

PROJETO DE CONTROLADORES PID PARA UM PROCESSO TÉRMICO BASEADO EM UMA NOVA REGRA DE SINTONIA

Luiz Affonso Guedes de Oliveira¹
Roberto C. Limão de Oliveira¹
Rosana Paula de Oliveira Soares¹

GRUPO: A B C D E

TEMA: Modelos e métodos matemáticos na gestão e análise de desempenho de sistemas de automação e controle.

PALAVRAS CHAVE: Curva de Reação, Sintonia de PID, Controle Digital, Processo Térmico.

RESUMO

Neste trabalho são analisados os desempenhos em tempo real de estruturas PID analógicas e digitais, com a sintonia obtida a partir do método de projeto proposto pelos autores bem como de outros diferentes métodos de projeto conhecidos na literatura especializada. Todos os métodos estudados consideram que o processo a ser controlado pode ser caracterizado adequadamente como um sistema de primeira ordem com atraso de transporte. Testes de comparação de desempenho do PID, sintonizado pelos diversos métodos, são realizados utilizando um processo térmico disponível no Laboratório de Controle e Sistemas - LACOS - da Universidade Federal do Pará. Para efeito de comparação de desempenho, são analisados os seguintes aspectos: velocidade de resposta, sobre sinal para referência tipo degrau, esforço de controle e simplicidade de projeto.

ABSTRACT

In this work are analyzed the real time performance of analogical and digital PID structures, with tuning obtained starting from the project method proposed by the authors as well as of other different methods of project available in the specialized literature. All the studied methods consider that the process to be controlled can be characterized appropriately as a system of first order with delay time. The comparative tests are realized of PID tuned acting by the several methods. They are accomplished using an available thermal process at Laboratory of Control and Systems - LACOS - of the Federal University of Pará. For effect of acting comparison, the following aspects are analyzed: answer speed, overshoot for step reference, control effort and project simplicity.

¹ Depto de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará.

INTRODUÇÃO

O Controlador Proporcional Integral Derivativo, mais conhecido como controlador PID, constitui a estratégia de controle de maior utilização na indústria ao longo de muitos anos, sendo na maioria das aplicações práticas suficiente para garantir bom desempenho do processo controlado. Entretanto, o mesmo só apresenta este desempenho se for bem sintonizado, sendo este o grande problema de sua utilização. A minimização deste problema de sintonia paramétrica do PID, pode ser alcançada, fazendo-se uso de métodos baseados em tabelas que informam os valores de k_p , T_i , e T_d , a partir de um modelo esperado para o processo. A tabela mais conhecida é a de Ziegler-Nichols ^[1], porém existem outras tabelas de sintonia disponíveis na literatura especializada com características semelhantes, porém com melhor desempenho ^{[2],[3],[4]}.

A tabela de sintonia de parâmetros do controlador PID proposta pelos autores ^[5], denominada de GLR, é de fácil uso e considera que o processo a ser controlado pode ser caracterizado adequadamente como um sistema de primeira ordem com atraso de transporte. A tabela foi obtida, utilizando-se um procedimento de otimização, em função do atraso de transporte. Os pontos, ditos 'ótimos', no espaço de parâmetros, são definidos através da minimização da somatória do erro quadrático entre a saída do sistema em malha-fechada e a saída de um modelo de referência. A partir destes pontos, encontra-se a curva que cria a tabela de sintonia dos parâmetros do controlador PID.

Neste trabalho é realizada uma análise comparativa do desempenho dos controladores PID analógicos e digitais, sintonizados a partir da tradicional regra de Ziegler-Nichols, da regra de GLR e de outras regras tais como IMC e etc., que se mostraram competitivas em relação ao desempenho apresentado pela regra proposta pelos autores. Para realizar esta avaliação de desempenho, foi utilizado um processo real que consiste em aquecer o ar em um túnel de vento, até alcançar a temperatura desejada. Todas as regras utilizadas baseiam-se no modelo desse processo, obtido a partir de resultados da curva de reação.

FORMULAÇÃO DA REGRA GLR PARA SINTONIA DE PID

Processos em malha aberta, sem integradores ou pólos ressonantes, podem frequentemente ser caracterizados por um sistema de primeira ordem com uma constante de ganho k , uma constante de tempo τ e um atraso de transporte T_a . Portanto a função de transferência do processo pode ser aproximada conforme mostrado na figura 1.

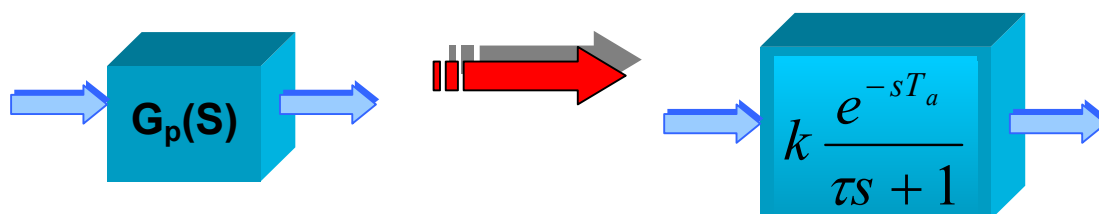


Figura 1 – Função de Transferência do Processo

Assumindo a aproximação mencionada, o processo pode ser identificado a partir da sua curva de reação ou seja com base na resposta do processo em malha aberta, devido a um sinal de entrada tipo degrau unitário. A relação entre a curva de reação e os parâmetros do processo (k , τ e T_a) é mostrada na figura 2.

