

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Eletrônica

MANUAL DO SISTEMA PILOTO TORNEIRA ELÉTRICA

Profa. Carmela Maria Polito Braga, DELT  
Roberto Dias Aquino, Bolsista PAE

Agosto  
2002

## Introdução

O Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação (LECI) possui diversos sistemas piloto didáticos utilizados em aulas práticas de Laboratório de Controle e Automação I e II e Informática Industrial. O Sistema Piloto Torneira Elétrica foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG, com o objetivo de viabilizar o estudo de um sistema térmico em laboratório.

## Descrição dos Sistemas, Circuitos Envolvidos e Princípios de Funcionamento e Operação

O objetivo do sistema é controlar a temperatura da água corrente por meio da manipulação da potência elétrica entregue à torneira, independentemente da vazão (perturbação de carga).

O controlador PID analógico recebe o sinal do sensor de temperatura e um sinal de referência, proveniente de um potenciômetro. Com base no erro calculado entre sinais o controlador calcula uma ação de controle, disponibilizando um sinal de controle na saída do circuito a ser aplicado na entrada da placa de disparo de tiristores (dispositivo de acionamento). Esta placa converte o sinal de controle em ângulo de disparo dos tiristores, que manipulam a potência entregue à torneira elétrica.

## Torneira

A torneira utilizada na planta é um chuveiro comum de 4400W de potência. Atualmente a torneira opera com uma resistência de 3200W. A torneira é mostrada na foto 01.



Foto 01: Torneira

## Fonte de Alimentação

Para a alimentação dos circuitos, foi projetada no trabalho inicial (Nogueira Jr. e outros, 1997) uma fonte de alimentação simétrica de  $\pm 15V$ , com corrente de saída de 500 mA. O circuito pode ser visto na figura 01.

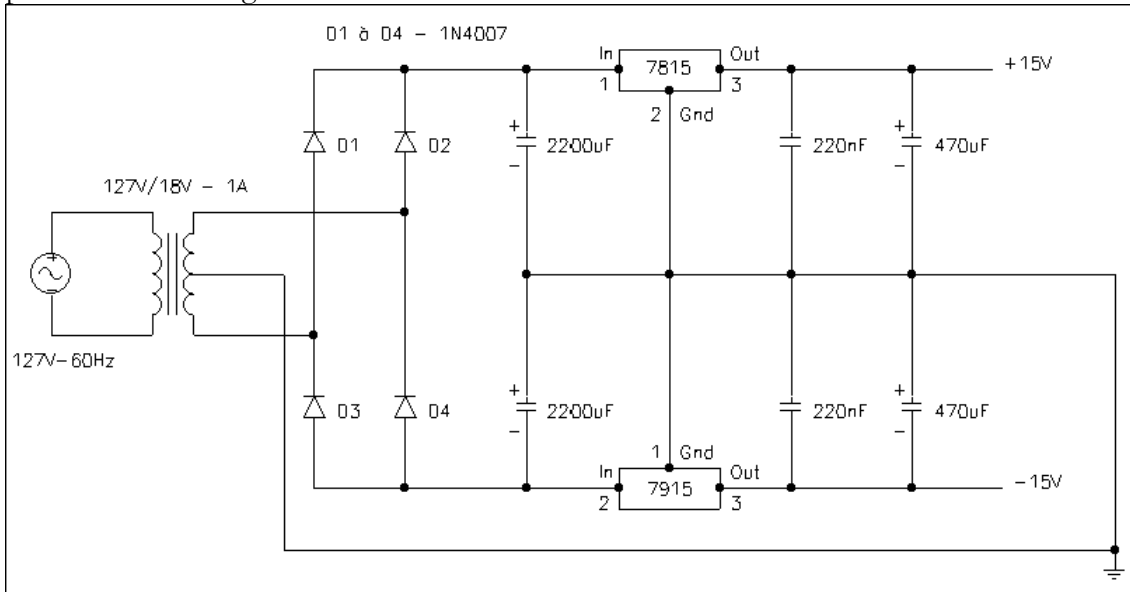


Figura 01 – Circuito da fonte de alimentação

## Sensor

O sensor de temperatura deste sistema é um transistor bipolar, que na configuração emissor comum, apresenta um ponto quiescente fortemente dependente da temperatura.

