



**e-Tec Brasil**  
*Escola Técnica Aberta do Brasil*

# **Controle Automático de Processos**

*Fernando Mariano Bayer*  
*Olinto César Bassi de Araújo*



**Santa Maria - RS**  
**2011**

Presidência da República Federativa do Brasil

Ministério da Educação

Secretaria de Educação a Distância

© Colégio Técnico Industrial de Santa Maria

Este Material Didático foi elaborado pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – e-Tec Brasil.

**Comissão de Acompanhamento e Validação - Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/CTISM**

**Coordenador Institucional**

Paulo Roberto Colusso/CTISM

**Professor-autor**

Fernando Mariano Bayer/CTISM

Olinto César Bassi de Araújo/CTISM

**Coordenação Técnica**

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

**Coordenação de Design**

Erika Goellner/CTISM

**Revisão Pedagógica**

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

**Revisão Textual**

Daiane Siveris/CTISM

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

**Diagramação e Ilustração**

Gustavo Schwendler/CTISM

Leandro Felipe Aguilar Freitas/CTISM

Maíra Rodrigues/CTISM

Marcel Santos Jacques/CTISM

Máuren Fernandes Massia/CTISM

Rafael Cavalli Viapiana/CTISM

Ricardo Antunes Machado/CTISM

Ficha catalográfica elaborada por Denise B. dos Santos – CRB10/1456  
Biblioteca Central – UFSM

**B357c Bayer, Fernando Mariano.**  
**Curso técnico em automação industrial : controle automático de processos / Fernando Mariano Bayer, Olinto César Bassi de Araújo. – 3. ed. – Santa Maria : Universidade Federal Santa Maria : Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.**  
**92 p.: il. ; 30 cm**

**1. Automação industrial. 2. Modelagem matemática. 3. Simulação – Sistemas. 4. Modelos computacionais. 5. Controle automático. 6. Algoritmos. I. Araújo, Olinto César Bassi de. II.Título.**

**CDU: 681.5**

# Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria entre o Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade, e promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geograficamente ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação  
Janeiro de 2010

Nosso contato  
[etecbrasil@mec.gov.br](mailto:etecbrasil@mec.gov.br)



# Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



**Atenção:** indica pontos de maior relevância no texto.



**Saiba mais:** oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



**Glossário:** indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



**Mídias integradas:** sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



**Atividades de aprendizagem:** apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



# Sumário

<b>Palavra do professor-autor</b> .....	<b>9</b>
<b>Apresentação da disciplina</b> .....	<b>11</b>
<b>Projeto instrucional</b> .....	<b>13</b>
<b>Aula 1 – Conceitos e noções preliminares de controle automático</b> .....	<b>15</b>
1.1 Sistemas de controle.....	15
1.2 Conceitos e noções preliminares.....	15
1.3 Diagrama de blocos.....	19
1.4 Controle em malha aberta e malha fechada.....	20
<b>Aula 2 – Estabilidade e algoritmos de controle</b> .....	<b>25</b>
2.1 Perturbações e estabilidade.....	25
2.2 Estabilidade.....	25
2.3 Conceitos e aplicação de algoritmos de controle.....	29
<b>Aula 3 – Ação liga-desliga (<i>on-off</i>) e ação proporcional (P)</b> .....	<b>33</b>
3.1 Ações básicas de controle.....	33
3.2 Ação liga-desliga ( <i>on-off</i> ).....	33
3.3 Ação proporcional (P).....	36
<b>Aula 4 – Ação integral (I) e derivativa (D)</b> .....	<b>45</b>
4.1 Ação integral e derivativa.....	45
4.2 Ação integral.....	45
4.3 Ação derivativa.....	47
<b>Aula 5 – Ação proporcional, integral e derivativa (PID)</b> .....	<b>53</b>
5.1 Combinações de ações de controle.....	53
5.2 Ação proporcional, integral e derivativa.....	53
<b>Aula 6 – Sintonia de controladores PID</b> .....	<b>57</b>
6.1 Parâmetros de ajuste.....	57
6.2 Ajuste manual de controladores PID.....	57

6.3 Sintonia por tentativa e erro .....	58
6.4 Método de <i>Ziegler-Nichols</i> .....	60
<b>Aula 7 – Simulação de sistemas – modelagem</b> .....	<b>65</b>
7.1 Simulação .....	65
7.2 Modelos físicos .....	66
7.3 Modelos matemáticos .....	67
7.4 Representação de modelos matemáticos .....	70
7.5 Modelos lógicos .....	72
7.6 Modelos de sistemas discretos .....	72
7.7 Modelos computacionais .....	72
<b>Aula 8 – Simulação de sistemas</b> .....	<b>75</b>
8.1 Software de simulação .....	75
8.2 Exemplo de simulação .....	76
8.3 Simulação de um controle <i>on-off</i> .....	77
8.4 Simulação de um controle PID .....	80
<b>Referências</b> .....	<b>91</b>
<b>Currículo do professor-autor</b> .....	<b>92</b>



## Palavra do professor-autor

Sistemas de Controle Automático de Processos ocupam um papel fundamental em vários setores da indústria, tais como fabricação de produtos, linhas de montagem automáticas, controle de ferramentas, e até mesmo no controle completo de veículos espaciais.

Dentro deste contexto, apresentamos uma introdução aos princípios básicos dos métodos e estratégias de controle automático de processos industriais. Durante a exposição do conteúdo, o rigor matemático é minimizado em favor da percepção física do funcionamento de um sistema de controle, no qual é possível compreender as ideias básicas e fundamentais. Com isso, visamos apresentar a técnica através de uma abordagem prática e simplificada.

Iniciamos os estudos com uma introdução aos conceitos básicos da área em questão. Na sequência, passamos à análise de algoritmos clássicos de controle PID (proporcional, integrativo e derivativo) que têm ampla utilização em processos industriais devido ao bom desempenho e facilidade de aplicação que apresentam. Concluímos usando computadores para simulação de processos.

Temos certeza de que o aperfeiçoamento técnico dos trabalhadores é indissociável do uso das melhores práticas, na produção industrial que o atual mercado competitivo exige. Dada essa importância, ressaltamos a necessidade de o estudante ler atentamente cada parte que compõe o conteúdo apresentado, de modo a facilitar o acompanhamento das aulas e a organização dos conhecimentos adquiridos.

Sugestões e críticas para o aprimoramento deste material são bem-vindas.

Fernando Mariano Bayer  
Olinto César Bassi de Araújo



# Apresentação da disciplina

Automatizar e controlar um processo significa atuar sobre ele ou sobre às condições as quais o processo está sujeito, de modo a manter variáveis e quantidades estáveis com o passar do tempo, mesmo que interferências externas tentem desviá-lo desta condição.

