

Roteiro Para Laboratórios da Cadeira de Sistemas de Controle e Manual de Operação do Controlador NOVUS N1100

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Junior

jmgomes@eletro.ufrgs.br

Eng. Luiz Fernando Gonçalves

luizfg@eletro.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica

2 de setembro de 2003

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo servir de roteiro, para os alunos de graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, das aulas de laboratório da disciplina de Sistemas de Controle, ENG04450. Nestas aulas, efetua-se diversos experimentos de controle, cito como exemplo: ensaio em malha fechada, em malha aberta, de relê, de resposta em frequência e programação de controladores digitais. Realizando-se ajuste de controladores PID via método Ziegler-Nichols, por exemplo. Outro objetivo é apresentar uma descrição do *kit* de ensino de controle empregado neste laboratório.

Inicialmente, descreve-se o intuito primordial destes laboratórios e experimentos, e após passa-se para uma análise dos principais componentes do *Kit*. Segue-se então, para um exame do supervisor utilizado e de cinco ensaios de laboratório praticados através do kit.

Palavras-chave: controle, experimentos, supervisor.

Abstract

This work has as main objective to serve like a script for the students of graduation from the Federal University of the Rio Grande Do Sul, of the lessons of laboratory of the discipline of Systems of Control, ENG04450. In this lessons, where they do diverse experiments of control, I cite: assay in closed loop, in opened loop, of relay, frequency response and programming of digital controllers. Adjustment of controllers PID by Ziegler-Nichols method, for example. Other objective is present a description of *kit* of education of control used in this laboratory.

Initially, one describes the primordial intention of these laboratories and experiments, and after is transferred to a description of the main components of *Kit*. It is followed then, for the analysis of the supervisory used and the five laboratories that have used the kit.

Key-words: control, experiments, supervisory.

Sumário

Resumo	i
Abstract	i
Introdução	1
1. Kit de Ensino de Controle	2
1.1 Planta Térmica	2
1.2 PID Industrial	3
1.2.1 Display	6
1.2.2 Teclado	7
1.2.3 Principais Registros	8
1.3 Microcomputador	9
1.4 Supervisório	9
1.4.1 Controlador Virtual	10
1.4.2 Aplicação Supervisória	11
1.4.3 Conexão do Supervisório com o Controlador	12
2. Ensaio em Malha Aberta	14
2.1 Método da Resposta ao Salto	14
2.1 Método de Chien	16
2.2 Procedimento de Execução	17
2.3 Análise dos Dados	18
3. Ensaio em Malha Fechada	19
3.1 Procedimento de Execução	20
4. Ensaio do Relê	22
4.1 Ação Bang-Bang	23

4.2 Procedimento de Execução	25
4.3 Análise dos Dados	26
5. Ensaio de Resposta em Frequência	27
5.1 Procedimento de Execução	28
5.2 Análise dos Dados	28
6. Ensaio de Programação de Controladores Digitais	29
6.1 Procedimento de Execução	29
6.2 Análise dos Dados	29
Bibliografia	29

Introdução

Os ensaios que são realizados em laboratórios, aplicados para alunos de graduação, têm como objetivo principal aproximar a teoria, que é em alguns casos abstrata, com a realidade, que é concreta e visível. Como experimentos tipicamente empregados em laboratórios de ensino de controle, pode-se citar massa mola, pêndulos, servomecanismos, etc.

Estes experimentos possuem a característica de serem caros e apresentarem pouca similaridade, tanto do ponto de vista construtivo quanto operacional, com aqueles sistemas de controle com os quais o aluno, futuro engenheiro, irá se defrontar em sua prática profissional. Resultando então, numa fraca identificação visual e operacional com a realidade profissional vivida pelo aluno.

Com o intuito de fechar esta lacuna, aproximando visual e operacionalmente o ensaio de laboratório da experiência prática do aluno, seria conveniente dispor de experimentos que utilizassem as mesmas grandezas, dispositivos e programas encontrados na prática industrial.

Para solucionar isto foi implantado, no Laboratório de Ensino em Sistemas de Controle e Automação Industrial (LESCAI), um sistema com um custo baixo e flexível, permitindo a realização de um grande número de análises, explorando conceitos básicos e avançados em sistemas de controle, conforme [1]. Os principais conceitos, então, que têm sido introduzidos por meio deste sistema são os seguintes:

- identificação de parâmetros de processos;
- ações básicas de controle;
- resposta em frequência de processos;
- ajuste de controladores PID pelos métodos de Ziegler-Nichols;
- implementação digital de algoritmos PID.

O sistema construído para efetuar estes experimentos é constituído dos seguintes elementos: uma planta térmica, um controlador PID industrial, um microcomputador e um sistema supervisor, ver fig. 3. Cada um destes elementos será analisado a seguir, bem como, fazer-se-á uma descrição dos experimentos realizados neste *kit*, dos procedimentos a serem tomados para tal e uma análise dos dados obtidos.

1. Kit de Ensino de Controle

1.1 Planta Térmica

A planta térmica, utilizada nos ensaios, é composta de uma resistência (fonte de calor), de um termopar tipo K (usado para medir a temperatura), de um ventilador (empregado para simular perturbações) e de um relé de potência, cuja principal função é controlar a alimentação [1], ver figura 3.

O sistema como um todo pode ser modelado como um processo de primeira ordem com atraso de transporte, conforme a figura 1 vista a seguir, sendo:

$$G(s) = \frac{\Delta P(s)}{\Delta T(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (1)$$

onde K é o ganho estático, L é o atraso de transporte e τ é a constante de tempo do processo. Os parâmetros da função de transporte podem ser variados de três modos:

1. variando-se a posição do sensor com relação à resistência é possível variar o atraso de transporte L ;
2. ajustando-se a chave seletora pode-se selecionar dois níveis de alimentação: nível máximo (100%) e nível reduzido (50%); variando assim, o ganho estático K ;
3. ligando ou desligando o ventilador modifica-se simultaneamente o ganho K e a constante de tempo τ .

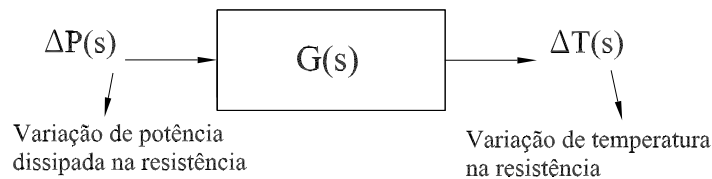


Figura 1: Modelo do processo térmico.

1.2 PID Industrial

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa para gerar um sinal de controle, dá origem ao que chama-se controle *proporcional-integral-derivativo* ou simplesmente PID. O objetivo é usar as características particulares de cada um destas ações para se alcançar um melhora considerável no comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado [6].

O sinal de controle gerado por um controlador PID é genericamente obtido pela seguinte expressão, onde $e(t)$ é o erro de seguimento de referência:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (2)$$

Assim dispõe-se de três parâmetros de ajuste do controlador: o ganho proporcional K (ação proporcional), o tempo integral T_i (ação integral) e o tempo derivativo T_d (ação derivativa).

