

de QAD (“quarter amplitude decay”), ou seja, a partir do primeiro *overshoot*, o próximo tem um quarto da amplitude do primeiro e assim sucessivamente.

Os parâmetros ajustados no controlador são válidos, em termos de estabilidade, para as condições estabelecidas, ou seja:

- Para a curva da válvula selecionada;
- Para o diâmetro do tanque escolhido, pois a área do tanque representa o que denomina-se de capacitância fluída;
- Para a vazão de água de alimentação do tanque.

VALORES AJUSTADOS NO CONTROLADOR

$$K_c = 2.0$$

$$I = 2.0 \text{ repetições por minuto}$$

$$D = 0$$

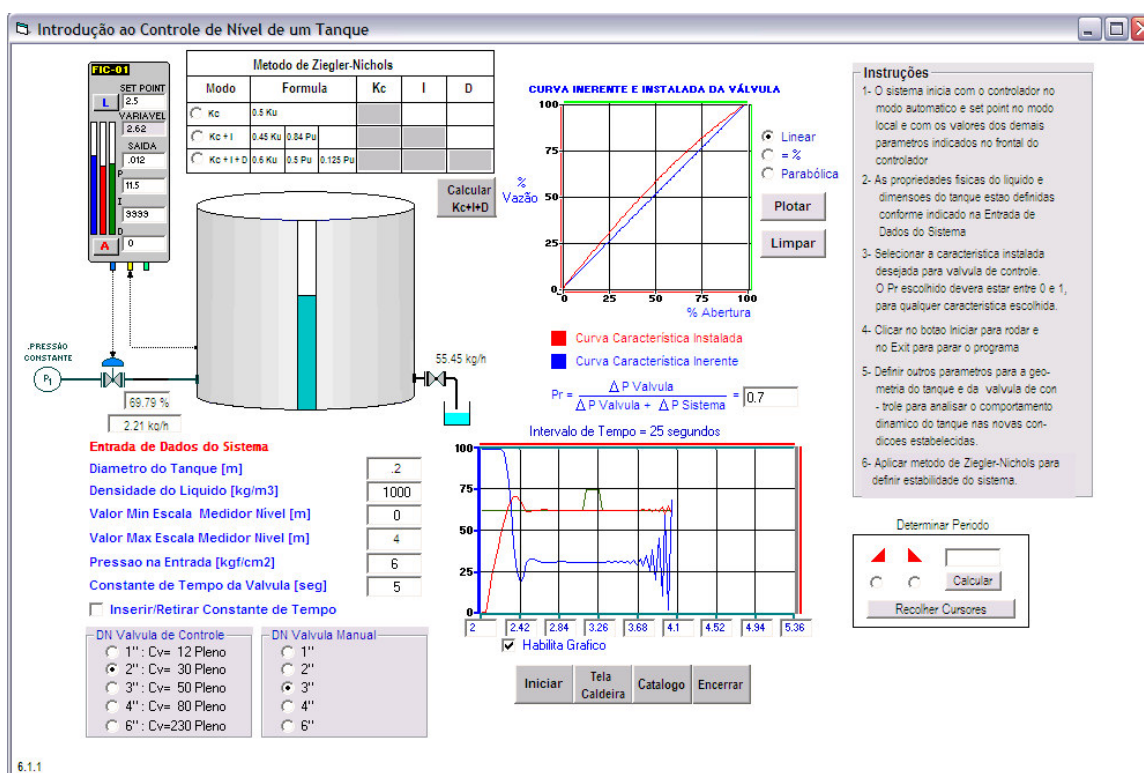


Figura 6.1 – Sistema de controle tende a oscilar com amplitude amplificada

A válvula escolhida é tem curva característica inerente linear e característica instalada com valor do parâmetro $Pr=0.7$. Observando o gráfico da curva da válvula instalada, o que apresenta uma pequena curvatura (cor vermelha), observa-se que neste caso, a curva instalada da válvula está um pouco deformada com relação a

curva inerente, representada por uma reta (cor azul), como mostrado na janela superior, da Figura 6.1..

Esta janela, permite que sejam selecionadas as curvas mais comuns utilizadas nos projetos de sistemas de controle que a linear, igual porcentagem e parabólica, sendo que esta última está caindo em desuso, para os dias atuais. A janela permite selecionar as curvas acima mencionadas e apresentar para cada tipo de curva inerente, a família de curvas instaladas, o que permite de certa forma evidenciar o entendimento do conceito de ganho de uma válvula de controle. O controlador P+I+D do nível apresenta seis campos que estão dispostos na posição vertical, onde são mostrados, de cima para baixo, os valores numéricos das variáveis abaixo descritas:

- *Set Point* ou valor desejado pelo operador, mostra o valor da altura em que o nível deve ser controlado. Este valor é escolhido pelo operador do sistema;
- O valor da variável de processo, ou seja a altura real do nível da água no interior do tanque;
- O valor do sinal de saída do controlador P+I+D, para a válvula de controle;
- O valor sintonizado do ganho ajustado no controlador;
- O valor da ação integral ajustada no controlador, em segundos por repetição (spr);
- O valor da ação derivativa ajustada no controlador, em segundos;

As outras informações que estão disponíveis na tela gráfica para a operação do sistema são as seguintes:

- ***Método para se provocar a oscilações com amplitude constante***

Este campo oferece ao usuário uma facilidade adicional para determinar o período de oscilação. Como o valor deste período tem importância fundamental na aplicação do método de Ziegler – Nichols. E com o objetivo de facilitar a obtenção dessa informação, é conveniente criar este campo. Na prática este valor é obtido ou lendo-se diretamente na tela do sistema ou imprimindo-se esta tela em impressoras dedicadas, com essa finalidade.