A utilização de sistemas de controle automático se encontra difundida no dia a dia de todas as sociedades desenvolvidas. Tais sistemas agem como elementos decisivos na tentativa de se obterem progresso e desenvolvimento. Podemos dizer que o controle automático num processo produtivo tem a finalidade de otimizar os sistemas capazes de produzir bens com menor custo, com maior quantidade, em menor tempo e com maior qualidade. Atualmente, a Automação Industrial é uma realidade em quase todas as fábricas no mundo. Dentre as diversas demandas para controle automático de processos estão o controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e ainda operação e montagem de partes mecânicas das indústrias de fabricação. O exemplo mais clássico de indústrias com essas características são as montadoras de automóveis com robôs utilizados em todas as atividades, como soldar, fixar rebites, pintar e conduzir peças.

Um temor recorrente é que a automação venha a reduzir a mão de obra empregada. De fato, isso pode ocorrer em alguns seguimentos, mas é necessário entender que neste processo muitos outros empregos são criados em novas funções necessárias para operar sistemas complexos. Esse novo tipo de profissional possui melhor remuneração e, devido à especialização, uma maior estabilidade no emprego. Ao invés de fazer a tarefa diretamente, o operador controla a máquina que faz a tarefa. Isso significa substituir um trabalho com ênfase braçal por outro com ênfase na capacidade mental do funcionário, relegando tarefas repetitivas a máquinas. Como motivação para o desenvolvimento desse novo cenário, está o aumento de produtividade das indústrias para a fabricação de produtos de alta qualidade com melhores condições de rendimento e segurança, a custos de produção compatíveis com o mercado consumidor.



# Projeto instrucional

**Disciplina:** Controle Automático de Processos (carga horária: 60h).

**Ementa:** Conceitos e noções preliminares de controle automático. Estabilidade e algoritmo de controle. Ação liga-desliga (*on-off*) e ação proporcional (P). Ação integral (I) e derivativa (D). Ação proporcional, integral e derivativa (PID). Sintonia de controladores (PID). Simulação de sistemas – modelagem. Simulação de sistemas.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Conceitos e noções preliminares de controle automático	Reconhecer conceitos básicos de controle automático. Interpretar diagramas de blocos que representam sistemas de controle. Identificar e conhecer malhas de controle e suas características.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08
2. Estabilidade e algoritmos de controle	Identificar processos estáveis e instáveis. Conhecer e analisar as características de regime transitório e regime permanente. Identificar algoritmos de controle em um processo industrial.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08
3. Ação liga-desliga ( <i>on-off</i> ) e ação proporcional (P)	Compreender o comportamento da ação de controle liga-desliga. Compreender o comportamento da ação de controle proporcional.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08
4. Ação integral (I) e derivativa (D)	Compreender o comportamento da ação de controle integral e derivativa.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08
5. Ação proporcional, integral e derivativa (PID)	Compreender o comportamento das ações proporcional, integral e derivativa combinadas. Conhecer as resposta das ações de controle P, I e D sozinhas ou combinadas.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	06
6. Sintonia de controladores PID	Diferenciar metodologias de sintonia de controladores PID.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	06
7. Simulação de sistemas – modelagem	Compreender as bases da simulação de sistemas e sua importância. Conhecer os principais métodos e programas de simulação.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
8. Simulação de sistemas	Conhecer softwares comerciais de simulação. Fixar os conhecimentos da disciplina através da utilização de um sistema de simulação.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08

# Aula 1 – Conceitos e noções preliminares de controle automático

## Objetivos

Conhecer conceitos básicos de controle automático.

Interpretar diagramas de blocos que representam sistemas de controle.

Identificar e conhecer malhas de controle e suas características.

## 1.1 Sistemas de controle

A engenharia de controle baseia-se no princípio da realimentação (ou retroação) e objetiva ao controle de determinadas variáveis de um sistema. Devido à combinação de conhecimentos que exige, pode-se dizer que é uma matéria interdisciplinar com aplicações em engenharia química, mecânica, aeronáutica, biomédica, entre outras. Especialmente em engenharia elétrica, o número de aplicações é extenso. O especialista em controle lida com a instrumentação ou hardware para medição e controle, técnicas de projetos para sistemas de controle, estratégias básicas de controle, comunicação digital, computação, programação e manutenção de sistemas de controle.

Dada a abrangência deste estudo, nesta aula vamos apresentar alguns conceitos básicos da teoria de controle e diagramas de blocos para interpretação gráfica de sistemas de controle em malhas abertas e fechadas.

## 1.2 Conceitos e noções preliminares

Para facilitar o entendimento de alguns termos do vocabulário comum desta disciplina, definições sucintas são dadas a seguir:

**Processo** – conjunto de atividades ou passos que objetivam atingir uma meta. Utilizado para criar, inventar, projetar, transformar, produzir, controlar, manter e usar produtos ou sistemas.

**Processos industriais** – procedimentos envolvendo passos químicos ou mecânicos que fazem parte da manufatura de um ou vários itens, usados em grande escala.

**Variável de processo** – qualquer grandeza ou condição de um processo que é passível de variação.

**Controle de processos** – técnica de manter variáveis de um processo (como temperatura e pressão) em valores predeterminados a partir de um procedimento que calcula correções proporcionais a uma ou mais variáveis que são medidas em tempo real por um determinado equipamento.

**Automação** – sistema automático de controle pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuando medições e introduzindo correções, sem necessidade de interferência do homem.

**Variável controlada** – variável sobre a qual o controle atua, no sentido de manter um determinado comportamento desejável no processo.

**Variável manipulada** – qualquer variável do processo que causa uma variação rápida na variável controlada e que seja fácil de manipular.