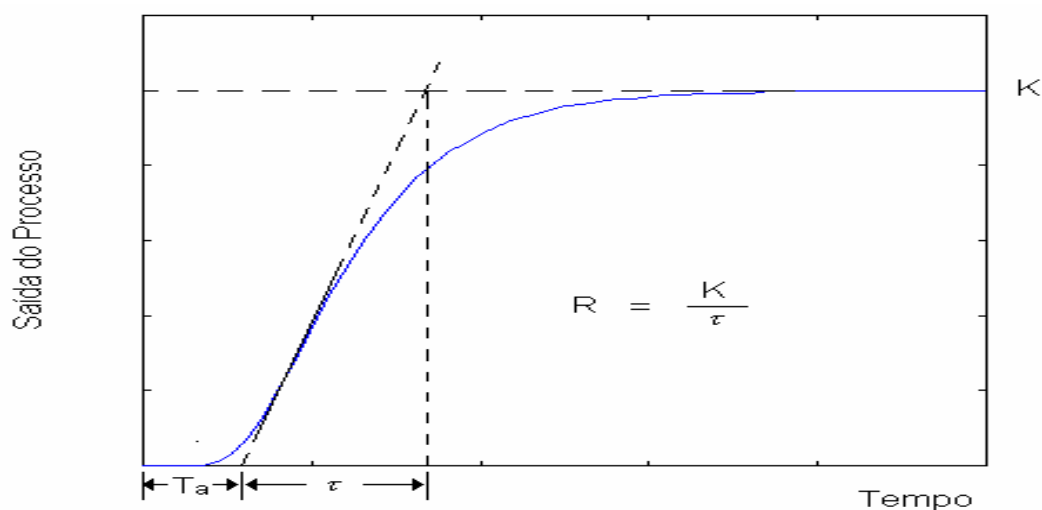


Figura 2 – Curva de Reação e Parâmetros do Processo

A estrutura da malha de controle adotada neste trabalho é a estrutura convencional, mostrada na figura 3.

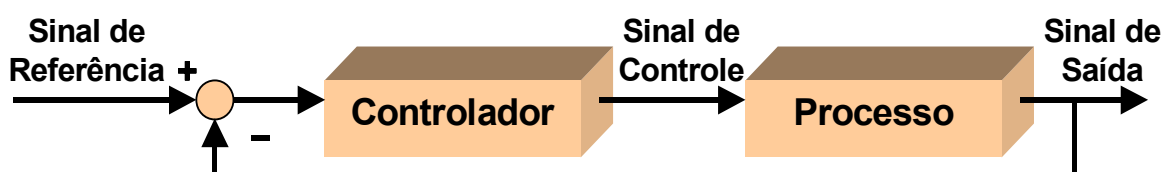


Figura 3 – Estrutura da Malha de Controle

Sabendo que a função de transferência do controlador PID é definida pela equação abaixo,

$$G_c(s) = K_p \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot S} + T_d \cdot S \right] \quad (1)$$

então a função de transferência da malha direta do sistema pode ser escrita da seguinte maneira:

$$G_{MD}(s) = K_p \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot S} + T_d \cdot S \right] \cdot k \frac{e^{-s \cdot T_a}}{\tau \cdot S + 1} \quad (2)$$

Normalizando a escala de tempo em relação a τ e adotando um ganho equivalente K_{eq} , tem-se que:

$$G_{MD}(s) = K_{eq} \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i' \cdot S} + T_d' \cdot S \right] \cdot \frac{e^{-S\alpha}}{S + 1} \quad (3)$$

onde, $K_{eq} = K_p \cdot k$; $\alpha = \frac{T_a}{\tau}$; $T_i' = T_i / \tau$; $T_d' = T_d / \tau$ (4)

Assim, a sintonia do controlador normalizado (k_{eq} , T_i' e T_d') é função apenas do valor assumido pelo parâmetro α , que caracteriza a relação entre o atraso de transporte e a constante de tempo do processo.

O procedimento de projeto proposto pelos autores em [6] é baseado no diagrama de blocos mostrado na figura 4. O objetivo é obter os parâmetros k_{eq} , T_i' e T_d' de modo a minimizar a integral do erro quadrático e_m entre a saída do modelo de referência y_{mr} e a saída do processo y , para uma entrada tipo degrau. Como o procedimento é realizado em termos de simulação numérica, foi utilizado a somatória ao invés da integração.

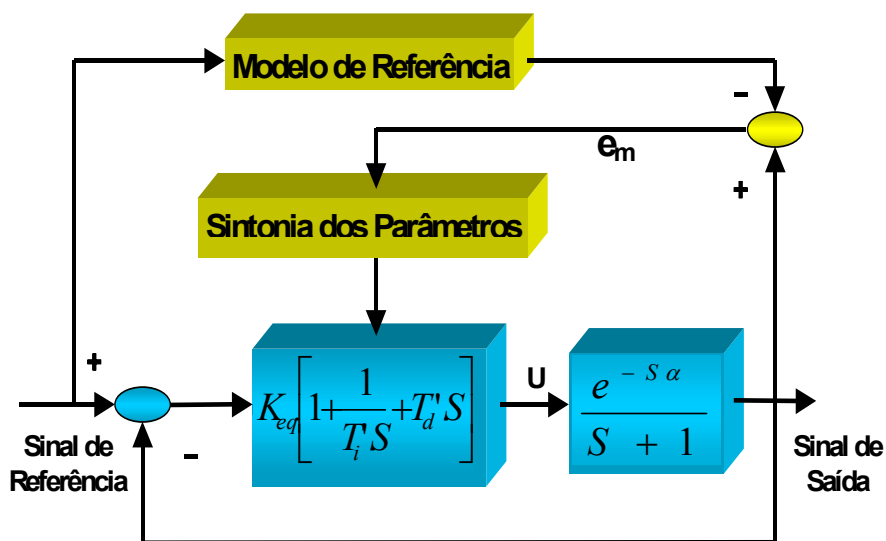


Figura 4 – Otimização dos parâmetros PID por Modelo de Referência.