Entretanto, na prática, por restrições de ordem física ou de segurança não é possível a aplicação de sinais de controle de amplitude ilimitada. Têm-se assim um limite máximo u_{max} e um limite mínimo u_{min} para a variável de controle. O sinal de controle dado por (2) pode ser reescrito como:

$$u(t) = Kf(e(t)) = Kw(t) \quad (3)$$

onde $f(\cdot)$ denota uma função genérica. Considerando-se os limites do controle, tem-se que o sinal que será efetivamente aplicado é descrito da seguinte forma:

$$u(t) = \begin{cases} u_{máx} & \text{se } w(t) > u_{max} \\ Kw(t) & \text{se } u_{min} \leq w(t) \leq u_{máx} \\ u_{min} & \text{se } w(t) < u_{min}. \end{cases} \quad (4)$$

Assim, há uma saturação do sinal de controle. Neste caso, o comportamento do controlador torna-se não linear e para que ele seja dado exatamente por (2), ou seja linear, o sinal $w(t)$ deve pertencer ao intervalo $[w_1, w_2]$, onde:

$$w_1 = \frac{u_{min}}{K} \quad (5a)$$

$$w_2 = \frac{u_{máx}}{K}. \quad (5b)$$

A largura do intervalo $[w_1, w_2]$ é chamado de Banda Proporcional, PB :

$$PB = w_2 - w_1. \quad (6)$$

A partir desta definição pode-se escrever:

$$u_{máx} - u_{min} = KPB. \quad (7)$$

Em resumo: quanto maior a banda proporcional, mais dificilmente ocorrerá saturação de controle, isto é, maior é a região de comportamento linear para o controlador PID.

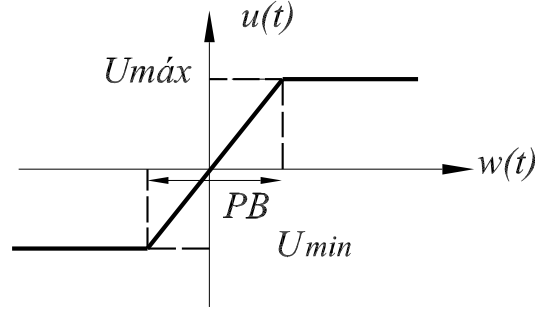


Figura 2: Banda proporcional.

A figura (2) ilustra graficamente a banda proporcional. Em muitos controladores PID industriais, como o controlador da NOVUS, ao invés de definir diretamente o valor de K , especifica-se o valor da banda proporcional em valor percentual. Observe que considerando:

$$u_{máx} - u_{min} = 100\% \quad (8)$$

tem-se:

$$K = \frac{100}{PB}. \quad (9)$$

Obviamente, quanto maior o valor de K menor será a banda proporcional e maior será o esforço de controle (energia de controle). O resultado é que o sistema tende a responder mais rapidamente. No entanto, valores excessivos de K podem fazer com que a resposta do sistema apresente um sobre-passo considerável ou mesmo se torne instável [1].

Já o tempo integral T_i ou *reset time*, corresponde ao tempo em que a parcela relativa à parte proporcional da ação de controle é duplicada. T_i é comumente especificado em minutos e sua principal função é fazer com que a resposta se aproxime mais rapidamente da referência. Determina-se para o controlador da NOVUS o termo IR (Integral Rate), expresso em min^{-1} :

$$IR = \frac{1}{T_i}. \quad (10)$$

Finalmente, a ação derivativa, expressa pelo parâmetro T_d (Derivative Time), quando combinada com a ação proporcional tem a função de antecipar a ação de controle a fim de que o processo reaja mais rápido. Neste caso, o sinal de controle a ser aplicado é proporcional a uma predição da saída do processo. T_d é expresso como DT no controlador da NOVUS, em segundos.

$$DT = T_d. \quad (11)$$

As características do controlador da NOVUS de maior interesse para os ensaios são descritas nos parágrafos a seguir, de acordo com [1].



Figura 3: Foto do Sistema.

É usado um controlador PID industrial do tipo *single loop*, modelo N1100, que foi produzido pela empresa NOVUS Produtos Eletrônicos Ltda. Trata-se de um controlador que possui características universais, aceitando a maioria dos sensores e sinais utilizados na indústria e possibilita todos os tipos de saída necessários à atuação nos diversos processos.

Este controlador microprocessado permite uma ampla programação dos parâmetros e dos modos de operação. Sendo possível realizar toda a configuração do controlador via teclado ou remotamente, seleção do tipo de entrada e de saída, da forma de atuação dos alarmes, além de outras funções especiais, sem qualquer alteração no circuito. Apresenta uma entrada universal multisensor, em particular, para sensores de temperatura (termopares e PT100) onde uma linearização interna via *software* é feita.

Na tabela 1, vista a seguir, são enunciados alguns dos tipos de entrada possíveis de serem utilizados pelo controlador.

Apresenta, também, uma saída em PWM através de um relé de potência (3A/250V); um display possibilitando a visualização de, entre outros: valores da variável manipulada (MV), valores da variável do processo (PV) em tempo real e dos valores dos parâmetros programados; e permite que modos de operação manual e automático sejam selecionáveis:

1. modo manual: neste modo, a operação se dá em malha aberta. Através das telas de programação do controlador é possível fixar a potência térmica a ser aplicada sobre a resistência entre 0% e 100%;
2. modo automático: neste modo, a operação se dá em malha fechada com controle PID ou controle liga-desliga com histerese.

Possui outras características como auto-sintonia do parâmetros PID, temporização para dois alarmes, retransmissão de PV ou do valor de referência (SP) em 0-20mA ou 4-20mA, etc, [4].

Tipo	Características
J	faixa:-50 a 760°C
K	faixa: -90 a 1370°C
T	faixa:-100 a 400°C
S	faixa: 0 a 1760°C
Pt100	faixa: -199.9 a 530°C

Tabela 1: Tipos de entradas do controlador.

A lei de controle PID para o controlador da NOVUS é implementada na forma série :

$$MV(t) = \frac{1}{PB} \left[e(t) + IR \int_0^t e(\tau) d(\tau) + DT \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

onde PB , IR e DT , como dito anteriormente, são os parâmetros do controlador PID, denominados respectivamente Banda Proporcional, Taxa Integral e Tempo Derivativo.

1.2.1 Display

Através dos *displays* de quatro algoritmos, *Display de PV/Programação* e *Display de SP/Parâmetros*, que aqui serão definidos como $D1$ e $D2$, respectivamente, ver figura 4, pode-se visualizar os valores das variáveis de processo (temperatura atual, por exemplo) o valor do *setpoint* (valor do percentual de potência a ser aplicado) em um dado ensaio, por exemplo.

O *Display de PV/Programação* ($D1$) apresenta o valor atual da variável do processo. Já quando se está no modo de operação ou de programação, mostra o mnemônico do parâmetro que está sendo apresentado: **Atun** (*Auto tuning*) e **Auto** (Automático), por exemplo.

Já o *Display de SP/Parâmetros* ($D2$) exhibe o valor de *setpoint* (SP) e dos demais parâmetros programáveis do controlador: int, unit, PB, DT, etc.

Como exemplo, quando a operação se dá em malha fechada, vemos por meio de $D1$ o valor atual de temperatura e, através de $D2$, o valor de temperatura de referência desejado, em graus centígrados. Pode-se visualizar, também, o modo de operação, automático ($D1$ - Auto, $D2$ - no) ou manual ($D1$ - Auto, $D2$ - yes). Vê-se também o estado de operação do controlador ($D1$ - run, $D2$ - no ou yes).

No painel frontal do controlador temos também um conjunto de quatro *LED's* (*Light Emissor Diode*): *LED's* de alarme 1 e 2, *LED Output* e *LED Manual*. Os *LED's* de alarme, como já diz o nome, sinalizam a ocorrência de algum alarme. O *LED Manual* sinaliza que o controlador está no modo de controle manual e fica piscando durante a execução de auto-sintonia dos parâmetros PID.

