



## AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA SINTONIA E ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE CONTROLE PID – PIDcad

**Marcos V. R. Silveira** – mvrattis@hotmail.com

Programa Especial de Treinamento – PET/SESu – Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

**Francisco J. Gomes** – chico@jfnet.com.br

Departamento de Energia – Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

**Resumo:** *PIDcad é um ambiente gráfico que permite efetuar a sintonia e analisar a dinâmica de malhas de controle utilizando concepções distintas de soluções PID, aplicadas a plantas de qualquer ordem. O ambiente é totalmente integrado, possibilitando rápida sintonia dos parâmetros de controladores PID e avaliação simultânea da solução empregada pela utilização de ferramentas que possibilitam análise no domínio do tempo, no domínio da frequência pelos diagramas de Bode ou Nyquist ou pela posição dos pólos. As topologias de controle disponibilizadas no ambiente são as seguintes: a estrutura PID convencional, com ou sem inserção dos módulos Derivativo e Proporcional na linha direta, sistema com dois controladores PID em concepção de alimentação em avanço ("feed forward"). A escolha dos modelos é totalmente facilitada por interface gráfica, que disponibiliza para o usuário as concepções a serem utilizadas. O ambiente se revela, com estas funcionalidades, poderosa ferramenta computacional de suporte ao estudo, sintonia e análise de estruturas PID aplicadas ao controle de processos industriais, tanto no que se refere ao projeto do controlador como na análise de dinâmicas transitórias de processos, em baixas e altas frequências.*

**Palavras-chave:** *Sistemas de Controle, Controle, Controladores, Simulação*

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente a análise de sistemas auxiliada por computador tem tomado grande espaço na etapa de projeto de sistemas de engenharia, percebe-se que há um grande empenho no sentido de se desenvolver ferramentas de simulação, que evidentemente não substituem o papel do engenheiro projetista, mas definitivamente auxiliam bastante a análise e projeto de sistemas em geral. Especialmente na área de engenharia de controle, tais ferramentas assumem papel imprescindível nas etapas de desenvolvimento de um sistema de controle estável e robusto. A análise computacional permite ao projetista determinar a dinâmica de um sistema à malha fechada, avaliar as características de resposta e alterar parâmetros de projeto de controladores para otimizar a resposta do sistema de acordo com a necessidade. Dentro desse contexto cabe ao engenheiro ao projetar um sistema de controle, avaliar as especificações de regime transitório necessárias dentro de uma determinada aplicação e analisar soluções que atendem tais especificações.

Um dos principais problemas no projeto de sistemas de controle está relacionado à sintonia de controladores, especificamente controladores PID – proporcional integral e derivativo. Os controladores PID são atualmente extensamente usados na indústria para

controle de processos à malha fechada. Alguns dos principais motivos que justificam tal escolha são: facilidade de implementação a nível hardware, baixo custo, e flexibilidade para atender especificações de projeto. A sintonia de controladores tem papel didático importante na análise de sistemas de controle lineares, pois combina conceitos distintos como especificações de regime transitório, lugar das raízes e resposta em frequência para obter um ajuste otimizado para uma condição específica.

Dentro desse contexto, buscando atender de forma objetiva o problema do projeto de sistemas de controle em nível acessível a estudantes e técnicos, desenvolveu-se um ambiente computacional para sintonia e análise de soluções em controle PID – PIDcad.

PIDcad é um ambiente gráfico que permite efetuar a sintonia e analisar a dinâmica de malhas de controle utilizando concepções distintas de soluções PID, aplicadas a plantas de qualquer ordem. O ambiente é totalmente integrado, possibilitando rápida sintonia dos parâmetros dos controladores PID e avaliação simultânea da solução empregada pela utilização de ferramentas que possibilitam análise no domínio do tempo, no domínio da frequência pelos diagramas de Bode ou Nyquist ou pela posição dos pólos, com o emprego de técnicas do lugar das raízes. O Ambiente representa uma ferramenta de grande valor no ensino e treinamento na área de controle, pois integra diversos conceitos da teoria de controle de forma objetiva, eficiente e fácil de usar.

## 2. O AMBIENTE

Esta seção trata da estruturação do ambiente. Primeiramente são apresentadas e explicadas as diversas estruturas de controle disponíveis no ambiente. Em seqüência são apresentados os procedimentos de sintonia e as principais ferramentas de análise associadas.

### 2.1 Controladores PID – Estruturas de controle

A utilidade dos controladores PID reside na sua aplicabilidade à maioria dos sistemas de controle. No campo dos sistemas de controle de processos contínuos, é fato conhecido que as estruturas de controle PID e PID modificadas provaram sua utilidade ao propiciar estabilidade satisfatória embora não possam fornecer o controle ótimo em muitas situações específicas.

