O termo MPC designa uma ampla variedade de métodos de controle que fazem uso explícito do modelo do processo para obter o sinal de controle pela minimização de uma função objetivo (CAMACHO & BORDONS, 2004). Esta metodologia é de natureza aberta, dentro do qual diferentes algoritmos de controle tem sido desenvolvidos, tais como, Controle Preditivo Generalizado (GPC) (CLARKE *et al*, 1987), Controle por Matriz Dinâmica (DMC) (CUTLER & RAMAKER, 1979), entre outros. O controlador preditivo pode ser aplicado em processos lineares, não lineares, mono e multivariáveis, com atrasos e restrições nas variáveis de entrada e saída, desde aqueles com dinâmica estável, até aqueles com fase não mínima e instáveis em malha aberta.

A metodologia de todos os controladores pertencentes à família MPC é caracterizado pela seguinte estratégia:

- As saídas futuras para um determinado horizonte de predição (h_c), são estimados a cada instante de tempo ($t=k$) usando o modelo do processo;
- O conjunto de sinais das ações futuras do controlador é calculado por otimização, atendendo a um determinado critério, de forma a manter o processo o mais perto o possível da trajetória de referência;
- O primeiro sinal da sequência das ações de controle $u(t)$ é enviado ao processo, enquanto que o restante é descartado.

Para implementar esta estratégia, a estrutura básica apresentada na Figura 01 é usada. Um modelo é necessário para prever as saídas futuras da planta, baseado nos seus valores presente e passados e nas ações de controle futuras proposta pela otimização. Estas ações são calculadas minimizando a função objetivo com as restrições impostas ao sistema.

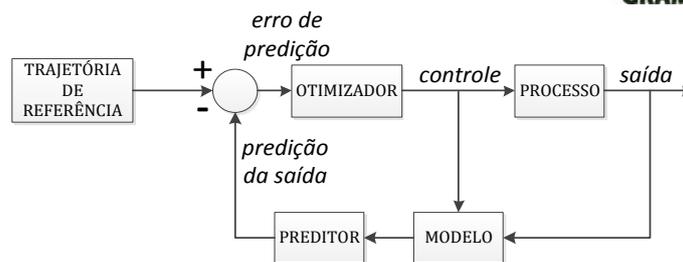


Figura 01: Estrutura de um Controlador Preditivo

O modelo do processo tem um papel decisivo no desempenho do controlador, devendo ser capaz de capturar a dinâmica do processo de forma a prever precisamente as saídas futuras, assim como ser simples na sua implementação e entendimento. O MPC é uma técnica que engloba diferentes metodologias, pois utilizam vários tipos de modelo, nas mais diferentes formulações.

A sintonia do GPC foi feita utilizando algoritmo genético de acordo com (ALMEIDA, 2011).

2.1. Controle Preditivo Generalizado (GPC)

O GPC é o controle preditivo baseado em modelo representado na forma de função de transferência. Esta técnica de controle abrange uma ampla faixa de processos, desde as plantas com dinâmicas mais simples até aquelas com dinâmicas mais complexas. O GPC consiste em calcular uma sequência de sinais de controle futuros de forma a minimizar uma função custo definida através de um horizonte de previsão.

O controle preditivo utiliza um modelo interno para gerar as previsões futuras do comportamento do processo. A técnica do GPC utiliza o modelo CARIMA dado pela seguinte equação:

$$A(z^{-1}) \cdot y(j) = z^{-d} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(j-1) + C(z^{-1}) \cdot \frac{e(j)}{1-z^{-1}} \quad (1)$$

Na qual $u(j)$ e $y(j)$ são as sequências de controle e a saída de controle respectivamente, $e(j)$ é um ruído branco de média zero, d é o atraso de transporte do sistema, A , B , e C são polinômios da seguinte forma:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_{na} \cdot z^{-na} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + \dots + b_{nb} \cdot z^{-nb} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 \cdot z^{-1} + c_2 \cdot z^{-2} + \dots + c_{nc} \cdot z^{-nc} \end{aligned} \quad (2)$$