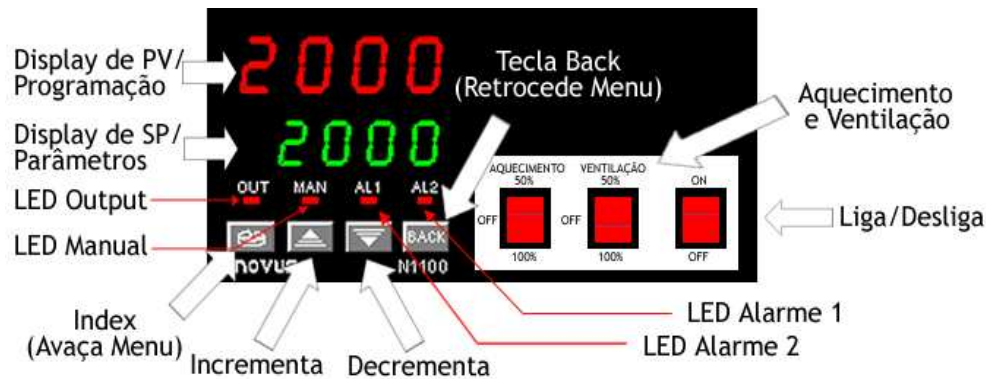


Figura 4: Painel frontal do controlador e identificação de seus componentes.

Já o *LED Output* indica que o controlador está ativo, com a saída de controle e os alarmes habilitados. Caso o tipo de saída de controle selecionado seja relé ou pulso, o *LED Output* representa o estado instantâneo do pulso ou relé (ligado ou desligado).

1.2.2 Teclado

As teclas de ajuste do controlador, vistas na figura 4, Tecla Index, Tecla Back, Tecla de Incremento e Decremento nos permitem selecionar uma gama de funções como o modo de operação (manual ou automático), a temperatura desejada, parâmetros do controlador, etc. As teclas de funções serão aqui definidas, da esquerda para a direita, como $T1$, $T2$, $T3$ e $T4$, figura 4.

Através da Tecla Index ($T1$) pode-se visualizar os sucessivos parâmetros do controlador, tais como Auto, run, entre outros. A Tecla Back ($T4$) é utilizada para retroceder ao parâmetro anteriormente apresentado no $D2$. Já as teclas de Incremento ($T2$) e Decremento ($T3$) permitem a alteração dos valores dos parâmetros e dos valores das variáveis.

Por exemplo, através de um toque sobre a tecla $T1$ pode-se sair do modo de visualização padrão, que mostra o valor de temperatura (em $D1$) e o valor de percentual de potência a ser aplicado em malha aberta (em $D2$), e passar para o ajuste de modo de operação (automático ou manual) por meio das teclas $T2$ e $T3$ respectivamente.

Ao escolher-se o modo de operação manual a luz de identificação do *LED Manual*, irá ficar acesa. Com mais um toque pode-se ajustar o valor de referência de temperatura desejado em malha fechada, valores maiores (através de $T2$) e valores menores (por meio de $T3$). E por fim, pode-se disparar o processo ($D1$ - run) tecando $T2$ ($D2$ - yes) ou $T3$ ($D2$ - no). Ao escolher-se a opção de disparar o processo (yes) a luz do *LED Output*, irá ficar acesa.

Os parâmetros de programação estão agrupados por afinidade em ciclos ou níveis de telas, onde cada tela é um parâmetro a ser definido.

Ciclo	Acesso
1-Operação	acesso livre
2-Sintonia 3-Programas 4-Alarmes 5-Configuração de entrada 6-I/O's 7-Calibração	acesso reservado

Tabela 2: Ciclos de programação do controlador.

Os sete ciclos de telas existentes são apresentados na tabela 2. O ciclo de operação (1º ciclo) tem acesso livre. Os demais ciclos necessitam de uma combinação de teclas para serem acessados. A combinação é pressionar as teclas $T1$ e $T4$ simultaneamente [4].

Estando no ciclo desejado, pode-se percorrer todos os parâmetros deste ciclo pressionando a tecla $T1$ (ou $T4$ para retroceder no ciclo). Caso deseje-se retornar ao ciclo de operação, pressionar $T1$ várias vezes até que todos os parâmetros do ciclo atual sejam percorridos.

Por exemplo, ao se pressionar as teclas $T1$ e $T4$ simultaneamente pode-se alterar os parâmetros DT , PB e IR , da lei de controle. Inicialmente irá aparecer no $D1$ a expressão $Atun$, sendo possível seleccionar-se *yes* (através de $T2$) ou *no* (por meio de $T3$). Ao escolher-se a opção *yes* a luz do LED Manual irá ficar acesa.

A seguir, teclando-se $T1$, pode-se então seleccionar, através de $T2$ (valores maiores) e $T3$ (valores menores), o valor de PB desejado. Teclando novamente $T1$ pode-se alterar IR e, teclando mais uma vez $T1$, o valor de DT . Procedimento análogo ao feito para ajustar-se o valor de PB deve ser tomado para alterar-se os valores de IR e DT .

Caso continue-se a teclar $T1$ serão acessadas outras variáveis que não são importantes para a realização dos ensaios, mas sim, para o processamento interno do controlador. Acessar-se-á outros menus, com outras funções especiais, ao pressionar-se juntamente as teclas $T1$ e $T4$ novamente, tais como rampas e patamares, temporização dos alarmes, entradas digitais, etc. Estes menus modificam o desempenho do sistema. Contudo, como dito anteriormente, não são interessantes para a realização dos ensaios, sendo seu acesso reservado. Portanto, não deve-se alterar seus valores, pois poderá comprometer o correto funcionamento do controlador.

1.2.3 Principais Registros

Serão listados a seguir os principais registros contidos na planta térmica, suas funções, opções de valores, etc.

- **Auto** (**A**utomatic), este registro é responsável pelo modo de controle: **yes** significa modo de controle automático e **no** significa modo de controle manual;
- **Pr n** (**P**rogram **n**umber), este registro controla a execução de programas, selecionando o programa de rampas e patamares a ser executado: 0 não executa programa algum, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 o respectivo programa;
- **run**, habilita o controle: **yes** significa controle e alarmes habilitados, **no** significa controle e alarmes inibidos;
- **Atun** (**A**uto-**t**une), habilita (**yes**) ou não (**no**) a sintonia automática dos parâmetros PID;
- **Pb** (**P**roportional **b**and), é o valor do termo P do controle PID, em percentual de faixa máxima do tipo de entrada; se ajustado zero, o controle é ON/OFF;
- **Ir** (**I**ntegral **r**ate), é o valor do termo I do controle PID, em repetições por minuto;
- **dt** (**d**erivative **t**ime), é o valor do termo D do controle PID, em segundos.

1.3 Microcomputador

O controlador industrial PID está conectado a um microcomputador através de uma interface serial RS232, que será descrita a seguir, como a saída padrão do N1100 é RS485 utiliza-se um conversor RS485-RS232. No microcomputador é feito o gerenciamento dos experimentos e a monitoração dos mesmos através da execução do programa supervisorio a ser descrito na seção a seguir.

Para tanto, a configuração mínima necessária é a seguinte: processador 80486DX ou superior (Pentium recomendado); 16Mb de memória RAM (32Mb recomendado); monitor VGA; 10Mb de espaço em disco livres; sistema operacional Microsoft Windows 3.1, 95, NT ou 98.

1.4 Supervisorio

Sistemas supervisorios são sistemas de supervisão, controle e aquisição de dados. Localizam-se na parte de mais alto nível de um processo de controle e são usados em grande escala pela indústria. Em particular, as telas para o gerenciamento e o monitoramento das análises foram geradas através do *software* supervisorio Elipse Scada, da empresa Elipse Software Ltda (Elipse SCADA, Manual do Usuário, 1999).

Suas unidades básicas de dados são os *TAGS*. O supervisorio trata os dados do processo como *TAGS*, sejam eles vindos de um CLP, via (*drivers*), de uma base de dados industrial, ou mesmo através de expressões matemáticas internas (*TAG* expressão)[2].