O ambiente disponibiliza as principais estruturas de controle empregadas em sistemas industriais práticos, cada uma delas apresenta características específicas que serão explicadas adiante. A escolha do modelo de controle que melhor se adapta a uma determinada situação é responsabilidade do engenheiro, nessa altura do projeto deve-se ter como base as especificações de resposta transitória requeridas e procurar atendê-las de uma forma que não comprometa a estabilidade. A partir de uma correta escolha do modelo de controle é possível sintonizar os parâmetros do controlador para atingir as especificações de projeto e ao mesmo tempo tornar a estabilidade robusta.

As estruturas de controle disponibilizadas no ambiente são as seguintes:

#### ***Estrutura de controle PID convencional (“Figura 1-a”)***

Este é o tipo clássico de estrutura de controle PID, possui três parâmetros de ajuste: ganho proporcional ( $K_p$ ), tempo integral ( $T_i$ ) e tempo derivativo ( $T_d$ ). O controlador opera sobre o sinal de erro, diferença entre o sinal de referência e a saída realimentada do sistema, implementando três funções paralelas: ganho diferencial que reproduz as taxas de variação do sinal de erro, ganho integral que literalmente integra no tempo o sinal de erro e um ganho proporcional.

A estrutura de controle PID pode ser implementada a partir de circuitos eletrônicos simples contendo amplificadores operacionais e componentes passivos. Apesar de simples, este tipo de controle é recomendável a uma grande classe de sistemas.

### ***Estruturas de controle PID modificadas***

#### ***Estrutura de controle PI-D (“Figura 1-b”)***

Esta estrutura de controle é uma variação da estrutura convencional. Repare que nessa topologia a função diferencial foi passada da linha direta para o percurso de realimentação, o efeito que se tem ao se fazer isso é que o sistema a malha fechada melhora sua resposta em frequência no sentido de atenuar efeitos indesejáveis de altas frequências entrando pelo sinal de referência. Essa estrutura também evita que variações rápidas no sinal de referência como, por exemplo, uma entrada em degrau, seja amplificada pela função diferencial levando eventualmente a uma saturação indesejada de algum dispositivo no sistema real.

#### ***Estrutura de controle I-PD (“Figura 1-c”)***

Nesse modelo de controle as funções diferencial e proporcional são retiradas do caminho direto e inseridas no percurso de retroação. O efeito integral atenua sinais de alta frequência, desta forma esta estrutura apresenta características ainda mais seletivas que a estrutura anterior. A estrutura I-PD evita que valores elevados do sinal de controle (responsáveis pelo fenômeno da saturação) atinjam o interior do sistema, assim é possível escolher valores maiores para  $K_p$  e  $T_d$  e fazer com que efeitos de perturbações nesse caso sejam atenuados mais rapidamente que na estrutura PID convencional.

### ***Estruturas de controle PID a dois graus de liberdade***

#### ***Estrutura de controle com dois controladores PID (“Figura 1-d”)***

Esta estrutura de controle possui seis parâmetros ajustáveis, neste caso é possível inserir parcialmente os efeitos proporcional integral e derivativo tanto no caminho direto quanto no caminho da realimentação. Este tipo de controle apresenta, portanto maior flexibilidade para sintonia permitindo atingir características de resposta mais específicas, entretanto exatamente por ter seis parâmetros para serem ajustados independentemente, a sintonia pode se tornar mais difícil e tediosa. As estruturas de controle a dois graus de liberdade são utilizadas apenas em situações especiais onde se deseja atingir especificações de desempenho mais apuradas, entretanto esta estrutura particularmente tem caráter didático importante, pois permite avaliar de forma contínua o efeito da inserção parcial dos módulos proporcional, diferencial e integral no percurso direto referência-saída ou na realimentação.

#### ***Estrutura de controle com dois controladores PID em concepção de realimentação em avanço “feed forward” - sistema com dois processos - (“Figura 1-e”)***

A alimentação em avanço “feed forward” permite antecipar o efeito de perturbações indesejáveis e de forma mais eficiente compensar o efeito de erros na saída do sistema antes que eles se materializem, isto é conseguido por uma realimentação da perturbação antes que esta atinja o processo principal (no caso o processo<sub>1</sub>). Em geral o processo<sub>2</sub> é um processo de primeira ordem que impõem uma constante de tempo à propagação da perturbação. A implementação desta estrutura de controle requer sensores específicos para medir o sinal de perturbação, na prática isto pode ser difícil inviabilizando a aplicação no aspecto de instrumentação. A aplicação dos controladores com ação à frente “feed forward” tem

aumentado significativamente em aplicações industriais o que reforça a importância deste conceito a estudantes e profissionais do meio.