Por motivos de simplificação o polinômio $C(z^{-1})$ é considerado igual a 1. Do modelo CARIMA, apresentado em (1) temos que a saída é dada por $y(j)$. O preditor GPC, k passos a frente, é obtido minimizando a variância do erro quadrático entre a saída $y(j+k)$ e a predição $\hat{y}(j+k|j)$, dada por:

$$\hat{y}(j+k|j) = \frac{B(z^{-1}) \cdot E_k(z^{-1})}{C(z^{-1})} \Delta u(j+k-d-1) + \frac{F_k(z^{-1})}{C(z^{-1})} y(j) \quad (3)$$

Onde E_k e F_k são polinômios que satisfazem a equação abaixo chamada de Equação Diofantina.

$$C(z^{-1}) = E_k(z^{-1}) \cdot \tilde{A}(z^{-1}) + z^{-k} \cdot F_k \quad (4)$$

E_k e F_k são polinômios de grau $k-1$ e na respectivamente.

Na equação Diofantina temos que:

$$\tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1}) \cdot (1 - z^{-1}) \quad (5)$$

Para encontrar os polinômios E_k e F_k fazemos a divisão de 1 por:

Assim teremos $E_k(z^{-1})$ que é quociente da divisão e $z^{-k} \cdot F_k(z^{-1})$ que é o resto desta divisão e possui grau $na+K$.

Tendo $E_k(z^{-1})$ e $z^{-k} \cdot F_k(z^{-1})$ e substituindo-os em (3) obtemos o preditor GPC k passos a frente.

A Equação de previsão (3) é aplicada na função objetivo dado pela Equação 6, com o objetivo de realizar um processo de otimização, onde a função objetivo J será minimizada em relação a (Δu) para obter o valor da variação sinal de controle (Δu) e consequentemente o valor do sinal de controle (u) a ser aplicado no processo.

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} \delta \left[\hat{y}(j+k|j) - w(j+k) \right]^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \lambda \left[\Delta u(j+k-1) \right]^2 \quad (6)$$

Mais informações a respeito do GPC, bem como demonstrações detalhadas das equações podem ser vista em (ALMEIDA, 2011).

3. SCILAB

O scilab é um software gratuito para cálculo numérico desenvolvido desde 1990 por pesquisadores do INRIA e da ENPC na França e mantido pelo Scilab Consortium desde 2003.

Particularmente, os computadores têm assumido um papel importante nas salas de aula e é cada vez mais comum o uso de softwares de computação numérica e simulação em diversas disciplinas dos cursos de engenharia. No entanto, enquanto o custo do hardware vem sendo reduzido, o custo de aquisição e manutenção de softwares proprietários têm se elevado dificultando a sua utilização quando recursos financeiros são limitados (PENDHARKAR, 2005), situação bastante comum nas instituições de ensino e pesquisa brasileiras. Isto vem motivando a ampliação do uso acadêmico de softwares livres como, por exemplo, o sistema operacional Linux e, na área de engenharia, o Scilab.

Além dos citados acima, existem ainda outros motivos pelos quais os estudantes de engenharia usam esse software livre: grande número de bibliotecas que englobam funções gráficas, integração numérica, álgebra linear, otimização e outras que são específicas para engenharia, como controle e processamento de sinais, existindo, também, a possibilidade de adição de novas funções disponíveis na Internet.

É importante considerar que, do ponto de vista do utilizador, a possibilidade de modificação de toolboxes existentes ou de seu desenvolvimento, uma vez que todas as bibliotecas também possuem código aberto, o Scilab é a alternativa que melhor se adapta à diversidade proporcionada pela experiência acadêmica ou industrial, ou seja, não é necessário adequar o problema a ferramenta. O Scilab possui uma linguagem de programação própria que permite a criação de programas numéricos complexos de uma forma simples e eficaz (PIRES & ROGERS, 2002).