O modelo de referência é determinado por,

$$G_{mr}(s) = \frac{e^{-sT_a}}{\beta s + 1} \quad (5)$$

com o valor de β igual a 0,2 (ou 0,33), que se caracteriza aqui como um parâmetro de projeto. A medida que se varia o valor de α , varia-se também os três parâmetros k_{eq} , T'_i e T'_d até encontrar os valores que minimizem a somatória do quadrado do erro e_m . Neste trabalho foi utilizado um intervalo entre 0.1 e 1 para α , uma vez que em [4] é advertido que as fórmulas de Ziegler-Nichols não devem extrapolar tal faixa de valores de α .

A relação da variação dos parâmetros do controlador em função de α foi obtida através de um procedimento onde, inicialmente para $\alpha=0,1$, utilizou-se o algoritmo de otimização de Powell, da mesma forma como em [6], para encontrar os valores “ótimos” dos parâmetros do controlador, sendo que o ponto de partida do algoritmo de otimização foi a tabela de Ziegler- Nichols.

Posteriormente, incrementando α em intervalos de 0,05 realizou-se uma busca nas vizinhanças dos parâmetros do controlador obtido para α antes do incremento (esta estratégia se baseou na hipótese de que pequenas variações de α acarretariam também pequenas variações nos parâmetros do controlador) , para encontrar novos valores de k_{eq} , T'_i e T'_d que minimizassem a somatória do quadrado do erro e_m .

Ao término do procedimento citado, obteve-se uma relação numérica entre os parâmetros do controlador e o parâmetro α e então através de um ajuste de curva por mínimos quadrados, determinou-se a nova regra de sintonia (GLR) para os parâmetros PID. As curvas obtidas podem ser vistas na figura 5.

Assim a nova tabela através da qual o controlador PID pode ser sintonizado a partir da curva de reação do processo, é a seguinte:

$$\begin{aligned} k_{eq} &= \left[\frac{1}{0,65\alpha + 0,38} \right] \\ T'_i &= (0,35\alpha + 0,97) \\ T'_d &= (0,34\alpha - 0,015) \end{aligned} \quad (6)$$

Os parâmetros k_p , T_i e T_d são obtidos utilizando (4). É importante notar que $1/k_p$, T_i e T_d variam linearmente com α , o que mantém uma grande similaridade com a tabela de Ziegler-Nichols

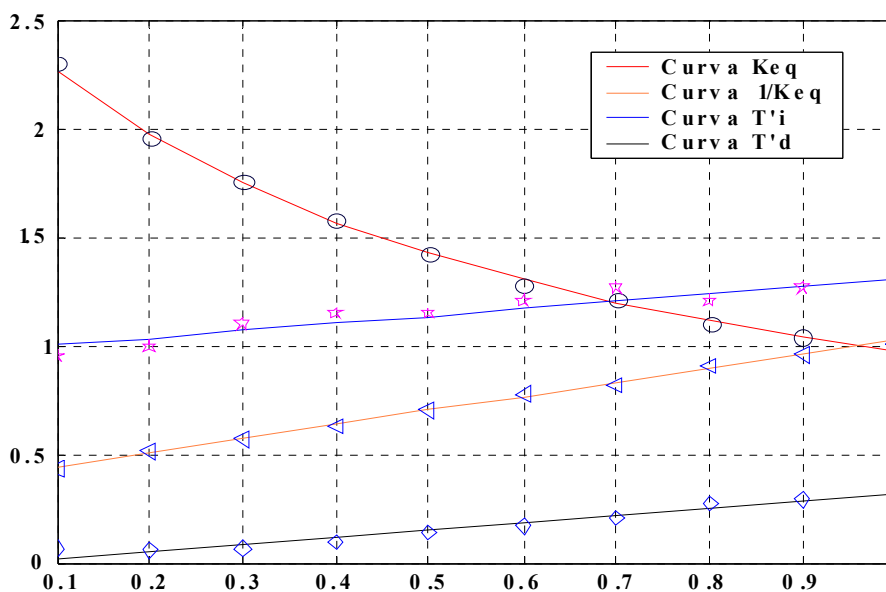


Figura 5 –Curvas de $1/k_{eq}$, k_{eq} , T'_i e T'_d em função de α .

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES PID

O processo real utilizado para avaliar o desempenho dos controladores PID, trata-se do equipamento PT326 da Feedback Instruments Ltd. Neste processo, o ar retirado da atmosfera através de um ventilador centrífugo é conduzido através de um tubo passando por uma grade resistiva. O processo consiste em aquecer o ar que flui no tubo, até alcançar a temperatura desejada. O equipamento é mostrado na figura 6.

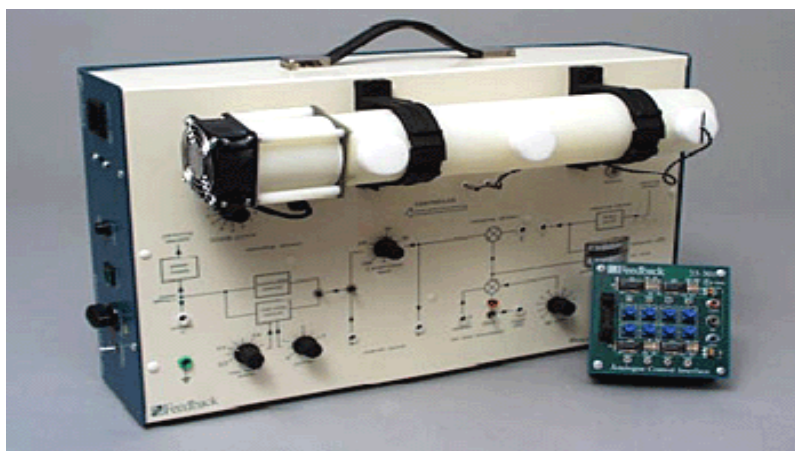


Figura 6 – Equipamento PT 326 da Feedback Instruments Ltd

O experimento da curva de reação foi realizado para obter um modelo aproximado do processo. Na figura 7, pode ser observado o resultado do experimento.