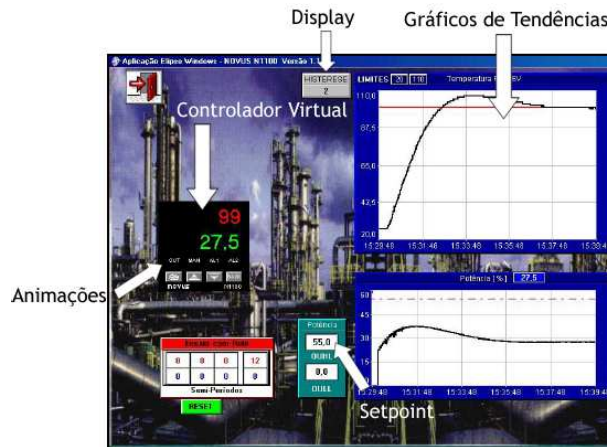


Figura 5: Tela do supervisor.

Em nosso sistema, associam-se *TAGS* a valores de registradores do controlador N1100. Assim, através do *driver* de comunicação serial, os valores dos registradores são passados, em tempo real, aos respectivos *TAGS* e vice-versa. Tais *TAGS* podem ser ainda processados internamente pela aplicação supervisória através da execução de *scripts* (pequenos trechos de programas) escritos na linguagem Elipse Basic.

Têm-se então grande facilidade e flexibilidade para realizar cálculos, elaborar relatórios, gerar arquivos históricos, montar estratégias de controle, manipular variáveis, etc. Entre outras características que este programa também possui pode-se citar: um ambiente gráfico para a edição das telas de monitoração (que permite a criação de *displays*, botões, animações, gráficos com tendências, etc.) e suporte para WEB.

As telas supervisórias dos experimentos incluem basicamente: um controlador *virtual*, gráficos de tendências e campos para entrada de parâmetros específicos para cada ensaio [1]. As características e funcionalidades destes objetos são detalhadas a seguir.

1.4.1 Controlador Virtual

É possível realizar todas as alterações e programações em tempo real dos parâmetros do N1100 remotamente através da tela supervisória, ver figura 5.

Sendo os valores programados enviados pela interface serial ao supervisor, podendo em seguida serem alterados através deste último. O controlador virtual, responsável pelo gerenciamento desta interface, é retratado por uma figura da parte frontal do N1100. Os botões de programação (idênticos aos do controlador real) são executados por meio de cliques de mouse sobre os mesmos.

A ação correspondente ao clique em um dos botões é diretamente enviada ao N1100 através da interface serial, e estas ações correspondem exatamente ao que ocorre quando o botão do controlador é pressionado fisicamente [1].

O controlador virtual é composto de uma série de objetos do Elipse: *displays*, botões, animações e *bitmaps*, os quais são muito úteis para construir-se uma aplicação. Este objetos e outros serão descritos a seguir. Cito que dar-se-á uma ênfase somente nos objetos de tela do *Elipse*, não descrevendo as outras funcionalidades do supervisorio utilizadas pelas aplicações, tais como: históricos, relatórios, *drivers*, etc.

1.4.2 Aplicação Supervisória

Como dito anteriormente, o Elipse é uma ferramenta para o desenvolvimento de sistemas supervisorios e controle de processos, para tal, necessita-se desenvolver uma aplicação neste.

Uma aplicação é composta de gráficos, *displays*, *Gauges*, figuras, animações, botões, etc., onde pode-se visualizar ou alterar, em tempo real, as variáveis de um certo processo. As características e funcionalidades dos objetos mais usados pelas aplicações, empregados nas aulas de laboratório, serão descritas a seguir.

a) Gráficos de Tendências

No Elipse o objeto que é usado para visualizar um gráfico é chamado de tendência, através dele é possível gerar um gráfico com até 16 *Tags*. O gráfico é constantemente atualizado a medida que o processo evolui e os valores dos *Tags* mudam. Sendo possível fazer gráficos como *Valor x Tempo* e *Valor x Valor*. Devido a estas características pode-se efetuar uma análise dos dados a medida que o processo evolui.

Especificamente, no ensaios de laboratório os gráficos de tendência exibem em tempo real o valor de saída (PV), o valor de referência (SP) e o sinal de controle (MV) do processo, figura 5.

A partir de um duplo clique do mouse sobre um determinado gráfico torna-se possível modificar as escalas (selecionando a faixa de tempo na qual deseja-se efetuar a análise), realizar um zoom, navegar com o mouse sobre a curva (obtendo os valores) e ainda alterar as cores e as linhas.

Com base na faixa de tempo escolhida é possível gerar ainda um arquivo texto com os dados do histórico. Isto é útil para servir-se destes dados em outros programas e para processo *off-line* como o Matlab, por exemplo [1].

b) Display

O objeto *Display* é utilizado para mostrar os valores dos *Tags* de uma aplicação em tempo real. Através do Elipse pode-se alterar as suas propriedades: tamanho, cor, fonte, alinhamento, efeitos 3D e outras características.

Nas aplicações usadas nos ensaios de laboratório, os *displays* são úteis para exibir em tempo real o valor de saída (PV), o valor de referência (SP), valores dos parâmetros do controlador, etc.

De modo semelhante ao gráfico de tendência, o *display* é atualizado constantemente, a partir da mudança dos *Tags*, que pode acontecer através da digitação de algum valor pelo usuário, ou por meio da mudança ou pelo cálculo interno (*Tag* expressão) de alguma variável do processo.

f) Bitmaps

O objeto *Bitmap* é largamente utilizado e permite inserir uma figura ou desenho no formato BMP na(s) tela(s) de uma aplicação. Este objeto pode ser redimensionado para ter o mesmo tamanho da figura, também possui suporte a transparência, bastando habilitar e selecionar a cor desejada. Nas aplicações ele está retratado pelo bitmap de saída da aplicação.

c) Botão

O objeto botão é útil para acionar ou executar tarefas especificadas pelo usuário, através do mouse (um clique) ou teclado. Seu funcionamento é idêntico ao dos botões padrões do *Windows*.

Nas aplicações, utilizadas nos ensaios de laboratório, ele é útil para alterar as variáveis do processo (PV, SP e MV) via controlador virtual, resetar um controlador PID, disparar ou encerrar um ensaio.

d) Animações

O objeto Animação é um meio fácil de criar uma animação usando *bitmaps* definidos pelo usuário. Através da associação de um Tag à animação de modo que o valor do Tag determine qual *frame* deverá ser mostrado. Pode-se usar *Bitmaps* de qualquer tamanho e cores, desde que sejam arquivos com extensão BMP [4].

Nas aplicações aqui estudadas, as animações são representadas pelos *Led's* presentes no controlador virtual, que expressam o estado de um processo por exemplo.

e) Setpoint

O objeto *Setpoint* funciona como uma caixa de edição do *Windows*, bastando assim selecionar a caixa, digitar um valor e pressionar ENTER para atribuir este valor ao Tag associado.

A partir de um clique sobre um objeto *Setpoint* é possível alterar os valores dos parâmetros do controlador, a taxa de amostragem, a escala de visualização de uma gráfico, por exemplo.

1.4.3 Conexão do Supervisório com o Controlador

O computador apresenta duas interfaces de comunicação clássicas: a interface paralela e a interface serial. A comunicação serial diferencia-se da paralela por transmitir apenas um bit por vez, enquanto que na comunicação paralela são transmitidos vários bits por vez. Isso faz com que a comunicação paralela seja mais rápida do que a serial.

Essa afirmação, embora aceita pela maioria das pessoas, não é totalmente verdadeira. A comunicação serial pode ser mais rápida do que a paralela, bastando para isso que os bits saiam do dispositivo transmissor a uma velocidade muito maior.

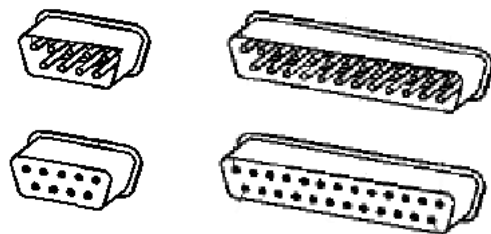


Figura 6: Conectores DB9 e D25 para comunicação serial RS232.