O sensor de temperatura foi acoplado na parte interna da torneira. O circuito mostrado na figura 02 corresponde à unidade eletrônica do sensor, ou ainda, um circuito que amplifica e condiciona o sinal na faixa de 0 a 10V. A placa possui 2 tripots que permitem a calibração do do ganho e do zero do sensor. A placa fornece um sinal de saída de 0-10V que deve ser calibrado para um range de 0 a 100°C. A tabela 01 relaciona os resistores do circuito do sensor.

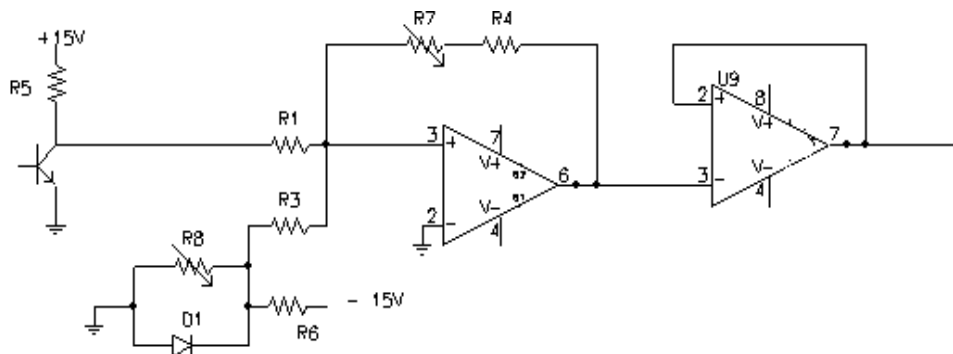


Figura 02 – Circuito da placa do sensor

Tabela dos Resistores do circuito ( $K\Omega$ )	
R1	15
R3	15
R9	560
R5	8.2
R6	1.5
R7	500
R8	10

Tabela 01 - Resistores do circuito do sensor

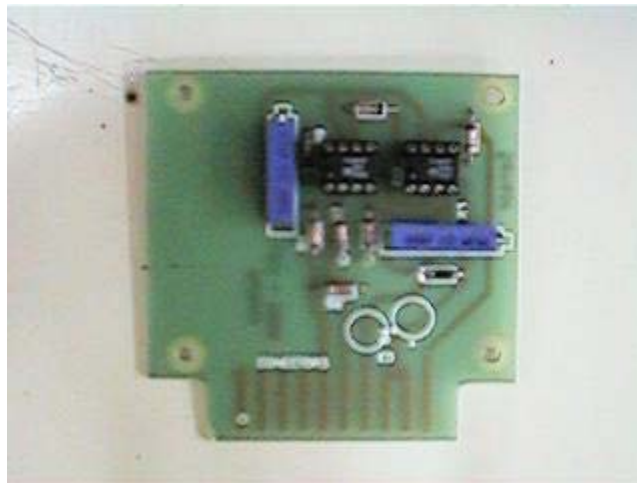


Foto 03: Placa do sensor

## Controlador

O controlador interno da planta é um circuito PID analógico. Externamente pode-se usar qualquer controlador. Para isso foi montado um circuito que permite selecionar uma entrada para um sinal externo ou o sinal interno proveniente do PID analógico. Há também uma saída do sinal do sensor. O sinal de controle deve ser na faixa de 0 a 10 V, sendo que 0 V significa potência máxima entregue ao sistema e 10 V potência mínima. O circuito pode ser visualizado na figura 03.

## Placa de Disparo dos Tiristores

A placa de disparo dos tiristores tem como objetivo converter o sinal de 0 – 10 V entregue pelo controlador em um ângulo de disparo de 0 a 180°. No circuito montado, uma tensão de controle de 0V significa um ângulo de disparo de 0°, máxima potência, e uma tensão de controle de 10V significa um ângulo de disparo de 180°, potência nula (Nogueira Jr. e outros, 1997). O circuito pode ser visualizado na figura 04.