1. Define-se o *set point* de operação do sistema, que no caso foi escolhido um nível no tanque com altura de 2.5 metros.
2. Coloca-se o máximo valor no campo de entrada para ajuste da ação integral, no caso coloca-se o valor 9999 segundos para uma repetição (spr). O significado

prático do valor 9999 segundos, é que o controlador levará 9999 segundos, ou seja, 166.6 minutos para repetir o valor do ganho, o que praticamente significa que o controlador esta sem a ação integral e é apenas um controlador proporcional.

3. Executados os procedimentos descritos nos itens 1 e 2, varia-se o ganho do controlador até que se obtenha uma oscilação do nível do tanque com amplitude constante. Para isso altera-se o *set point* em pequenos valores para poder provocar essa oscilação. No caso foram feitas alterações sucessivas entre 2.5 e 3.0 metros de altura do nível, sendo que essas alterações são acompanhadas por variações , aumentado o ganho controlador.

4. Obtida as oscilações com amplitude constante, mede-se o período das oscilações, conforme descrito nos itens de 5 a 10.

- ***Caixa identificada com o título: Determinar Período***

5. O gráfico deve ser desabilitado, para isso remove-se a seleção da caixa Habilita Gráfico. Após o gráfico ter sido desabilitado, as curvas que estão sendo registradas ficam congeladas no tempo, o que facilita para o usuário a medição do período da oscilação.

6. Na caixa Determinar Período seleciona-se o primeiro cursor e utilizando-se o *mouse* coloca-se seu cursor no ponto desejado do início do período e dá-se um clique no botão esquerdo do *mouse*, no mesmo instante o cursor que esta no interior da caixa Determinar Período move-se para a posição indicada pelo *mouse*.

7. De maneira análoga, utilizando-se o *mouse*, seleciona-se o segundo ponto da curva, que corresponde ao período completo da oscilação. Ao se clicar com o botão esquerdo do *mouse*, o segundo cursor da caixa Determinar Período, move-se para esta posição.

8. Clicando no botão Calcular da caixa Determinar Período, o período de tempo determinado pelos cursores e calculado e mostrado no campo acima do mencionado botão.

9. Após as operações acima descritas, o usuário pressiona o botão Recolher Cursores, fazendo com que os cursores retornem para o interior da caixa Determinar Período, isto é voltam para sua posição original.

10. O próximo passo é e do clicar na seleção Habilita Gráfico, para que os gráficos retornem a registrar no tempo.

- ***Caixa identificada com o título: Método de Ziegler-Nichols***

Nesta caixa são apresentadas as equações de Ziegler–Nichols utilizadas para calcular os parâmetros de sintonia do controlador P+I+D. A caixa é utilizada da seguinte forma:

1. Após ter sido definido o período de oscilação com amplitude constante, cujo procedimento é descrito nos itens anteriores:
2. Seleciona-se o modo de controle desejado através dos botões de seleção da caixa Método de Ziegler – Nichols. Fazendo-se isso, os valores dos parâmetros de sintonia são calculados automaticamente e seus valores são mostrados nas respectivas colunas da caixa.
3. Digita-se os valores indicados nas colunas da caixa em questão para as posições correspondentes do ganho, integral e derivada, na figura do controlador de nível.

- ***Caixa identificada com o título: Instruções***

Nesta caixa é descrita de forma resumida o procedimento para se operar o simulador, com o objetivo de facilitar o usuário.

- ***Caixa identificada com o título: Entrada de Dados do Sistema***

Esta caixa permite ao usuário entrar com os dados do sistema a ser controlado, isto é, os dados do tanque de armazenamento. Os dados são entrados na seguinte seqüência:

1. Diâmetro do tanque de armazenamento em metros, com esse dado é calculada a área transversal do tanque. Esta área define a capacitância fluída do tanque, parâmetro importante, pois é ele que define o comportamento dinâmico do nível no tanque. No nosso caso foi escolhido o diâmetro do tanque de 0.2 metros.
2. Densidade do líquido armazenado em kg/m^3 , escolhido em 1000 kg/m^3 .
3. Valor mínimo da escala do medidor de nível, em metros, foi escolhido 0 metros.
4. Valor máximo da escala do medidor de nível, em metros, foi escolhido 4 metros.
5. Pressão de entrada na tubulação de alimentação do tanque, no nosso caso foi escolhida a pressão de 6 kgf/cm^2 manométrica.
6. Constante de tempo da válvula de controle em segundos. O valor escolhido foi de 5 segundos, o que significa que a válvula necessita 5 segundos para atingir 65.3% de sua abertura total.
7. Caixa de Seleção para considerar ou não uma constante de tempo para a válvula.

Na Figura 6.1 pode se observar que com ganho igual a 11.5 e integral igual a 9999 segundos para uma repetição (spr) e derivativa igual zero o sistema de controle de nível começa a tender oscilar com amplitude amplificada. Essa forma de oscilação amplificada evidência que o valor do ganho esta muito elevado.

Na Figura 6.2, após algumas tentativas, foi possível obter do sistema uma oscilação com amplitude constante, como pode-se observar no gráfico.