Um exemplo disso é a porta Serial ATA que, apesar de ser serial, consegue atingir uma taxa de transferência de até 150 MB/s, enquanto que a porta IDE tradicional consegue atingir, no máximo, 133 MB/s.

A alguns anos atrás, toda impressora era conectada à interface paralela e todo mouse era um dispositivo serial. Atualmente, muitas impressoras usam a interface Universal Serial Bus (USB) e nos PCs mais novos, a porta padrão para o mouse é a PS/2. Contudo, as interfaces paralela e serial ainda existem em todos os computadores. Em particular, a comunicação, envio e recebimento de dados entre o supervisor e a planta térmica realiza-se via interface serial.

Devido a simplicidade do hardware, a interface serial é muito empregada dentro da indústria eletro-eletrônica. Hoje, o padrão de comunicação serial mais utilizado é o EIA/TIA-232 ou, simplesmente, RS232 (Recommended Standard). Com esse padrão, pode-se estabelecer uma comunicação bidirecional entre dois dispositivos usando apenas três fios. Daí vem a sua simplicidade e praticidade.

Talvez devido a estes aspectos todas as tecnologias hoje existentes estão migrando da comunicação paralela para a comunicação serial. O novo padrão de discos rígidos IDE é serial (Serial ATA). O barramento PCI será transformado em serial nos próximos anos com o lançamento de sua nova versão, o PCI Express. A interface SCSI também está sendo transformada em serial.

A comunicação RS-232 é muito utilizada em microcontroladores também. A maioria deles tem um periférico exclusivo para comunicação RS-232. Por isso, a interface serial é uma maneira simples e prática de fazer o computador comunicar-se com um projeto.

Por exemplo, pode-se construir um pequeno robô e fazer com que a sua programação seja feita conectando-se o microcontrolador (que controla o robô) ao seu computador através de uma interface serial.

O problema de se usar comunicação serial entre o PC e um microcontrolador são os níveis de tensão exigidos pela interface serial. Geralmente, os microcontroladores trabalham com níveis de tensão entre 0 e 5V. Na interface serial do PC, os níveis envolvidos são -12 e 12V. Por isso, deve-se utilizar drivers de tensão. Na figura 6 vê-se os conectores padrões para comunicação serial.

2. Ensaio em Malha Aberta

Dispõe-se de vários métodos que são baseados na resposta em frequência ou na resposta ao salto para determinar os parâmetros do controlador PID. Estes métodos de projeto diferem com respeito ao conhecimento do processo dinâmico que se faz necessário.

O ajuste dos parâmetros de um controlador para um dado processo deve procurar a otimização do desempenho e da robustez do sistema. Assim, com o intuito de alcançar o ajuste ótimo para um processo, é necessário ter a noção de seu comportamento, tanto do ponto de vista estacionário quanto do ponto de vista transitório. Somente usando esta informação torna-se possível definir o modo correto de agir sobre o processo, alcançando assim um desempenho aceitável do sistema de controle [5].

O desempenho alcançável de um sistema de controle é tão melhor quanto mais preciso for o modelo disponível para o processo. Assim todo método de ajuste de controladores PID divide-se em duas etapas, a saber: obtenção de um modelo para o processo e o cálculo dos parâmetros do PID a partir do modelo obtido. Especificamente, a obtenção do modelo térmico baseia-se na realização de um ensaio ao salto em Malha Aberta (MA). O método clássico de Ziegler-Nichols (onde os parâmetros são simplesmente características obtidas da resposta ao salto) e os métodos derivados deste, serão descritos a seguir.

2.1 Método da Resposta ao Salto

O método da resposta ao salto permite adquirir um modelo matemático satisfatório do processo a partir do cálculo dos parâmetros do controlador de modo sistemático e simples. Sendo fundamentado no conhecimento de duas ou três grandezas que caracterizam a resposta do processo.

Este método clássico empregado para a determinação dos parâmetros dos controladores PID foi apresentado em 1942 por Ziegler e Nichols (ZN). Este método e seus correlatos são ainda atualmente usados na sua forma original ou com algumas modificações.

A Maioria dos processos industriais apresentam uma resposta a um salto unitário em sua entrada, isto é, na variável manipulada, como mostrado na figura 7.

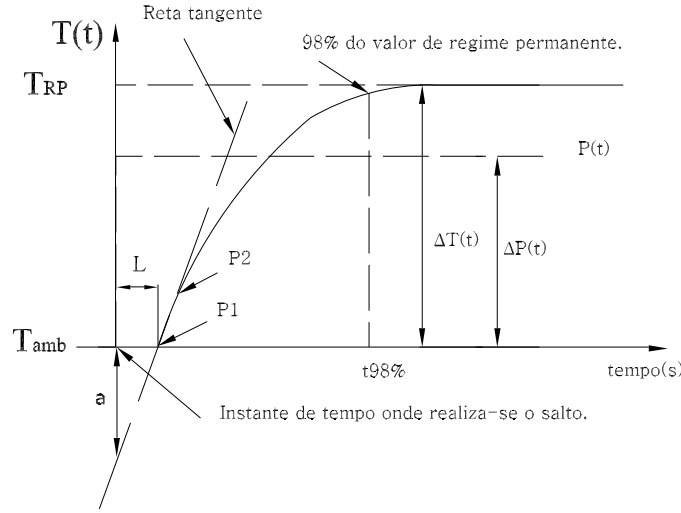


Figura 7: Características da resposta ao salto do processo térmico.

Controlador	K	T_i	T_d
P	$1/a$	-	-
PI	$0.9/a$	$3L$	-
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

Tabela 3: Parâmetros do controlador PID obtidos do método da resposta ao salto de ZN

Eles oferecem a forma básica de procedimento de ajuste dos controladores dos processos industriais e são baseados na determinação de algumas particularidades do processo dinâmico a partir da resposta ao salto unitário do sistema, sendo caracterizados por dois ou três parâmetros, como na figura 5, onde percebe-se que há um atraso de tempo também. Os parâmetros do controlador são expressos, então, em termos destas características por simples fórmulas.

Nestes, os processos dinâmicos são formados por três parâmetros: um está relacionado com o ganho do processo (K), o outro descreve o quão rápido o processo é (τ , que é a constante de tempo dominante) e o último refere-se ao atraso de transporte (L).

A obtenção destes parâmetros a partir do gráfico parece simples. Entretanto, deve-se prestar atenção em certos aspectos: inicialmente, traça-se os eixos coordenados tomando como referência no eixo da abscissas o instante de tempo em que foi aplicado o salto e no eixo das ordenadas o valor da variável de processo antes deste mesmo instante [5].

A seguir, traça-se uma reta tangente à curva de resposta no seu ponto de inflexão, ou seja, o ponto onde a taxa de variação tem seu máximo (P1). A partir das intersecções entre a tangente e a coordenada do eixo obtemos os parâmetros a e L , conforme a figura 7.

Obtém-se os parâmetros do controlador em função destes dois parâmetros, como visto na tabela 3. A constante de tempo τ , é obtida pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{t_{98}}{4} \quad (13)$$

onde t_{98} é o tempo decorrido até o valor da temperatura atingir 98% do valor de regime permanente. Uma vez realizadas as medidas de τ , K e L está completa a primeira etapa de ajuste, cujo modelo de função de transferência de primeira ordem é aquele descrito na equação (1). O cálculo dos parâmetros do PID é feito em função destas características.

O método da resposta ao salto consiste portanto dos seguintes passos: primeiro, registrar a resposta do processo a um salto em sua entrada; após, encontrar o instante de tempo em que a taxa de variação da saída atinge o seu valor máximo; anotar o valor da saída e de sua taxa de variação neste instante de tempo; determinar o atraso de transporte e o ganho graficamente e, se necessário, a constante de tempo dominante [5]

Este método limita-se a processos cuja resposta pode ser aproximada pela forma da figura 7. Não se enquadram nesta categoria: processos de fase não-mínima (processos de vazão, por exemplo), processos integradores (controle de posição de motores CC) processos oscilatórios (acionamento escalar de motores de indução) processos com atraso aparente desprezível (controle de velocidade de motores CC por corrente). Os processos que tipicamente apresentam uma resposta da forma da figura 7 são processos térmicos.