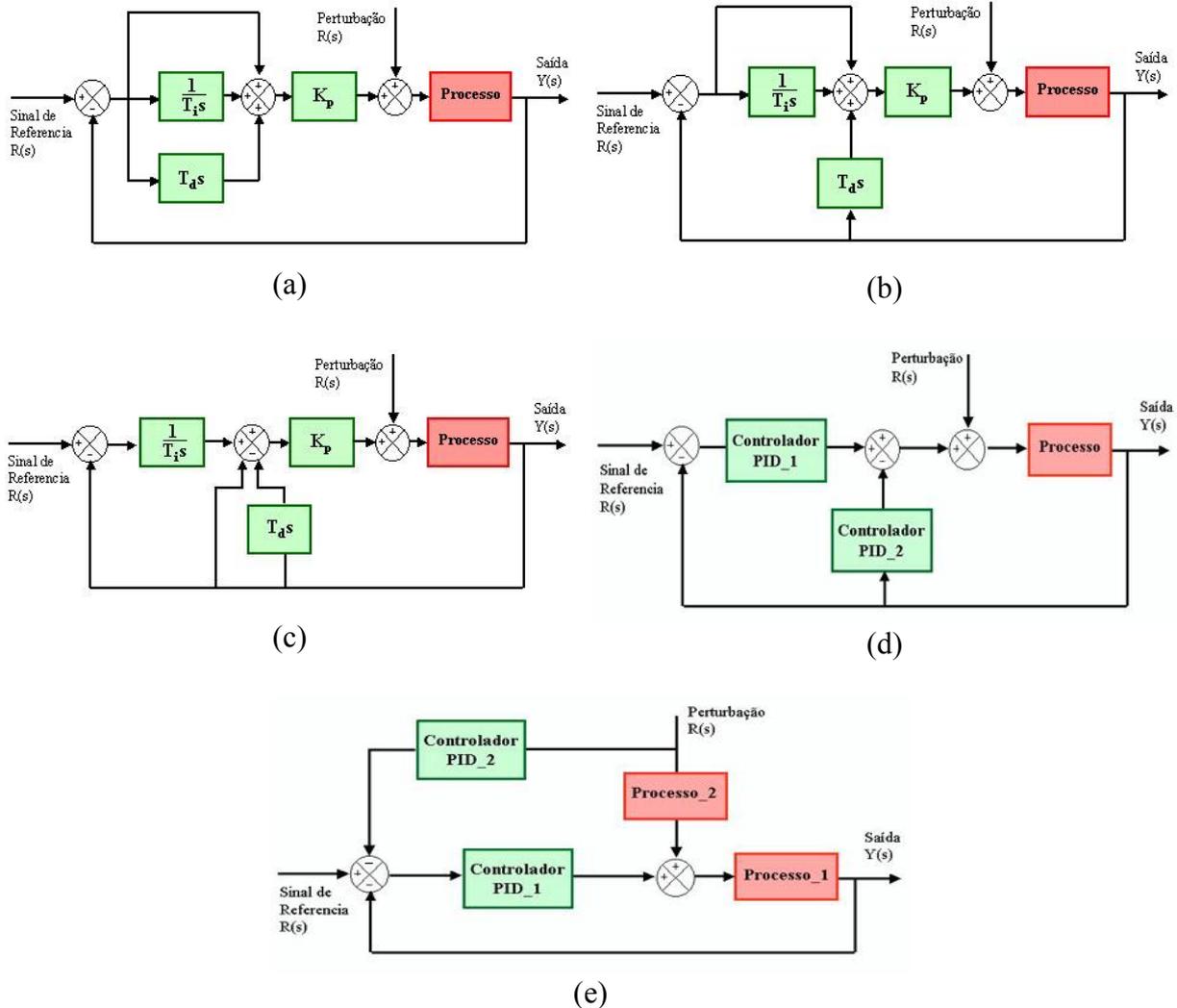


Figura 1 – Estruturas de controle do ambiente

## 2.2 Funcionalidades do ambiente – Objetos de controle

A concepção de uma solução para o controle de um determinado processo segue uma seqüência de procedimentos que serão apresentados nesta seção.

Para iniciar o processo de sintonia do controlador o usuário deve primeiramente escolher uma das cinco estruturas de controle apresentadas no item anterior e especificar a função de transferência de um ou dois processos presentes na planta, a “Figura 2” apresenta a interface para escolha da estrutura de controle e definição da função de transferência dos processos.

Uma vez definida a estrutura de controle e o processo que se deseja controlar o usuário está apto a iniciar os procedimentos de sintonia.

A “Figura 3” apresenta a tela principal do ambiente para análise de soluções e sintonia dos parâmetros do controlador. Os objetos dispostos na janela determinam diretamente a resposta gráfica apresentada. Descrevemos a seguir os principais objetos de controle e como estes objetos influenciam na dinâmica de análise e sintonia.