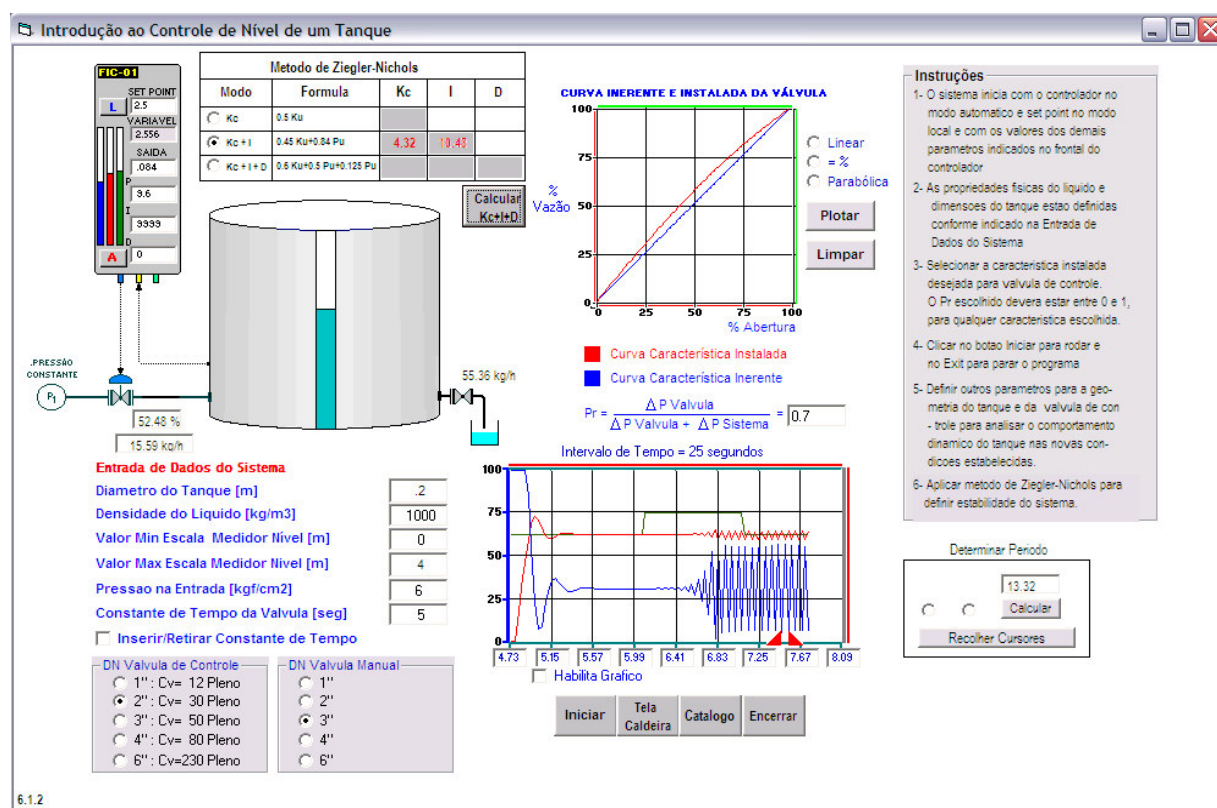


Figura 6.2 – Tela mostrando a variável controlada oscilando com amplitude constante e a determinação dos valores da equação de Ziegler

Baseado no procedimento descrito anteriormente e utilizando o recurso dos cursores, mede-se o período de oscilação, cujo valor é 13.32 segundos, como mostrado na caixa Determinar Período. A oscilação com amplitude constante foi conseguida com o valor de ganho igual a 9.6.

Na tela da Figura 6.2 são mostrados os dois cursores posicionados sobre a curva que representa o sinal de saída para a válvula de controle. Na verdade, estes cursores deveriam estar posicionados sobre a curva de variação do nível, mas como nosso interesse é medir o período da frequência de oscilação e como as duas variáveis possuem a mesma frequência, optou-se por medir na curva da válvula de

controle. Feito isto, clica-se no botão Calcular K+I+D e obtém-se os valores $K_c = 4.32$ e $I = 11.1$ através das equações de Ziegler para um controlador P+I.

O passo final de nosso teste seria o de aplicar os valores calculados pelo método de Ziegler-Nichols e aplicá-los no controlador e verificar sua resposta. Alterando os valores de ganho e integral do controlador P+I, pode-se analisar na figura 6.1.3 a resposta do sistema no simulador.