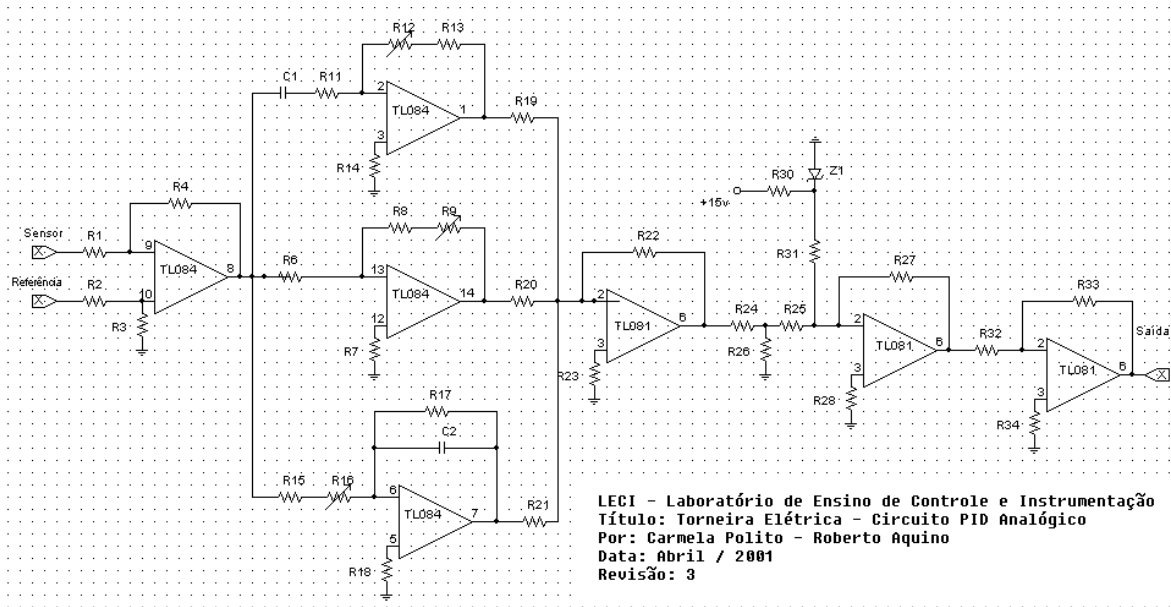


Figura 03 – Circuito PID

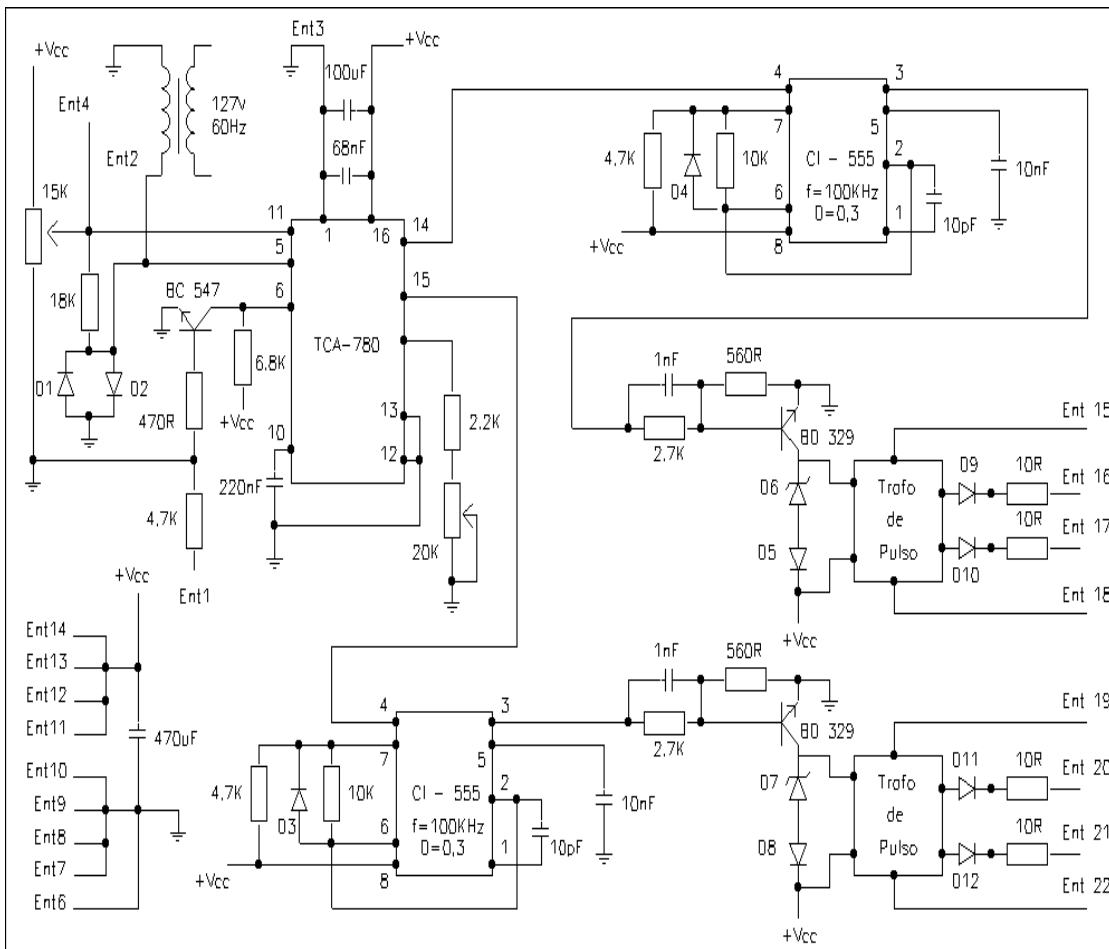


Figura 04 – Figura da placa de disparo dos tiristores

A figura 05 mostra a conexão dos tiristores (2 SCRs ligados em anti-paralelo). O SCR é um componente eletrônico que não conduz corrente em nenhuma direção quando em seu estado normal. Uma vez disparado por meio da aplicação de um pulso no gatilho, o SCR conduz em apenas uma direção, desde que esteja polarizado diretamente.

Condições para o disparo do tiristor:

$$i_{GK} \text{ ou } v_{GK} > 0 \quad \text{e} \quad v_{AK} > 0$$

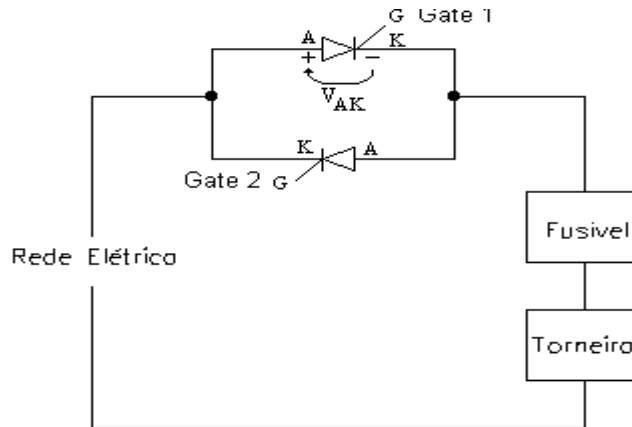


Figura 05 - Conexão dos tiristores

## Filtro Ativo

Para tratar o sinal do sensor que originalmente apresentava-se muito ruidoso, com picos equivalentes a 0,5°C, de um ruído senoidal de 60Hz. Esse ruído era observado somente quando a resistência da torneira era energizada. Para remover este ruído foi projetado um filtro ativo passa altas, cujo resultado pode ser visto na figura 06.