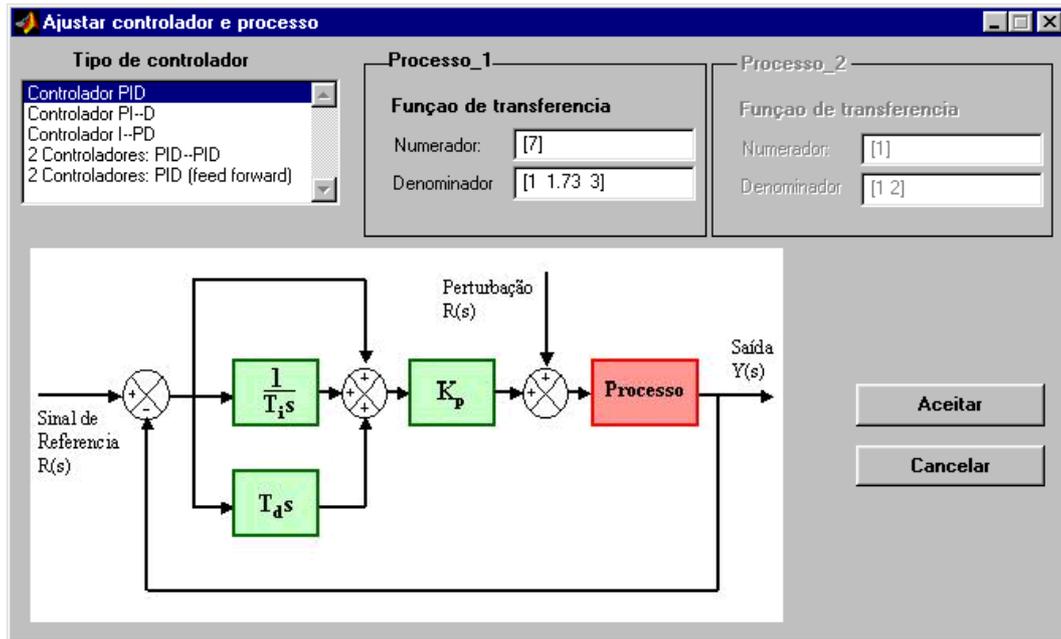


Figura 2 – Escolha do modelo de controle e especificação do processo.

### **Sistema**

Na parte superior direita é apresentada uma descrição do sistema: controlador e função de transferência do processo, previamente definido pelo usuário. O botão “Ajustar...” abre a janela mostrada na “Figura 2” e permite, portanto alterar a estrutura de controle e a função de transferência do processo.

### **Análise da resposta**

Especifica o tipo de resposta que será apresentada para a função de transferência a malha fechada. As seguintes opções estão disponíveis:

- **Resposta no domínio do tempo:** resposta transitória ao degrau unitário.
- **Resposta no domínio da frequência:** gráficos de Bode, amplitude e fase em função da frequência.
- **Lugar das raízes:** apresenta na tela a posição dos pólos no plano complexo.
- **Nyquist:** apresenta o gráfico polar de Nyquist.

As quatro formas de análise de resposta permitem avaliar diversas características do sistema a malha fechada.

### **Função de transferência**

As estruturas de análise descritas possuem todas duas entradas, sinal de referência e perturbação, e apenas uma saída. Portanto é possível definir duas funções de transferência a malha fechada:

- **Sinal de Referência → Saída:** relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída e da entrada de referência, enquanto a entrada perturbação é mantida em zero.
- **Perturbação → Saída:** relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída e da entrada perturbação, enquanto a entrada de referência é mantida em zero.

Desta forma é possível analisar separadamente o desempenho do sistema ao responder a variações do sinal de referência e o efeito de perturbações indesejadas na malha de controle. Se o sistema atender individualmente a cada um desses critérios então, por se tratar de sistemas lineares, a resposta do sistema a uma combinação das entradas também terá desempenho satisfatório.

### Controlador PID\_1

Este objeto permite alterar de forma dinâmica os parâmetros do controlador. A situação apresentada na “Figura 3” disponibiliza apenas um controlador, de acordo com a estrutura de controle atual. Cada controlador possui três parâmetros ajustáveis:

- **Ganho proporcional (Kp):** este parâmetro altera diretamente o ganho de malha aberta do sistema.
- **Tempo integral (Ti):** este parâmetro atua inversamente sobre o efeito integral do controlador que integra o sinal de entrada no tempo.
- **Tempo derivativo (Td):** este parâmetro influencia diretamente o efeito derivativo do controlador destacando as altas frequências do sinal de entrada.