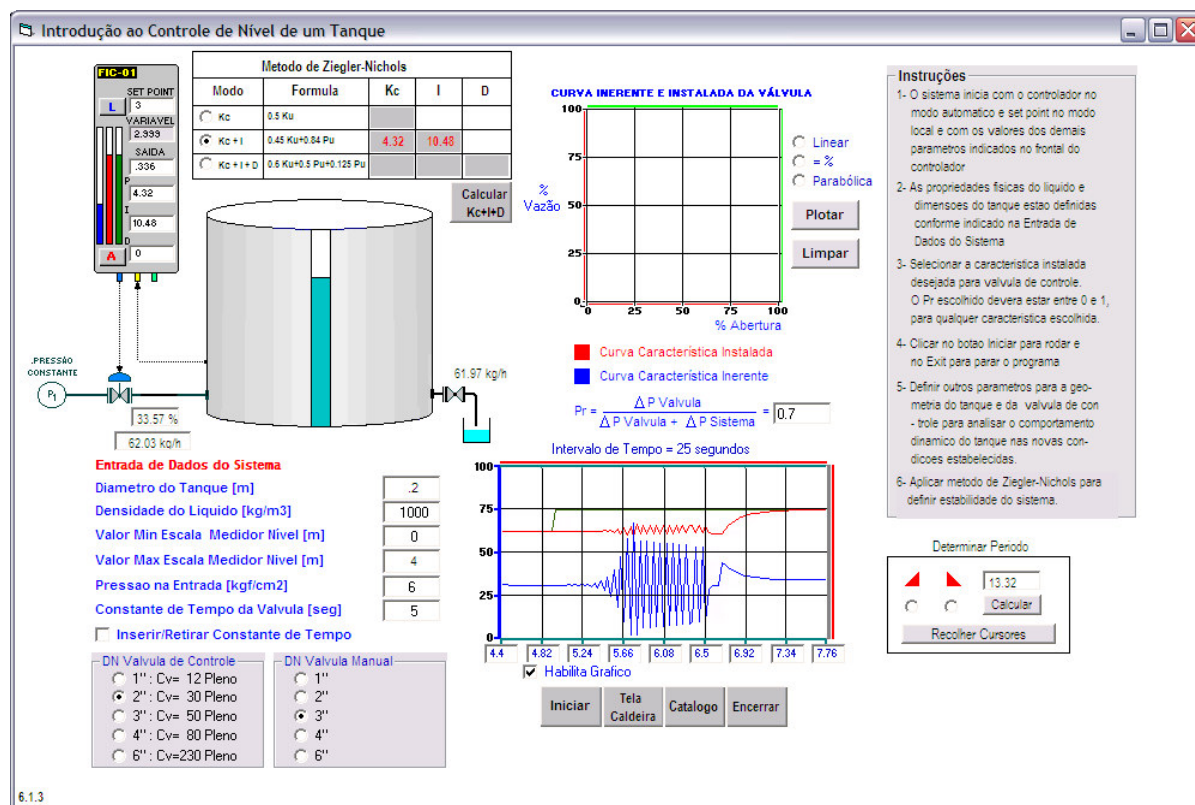


Figura 6.3 – Determinação da estabilidade do sistema após a aplicação do método de Ziegler-Nichols

Resumindo as operações que foram executadas pode-se descrever o procedimento como segue:

Na Figura 6.1, o sistema foi inicializado com ganho igual a 2, integral igual a 2 e derivada igual a zero. Para esses valores iniciais o sistema entrou em oscilação, apresentando inclusive “overshoot” e posteriormente se estabilizou. Após o instante aproximado de 2.68 minutos o ganho do controlador foi alterado de dois para 11.5 e a integral de 2 para 9999 com a intenção de anular os efeitos dessa ação do controlador, isto é, o objetivo é deixar o controlador apenas como proporcional. Essas novas ações do controlador provocaram, como será visto, oscilações com amplitude amplificadas, tanto no nível como na válvula de controle. Nota-se que as

oscilações dessas variáveis estão na mesma frequência. A conclusão imediata que se pode chegar, é que o ganho 11.5 tem valor muito alto, portanto precisamos diminuir este ganho.

Na Figura 6.3 na caixa Método de Ziegler-Nichols, seleciona-se o controlador P+I e pressiona-se o botão Calcular Kc+I+D e obteve-se o resultado $K_c = 4.32$ e Integral = 19.43. Uma vez estabelecido esse tempo, ao se selecionar o tipo de controlador a ser usado na caixa Método de Ziegler-Nichols, clicando-se no botão Calcular Kc+I+D, nas colunas Kc e I da caixa são mostrados os dados calculados do ganhos $K_c=4.32$ e Integral = 10.48.

Os parâmetros do controlador foram ajustados para esses valores e como resposta do sistema de controle a estabilidade foi recuperada.

Com o que foi exposto encerra-se a primeira fase do teste nr. 1, porém ressalta-se que o método de Ziegler-Nichols, quando aplicados na prática, em alguns sistemas de controle apresenta a desvantagem de se necessitar do inconveniente das oscilações, que muitas vezes é impossível e indesejável, pois pode comprometer a segurança de uma unidade industrial.

Dando continuidade as etapas dos testes de sistema de controle simples, no próximo item será iniciado o teste nr. 2, que representa em relação ao teste nr.1 a consideração do atraso de tempo que será considerado para a válvula de controle e com isso pretende-se mostrar a influência desse atraso na sintonia dos parâmetros do controlador.

6.2 Tanque cilindro reto vertical – Teste nr. 2

Na tabela abaixo são indicados os valores de configuração do sistema para o teste nr.2. Este teste esta mais próximo de um sistema de controle real, pois como dito anteriormente, foi considerado um atraso de tempo na resposta da válvula de controle.

No teste nr. 2 foram mantidas a mesma configuração do teste nr. 1, com exceção da constante de tempo da válvula de controle que foi alterada de zero para 5 segundos.

CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA O TESTE NR. 2

- 1 : Selecionada válvula com característica instalada linear com $Pr = 0.7$
- 2 : Considerado atraso na resposta da válvula de controle de 5 segundos
- 3 : Reservatório considerado com diâmetro de 0.2 metros
- 4 : Densidade do líquido 1000 kg/m³
- 5 : A pressão da água de alimentação é de 6 kgf/cm²

O controlador de nível foi ajustado para os seguintes valores iniciais, que são indicados na tabela abaixo:

VALORES INICIAIS AJUSTADOS NO CONTROLADOR

$K_c = 2.0$
 $I = 2.0$ repetições por segundo
 $D = 0$

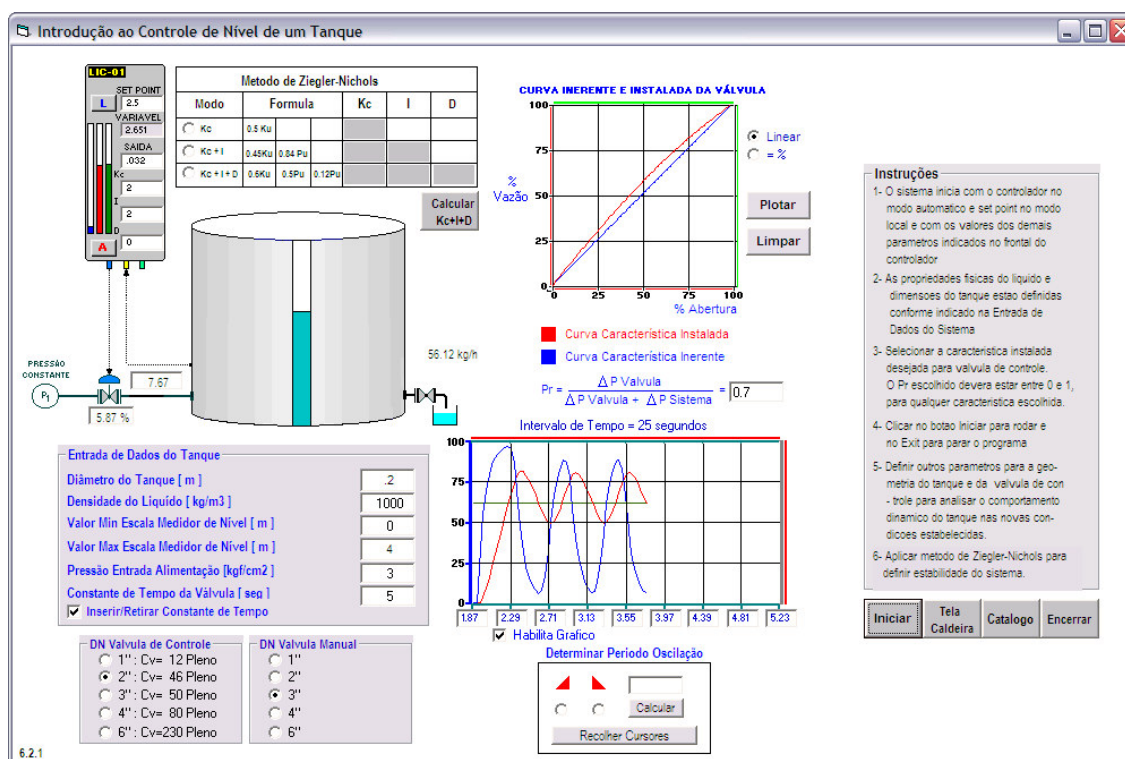


Figura 6.4 – Comportamento do sistema de controle de nível para os parâmetros iniciais do controlador P+I+D

Para os valores iniciais de ganho $=2$ e Integral $=2$, na Figura 6.4 observa-se que a resposta do sistema de controle é instável, isto é, o sistema inicia com oscilação e continua oscilando de forma indesejável. Para tornar o sistema estável, será aplicado o método de Ziegler-Nichols, lembrando que, para este caso foi

introduzido uma variável adicional que é a constante de tempo da válvula de 5 segundos.

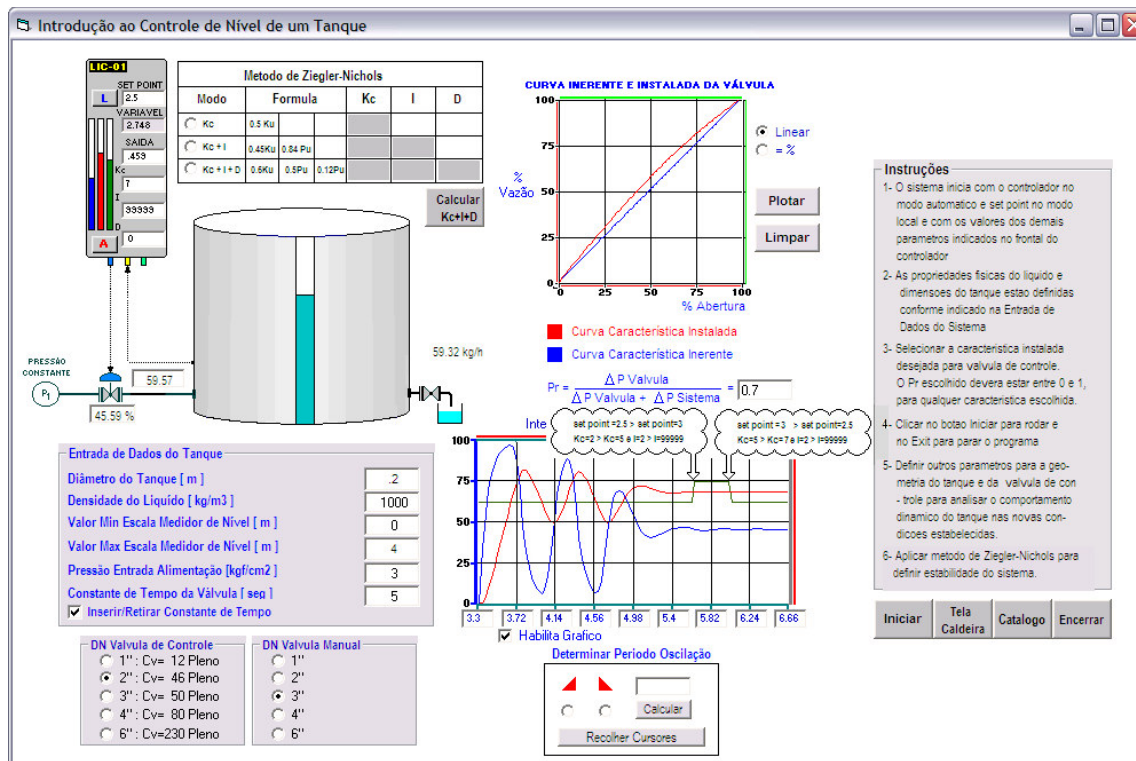


Figura 6.5 – Gráfico mostrando a tentativa de se criar oscilações com amplitude constante

Na primeira tentativa observando a Figura 6.5, altera-se o valor do ganho do controlador de 2 para 5 e sua integral de 2 para 99999, feito isto aumenta-se em degrau o *set point* do controlador de 2.5 para 3.0 metros, porém o sistema não respondeu com a instabilidade para esse novo ganho. A intenção é deixar controlador apenas proporcional, motivo de se colocar a integral em um numero tão elevado.