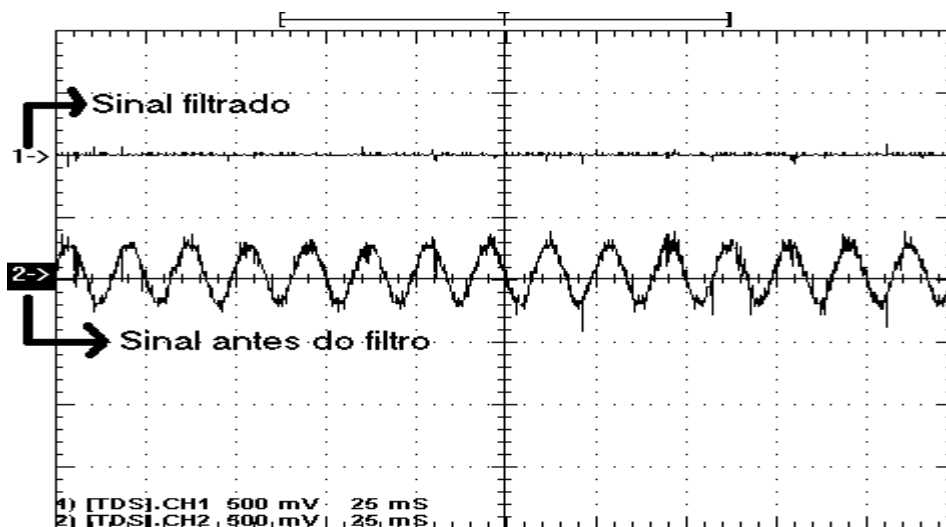


Figura 06: Sinais antes e depois do filtro

## Modelagem do Sistema Torneira Elétrica

Para a modelagem da planta, propõe-se a realização de testes em malha aberta no sistema. Aplica-se uma entrada em degrau, proveniente de uma fonte de tensão externa ou de uma placa de aquisição de dados, à entrada da placa de disparo, na faixa de 0 a 10V. Durante a realização dos testes os dados devem ser salvos por meio de uma placa de aquisição de dados ou de um osciloscópio digital.

O sistema torneira elétrica, em malha aberta, pode ser representado em diagrama de blocos como indicado na figura 07.



Figura 07 : Diagrama de blocos da torneira em malha aberta

Sugere-se aplicação de degraus positivos e negativos para modelagem das dinâmicas de aquecimento e resfriamento (um pouco diferentes), cuidando para obter-se duas massas de dados para cada sentido de degrau, sendo uma para modelagem e outra para validação do modelo.

Propõe-se que sejam desenvolvidos um modelo de segunda ordem (pelo método de Sundaresan, por exemplo) e um modelo de primeira ordem com tempo morto e que sejam procedidas análises comparativas destes dois modelos, observando-se a validade, as vantagens e os limites de cada um.

## Controle da Torneira Elétrica

A sintonia de um controlador é um aspecto fundamental no controle de um processo. Na prática industrial, o controlador PID é usado quase sempre como uma “solução de prateleira” para os problemas de controle. De fato, ele possui características que o tornam apropriado para controle realimentado: é simples, possui uma única equação (execução rápida, não introduzindo atraso na malha e sem cálculos iterativos, sem risco de não convergência), oferece flexibilidade de adaptação de desempenho a diferentes tipos de processo por meio do ajuste de três parâmetros que podem ser selecionados para modificar o comportamento do sistema realimentado [Marlin, 95].

Estas características fazem do PID o controlador mais utilizado na indústria e disponível nos equipamentos de controle digital, comercialmente ofertados no mercado (CLP's, Controladores Single-loop). No entanto, não basta a escolha de PID para solucionar o problema de controle. É fundamental o uso de uma sintonia adequada de parâmetros. Um bom desempenho de controle pode ser obtido com um conjunto adequado de parâmetros, enquanto que uma escolha ruim destes mesmos parâmetros pode levar a um desempenho pobre e mesmo à instabilidade do sistema em malha fechada.