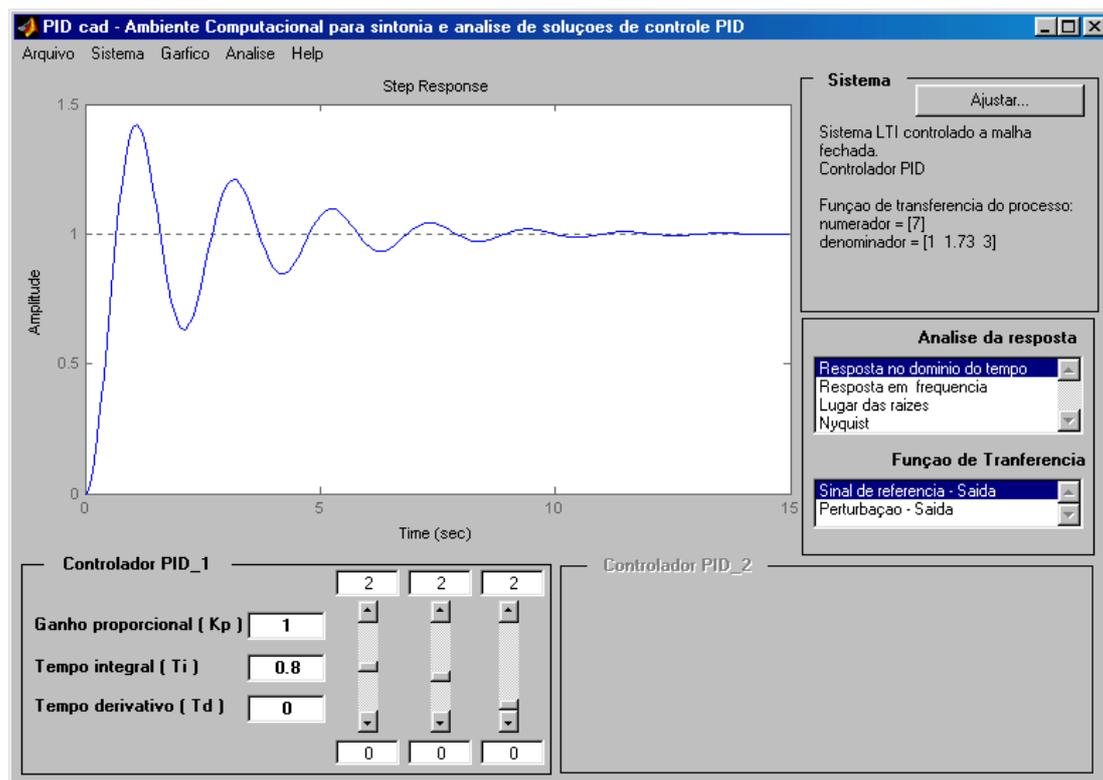


Figura 3 – Ambiente para sintonia dos parâmetros do controlador.

## 2.3 Dinâmica do ambiente – Procedimentos de sintonia e análise

Para ilustrar a dinâmica do ambiente considere a seguinte situação exemplo: desejamos projetar um sistema de controle PID para controlar um processo de segunda ordem que tenha a função de transferência mostrada na “equação (1)”. O processo possui um coeficiente de amortecimento  $\zeta=0,5$  e uma frequência natural não amortecida  $\omega_n=1,73$ , a definição destes parâmetros pode ser encontrada em OGATA(1998).

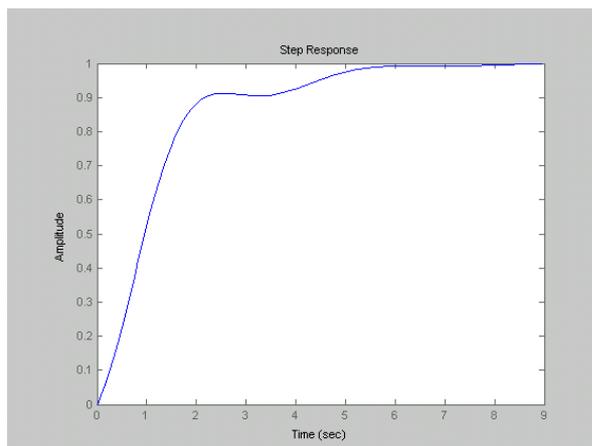
$$Gp(s) = \frac{7}{s^2 + 1,73s + 3} \quad (1)$$

A “Figura 2” apresenta a interface para configuração do problema. A estrutura de controle PID convencional, foi escolhida para este caso.

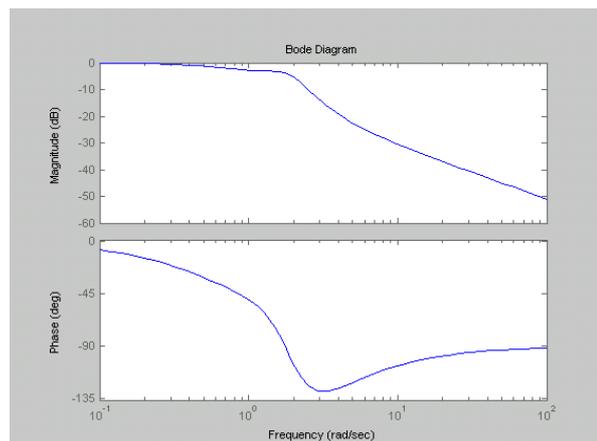
A interface para sintonia dos parâmetros do controlador é mostrada na “Figura 3”, o gráfico exibe a resposta transitória ao degrau unitário para a função de transferência a malha fechada: referencia → saída. Os parâmetros do controlador podem ser livremente alterados, especificamente para a situação apresentada temos:  $K_p=1$ ,  $T_i=0,8$  e  $T_d=0$ . É possível perceber que nesta situação a resposta apresenta um comportamento oscilatório e um valor de estado estacionário igual a 1, como esperado.