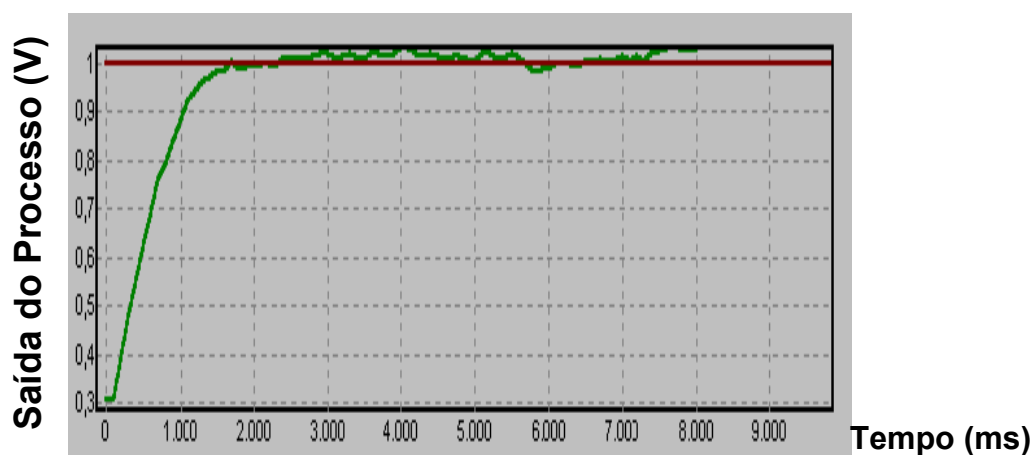


Figura 7– Curva de Reação do Processo

Com o resultado obtido, o modelo adotado para o processo é definido pela seguinte função de transferência:

$$G(s) \approx \frac{1,0.e^{-0,11s}}{0,46s + 1} \quad (7)$$

que implica em $\alpha = \frac{T_a}{\tau} = 0,239$.

Com base no modelo adotado para o sistema teste e em vários métodos de sintonia de PID aplicados a processos caracterizados por modelos de primeira ordem com atraso de transporte, foram projetados e implementados alguns Controladores PID. Para fazer o projeto foi utilizada uma interface desenvolvida em MATLAB a qual fornece os parâmetros dos Controladores PID a partir dos dados do processo (Ganho, Constante de Tempo e Atraso de transporte) e da escolha do método de projeto. Na figura 8, pode ser vista a interface e os métodos disponíveis.

Na tabela 1 são mostrados os valores obtidos para os parâmetros do controlador PID, utilizando os métodos de Ziegler-Nichols, os métodos propostos pelos autores e os métodos que se mostraram mais competitivos com a nova regra de sintonia.

Tabela 1 – Parâmetros Sintonizados do PID

Métodos	Ziegler Nichols	Jean_Marie Flaus	IMC (0,2)	GLR (0,2)	GLR (0,33)
Parâmetros					
Kp	5,018	2,34	1,48	2,47	1,86
Ti	0,22	0,51	0,46	0,48	0,48
Td	0,055	0,049	0	0,032	0,030

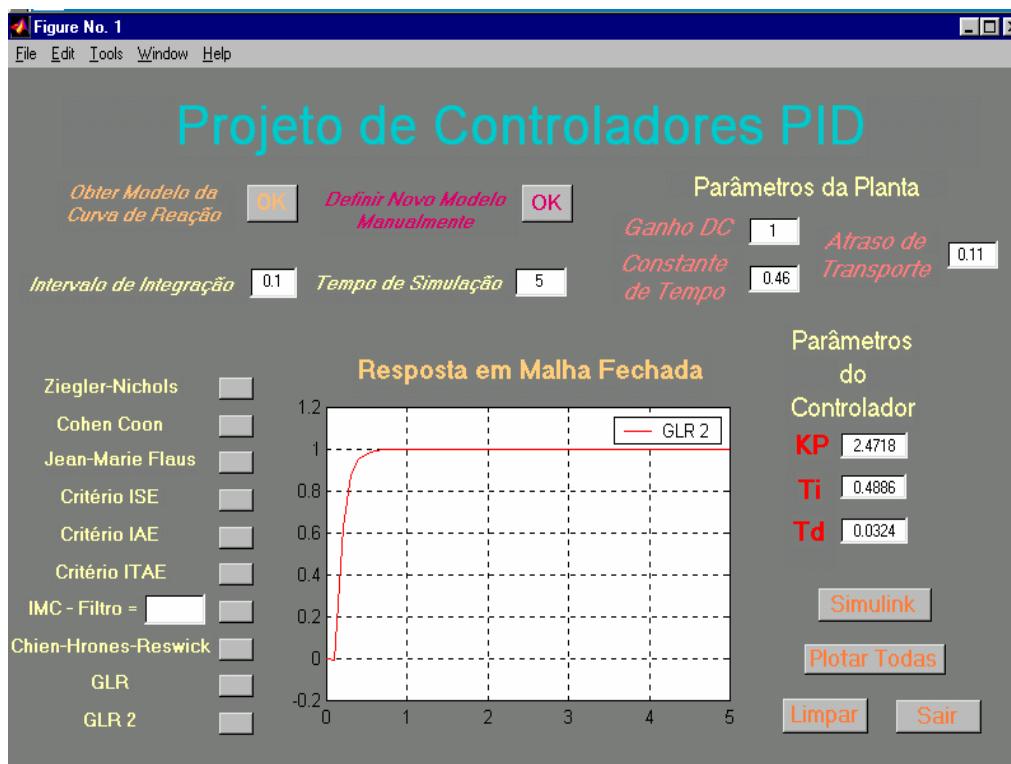


Figura 8 – Interface em MATLAB para projetar PID

A implementação analógica dos controladores PID mostrados na tabela 1 foi realizada pelo módulo PID150Y da Feedback Instruments Ltd, mostrado na figura 9.