Como não foi obtido sucesso, fez-se uma segunda tentativa alterando o valor do ganho de 5 para 7 e variando novamente o *set point* do controlador de 3 para 2.5 metros e desta vez também não foi obtido sucesso.

Na terceira tentativa, altera-se o valor do ganho do controlador proporcional para 9.5, mantendo a integral em 99999, e como pode-se observar na Figura 6.2.3 o sistema começou a oscilar com amplitude constante. O último passo deste teste é calcular os parâmetros de sintonia de acordo com o método de Ziegler-Nichols e baseado neste período determinado com as oscilações com amplitude constante, calcular os parâmetros de sintonia do controlador. As operações acima descritas

estão visualizadas no gráfico da tela da Figura 6.6. Os procedimentos dessas operações já foram anteriormente descritos.

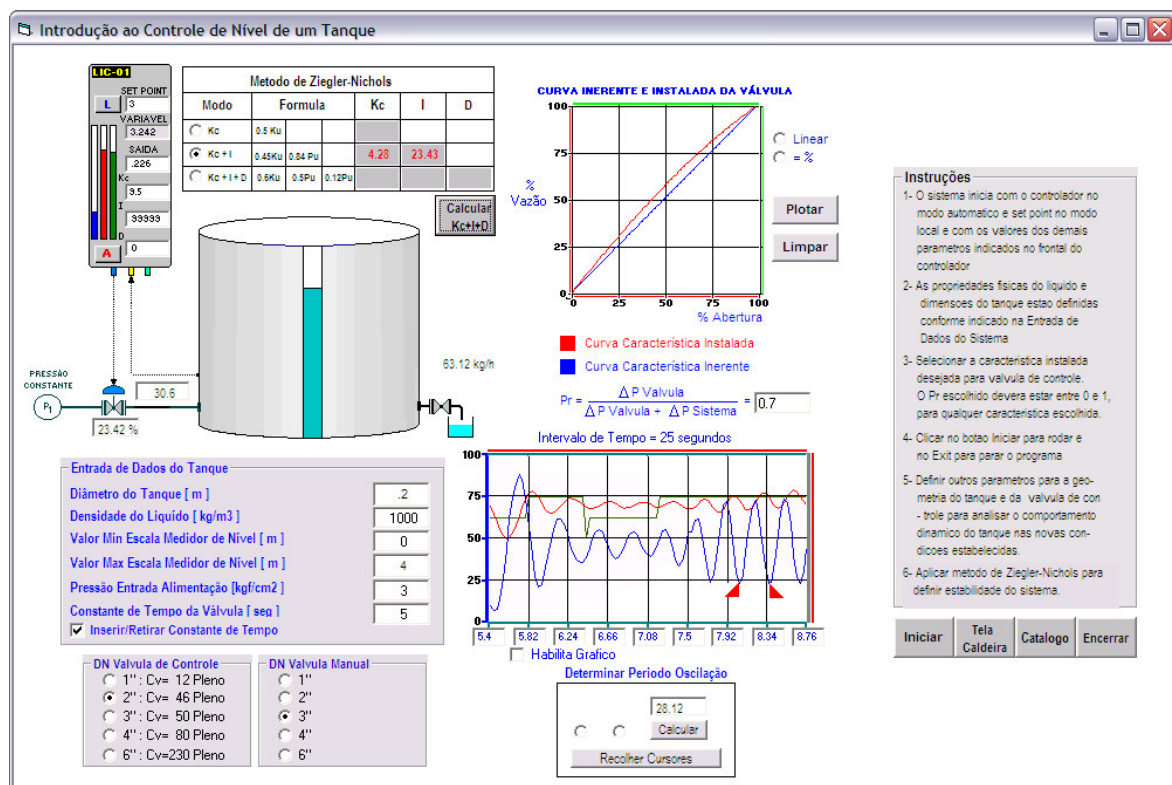


Figura 6.6 – Gráfico mostrando a determinação do período de oscilações com amplitude constante

Como pode-se observar o ganho e integral segundo o método de Ziegler-Nichols, são 4.28 de ganho e 23.43 para a ação integral. Para finalizar o teste nr. 2, deve-se aplicar este valor ao controlador, variar seu *set point* e observar se as curvas de respostas são adequadas.

Na Figura 6.7 a intenção é testar os parâmetros de sintonia do controlador, calculados pelo método de Ziegler-Nichols. Como pode-se observar o controlador foi sintonizado com ganho de 4.28 e integral de 23.43 segundos por repetição. Analisando o gráfico, o teste foi iniciado para o pior caso, isto é com um *set point* inicial de 2.5 metros, o que significa um erro em degrau de grande magnitude. Observando-se o gráfico percebe-se que a resposta do controlador foi adequada.