A dinâmica de sintonia se processa de forma que alterações nos parâmetros do controlador por parte do usuário são atualizadas automaticamente, desta forma é possível avaliar rapidamente a resposta para diferentes valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  e fazer com que o desempenho do controlador atenda às especificações de projeto.

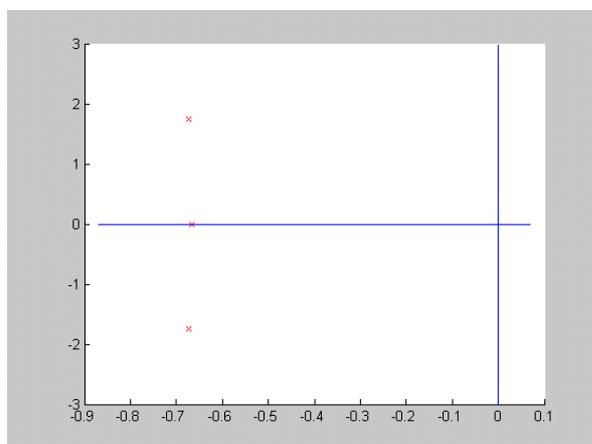
A seguir apresentamos diferentes formas de resposta, exemplificando como a dinâmica do sistema pode ser alterada por uma escolha conveniente dos parâmetros do controlador. Neste caso estão sendo avaliadas além da resposta transitória ao degrau unitário, as respostas em frequência, a posição dos pólos a malha fechada e o gráfico polar de Nyquist.



Resposta no domínio do tempo



Resposta em frequência



Posição dos pólos a malha fechada

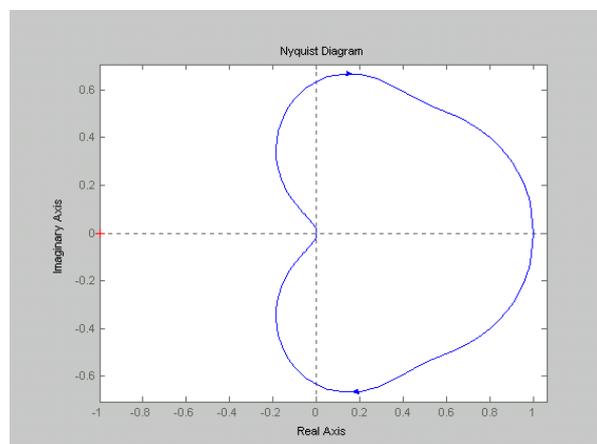
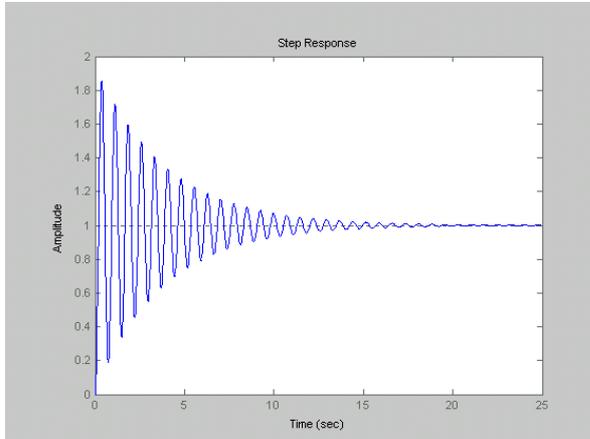