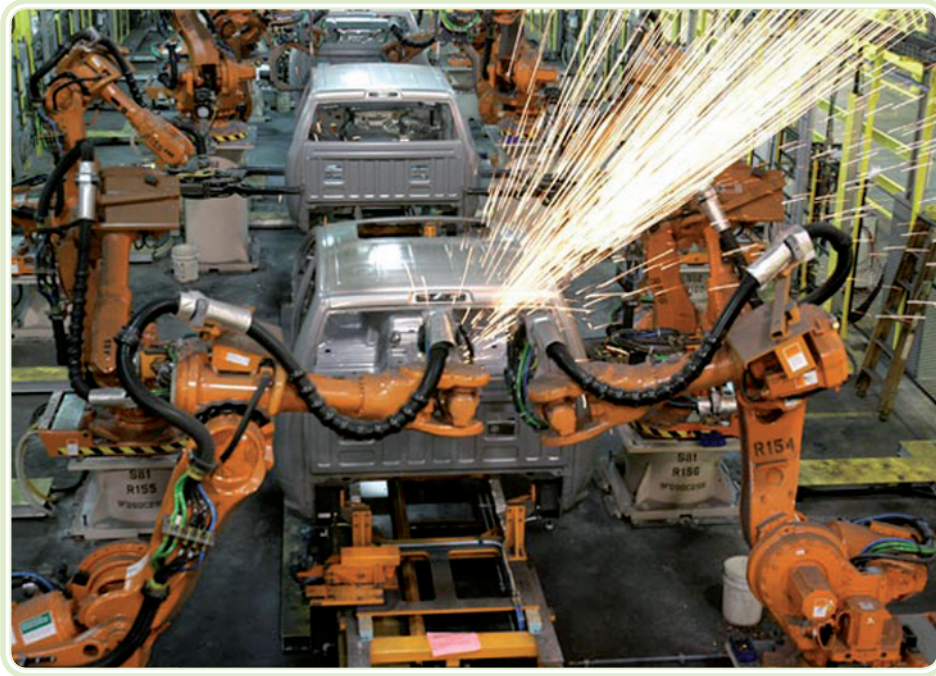
**Valor desejado (*setpoint*)** – sinal de entrada que estabelece o valor desejado da variável controlada. O *setpoint* e a variável controlada são expressos nas mesmas unidades.

Exemplo: Sistema de aquecimento de água a vapor para uma temperatura de 75°C.

- Variável controlada: temperatura da água
- Variável manipulada: vazão do vapor
- *Setpoint*: 75°C

Neste estudo, mais especificamente, vamos tratar do Controle Automático de Processos Industriais, em que técnicas são aplicadas ao controle e otimização de um determinado processo industrial. Exemplos: produção de aço (processos siderúrgicos), produção de celulose, extração e beneficiamento de minérios, refino de petróleo, entre outros.





**Figura 1.1: Indústria automotiva**

fonte: <http://g1.globo.com/noticias/carros/foto/0,,20603683-ex,00.jpg>

Podemos citar como objetivos operacionais do controle dos processos industriais:

- Adaptação a perturbações externas
- Adaptação às restrições dos equipamentos e materiais
- Aumento da estabilidade operacional
- Atendimento da especificação do produto
- Otimização do uso de recursos e matéria-prima
- Melhora nos resultados econômicos do processo;
- Segurança operacional e pessoal
- Redução do impacto ambiental.

No princípio da era industrial o operário procurava atingir os objetivos citados através de controles manuais em instrumentos como manômetro, termômetro e válvulas. Isso era suficiente devido à simplicidade dos processos. Com o passar

do tempo, os mesmos tornaram-se mais sofisticados, exigindo a automação através de instrumentos de medição e controle. Com isso, os operadores puderam se liberar da atuação física direta no processo. Simultaneamente, ocorreu a centralização das atividades em uma única sala de monitoramento e controle de processos.

A centralização das variáveis do processo possibilitou a fabricação de produtos que seria impossível por meio do controle manual. De fato, para atingir o nível de produção que as indústrias possuem hoje, o monitoramento e controle de processos sofreram grandes transformações tecnológicas, como controle mecânico e hidráulico, controle pneumático, controle elétrico, controle eletrônico, controle digital, além do controle manual.

Todos esses controles compartilham das mesmas estratégias básicas, que são duas: controle realimentado (*feedback*) e controle antecipatório (*feedforward*). Ou ainda, uma terceira que é a combinação das duas estratégias de controle para resolver problemas de estabilidade.

Na grande maioria dos casos é utilizada a estratégia de controle realimentado. Nesse caso, o valor de uma variável controlada é medido com um sensor e comparado ao valor desejado (*setpoint*). A diferença encontrada entre o *setpoint* e a variável controlada determina um erro ou desvio e é utilizada na definição da saída do controlador para ajustar uma variável manipulada.

Uma desvantagem do controle realimentado reside no fato de ele atuar somente após detectar um erro entre o valor da variável controlada e o *setpoint*. Idealmente seria melhor evitar que erros ocorressem. O controle antecipatório é baseado nesta filosofia.

Existe a possibilidade de modificar uma variável manipulada para prevenir, ou pelo menos minimizar, erros surgidos na variável controlada sempre que houver uma forma de prever variações de carga e de seus efeitos. Em qualquer controle antecipatório é necessário definir um modelo matemático que descreva adequadamente o processo e que leve em conta a relação entre as variáveis de carga e os respectivos efeitos na variável controlada.

Uma desvantagem do controle antecipatório é o fato deste não efetuar medições na variável controlada, dependendo exclusivamente da precisão da relação dos valores estabelecidos entre o *setpoint* e a variável manipulada. Uma forma de superar as desvantagens é a combinação das duas estratégias de controle.

Observe que uma variedade de erros pode surgir, por isso a escolha da variável do processo a ser manipulada é determinada pelas características do processo, por fatores econômicos e também de produção.

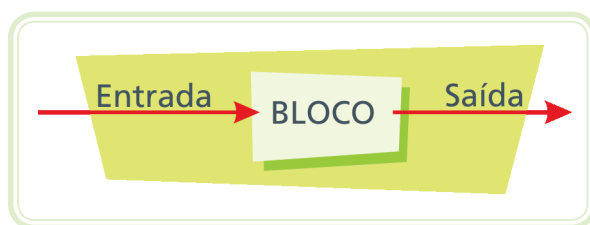
Diante disso, podemos concluir que a filosofia básica de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada do processo com o intuito de fazer com que o sinal de saída satisfaça certas especificações e/ou apresente um comportamento particular.

Um problema de controle consiste então em determinar os sinais adequados a serem aplicados a partir da saída desejada e do conhecimento do processo.

### 1.3 Diagrama de blocos

A análise de um sistema de controle pode mostrar-se uma tarefa difícil, uma vez que não raramente ele é composto por vários elementos. Para facilitar o entendimento, um processo pode ser adequadamente representado de forma simplificada por um **diagrama de blocos**.

Um diagrama de blocos apresenta uma abstração das funções desempenhadas por cada componente e um fluxo de sinais, veja a Figura 1.2.