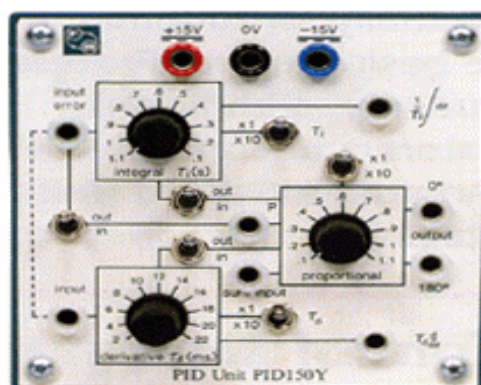


Figura 9 – Módulo PID150Y da Feedback Instruments Ltd

Para implementar o controlador PID digital foi utilizado um software com interface amigável, desenvolvido em DELPHI 3.0 que se comunica com o processo através de uma placa AD-DA^[8]. Conforme pode ser observado na figura 10, na interface é definido o sinal de referência, a taxa de amostragem e os parâmetros do controlador PID o qual é discretizado internamente utilizando a regra de Tustin.

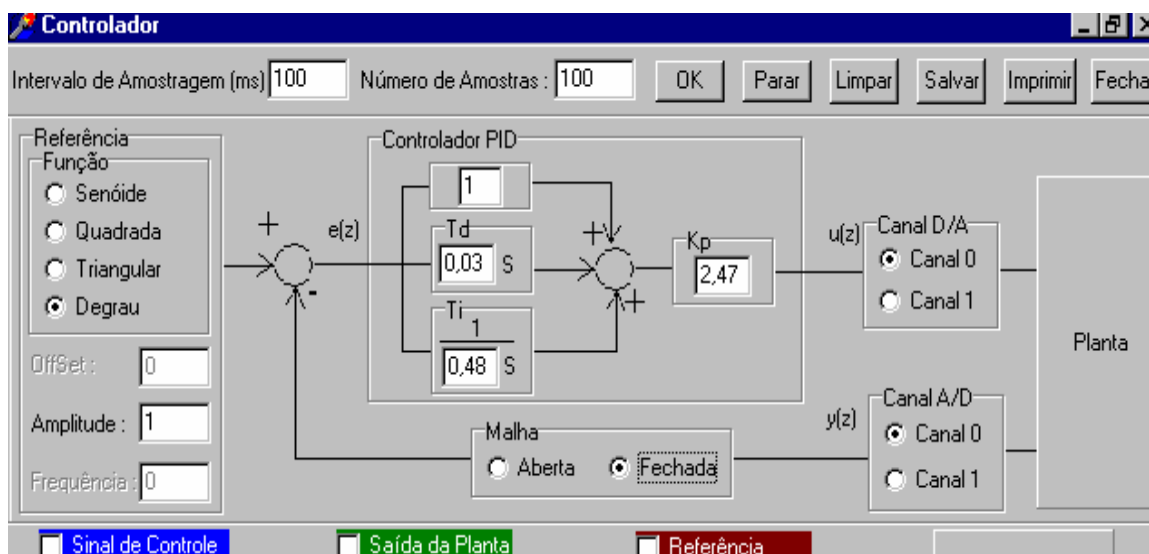


Figura 10 - Estrutura da interface para implementar o Controlador PID Digital

Nos experimentos realizados foi utilizada a taxa de amostragem de 100ms e o sinal de referência tipo degrau unitário.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para avaliar o comportamento do sistema em malha fechada com os controladores PID analógicos foi aplicado um acréscimo de temperatura correspondendo a aproximadamente 2,0 Volts. Os resultados obtidos podem ser observados nas figura 11 e 12, onde os sinais de saída do sistema em malha fechada e do sinal de controle utilizando controladores PID analógicos, sintonizados pela regra de IMC e de GLR, são mostrados, respectivamente. Entre todas as regras disponíveis na interface mostrada na figura 8, essas duas foram as que apresentaram melhor desempenho.