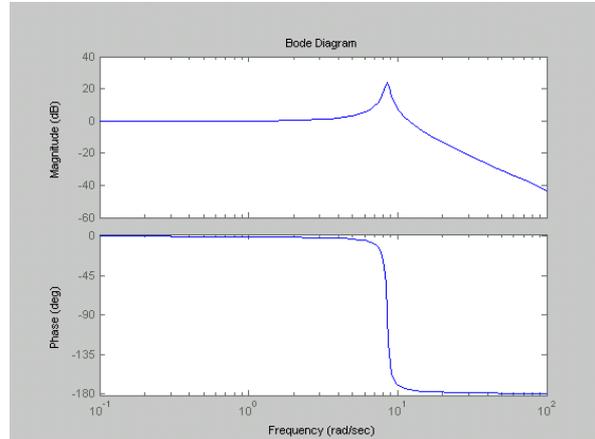
Gráfico polar de Nyquist

Figura 4 – Resposta para  $K_p=0,2$ ,  $T_i=0,6$  e  $T_d=0,2$

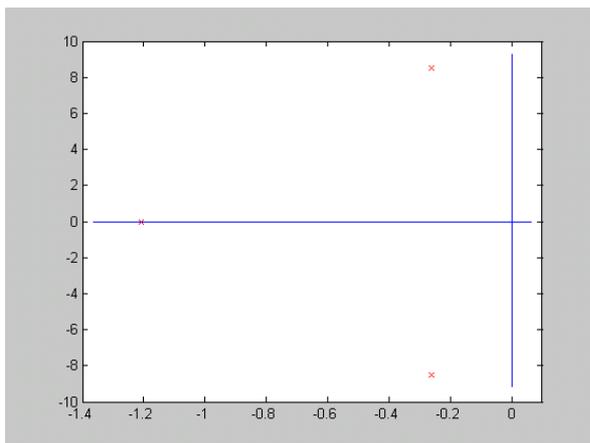
A dinâmica do sistema para a situação proposta na “Figura 4” tem característica sub-amortecida, repare que o sistema é estável e que a saída acompanha o valor de referência. A resposta em frequência mostra que o sistema atenua altas frequências, a frequência de corte (frequência de 3dB) está em torno de 1Hz.



Resposta no domínio do tempo



Resposta em frequência



Posição dos pólos a malha fechada

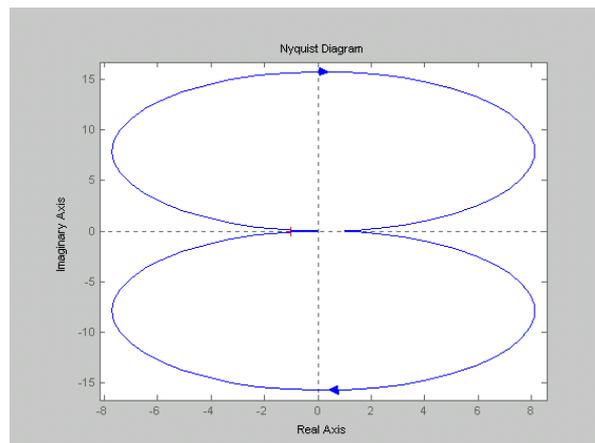
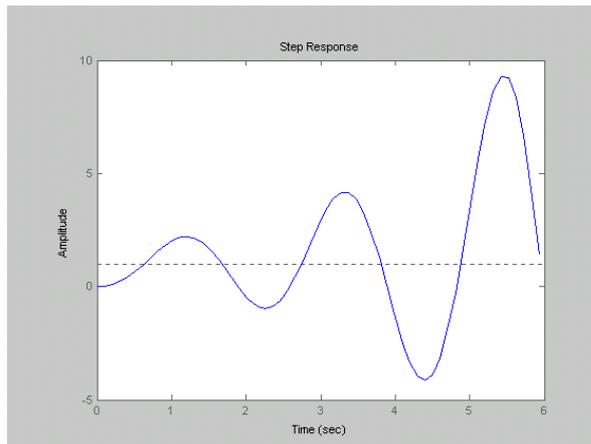


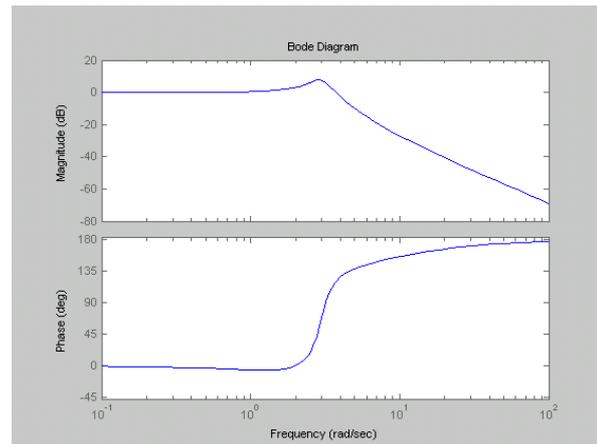
Gráfico polar de Nyquist

Figura 5 – Resposta para  $K_p=10$ ,  $T_i=0,8$  e  $T_d=0$

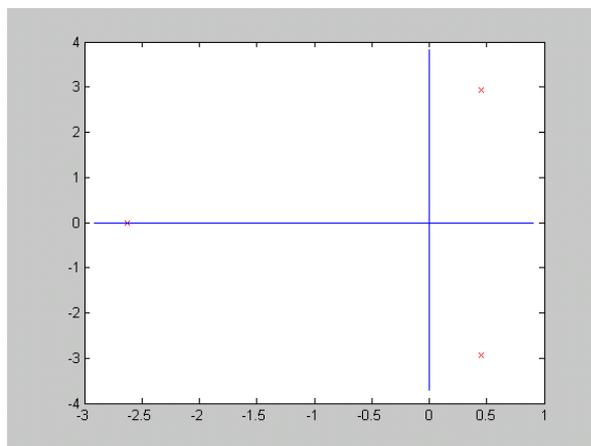
A dinâmica apresentada na “Figura 5” apresenta, como pode ser visto a partir da resposta no domínio do tempo, uma alta frequência natural amortecida (aproximadamente 1,3Hz). A curva de resposta em frequência exibe característica ressonante na frequência de 8Hz, isto indica que esta condição de controle não deve operar com sinais de referência com variações nesta frequência pois isto poderia amplificar o sinal de entrada e eventualmente levar a uma saturação de algum elemento do sistema.