A escolha de uma sintonia adequada exige que se saiba previamente e com clareza o objetivo de controle desejado para o sistema em questão, bem como as ações de controle que serão adotadas em função deste objetivo, pois os métodos de sintonia são baseados nos mesmos.

Alguns métodos objetivam obter uma razão de decaimento de  $\frac{1}{4}$  na resposta em MF (uma maneira de especificar-se o grau de oscilação da variável controlada em relação à referência (Set-point)). Outros métodos procuram obter um valor para a porcentagem de desvio em relação a referência o que, na verdade, também é uma medida de oscilação. Existem ainda outros métodos que objetivam minimizar a área entre a referência e a variável controlada durante uma mudança de referência. Minimizam na verdade a integral do valor absoluto do erro e é por isto chamado de método de sintonia IAE. Outros ainda buscam minimizar a integral do erro quadrático (ISE) ou a integral do produto do erro absoluto pelo tempo (ITAE) [Mollenkamp, 88, Marlin, 95, Seborg, 89].

Alguns destes métodos podem resultar em um sobrepasso (overshoot) considerável, oscilação e resposta rápida, enquanto outros podem resultar em um pequeno sobrepasso menos oscilação e uma resposta mais lenta. Alguns processos simplesmente não toleram sobrepasso, e devem ser sintonizados para uma resposta mais lenta.

Método de Ziegler-Nichols:

A técnica mais frequentemente usada pra sintonizar controladores PID foi proposta por Ziegler-Nichols em 1942. Basicamente, este método consiste em determinar-se o ganho crítico e o período crítico de oscilação da malha fechada. Estes parâmetros correspondem à condição obtida ao aumentar-se gradativamente o ganho do controlador até que o sistema comece a oscilar, sem decaimento. Deve-se proceder da seguinte maneira:

Com o sistema em malha fechada (automático), remova a ação integral e a ação derivativa por completo ( ou ainda, faça  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$  ou próximo a isto. Se seu algoritmo usar ganho integral, faça-o igual a zero ( $K_i = 1/T_i$ ).

Assuma um valor arbitrário para o ganho proporcional e imponha um pequeno distúrbio no sistema (por ex., varie um pouco a referência e volte ao valor inicial). Observe a resposta.

Aumente o ganho proporcional até que o sistema comece a oscilar e mantenha a oscilação sem decaimento. Ajuste o ganho para obter esta condição e anote o valor deste ganho e o período da oscilação não amortecida obtida. Estes são, respectivamente, o ganho crítico,  $K_u$ , e o período crítico,  $T_u$ , desejados.

Ajuste os parâmetros de acordo com os cálculos empíricos de Ziegler-Nichols para obter-se o decaimento de  $1/4$ :

Modos	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_u$	-	-
P+I	$0.45K_u$	$T_u/1.2$	-
P+I+D	$K_u/1.67$	$T_u/2$	$T_u/8$

Normalmente dispõe-se de um modelo aproximado do processo. Estuda-se uma sintonia adequada pelo modelo inicialmente. Mas este conjunto de parâmetros obtidos deve ser considerado como um conjunto inicial de parâmetros que ajudarão no ajuste fino da sintonia,



posteriormente. Isto porque os modelos não são perfeitos e nem os métodos de sintonia. Assim, mesmo que o método seja diretamente aplicado no processo, realizando o procedimento de teste diretamente na planta, após a aplicação dos parâmetros obtidos deve ser feito um ajuste fino dos mesmos para obter-se o desempenho esperado. Este ajuste fino é feito observando-se a resposta da variável controlada em relação à referência e a resposta da variável manipulada a respostas ao degrau. A meta é alcançar-se o objetivo de controle definido do início do processo.

Para a torneira elétrica:

Considerando o modelo obtido para este sistema, aplique o método de Ziegler–Nichols e determine um conjunto inicial de parâmetros de sintonia por meio do mesmo. Aplique-o ao processo. Observe a resposta da variável controlada (temperatura) e do sinal de controle. Faça os ajustes finos necessários para uma boa sintonia.