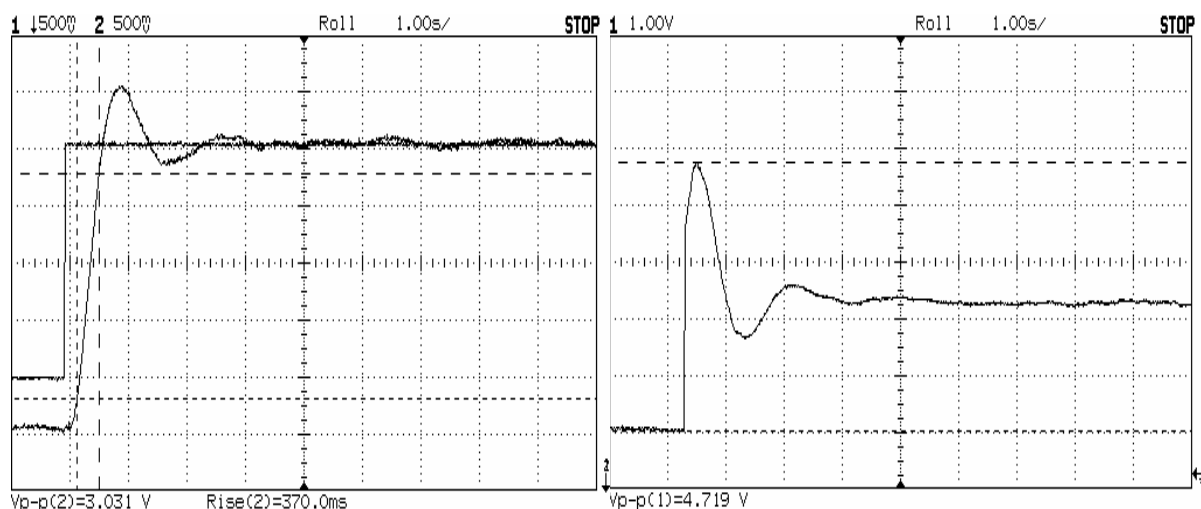


Figura 11 - Sinal de saída e de controle utilizando Controlador PID analógico (IMC – Filtro – 0,2)

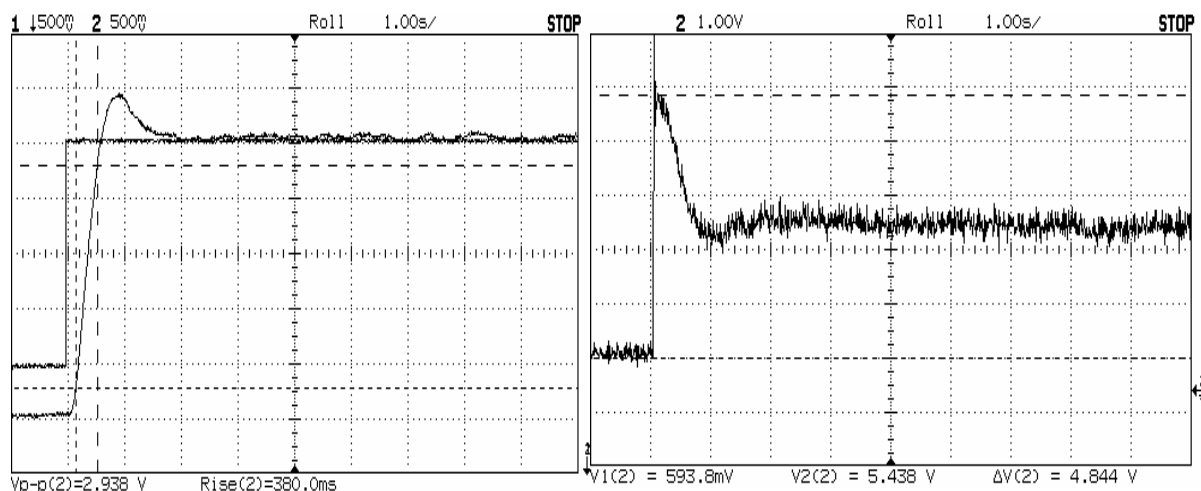


Figura 12 - Sinal de saída e de controle utilizando Controlador PID analógico (GLR – 0,2)

Comparando os dois desempenhos apresentados, observa-se que a ação de controle gerada pelo controlador projetado pela regra de GLR, faz com que a saída do sistema tenha maior velocidade final de resposta e menor sobre sinal. Contudo, o sinal de controle gerado pelo controlador projetado pela regra de IMC, possui características mais seguras para o processo visto que sua variação inicial é menor e mais suave.

Na tabela 2 são apresentados os resultados numéricos sintetizando o desempenho dos controladores PID analógicos sintonizados pelas regras mais competitivas.

Tabela 3 – Medidas de Desempenho em Malha Fechada

Métodos	IMC (0,2)	GLR (0,2)
Medidas		
Tempo de Subida	370ms	380ms
Maior Sobre sinal	3,03V	2,93V
Tempo de Acomodação	≈3,20	≈2,00

Nas figuras 13, 14 e 15 podem ser observadas as respostas ao degrau unitário do sistema em malha fechada utilizando controladores PID digitais, sintonizados pelas regras de Ziegler – Nichols, de IMC e de GLR, respectivamente. Avaliando esses resultados, percebe-se que a sintonia de Ziegler Nichols apresentou características mais oscilatórias e de maior sobre sinal. A sintonia de GLR apresentou características de resposta semelhantes a sintonia de IMC, porém com sobre sinal mais elevado e menor tempo de subida.

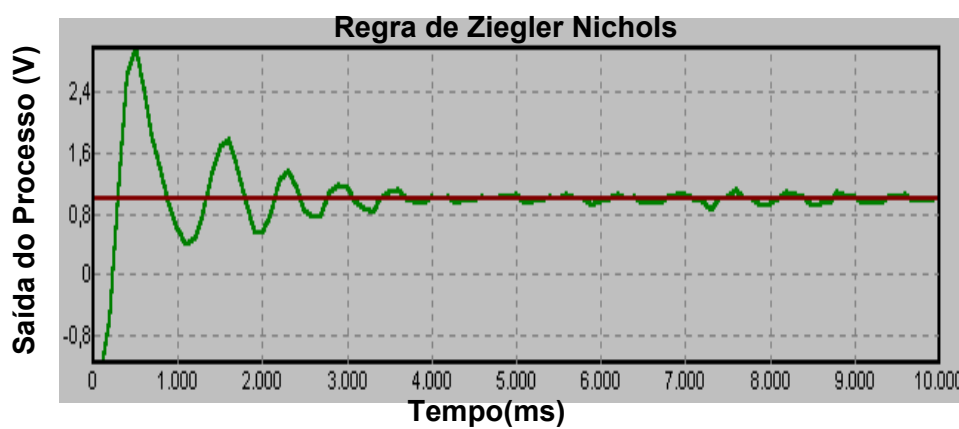


Figura 13 - Desempenho em malha fechada com Controlador PID Digital (Ziegler – Nichols)