Reposta no domínio do tempo



Resposta em frequência



Posição dos pólos a malha fechada

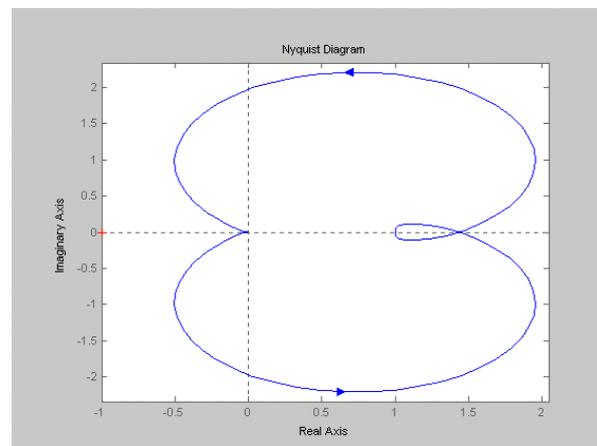


Gráfico polar de Nyquist

Figura 6 – Reposta para  $K_p=0,5$ ,  $T_i=0,15$  e  $T_d=0$ 

A “Figura 6” exemplifica o aspecto da instabilidade em sistemas de controle, este tipo de resposta é indesejável e deve ser evitado. Ao sintonizar um controlador o usuário deve verificar se o sistema além de ser estável apresenta uma certa margem de estabilidade para compensar efeitos não previstos no modelo do processo. Repare que apenas neste caso existem pólos no semiplano direito, característica de sistemas instáveis.

As ferramentas de análise integradas ao ambiente permitem que esses e outros aspectos da simulação possam ser prontamente analisados pelo estudante. Toda a análise que foi apresentada aqui se refere à estrutura de controle PID convencional, “Figura 1-a”. Eventualmente pode-se examinar o desempenho de cada uma das estruturas de controle disponíveis e então escolher a que melhor se adapta às especificações de projeto.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido é de grande importância para estudo, síntese e desenvolvimento de sistemas de controle, o ambiente representa uma ferramenta de auxílio computacional que pode e vem sendo usada por professores e alunos da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF para ensino e para estudos diferenciados da dinâmica de sistemas lineares invariantes no tempo.

As funcionalidades integradas permitem que o estudante possa interagir com os sistemas para verificar resultados teóricos e ainda experimentar situações diversas para tirar conclusões



próprias. As estruturas de controle foram cuidadosamente selecionadas para permitir analisar casos encontrados com frequência em sistemas industriais de controle contínuo, tornando claro a aplicabilidade prática do programa.

Procurou-se criar uma interface orientada para o projeto de controladores PID, criando uma estrutura dinâmica para sintonia dos parâmetros dos controladores, de modo que a simulação é automaticamente atualizada mediante qualquer alteração por parte do usuário.

Pretende-se futuramente incluir estruturas com características não lineares associados ao processo e então investigar a dinâmica de controle PID aplicada a sistemas não lineares e avaliar possíveis situações onde as técnicas de controle de sistemas lineares não podem fornecer condições de resposta satisfatórias.

O ambiente se revela, com estas funcionalidades, poderosa ferramenta computacional de suporte ao estudo, sintonia e análise de estruturas PID aplicadas ao controle de processos industriais, tanto no que se refere ao projeto do controlador como na análise de dinâmicas transitórias de processos, em baixas e altas frequências.

### ***Agradecimentos***

Ao Programa Especial de Treinamento – PET/SESu/UFJF

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ÄSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. Nova York: Editora ISA, 1992.

BUCHANAN, J. L.; PETER, R. T. **Numerical Methods and Analysis**. Nova York: Editora Mc Graw Hill International Editions, 1992.

GAYAKWAD, R.; SOKOLOFF, L. **Analog and Digital Control Systems**. New Jersey: Prentice-Hall International Editions, 1988.

HARRIOTT, P. **Process Control**. USA: Editora McGraw-Hill Book Company, 1964.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro-RJ: Editora Prentice-Hall do Brasil, terceira edição, 1998.

## **INTEGRATED INTERACTIVE ENVIRONMENT FOR PID CONTROLLERS TUNING AND DESIGN**

***Abstract:*** *PIDcad is an application developed to analyse and design linear control systems using PID controllers solutions applied to any order processes. The environment is totally integrated for tuning PID controller's parameters, it enables analysis in the time domain and in the frequency domain with Bode and Nyquist diagrams. The control structures available are the following: the conventional PID structure, with or without insert of the Derivative and Proportional modules in the direct path and systems with two PID controllers in feed forward conception. The environment, with all these functionalities, is a powerful tool to support PID controller's project and analysis of industrial control systems dynamics, for low and high frequencies.*

***Key-words:*** *Control systems, Control, controllers, Simulation*