4. TOOLBOX GPC NO SCILAB

Objetivando simplificar a entrada de dados e tornar mais intuitiva a inserção dos parâmetros de controle e dos coeficientes do modelo da planta, foi implementada uma interface visual composta de caixas de texto. Primeiramente, os dados recebidos são armazenados em vetores que alimentam as demais funções.

Na tela do console do Scilab, a toolbox pode ser invocada pelo comando `gpc`. Em seguida, aparecerá uma tela que pode ser vista na Figura 02 onde está a janela para coleta dos parâmetros do controlador GPC sendo eles: horizonte de controle (hc), horizonte de previsão (hp), λ , α e δ :

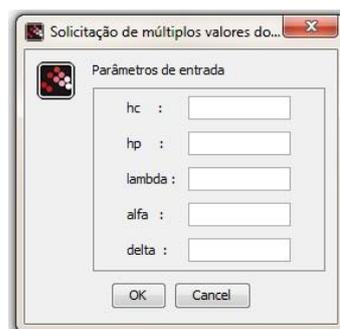


Figura 02: Parâmetros de sintonia do GPC

Em seguida, apresenta-se o modelo que se deseja controlar. No quadro apresentado na Figura 03 têm-se os coeficientes da equação (7) que devem ser inseridos em ordem crescente, do menor para o de maior ordem.

$$G = \frac{1}{0.01s^2 + 0.2s + 1} \quad (7)$$

A correta entrada dos dados deve ser feita da seguinte forma:



Figura 03: Coeficientes da função de transferência

Os valores digitados tanto no numerador quanto no denominador devem ser separados por um espaço.

Após a entrada dos parâmetros da função de transferência que se deseja controlar, a toolbox irá executar o controle e no final irá apresentar os gráficos correspondentes à saída controlada (y), o sinal de controle (u) e a variação do sinal de controle (Δu).

5. RESULTADOS

Nesta seção, serão mostrados os resultados do algoritmo de GPC no ambiente scilab para realizar o controle de algumas classes de modelo que segundo (ASTROM & HAGGLUND, 2011), podem ser caracterizados como representativos da maioria dos processos industriais mais comuns e assim garantir o perfeito funcionamento da toolbox desenvolvida. Tais sistemas estão representados pelas seguintes funções de transferência:

$$G_1(s) = \frac{1}{(0,1s+1)^2} \quad (8)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (9)$$

$$G_3(s) = \frac{1}{(s+1)(s+0,7)(s+0,49)(s+0.343)} \quad (10)$$

$$G_4(s) = \frac{1-0,1s}{(s+1)^3} \quad (11)$$

A sintonia do GPC foi feita utilizando algoritmo genético de acordo com (ALMEIDA, 2011).

5.1. Função G_1

Os parâmetros utilizados para este modelo foram $h_c=3$, $h_p=3$, $\alpha=0.0490$, $\delta=3$ e $\lambda=0.3685$. A resposta apresentada pode ser vista na Figura 03:

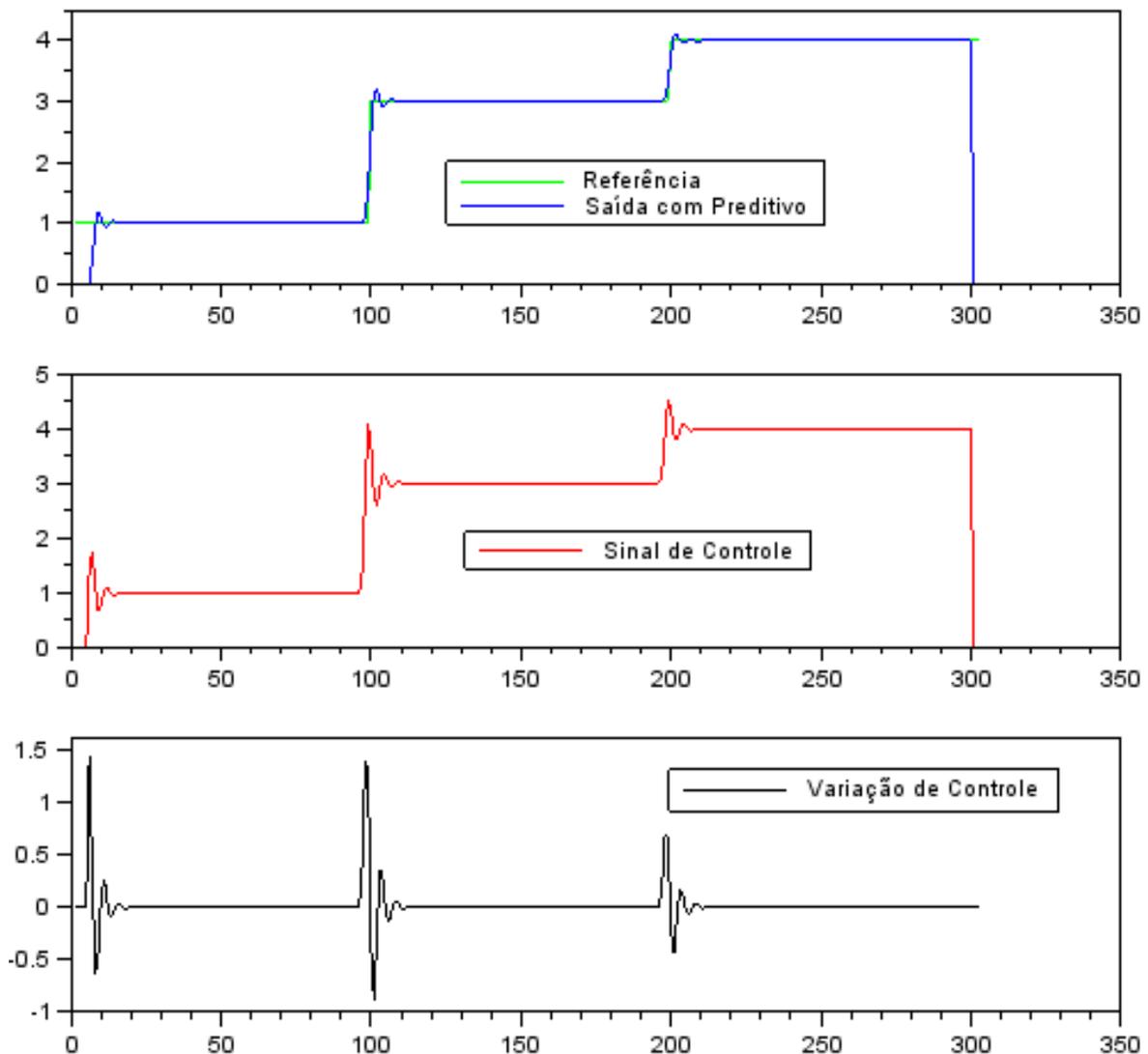


Figura 04: sinal de resposta y , u e Δu para G_1

5.2. Função G_2

Os parâmetros utilizados para este modelo foram $h_c=3$, $h_p=3$, $\alpha=0.0490$, $\delta=1$ e $\lambda=0.3688$. A resposta apresentada pode ser vista na Figura 04:

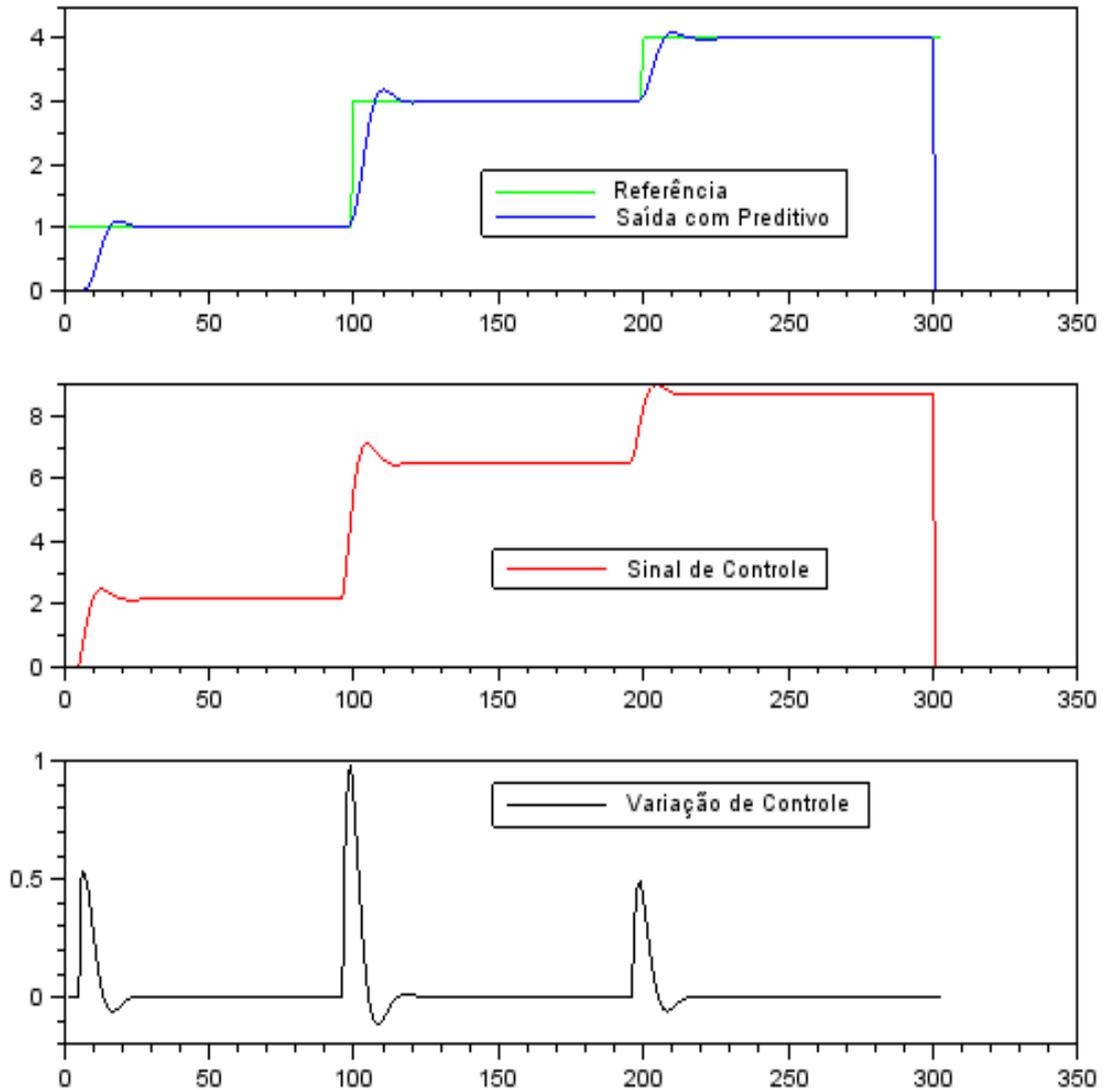


Figura 04: sinal de resposta y , u e Δu para G_2

5.3. Função G_3

Os parâmetros utilizados para este modelo foram $h_c=3$, $h_p=3$, $\alpha=0.0490$, $\delta=0.01$ e $\lambda=0.3685$. A resposta apresentada pode ser vista na Figura 05:

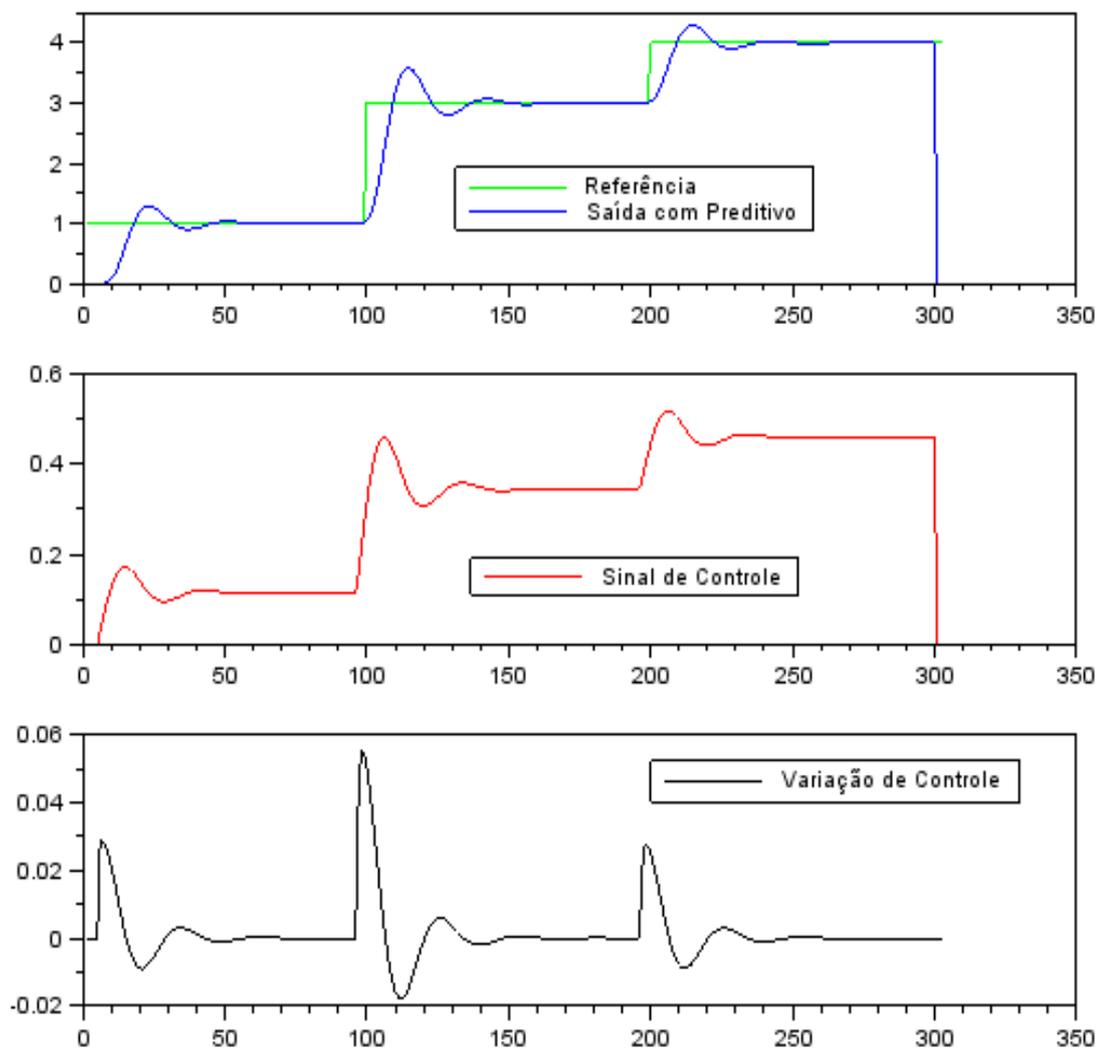


Figura 05: sinal de resposta y , u e Δu para G_3

5.4. Função G_4

Os parâmetros utilizados para este modelo foram $h_c=3$, $h_p=3$, $\alpha=0.0490$, $\delta=0.1$ e $\lambda=0.3685$. A resposta apresentada pode ser vista na Figura 06:

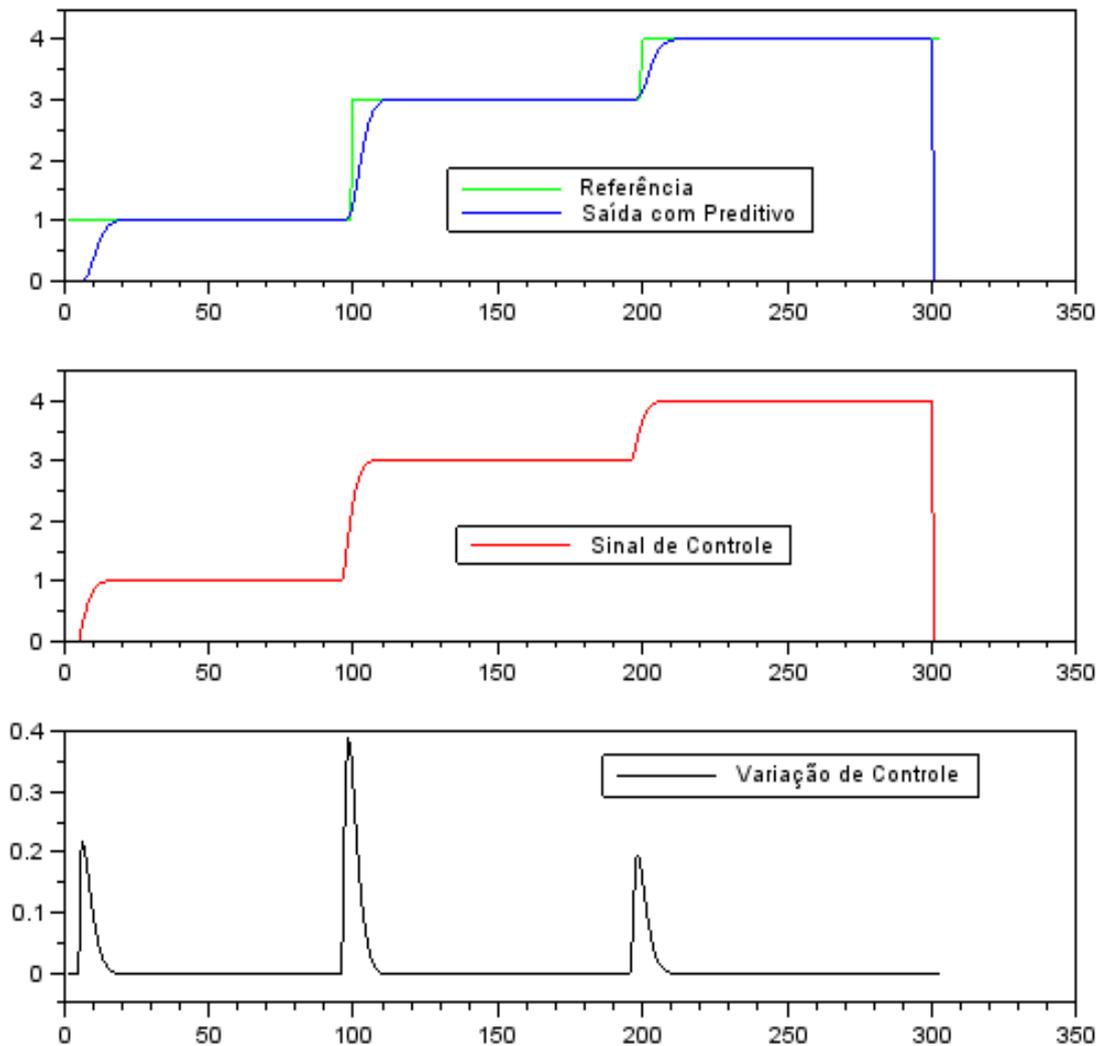


Figura 06: sinal de resposta y , u e Δu para G_4

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

Considerando o aumento do preço dos softwares proprietários, que muitas vezes inviabiliza a realização de certas atividades acadêmicas e de pesquisa, juntamente com a necessidade de se utilizar no ensino o que se tem de melhor em tecnologia, percebe-se a necessidade de utilização de software livres, onde se tem a flexibilidade de se desenvolver trabalhos com o intuito de auxiliar o processo ensino-aprendizagem dentro de sala de aula.