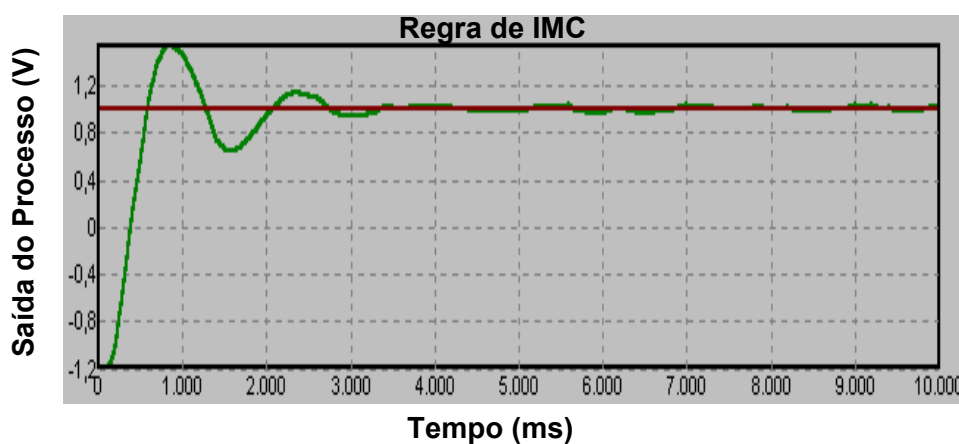


Figura 14 - Desempenho em malha fechada com Controlador PID Digital (IMC – Filtro – 0,2)

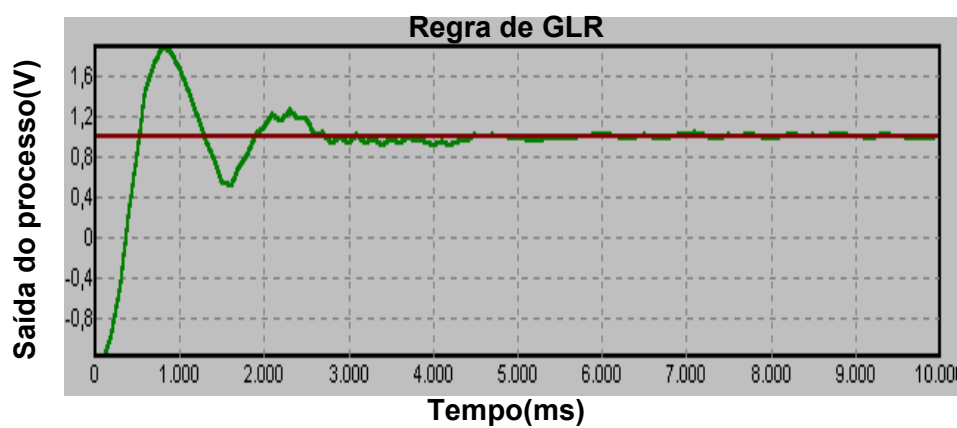


Figura 15 - Desempenho em malha fechada com Controlador PID Digital (GLR – 0,33)

Na tabela 3 são apresentados os resultados numéricos sintetizando o desempenho dos controladores PID digitais sintonizados pelas regras mais competitivas.

Tabela 3 – Medidas de Desempenho em Malha Fechada

Métodos	Ziegler Nichols	Jean_Marie Flaus	IMC (0,2)	GLR (0,2)	GLR (0,33)
Medidas					
Tempo de Subida	300ms	440ms	600ms	380ms	580ms
Maior Sobre sinal	2,80V	1,80V	1,60V	2,10V	1,90V
Tempo de Acomodação	≈4s	≈3,50	≈3,50	≈3,50	≈3,50

Observando, nas figuras 16, 17 e 18, os sinais de controle gerados pelos diferentes controladores, percebe-se ainda que a regra de IMC apresenta melhores características, pois o esforço de controle é menor e mais suave.

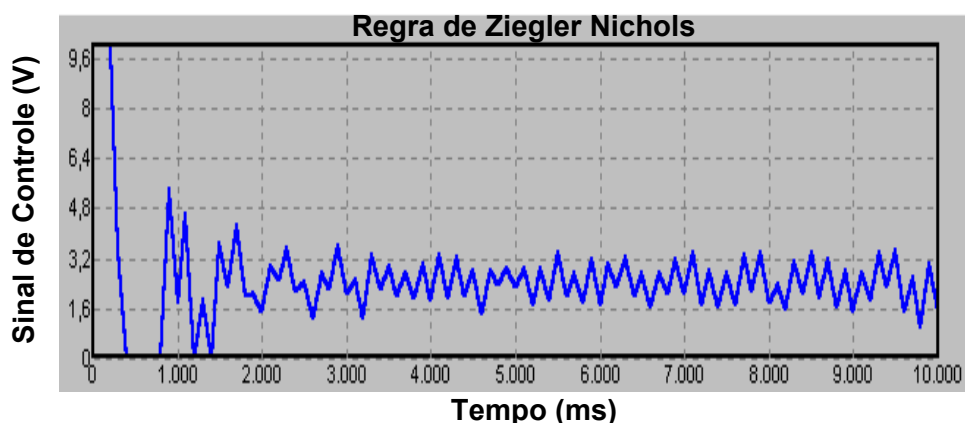


Figura 16 - Sinal de Controle do Controlador PID Digital (Ziegler – Nichols)