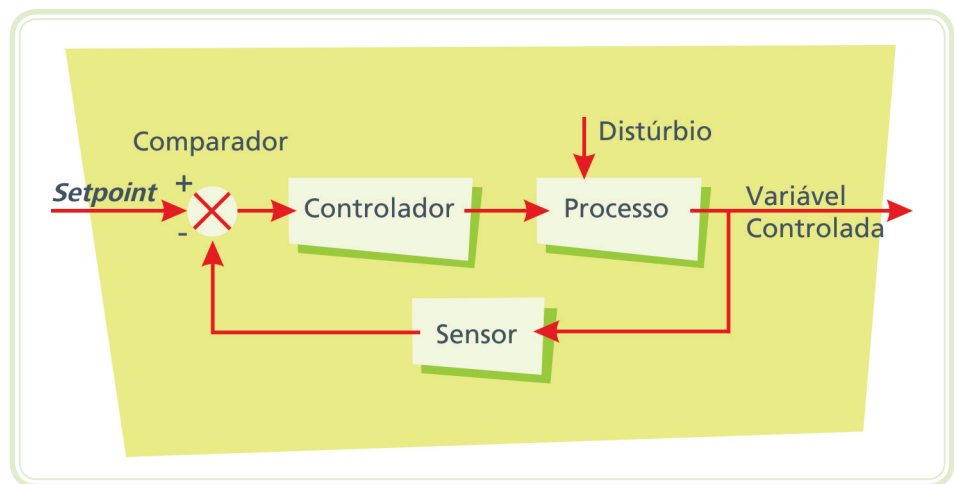
**Figura 1.2: Forma elementar**  
Fonte: CTISM

As setas identificam a direção da informação, e o bloco representa a operação a ser aplicada à entrada que proporciona a saída. O bloco pode ser identificado a partir de uma legenda, etiqueta ou símbolo do elemento.

O diagrama de blocos representado pela Figura 1.2 mostra o sistema como uma caixa preta, no qual não se conhecem detalhes internos e sim as relações entre um sinal de entrada (variável controlada) e o sinal de saída (variável controlada). Observe que esta abstração não necessariamente prejudica o entendimento, uma vez que vários sistemas totalmente diferentes podem apresentar comportamentos ou sinais de saída semelhantes.

O diagrama de blocos da Figura 1.3 apresenta os componentes principais de um sistema, integrados por meio de linhas que indicam os sentidos de fluxos de sinais entre os blocos. A partir deste diagrama é possível estudar as relações de dependência entre as variáveis que interessam à cadeia de controle.

No diagrama, o *setpoint* expressa a saída desejada (ou ideal) para o sistema, enquanto a variável controlada expressa o que realmente ocorre (saída real). O controlador gera o sinal de controle que atua sobre o processo no sentido de diminuir o erro  $e$ , idealmente, levar a zero.



**Figura 1.3: Diagrama de blocos de um sistema**

Fonte: CTISM

## 1.4 Controle em malha aberta e malha fechada

Os sistemas de controle são classificados em sistemas de controle em malha aberta e sistemas de controle em malha fechada. A diferença entre esses sistemas reside na forma em que o controle atua para produzir a saída desejada.

### 1.4.1 Sistemas em malha aberta

Num sistema em malha aberta, o sinal de entrada é um sinal predefinido, baseado em experiências passadas, de forma que o sistema forneça o sinal de saída desejado. Nesse sistema, não existe informação de realimentação e é possível corrigir o sinal de entrada de forma a alcançar um sinal de saída desejado.

Um exemplo prático desse tipo de sistema é o forno de micro-ondas. Após ter sido programada a função “descongelar”, com tempos pré determinados, não há possibilidade de verificar se ela foi efetuada de forma correta. Torna-se

necessário retirar o alimento e verificar se ele está nas condições desejadas pelo usuário.

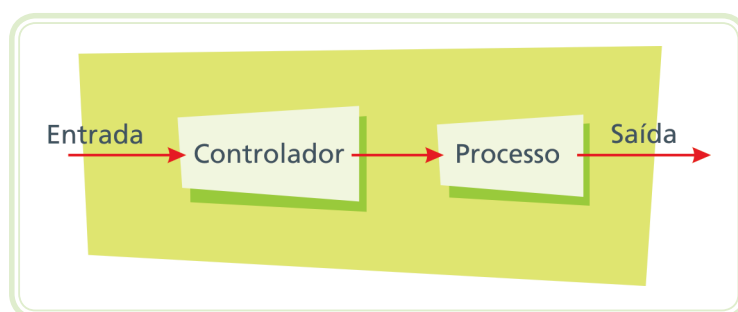
As principais vantagens desse tipo de malha são a simplicidade e o baixo custo. As desvantagens são a imprecisão devido à falta de realimentação.

Os elementos básicos de uma malha aberta são:

**Controlador** – composto por um elemento de controle e um elemento de correção que envia um ou mais sinais ao processo, conforme os ajustes predeterminados, para se obter a saída desejada.

**Processo** – sistema no qual a variável é controlada.

Um diagrama de bloco para esse sistema é apresentado na Figura 1.4.



**Figura 1.4: Sistema em malha aberta**

Fonte: CTISM

## 1.4.2 Controle em malha fechada

Num sistema em malha fechada o sinal de saída é realimentado, fazendo-se uma comparação com o sinal de entrada, o que gera um sinal corrigido que entra novamente no sistema de forma a alcançar o sinal de saída desejado.

Este tipo de malha apresenta como vantagens a compensação de erros, saída constante e robustez (menor sensibilidade a distúrbios). A complexidade e o maior custo são desvantagens.

Os elementos básicos de uma malha fechada são:

**Comparador** – compara o valor de referência com o valor medido na saída e gera um sinal de erro que indica o quanto o sinal de saída está longe do sinal de entrada.

**Controlador** – determina a ação a ser tomada com base no erro enviado pelo comparador.

**Atuador** – a partir do sinal recebido do controlador, atua sobre a variável manipulada para ajustar e alterar a variável controlada de modo a corrigir o erro.

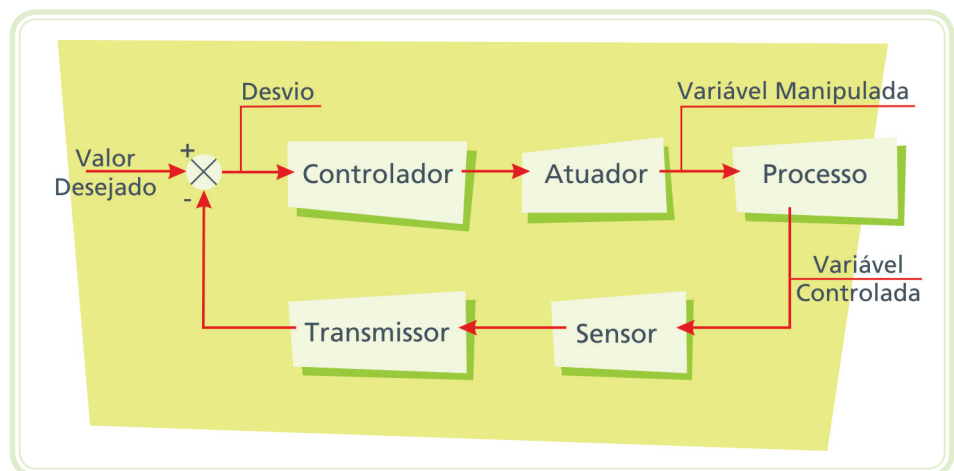
**Processo** – é o sistema no qual a variável está sendo controlada.