Cito que um salto de amplitude distinta da unidade pode ser usado, sendo neste caso necessário normalizar o ganho, dividindo-o pela amplitude deste salto [5]. Esta normalização e outros pontos serão vistos a diante.

2.2 Método de Chien

O comportamento transitório em malha fechada típico do ajuste pela tabela de Ziegler-Nichols apresenta um bom desempenho a resposta a perturbações, porém a resposta à variação de referência é bastante oscilatória, com um grande sobre-passo. A prática industrial mostra que a Tabela de Ziegler- Nichols geralmente fornece resultados satisfatórios quando $0.1 < L/T < 0.6$. Para outros casos foram posteriormente sugeridas outras fórmulas, por vezes utilizando o terceiro parâmetro da resposta ao salto: a constante de tempo dominante τ [5].

Foram feitas muitas sugestões para modificar o método de Ziegler-Nichols. Chien, Hrones e Reswick modificaram o método da resposta ao salto para obter um melhor amortecimento do sistema em malha aberta, e o mínimo tempo de estabilização, aqui definido como método de Chien. Eles propuseram o uso de um controlador que não tivesse sobre-passo (*overshoot*) ou que tivesse um sobre-passo de 20% como critério de projeto, ver tabela 4.

Sobre-passo	0%			20%		
Controlador	K	T_i	T_d	K	T_i	T_d
P	0.3/a	-	-	0.7/a	-	-
PI	0.35/a	1.2τ	-	0.6/a	τ	-
PID	0.6/a	τ	0.5L	0.95/a	1.4τ	0.47L

Tabela 4: Parâmetros do controlador PID, obtidos do método de Chien.

Para ajustar o controlador de acordo com o método de Chien, os parâmetros a e L são determinados da mesma forma que o método da resposta ao salto de Ziegler-Nichols.

2.2 Procedimento de Execução

O roteiro que será descrito a seguir deve ser seguido para efetuar-se corretamente o ensaio em MA no laboratório de Sistemas de Controle. Os procedimentos sugeridos são:

1. Abrir o executável do Elipse no *desktop* do PC.
2. Abrir a aplicação `ensaio_ma_batelada.app` no seguinte diretório: `C:\Elipse\N1100.10`.
3. Executar a aplicação: através da barra de Menus (Arquivo, Rodar), por meio da tecla F10 ou do ícone Roda Aplicação.
4. Apertar a tecla **Index** até que surja a possibilidade de se ajustar o modo de operação: **Auto**.
5. Apertar a tecla **Decrementa** selecionando-se o modo não automático (manual), o que corresponde a operar o sistema em malha aberta.
6. Ajustar a potência a ser aplicada na planta, 20% por exemplo. Para isto aperta-se mais uma vez a tecla **Index** e ajusta-se o valor desejado de MV através das teclas **Decrementa** e **Incrementa**.
7. Ajusta-se então a chave de aquecimento do *Kit* em 100%, certificando-se que o ventilador está desligado.
8. Coloca-se o controlador em operação. Isto pode ser feito através da escolha da opção **YES** na tela *RUN* ou apenas por meio de um clique no botão **Iniciar Ensaio** na tela do supervisão.
9. Quando o processo térmico estabilizar, chegando em um valor de regime permanente (o que deve levar alguns minutos), finalizar-se-á o ensaio através de um clique no botão **Encerrar Ensaio** ou por meio da escolha da opção **NO** na tela *RUN*.

2.3 Análise dos Dados

Com base no ensaio ao salto realizado, conforme os procedimentos sugeridos anteriormente, determina-se os ganhos do controlador utilizando a tabela de Chien. Deve-se no entanto considerar certos detalhes, que serão descritos agora.

Como no ensaio de Ziegler-Nichols, descrito na seção 2.1, o salto é unitário, deve-se normalizar o salto de potência. Assim, a diferença entre a temperatura registrada no gráfico e o ponto onde esta reta tocaria o eixo da temperatura, denominada a , medida em $^{\circ}\text{C}$, será redefinida como \tilde{a} . A normalização é feita conforme a equação a seguir:

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{a}}{\Delta p} \quad (14)$$

onde Δp é o valor do salto de potência, dado em % de potência, e \tilde{a} é dada em $^{\circ}\text{C}/\%Potência$

Os valores de SP e PV são representados em percentual da escala máxima do sensor encontrado no *kit*. Deve-se fazer, então, uma uniformização do valor de \tilde{a} , visto que o controlador, que pode trabalhar com vários sensores, utiliza valores percentuais do fundo de escala associado a um determinado sensor. Neste caso o sensor é um termopar do tipo k, cuja faixa de medição de temperatura varia de 0° até 1460°C . Obtendo-se então o parâmetro a , dado em $\%^{\circ}\text{C}/\%Potência$.

$$a = \frac{100\tilde{a}}{1460} \quad (15)$$

De posse dos parâmetros a , L e τ consulta-se a tabela de Chien e determina-se os parâmetros K , Ti e Td para o controlador que deseja-se implementar (P, PI ou PID). Entretanto, ainda deve-se implementar a lei de controle para o controlador da Novus, conforme a equação (2), determinando os parâmetros PB , IR e DT , de acordo com as equações (9),(10) e (11) aqui reescritas:

$$PB = \frac{100}{K} \quad (16a)$$

$$IR = \frac{1}{Ti} \quad (16b)$$

$$DT = \tau \quad (16c)$$

onde as unidades de IR e DT são respectivamente min^{-1} e s.

3. Ensaio em Malha Fechada

No controle em malha fechada, informações sobre como a saída de controle está evoluindo são usadas para obter o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma realimentação da saída para a entrada. Em geral, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele não reaja a perturbações externas, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência e o desvio (erro) entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo.

Deste modo, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência. O controlador ou compensador utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta. O diagrama básico de um sistema de controle em malha-fechada é mostrado na figura a seguir [6].

Considere o exemplo da resistência do *kit*. Suponha que a sua temperatura seja medida e que seu valor seja comparado com uma referência pré-estabelecida pelo aluno. Se a temperatura da resistência for menor que a referência, então aplica-se na resistência uma potência proporcional a esta diferença. Neste sentido, a temperatura da resistência tenderá a crescer diminuindo a diferença com relação a referência. No caso do erro ser negativo (temperatura da resistência maior que o valor de referência) acionaria-se um sistema de resfriamento da resistência com uma potência proporcional a este erro, ou, simplesmente, se desligaria o aquecimento. Deste modo, a temperatura da resistência tenderia sempre a estabilizar no valor de referência ou em um valor muito próximo deste, garantindo ao sistema de controle uma boa precisão. Além disto, variações da temperatura externa (que fariam variar a temperatura) seriam compensadas pelo efeito da realimentação, garantindo ao sistema capacidade de adaptação a perturbações externas.

Em resumo, a utilização da realimentação e, portanto, do controle em malha fechada, permite entre outros:

- aumentar a precisão do sistema;
- rejeitar o efeito de perturbações externas;

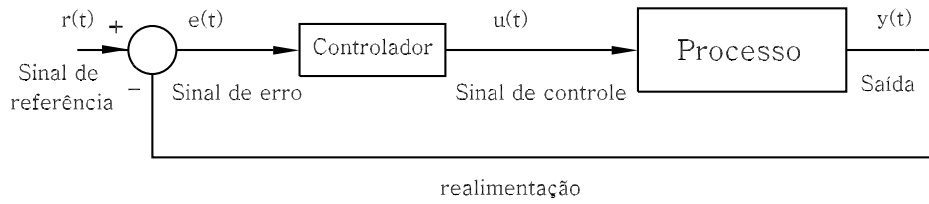


Figura 8: Controle em Malha Fechada.