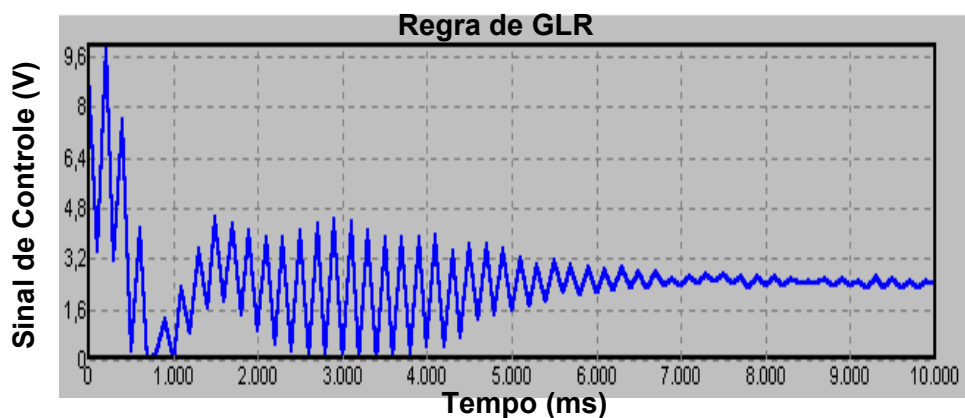


Figura 17 - Sinal de Controle do Controlador PID Digital (GLR - 0,2)

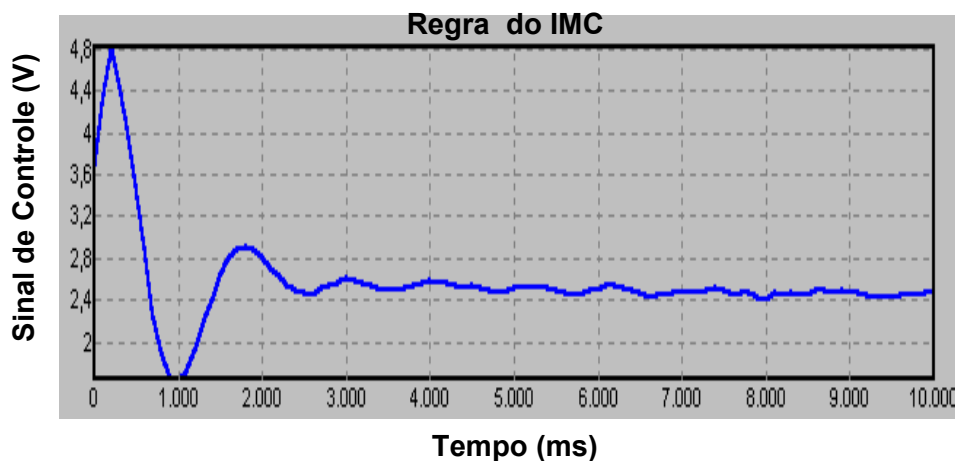


Figura 18 - Sinal de Controle do Controlador PID Digital (IMC - 0,2)

CONCLUSÃO

O desempenho dos controladores gerados pela regra de sintonia do PID proposta pelos autores foi comparado com os advindos de outras tabelas de sintonia através de experimentos em tempo real com um processo de controle de temperatura. Os controladores sintonizados foram implementados em sua forma originalmente projetada ou seja em sua forma contínua, sendo também implementados em sua forma discreta utilizando método de discretização de Tustin.

Os resultados obtidos neste trabalho, demonstraram o bom desempenho da regra GLR em amortecer as oscilações, produzindo pequenos sobre sinais e maior velocidade de resposta quando comparada com as outras regras. Esse resultado somente é alcançado quando da implementação do controlador na sua forma analógica.

Foi constatado que a discretização do controlador degrada o desempenho do sistema em malha fechada, sendo que essa degradação é menor quando é utilizado o método IMC de sintonia do PID. Isto provavelmente ocorre devido o método IMC considerar a parcela derivativa nula quando o processo a ser controlado é de 1ª ordem.

A maioria das regras de sintonia de PID, abordadas neste trabalho, fornecem valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d , somente a partir das características do processo obtidas de sua curva de reação. A regra IMC, porém dispõe ao projetista uma flexibilidade adicional no projeto que é a escolha da constante de tempo do filtro. Esta flexibilidade é decisiva na garantia de bons resultados de desempenho tornando-a bastante competitiva em relação a regra de sintonia proposta pelos autores.

Com o objetivo de aprimorar a regra de sintonia GLR, pretende-se investigar em trabalhos futuros, os seguintes aspectos:

- Elaborar a regra de GLR com o parâmetro β sendo escolhido pelo projetista.
- Construir regra de sintonia especificamente para controladores discretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ziegler, J. G. e Nichols, N. B. (1942). "Optimum Settings for Automatic Controllers", *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-768.
- [2] Åström, K. J. e Hägglund, T. (1995). "Automatic Tuning of PID Controllers", *The Control Handbook*, W. S. Levine (Ed.), CRC Press.
- [3] *Flaus Jean – Marie* (1994). "La régulation industrielle – regulateurs PID, Prédicatifs et flours". Hermès, Paris
- [4] Smith, C. A. e Corripio, A. B. (1985). *Principles and Practice of Automatic Process Control*, New York: Wiley.
- [5] *Guedes, L. A., Oliveira, R. C. L. e Soares, R. P. O.* (2000). "Real Time Results for a New Tuning PID Rule", CD ROM do IV Industry Applications Conference – INDUSCON 2000.
- [6] *Silva, G. A., Maitelli, A. L. e Araújo, A. D.* (1998). "Um Ambiente para Projeto de Controladores Clássicos Empregando Técnicas de Otimização", *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*, Vol. VI, Uberlândia, MG, pp. 1911-1916.
- [7] *Feedback Instruments Ltd.*, Process Trainer PT326.
- [8] *Araujo, R. B.* (2000). "Ambiente para Ensino de Controle Digital em Tempo Real". Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.