**Sensor** – lê a variável controlada na saída e envia sua condição na forma de sinal para o comparador, fechando o laço.



O sinal enviado por um sensor pode ser elétrico, digital, mecânico e outros.

Conforme mostra a Figura 1.5, um sensor lê informações da variável controlada e as transmite, através de um equipamento adequado para o comparador que calcula o desvio e que fornece informações necessárias para o controlador atuar sobre o processo.



**Figura 1.5: Sistema em malha fechada**

Fonte: CTISM

Os sistemas em malha fechada apresentam uma sensibilidade a mudanças de carga muito menor do que sistemas em malha aberta e são, conseqüentemente, muito mais estáveis que as malhas abertas. Para que um sistema em malha fechada consiga reduzir o erro no decorrer do tempo, ele deve ser capaz de gerar internamente, a partir de um sinal de perturbação, um sinal a fim de cancelá-lo.

## Resumo

Diagramas de blocos podem ser utilizados para representar um sistema de controle a partir de dispositivos abstratos que recebem entradas e produzem saídas como resposta a essas entradas.

O controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle pré determinado com a finalidade de que, ao final de um determinado tempo, a variável controlada atinja um valor ou determinado comportamento esperado.

No controle em malha fechada, é feita uma realimentação da saída para a entrada, de modo a determinar um sinal de controle a ser aplicado ao processo em um instante específico.

## Atividades de aprendizagem



1. O que é processo?
2. O que é processo industrial?
3. Qual é a diferença entre variável controlada (VC) e variável manipulada (VM)?
4. Como pode ser classificado um controle em relação a sua ação?
5. Dê um exemplo prático de um sistema de controle em malha aberta.
6. Faça um digrama de blocos para a questão anterior.
7. Dê um exemplo prático de um sistema de controle em malha fechada.





# Aula 2 – Estabilidade e algoritmos de controle

## Objetivos

Identificar processos estáveis e instáveis.

Conhecer e analisar as características de regime transitório e regime permanente.

Identificar algoritmos de controle em um processo industrial.

## 2.1 Perturbações e estabilidade

Um sistema controlado apresenta diferentes respostas a perturbações. Grandes variações na saída do processo podem ocorrer após a aplicação de uma nova entrada no sistema que lhe exige um tempo de acomodação ou reação. Após um determinado tempo, espera-se que o comportamento de saída do sistema permaneça estável.

Para manter o valor da variável controlada no *setpoint* são implementados algoritmos ou ações de controle que agem sobre o processo. A ação de controle para um processo depende de fatores como economia, precisão requerida, tempo de resposta do processo, segurança, sensores e atuadores disponíveis.

Nesta aula estudaremos a estabilidade de sistemas controlados considerando os regimes transitórios e permanentes, bem como os principais algoritmos. No decorrer dos estudos são evidenciados os princípios físicos envolvidos.

## 2.2 Estabilidade

Sistemas em malha aberta sempre são estáveis, já nos sistemas em malha fechada existe a possibilidade de instabilidade devido a atrasos no tempo.

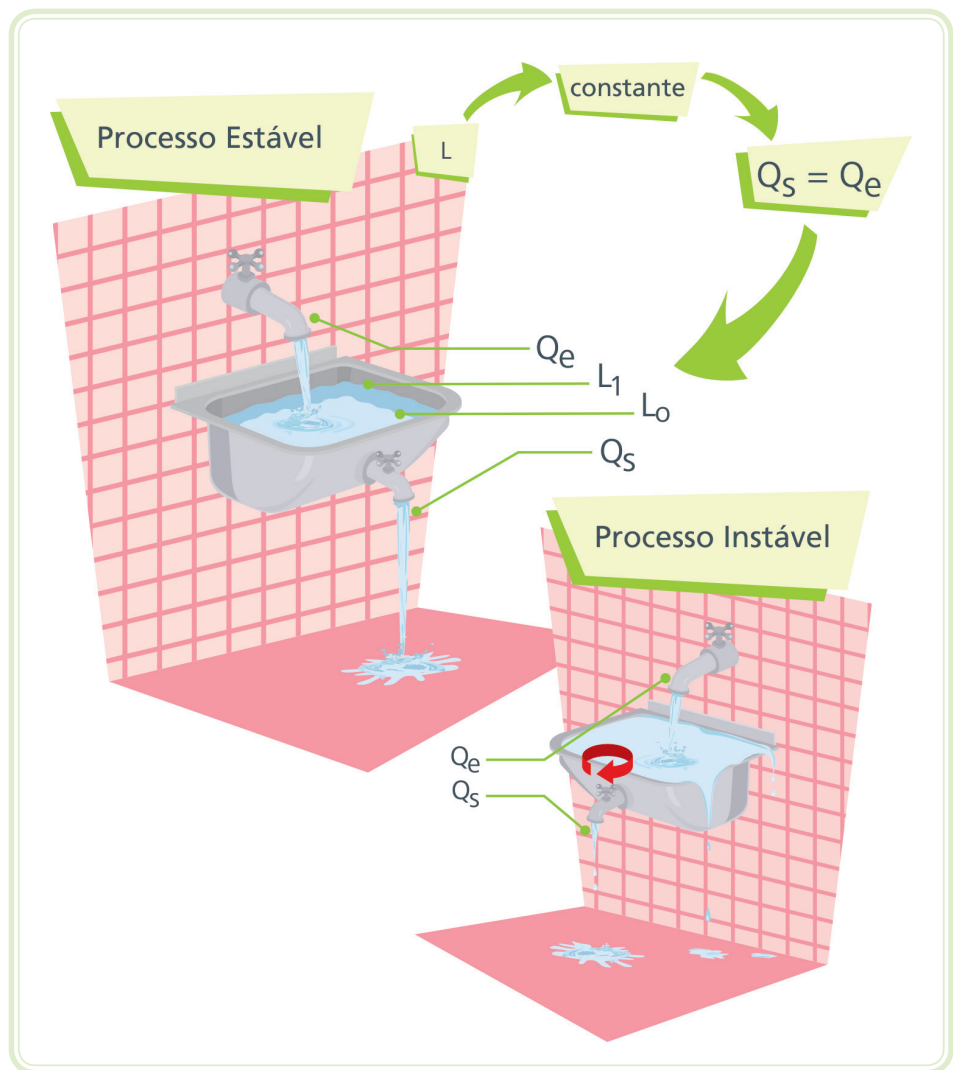
A estabilidade de um sistema pode ser definida de diversas maneiras e sob vários pontos de vista. Vamos considerar o conceito de BIBO-estabilidade (*bounded input-bounded output*, ou entrada limitada – saída limitada). De