- melhorar a dinâmica do sistema e, eventualmente, estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta;
- diminuir a sensibilidade do sistema a variações dos parâmetros do processo, ou seja, tornar o sistema robusto.

3.1 Procedimento de Execução

Como feito para o ensaio em MA, o roteiro que será descrito a seguir deve ser seguido para efetuar-se corretamente o ensaio em MF no laboratório de Sistemas de Controle. Os procedimentos são muito semelhantes aos sugeridos para o ensaio em MA, e são:

1. Abrir o executável do Elipse no *desktop* do PC.
2. Abrir a aplicação `ensaio_ma_batelada.app` no seguinte diretório: `C:\Elipse\N1100.10`.
3. Executar a aplicação através dos mesmos métodos descritos anteriormente para o ensaio em MA.
4. Pressionar as teclas *T1* e *T4* simultaneamente até aparecer a expressão **Atun**. Pressionando-se a tecla *T1* torna-se possível, então, ajustar o valor da banda proporcional através das teclas *Decrementa* e *Incrementa*. Pressionando-se mais uma vez a tecla *Index* passa-se para o ajuste de *DT* por meio de *T2* e *T4*. Novamente, apertando a tecla *T1* ajusta-se o valor de *IR*.
5. Apertar a tecla *Index* até que surja a possibilidade de se ajustar o modo de operação: **Auto**.
6. Apertar a tecla *Incrementa* selecionando-se o modo automático, o que corresponde a operar o sistema em malha fechada.
7. Ajusta-se então a chave de aquecimento do *Kit* em 100%, certificando-se que o ventilador está desligado.

8. Coloca-se o controlador em operação. Isto pode ser feito através das mesmas opções citadas para o ensaio em MA.
9. Quando o processo térmico estabilizar, finalizar-se-á o ensaio através de um clique no botão *Encerrar Ensaio* ou por meio da escolha da opção *NO* na tela *RUN*.

Dentre principais operações matemáticas realizadas pelo controlador (ação liga-desliga, proporcional, derivativa, ...) sobre o sinal $e(t)$, também chamadas ações de controle, com o intuito de produzir um sinal $u(t)$ que será aplicado na planta a fim de satisfazer um determinado objetivo, será descrito no capítulo a seguir a ação liga-desliga. Ressalto que a compreensão física destas ações são fundamentais para o perfeito entendimento e sintonia dos controladores PID [6].

4. Ensaio do Relê

O mínimo valor do ganho do controlador puramente proporcional, presente em um sistema operando em MF, que foi obtido aumentando progressivamente e lentamente o ganho, que faz com que surja uma oscilação sustentada, é chamada de *ganho crítico* do processo. Já o período da oscilação observada é dito o *período crítico* do processo. Estas duas características são fundamentais em um processo e estão relacionadas a sua resposta em frequência [5].

De modo semelhante ao método da resposta ao salto, os ajustes de um PID para um processo podem ser feitos em função destas características por meio de fórmulas que relacionam os parâmetros do PID com estas grandezas.

Devido ao fato de que a formulação deste método não está baseado em uma resposta típica do processo, ele pode ser aplicado a uma classe de sistemas para os quais o método da resposta ao salto não é adequado; este também, é menos sensível ao efeito do ruído do que o método da resposta ao salto.

No entanto, a determinação do ganho crítico e do período crítico de um processo pelo ensaio com controle proporcional é pouco eficiente pelos seguintes motivos, conforme descrito em [5]:

- já que o ganho deve ser aumentado gradativamente, o procedimento torna-se muito demorado;
- é essencial ter de antemão alguma informação sobre o processo, para que se possa determinar o valor inicial do ganho e sua taxa de variação;
- não se tem controle sobre a amplitude da oscilação observada na saída, que pode ser bastante pronunciada, desencorajando sua aplicação *on-line*.

Um modo mais eficiente de obter estes parâmetros é o ensaio em MF com controle bang-bang, que não sofre nenhum dos inconvenientes citados anteriormente e que será descrito agora.

4.1 Ação Bang-Bang

Na ação Bang-Bang, o controlador é modelado por um comparador de acordo com a figura 9. Este tipo de ação pode ser considerada como a mais simples e mais econômica. Devido ao fato de que este tipo de ação possui limitações no que concerne ao comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema em malha fechada, suas aplicações são restritas a sistemas onde são desnecessárias a precisão e um bom desempenho dinâmico, como por exemplo: termostato de geladeira e controle de nível d'água por meio de bóias [6].

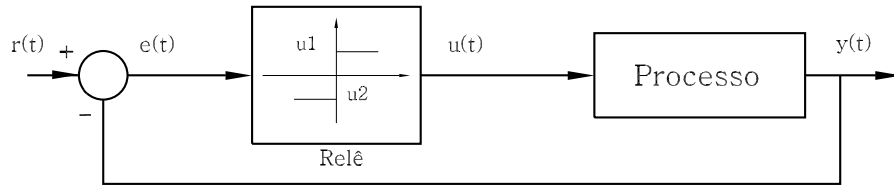


Figura 9: Controle bang-bang.

O sinal de controle $u(t)$ pode assumir dois valores, conforme o erro seja positivo ou negativo, isto é:

$$u(t) = \begin{cases} U1 & \text{se } e(t) > 0 \\ U2 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

Caso $U2$ seja igual a zero (ou $U1$ o seja), a ação bang-bang é chamada de ação liga-desliga, ou, no jargão industrial, de ação de controle on-off. A ação bang-bang pode ser implementada como um simples comparador ou até um relê físico. Deve-se notar que neste caso ter-se-ia uma inconsistência em zero na presença de ruídos, ocorrendo chaveamentos espúrios quando o sinal $e(t)$ estiver próximo de zero [6].

Para sanar este problema, utiliza-se na prática o controlador denominado bang-bang com histerese, como mostrado na figura 10. Este tipo de controlador, possui o seguinte comportamento:

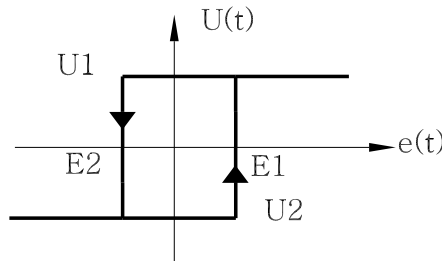


Figura 10: Histerese.

- Caso $U(t)$ seja igual a $U1$, é necessário que o valor de $e(t)$ alcance um valor menor que $E2(t)$ para que ocorra um chaveamento para $U2$;
- Caso $U(t)$ seja, agora, igual a $U2$, torna-se essencial que o valor de $e(t)$ ultrapasse o valor de $E1(t)$ para que haja um chaveamento para $U1$.

A resposta de um sistema em malha fechada com um controlador bang-bang com histerese, possui uma oscilação em torno do valor de referência, o que denota uma baixa precisão obtida com este tipo de controlador. A amplitude e a frequência da oscilação são funções do intervalo $[E1, E2]$, que deve ser determinado considerando-se a precisão desejada, os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

Analisar-se-a agora a simetria da oscilação que surge quando utiliza-se um controlador bang-bang. Esta, é a relação entre os intervalos de tempo em que a variável manipulada fica em seu valor máximo e mínimo. A oscilação será simétrica com respeito ao valor de referência. Caso esta oscilação seja simétrica, seu período será igual ao período crítico do processo e o ganho crítico pode então ser calculado pela expressão a seguir:

$$K_c = \frac{4M}{\pi A} \quad (18)$$

onde M é a diferença entre $U1$ e $U2$:

$$M = U1 - U2 \quad (19)$$

e A é a amplitude pico-a-pico da oscilação observada na variável controlada. Já a simetria da oscilação depende exclusivamente do valor médio da variável manipulada β :

$$\beta = \frac{U1 + U2}{2} \quad (20)$$

Para que a oscilação seja simétrica, o valor médio da variável manipulada deve ser tal que o valor médio da variável controlada seja igual ao valor de referência. Os valores de $U1$ e $U2$ devem ser calculados de forma a satisfazer esta restrição. Caso o valor médio da variável manipulada (β) não apresentar o valor correto o sistema não oscilará ou oscilará de forma assimétrica. Assim, deve-se recalcular β [5].