Aplique o método diretamente no processo. Obtenha  $K_u$  e  $T_u$  de testes aplicados diretamente na planta e refaça o processo de ajuste fino desta sintonia.

Anote suas observações e comentários do processo de sintonia. Será possível aplicar este método a todo processo? Processos com dinâmicas muito lentas poderiam ser sintonizados por este método?

O que poderia ser uma solução para projeto/sintonia de processos lentos?

Estes processos muitas vezes não admitem a relação de decaimento de  $1/4$ , que é o objetivo assumido por Ziegler-Nichols. Embora uma resposta rápida, como a oferecida por estas malhas, seja interessante, as oscilações que as acompanha podem provocar sérios distúrbios em outras malhas de controle no mesmo processo. Outras vezes a limitação pode ser devida à condição operacional do processo próxima a alguma condição limite como riscos de explosão, alteração da concentração do produto alterando sua qualidade, degradação do produto por variação da temperatura, etc.

Nestes casos o projeto baseado no Método da Síntese do Controlador, que demanda um modelo simples do processo (obtido a partir de um teste em degrau), pode ser aplicado para reduzir um pouco ou mesmo eliminar o sobrepasso na resposta, uma vez que o objetivo de controle neste caso, é obter por exemplo, uma resposta equivalente à de um sistema de primeira ordem com tempo morto.

## **Exemplo de sintonia pelo método de Ziegler e Nichols**

Realizados os testes propostos pelo método, o período crítico medido foi de 20s e o ganho crítico foi 65. Após os cálculos, chegou-se nos seguintes parâmetros:  $K_p = 38$ ,  $T_i = 10s$ , e  $T_d = 2,5s$ .

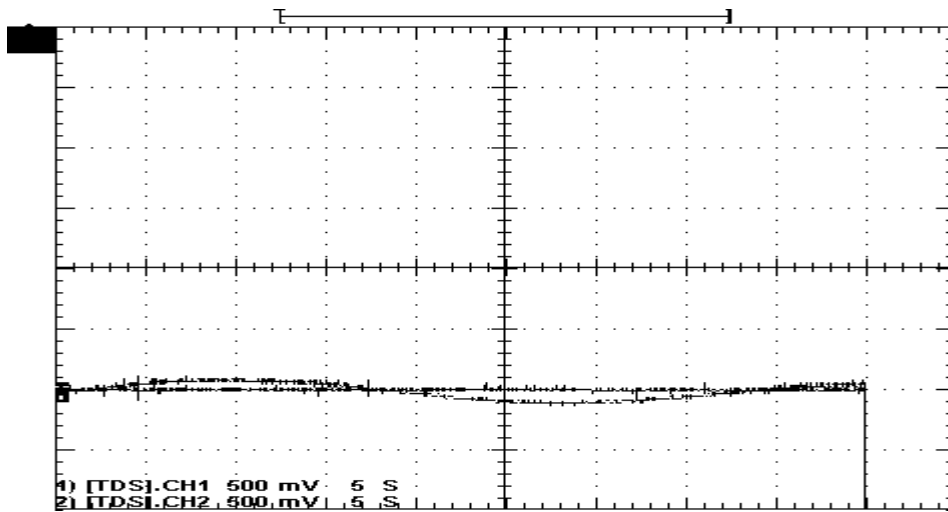


Figura 07: Teste de sintonia de Ziegler-Nichols

## Referências Bibliográficas

Nogueira Jr., K. <sup>a</sup>, Faria, R. G., Cortizo, P. C., Pena, R. T. – “Controle de Torneira Elétrica – manual de construção e operação (versão preliminar)”, Relatório Técnico – LECI, DELT-EEUFMG, 1997.

Marlin, Thomas E. (1995): “Process Control – Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance”, McGRAW-HILL International Editions, Chemical Engineering Series.

Mollenkamp, Robert, A. (1988): “Controle Automático de Processos”, EBRAS Editora Brasileira, SMAR – ISA.

Seborg, D.E., Edgar, T.F. e Mellicamp, D.A. (1989): “Process Dynamics and Control”, John Wiley.