Para saber mais sobre BIBO-estabilidade, acesse: [http://translate.google.com.br/translate?hl=pt-&langpair=en%7cpt&u=http://en.wikipedia.org/wiki/bibo\\_stability](http://translate.google.com.br/translate?hl=pt-&langpair=en%7cpt&u=http://en.wikipedia.org/wiki/bibo_stability)

acordo com esse conceito, um sistema é estável se, para todo sinal com amplitude aplicado na entrada, o sinal de saída também é limitado. Do contrário, se o sistema é instável, um sinal de amplitude limitada na entrada gera uma saída que divergirá com o passar do tempo, ou seja, a amplitude do sinal de saída tenderá a crescer indefinidamente.

Vamos considerar o nível  $L$  de um tanque, conforme a figura que segue. A vazão de saída  $Q_s$  é uma função do nível  $L$  ( $Q_s = k \cdot L$ ,  $k$  uma constante de proporcionalidade). Quando  $L$  é constante, significa que  $Q_s$  é igual à vazão de entrada  $Q_e$ . Se a válvula  $Q_e$  for aberta repentinamente (sinal degrau), o nível começará a aumentar provocando também um aumento na vazão de saída  $Q_s$ . Com o tempo, o nível estabilizará em um novo patamar  $L_1$  e, novamente, a vazão de saída  $Q_s$  será igual à vazão de entrada  $Q_e$ . Este é um processo estável.



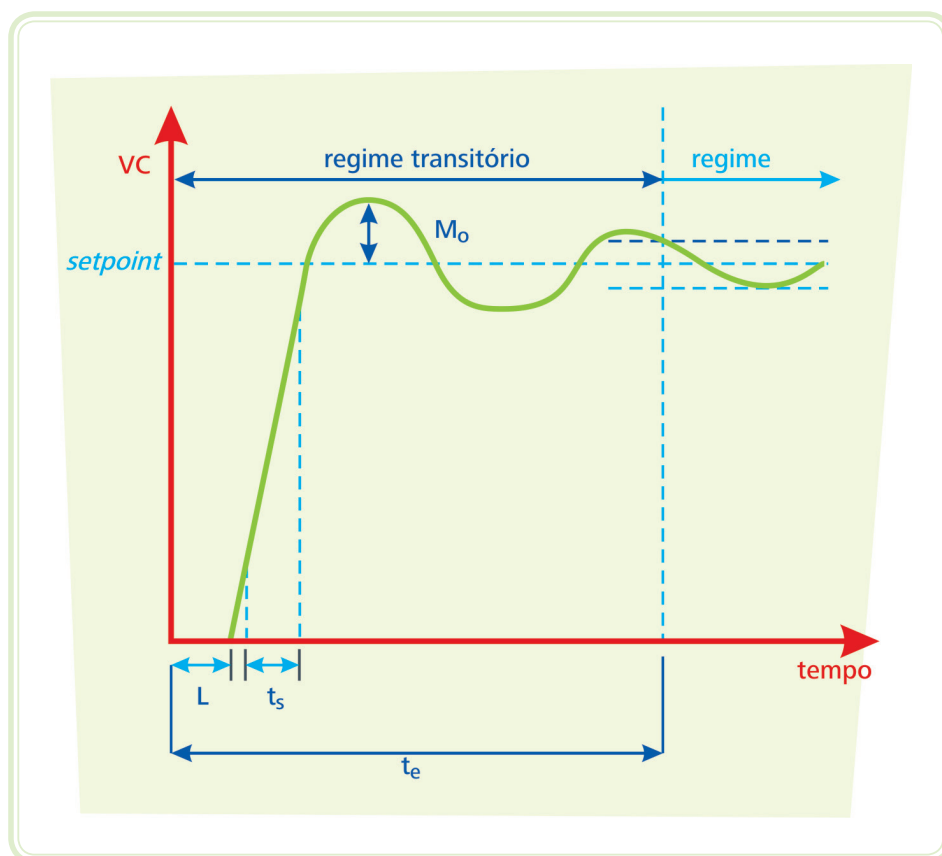
**Figura 2.1: Processo estável e processo instável**

Fonte: CTISM

Se modificarmos o processo anterior com escoamento natural por um forçado, ou seja, acrescentando uma bomba de vazão constante que limita  $Q_s$ , o nível não se estabilizará. Com isso, o processo passa a ser instável.

Uma resposta típica a uma alteração de carga pode ser decomposta em duas partes: regime transitório e regime permanente. O regime transitório é o período no qual, a partir de uma variação inicial, a variável controlada apresenta alterações. O projeto de um controle deve considerar características do regime transitório como tempo de subida, amplitude máxima da oscilação e tempo de acomodação. O regime permanente é o período a partir do qual a variável controlada converge para um valor ou comportamento aproximadamente constante. Nessa fase o objetivo é reduzir o erro.

O gráfico da Figura 2.2 ilustra os regimes transitório e permanente.



**Figura 2.2: Resposta a uma alteração de carga: regime transitório e regime permanente**  
Fonte: CTISM

Neste gráfico podemos identificar as seguintes características:

- **$M_o$  – pico da resposta ou *overshoot*.**

É o valor que a variável controlada ultrapassa o *setpoint* por ocasião da primeira oscilação. Normalmente é expresso em termos percentuais em relação ao *setpoint*.

- **$t_e$  – tempo de estabilização ou acomodação.**

Tempo que a variável controlada do processo demora para alcançar 95% de seu valor em regime permanente (*setpoint*). Quando a resposta do sistema é oscilatória, o tempo de estabilização corresponde ao tempo para a variável controlada se manter na faixa de  $\pm 5\%$  do *setpoint*.

- **$t_s$  – tempo de subida.**

Tempo decorrido para que a variável controlada vá de 10% até 90% do *setpoint*.

- **L – Atraso ou tempo morto.**

Tempo que o processo leva para começar a responder a uma variação na variável manipulada.