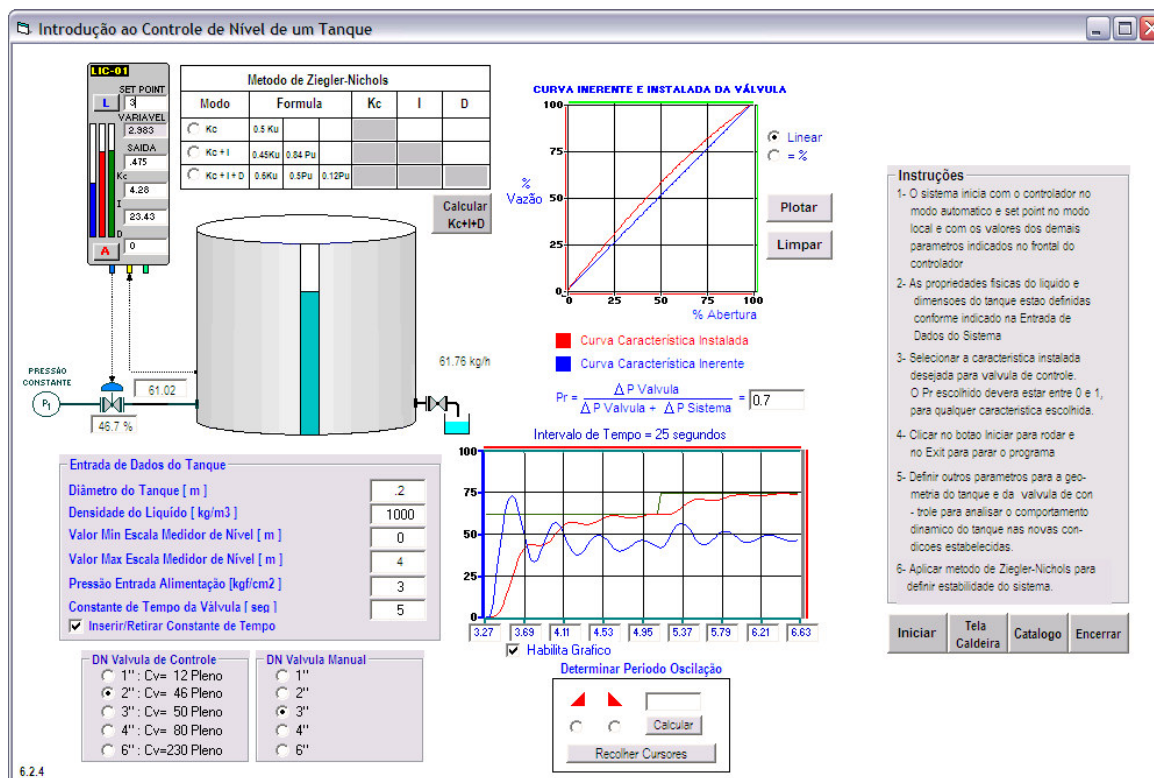


Figura 6.7 – Teste de estabilidade do sistema de controle de nível

Após a variável controlada ter atingido seu equilíbrio em torno do *set point*, este foi alterado de 2.5 metros para 3 metros, e como pode-se observar que o equilíbrio do sistema manteve-se.

6.3 Para o Tanque cilindro reto vertical – Teste nr. 3

A intenção do teste é mostrar a influência da curva instalada da válvula na determinação dos parâmetros de sintonia do controlador. Utilizar-se-á um sistema idêntico ao sistema do teste nr. 2, com exceção da modificação significativa que será introduzida na curva instalada da válvula de controle. Alterar-se-á o número Pr da válvula de controle de 0.7 para 0.01 e utilizaremos os mesmos métodos aplicados anteriormente para determinar os parâmetros de sintonia do controlador e compará-los com os mesmos parâmetros obtidos no teste nr. 2.

Na Figura 6.8 mostra-se o início do teste. Como pode-se observar, para os parâmetros iniciais do sistema de controle, a oscilação inicial está presente, porém de forma diferente, neste caso ela não apresentou amplificação inicial na amplitude, mas oscila com amplitude constante porém mostrando um crescimento ascendente sobre seu eixo. A variável controlada, que no caso é o nível do tanque, se afasta do

set point gradativamente e de forma crescente, sempre oscilando com amplitude constante.