Ainda, a largura da histerese deve ser escolhida maior do que o nível de ruído de medição presente no sistema. Neste caso pode-se demonstrar que o período desta oscilação será aproximadamente igual ao período crítico e que o ganho crítico pode ser calculado pela expressão a seguir:

$$K_c = \frac{4M}{\pi \sqrt{A^2 - h^2}} \quad (21)$$

onde h é a faixa de histerese.

4.2 Procedimento de Execução

Como dito anteriormente, o ensaio com controle bang-bang é feito em malha fechada e durante este ensaio a saída oscila em torno do valor da referência. Portanto, o ensaio pode ser feito com o processo em operação, sem a necessidade de interrompê-lo. Neste caso deve-se escolher uma amplitude para a variação da variável manipulada que seja suficientemente pequena para não provocar oscilações excessivas na variável de processo, de modo que o processo possa ser mantido em operação. Por outro lado, a oscilação na variável de processo deve ser suficientemente grande para permitir uma medida confiável de sua amplitude [5]. O método de ajuste do período crítico consiste portanto dos seguintes passos:

1. Abrir o executável do Elipse no *desktop* do PC.
2. Abrir a aplicação `ensaio-rele.app` no seguinte diretório: `C:\Elipse\N1100_10`.
3. Executar a aplicação através dos mesmos métodos descritos anteriormente.
4. Programe a histerese do relê (\tilde{h}), $1^{\circ}C$ por exemplo. Isto deve ser feito digitando-se o valor 1 no campo onde está escrito SP.
5. Ajuste a amplitude do relê (M), 15% por exemplo. Isto deve ser feito digitando-se o valor no campo onde está escrito M (%).
6. Inicialize o valor do *bias*. De modo semelhante, digite o valor no campo Bias.
7. Acione a chave do Relê.
8. Ajuste o SP no valor desejado.
9. Apertar a tecla Index até que surja a possibilidade de se ajustar o modo de operação: Auto.
10. Apertar a tecla Decrementa selecionando-se o modo manual.
11. Ajusta-se então a chave de aquecimento do *Kit* em 100%, certificando-se que o ventilador está desligado.
12. Coloca-se o controlador em operação. Isto pode ser feito através das mesmas opções citadas anteriormente.
13. O programa elipse emulará um controlador *ON-OFF* (bang-bang) que ficará chaveando a saída do controlador entre $(bias + M)$ e $(bias - M)$. Observar-se-á um ciclo-limite na saída do processo. Esta oscilação muito provavelmente não será simétrica em torno da referência. Este fato pode ser observado a partir do mostrador de 4 campos no canto inferior esquerdo da tela do supervisor. Estes campos mostram quanto tempo o relé ficou $(bias + M)$ (azul) e em $(bias - M)$ (vermelho) nos últimos 4 períodos.

14. A fim de obter uma oscilação simétrica em torno da referência, altere o valor médio (*bias*) de potência aplicado ao processo. até que os tempos de permanência em alta ou em baixa sejam aproximadamente os mesmos nos últimos 3 períodos.
15. Tendo obtido uma oscilação simétrica com relação a referência, meça a amplitude (\tilde{A}) da oscilação sustentada e o período desta (T_u), determine K_c . Lembre-se, deve-se considerar A e h em valores percentuais do fundo de escala de temperatura, ou seja:

$$A = \frac{100\tilde{A}}{1460} \quad (22a)$$

$$h = \frac{100\tilde{h}}{1460} \quad (22b)$$

De posse dos valores de K_u e T_u calcula-se os valores do controlador desejado a partir da tabela de Ziegler e Nichols e determinar-se estes valores para o controlador da Novus, isto será visto na seção a seguir.

4.3 Análise dos Dados

De posse dos parâmetros K_u e T_u consulta-se a tabela de Ziegler e Nichols, tabela 5, e determina-se os parâmetros K , T_i e T_d para o controlador que deseja-se implementar (P, PI ou PID).

Tipo de controlador	K	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.4 K_u$	$0.8 T_u$	-
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

Tabela 5: Fórmulas de Ziegler e Nichols para ajuste de pelo método do período crítico

Entretanto, ainda deve-se implementar a lei de controle para o controlador da Novus, conforme a equação (2), determinando os parâmetros PB , IR (em \min^{-1}) e DT (em segundos), de acordo com as equações (6.a), (6.b) e (6.c) aqui reescritas:

$$PB = \frac{100}{K} \quad (23a)$$

$$IR = \frac{1}{T_i} \quad (23b)$$

$$DT = \tau \quad (23c)$$

Agora coloque o controlador para funcionar em modo automático e observe o desempenho do sistema a mudanças de referência e a perturbações.

5. Ensaio de Resposta em Frequência

Ao injetar-se um sinal senoidal em um sistema linear, obtém-se em sua saída, após um período transitório, um sinal senoidal de mesma frequência mas com amplitude modificada (amplificada ou atenuada) e deslocado em fase com relação ao sinal de entrada, a figura a seguir ilustra este ensaio.

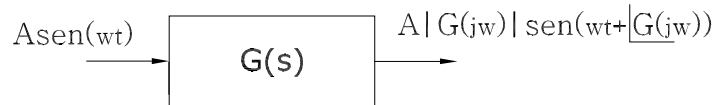


Figura 11: Ensaio de resposta em frequência.

Vale citar que, embora a maioria dos processos industriais sejam não lineares, seu comportamento no entorno de um ponto de operação pode ser aproximado por um modelo linear.

A amplitude e a fase do sinal de saída dependem da frequência do sinal senoidal de entrada. Deste modo, realizando-se uma varredura em frequência, isto é, variando-se a frequência do sinal de entrada, pode-se fazer um mapeamento do comportamento da amplitude e da fase do sistema em relação ao sinal de entrada e assim caracterizar o que chama-se de *resposta em frequência do sistema* [6].

A resposta em frequência de um sistema pode ser determinado de forma experimental, injetando-se sinais senoidais na entrada do sistema e observando-se a saída, ou a partir da função de transferência, fazendo-se $s = jw$. A justificativa para isto vem da análise da transformada de Laplace do sistema, considerando a entrada com uma senoide de frequência angular w .

5.1 Procedimento de Execução

5.2 Análise dos Dados

6. Ensaio de Programação de Controladores Digitais

6.1 Procedimento de Execução

6.2 Análise dos Dados

Referências Bibliográficas

- [1] J. M. Gomes da Silva Jr., A. S. Bazanella, Um Sistema Didático Para o Ensino de Ajuste de Controladores PID, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, RN, 2 a 5 de setembro de 2002.
- [2] R. P. Zeilmann, Uma estratégia Para Controle e Supervisão de Processos Industriais Via Internet, Dissertação de Mestrado, UFRGS, PPGEE , Porto Alegre, 2002.
- [3] K. J. Astrom, T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2^a edição, 1995.
- [4] Manual de Instruções do Controlador Universal de Processos, Modelo N1100, Novus Produtos Eletrônicos.
- [5] A. S. Bazanella, Curso de Especialização em Sistemas de Controle e Automação Industrial, Grupo de Controle Automação e Robótica (GCAR), UFRGS.
- [6] A. S. Bazanella, J. M. Gomes da Silva Jr., Ajuste de Controladores PID, Cursos de Extensão, Apostila on-line: www.delet.ufrgs.br/jmgomes.