Para que um processo em malha fechada apresente oscilações é necessário que exista tempo morto. As oscilações serão tanto maiores quanto maior for o ganho do controlador, e o período de oscilação está relacionado exclusivamente aos valores de resistência, capacitância e valor de tempo morto inerentes ao processo. Em geral, quanto maior o tempo morto, mais difícil é o controle do processo. Entre as causas de ocorrência do tempo morto, podemos citar: atraso na medida da variável de processo, ou seja tempo que o sensor leva para sentir que houve efetivamente uma variação, atraso na operação do atuador e atraso na ação do próprio controlador.

Outro aspecto importante é o *overshoot* como indicativo da estabilidade relativa do sistema. Quanto maior seu valor menor a estabilidade relativa, isto é, mais próximo o sistema estará de apresentar um comportamento instável. Em muitas aplicações, como em controle de posição, por exemplo, picos de resposta são extremamente indesejáveis. Outro aspecto importante do regime transitório é o tempo morto.

Como exemplo, considere que você está dirigindo um carro e, obviamente, deseja permanecer dentro do traçado da estrada. Se por algum motivo o carro derrapar, é necessário corrigir a direção do carro. Esta correção geralmente demora um determinado tempo e é feita a partir de movimentos bruscos até que se consiga retomar o comportamento desejado. Observe que este é um sistema em malha fechada, e a derrapagem corresponde a uma perturbação no sistema.

As oscilações durante o tempo que se demora para retomar o domínio do carro (tempo de acomodação) caracterizam um regime transitório e, após a estabilização, obtemos o regime permanente. Mesmo no regime permanente, pequenas alterações na direção do carro podem ocorrer, demandando pequenas correções. Ainda neste exemplo, no que se refere à estabilidade, é fácil intuir que grandes desvios (*overshoot*) e demora em se obter uma resposta às correções (tempo morto) podem levar a uma situação fora de controle (instabilidade).

No gráfico da Figura 2.2, no regime permanente, o valor da variável controlada oscila com uma amplitude reduzida em torno do *setpoint*. Como se verá mais adiante, esse comportamento, em geral, é uma característica da ação de controle liga-desliga. O ideal é que não ocorra oscilação e, quando isto é estritamente necessário, ações de controle mais elaboradas devem ser utilizadas.

## 2.3 Conceitos e aplicação de algoritmos de controle

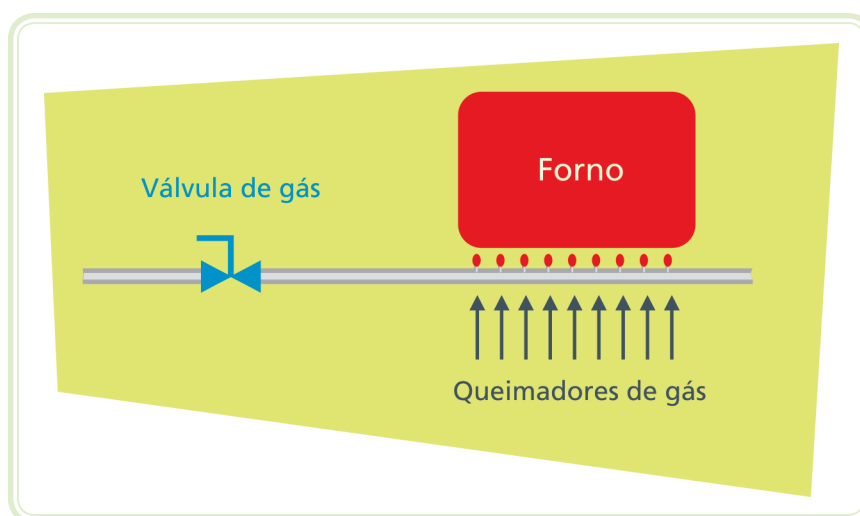
Conforme vimos, um problema de controle consiste em determinar sinais adequados para modificar ou não o valor de uma variável manipulada de um processo, a fim de se obter uma saída desejada. Para tanto, ao efetuarmos a medição de uma variável controlada, comparamos o valor obtido com o valor desejado. O erro é, então, processado em uma unidade denominada unidade de controle. O processamento é feito a partir de diferentes tipos de cálculos matemáticos (algoritmos) que determinam a ação de controle e, conseqüentemente, os efeitos corretivos no processo.

Existe uma enorme gama de controladores comerciais no mercado, cada uma com suas vantagens e desvantagens em relação a sua função. Aqui são apresentados quatro tipos de ações básicas de controle que podem ser utilizados isoladamente ou associados:

- Ação liga-desliga (*on-off*)
- Ação proporcional (P)
- Ação integral (I)
- Ação derivativa (D)

A compreensão física destas ações é de fundamental importância para um perfeito entendimento desses algoritmos.

Vamos considerar um exemplo simples para demonstrar a ideia básica de como um controle automático atua sobre um típico processo industrial. Observe a Figura 2.3 e imagine que a válvula que controla o gás que alimenta os queimadores do forno está desligada por um longo tempo. Devido a isso, o sistema apresenta temperatura constante próxima à temperatura ambiente, neste exemplo 25°C. Se a válvula do gás é manualmente aberta em 80% do fluxo total, uma grande quantidade de calor começa a entrar no forno e, inicialmente, a temperatura passa para 67°C. Como a temperatura ambiente permanece em 25°C, as leis da física estabelecem que, nessas condições, uma quantidade de calor do forno é cedido para o ambiente. Além disso, quanto maior a diferença mais calor é cedido. Nosso exemplo mostra que a temperatura continua aumentando até que a perda de calor para o ambiente seja compensada pelo calor fornecido pelos queimadores e a temperatura se estabilize em 175°C.



**Figura 2.3: Diagrama de forno industrial**  
Fonte: CTISM

Vamos considerar agora que a temperatura do ambiente, por qualquer razão, aumente para 27°C. Com a diferença de temperatura entre o forno e o ambiente, também diminui o fluxo de calor do primeiro para o segundo. Nessas condições, a temperatura do forno aumenta novamente e estabiliza em 176°C. Para fazer com que a temperatura volte aos 175°C é necessário fazer com que o calor trocado entre o forno e o ambiente interfira mais fortemente na temperatura final do forno. Para tanto, é necessário reduzir manualmente o fluxo de gás através de um novo ajuste da respectiva válvula.

Observe que dependendo da variação da diferença de temperatura é necessário ajustar a válvula de modo a aumentar ou diminuir o fluxo de gás. Para facilitar a compreensão é necessário entender o conceito de “ganho” nesse contexto que é calculado a partir do quociente entre a taxa de mudança na saída e a taxa de mudança na entrada. Nesse caso, a taxa de saída é representada pela variação na temperatura do forno, e a taxa de entrada é representada pelo fluxo de gás que alimenta os queimadores.

A partir do que foi exposto, o objetivo do nosso estudo é substituir o controle manual por um controle automático que utiliza um ou mais dos algoritmos que serão descritos na próxima aula.