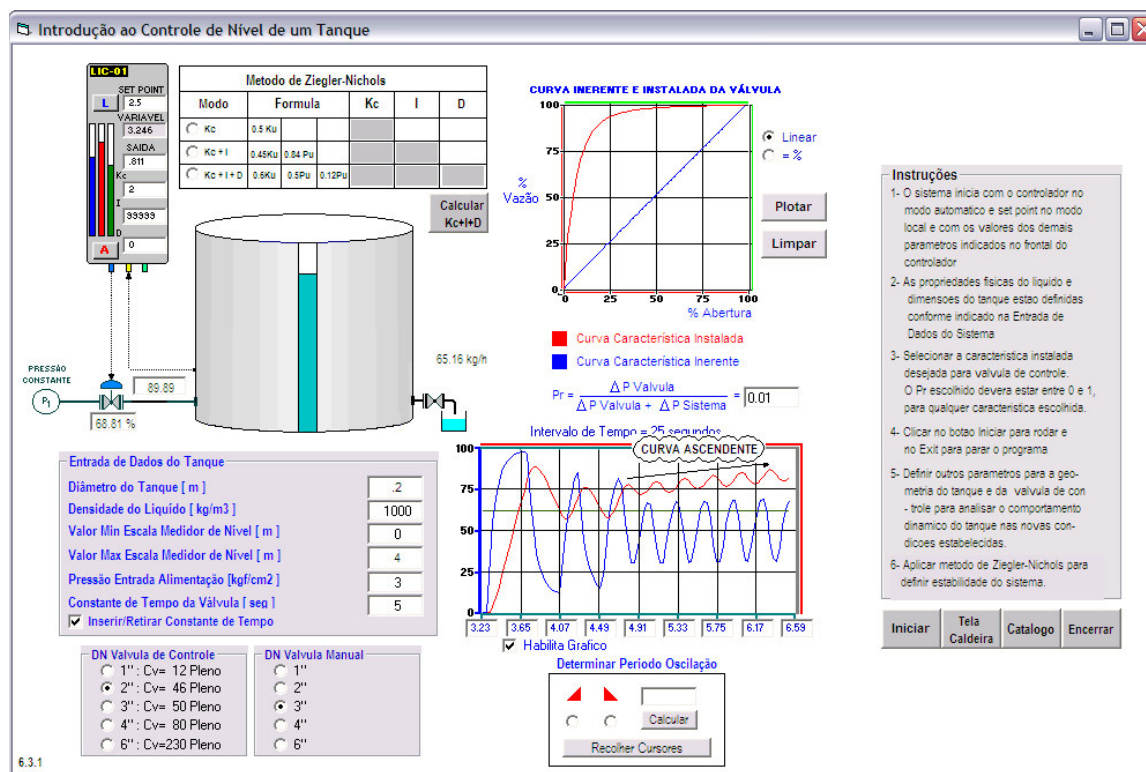


Figura 6.8 – Influência do ganho da curva instalada da válvula na sintonia do controlador

Este tipo de comportamento é característico para sistema com ganho total elevado, isto é, o ganho da válvula e o ganho do controlador estão muito elevados.

Reinicia-se o teste nr. 3, porém será considerado o ganho inicial do controlador como 1 e analisando o comportamento do sistema com este novo ganho.

Analisando o gráfico da Figura 6.9 observa-se que a variável controlada oscila, porém mantém-se em torno do *set point*. A oscilação que observamos poderia ser confundida como uma oscilação de amplitude constante, porém deve-se lembrar que o controlador esta no modo P+I, pois o ganho é igual a 1 e a integral igual a 2.

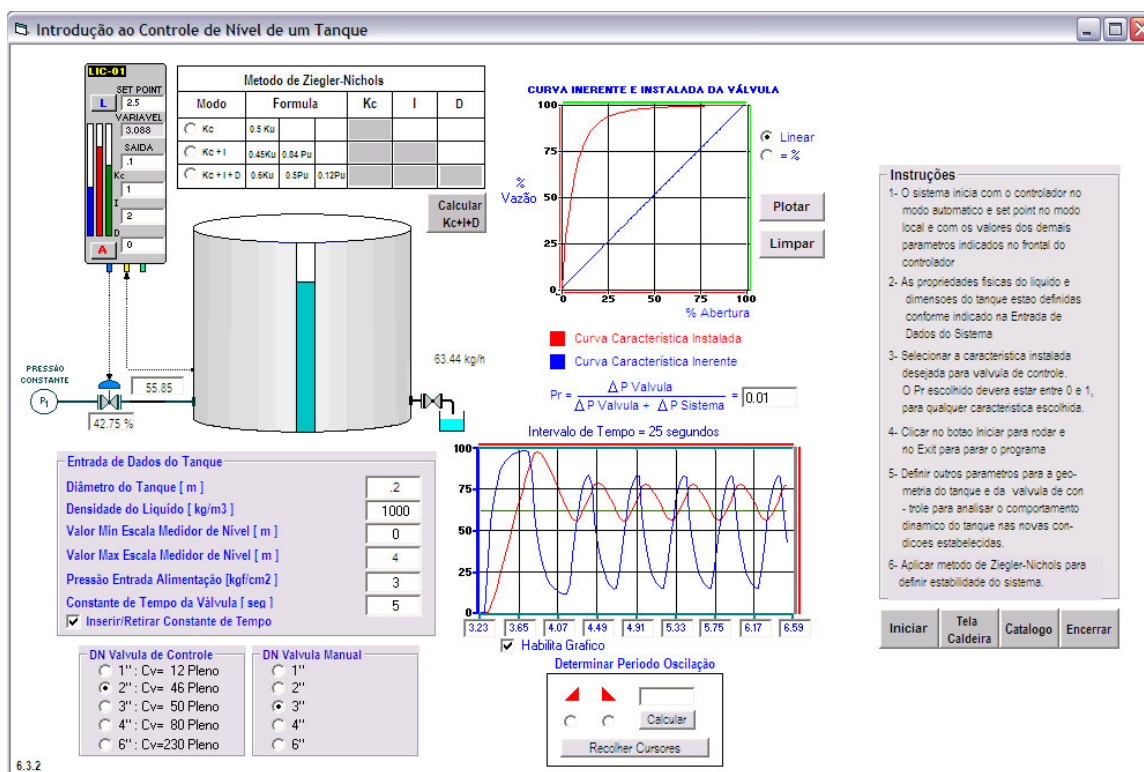


Figura 6.9 – Comportamento do sistema ao se diminuir o ganho do controlador

Para que se possa aplicar o método de Ziegler-Nichols ao sistema, como visto anteriormente o valor de integral deve ser máximo. As duas simulações foram executadas com o objetivo de familiarizar o aluno com certas particularidades que podem ocorrer na vida prática e para as quais deve-se estar preparados para resolvê-las.

Mantendo as novas condições iniciais do controlador P+I tentar-se-á aplicar o método de Ziegler-Nichols, porém anulando-se o efeito da ação integral sobre a resposta do sistema. Salienta-se que o grande problema desse sistema é o ganho excessivo escolhido apresentado para a válvula de controle, este ganho na verdade deveria ser evitado por ocasião do projeto do sistema.

Na Figura 6.10, aproximadamente no instante de tempo 5.23 insere-se o valor 99999 para a ação integral do controlador, com isso anulamos esta ação fazendo com que o controlador parasse apenas como controlador proporcional. Analisando o que está ocorrendo com a variável de processo nível percebe-se que com ganho igual a 1 do controlador a oscilação estava tornando-se amortecida e em