O desenvolvimento de ferramentas ou bibliotecas de GPC para softwares de código aberto constitui, então, importante incentivo para a elaboração de trabalhos acadêmicos e científicos, bem como para a implementação de sistemas de controle baseados nesse



modelo na indústria, por não agregar custo ao projeto e também por ser facilmente adaptado a qualquer aplicação através de alterações de sua programação.

É importante mencionar também que a metodologia dos MPC's estão cada vez mais sendo aplicados tanto nas indústrias quanto na academia e que a ferramenta desenvolvida neste trabalho, visa difundir ainda mais esta técnica de controle nos cursos de Engenharia.

Este trabalho é uma complementação de um projeto onde visa a implementação de todas as técnicas de controle preditivo no SCILAB, pois o mesmo já vem sendo utilizado na Disciplina de Controle Avançado e obtendo ótimos resultados em relação ao aprendizado dos alunos, pois, anterior a este projeto, não se tinha o ensinamento da técnica de controle preditivo, pois, o mesmo só era disponível via *software* MATLAB.

Em continuação a este trabalho, serão adaptados algoritmos cuja sua finalidade será levar em consideração as restrições nas variáveis de entrada e saída apresentadas, além de um algoritmo que terá a finalidade de realizar a sintonia desses parâmetros de modo automático. Em seguida, será realizada a implementação de outras técnicas de controle preditivo que já estão no ambiente MATLAB para o SCILAB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. M. Controle Preditivo Sintonizado via Algoritmo Genético Aplicado em Processos Siderúrgicos. Tese de Doutorado, UFES, 2011.

ASTROM, Karl J.; HAGGLUND, Tore. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, vol. 2. Instr. Society of America, 2011.

CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, CARLOS. Model Predictive Control. New York: Springer, 2004.

CLARKE, D. W., MOHTADI, C., AND TUFFS, P. S. Generalized Predictive Control. Part i. the basic algorithm. Automatica, 1987.

CUTLER, C. R. AND RAMAKER, B. C. Dynamic Matrix Control – A Computer Control Algorithm. In Automatic Control Conference, 1980.

GOMEZ, C. Engineering and scientific computing with Scilab. Birkhauser Boston, 1998.

NETO, M. O., ALMEIDA, G. M. Elaboração de um toolbox de Controle Preditivo do Tipo Controle Preditivo por Matriz Dinâmica (DMC) no SCILAB, XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), 2012.

PENDHARKAR, I. Rltool for Scilab. IEEE Control System Magazine, 2005.

PIRES, P. S., ROGERS, D. A. Free/open source software: an alternative for engineering students. Proc, 32° ASEE/IEEE Frontiers in Education Conf. Boston, 2002.



QIN, S. AND BADGWELL, T. A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice, 11, 7, 2003.

PREPARATION OF A TOOLBOX FOR PREDICTIVE CONTROL OF TYPE GENERALIZED PREDICTIVE CONTROL (GPC) IN SCILAB

***Abstract:** This work presents an implementation of a toolbox of predictive control of type Generalized Predictive Control in SCILAB mathematical environment. Scilab is a powerful software distributed free to perform calculations and simulations in various areas of education. The MPC toolbox developed aimed at spreading this advanced control technology increasingly used in industry due to its robustness and stability in academia and research centers.*

***Key-words:** Free Software, Scilab, Predictive Control.*