## Resumo

Um sistema é estável se, para todo o sinal com amplitude aplicado na entrada, o sinal de saída também for limitado. Ao contrário disso, se o sistema é instável, um sinal de amplitude limitada na entrada gera uma saída que, com o passar do tempo, tende a crescer indefinidamente.

O período no qual, a partir de uma variação inicial na variável manipulada, a variável controlada apresenta alterações corresponde ao regime transitório. O regime permanente é a fase após o transitório, durante o qual a saída permanece quase estável (controlada).

Os aspectos de estabilidade de malha fechada como a velocidade de resposta, o erro em regime permanente e o ganho no controle podem ser observados pela evolução dos sinais de saída.

Em sistema controlado, o processamento do erro é feito a partir de diferentes tipos de algoritmos que determinam a ação de controle que determinam os efeitos corretivos no processo.



## Atividades de aprendizagem

1. Dê um exemplo e descreva o comportamento de um processo instável.
2. Dê um exemplo de um sistema de controle em malha fechada estável.
3. Uma das características necessárias para que um sistema em malha fechada apresente oscilação é:
  - a) Tempo morto.
  - b) Sinal de saída estável.
  - c) Tempo de subida.
  - d) Ganho nulo.
4. Que características do regime transitório podem levar à instabilidade?
5. Exemplifique um processo no qual você atua como controlador. Evidencie a variável manipulada e a variável controlada. O que é necessário para que o processo fique instável?



# Aula 3 – Ação liga-desliga (*on-off*) e ação proporcional (P)

## Objetivos

Compreender o comportamento da ação de controle liga-desliga.

Compreender o comportamento da ação de controle Proporcional.

## 3.1 Ações básicas de controle

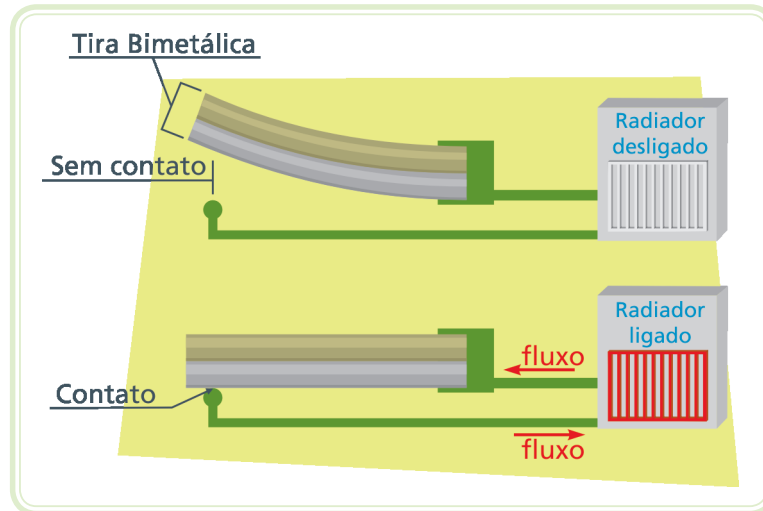
Usualmente, sistemas de controle sofrem a ação de distúrbios, como atrito e folgas. Esses distúrbios podem ser representados como sinais de entrada no sistema que afetam diretamente o sistema a ser controlado. Para manter o valor da variável controlada no *setpoint* são implementados algoritmos ou ações de controle que agem sobre o processo.

Nesta aula vamos estudar as ações de controle liga-desliga e proporcional.

## 3.2 Ação liga-desliga (*on-off*)

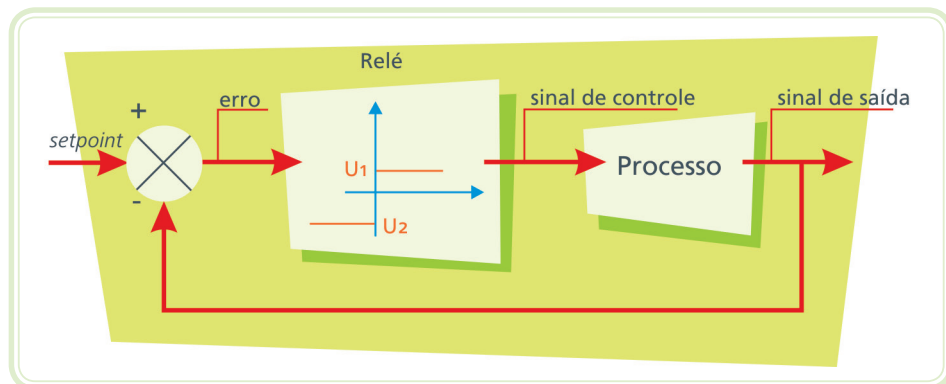
Em muitos sistemas básicos o controle pode ser efetuado a partir de uma simples chave liga-desliga que é acionada/desacionada, por exemplo, a partir de uma determinada temperatura ou nível do reservatório. Nesse tipo de ação, o controlador compara o sinal de entrada com a realimentação e, se a saída superar a entrada, desliga o atuador; se a realimentação for menor, liga o atuador.

Refrigeradores são exemplos nos quais um termostato controla o compressor, que é um controlador liga-desliga com par bimetálico. Quando a temperatura fica abaixo de um determinado valor, um dos metais se dilata mais que o outro, vergando-se e abrindo o contato, o que leva o compressor a se mudar, e algum tempo depois o bimetálico retorna à posição original, fechando o contato e ligando o compressor novamente. A Figura 3.1 exemplifica este processo.



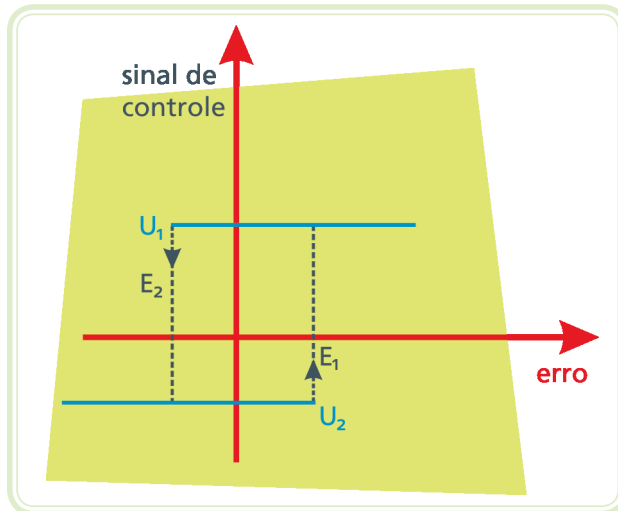
**Figura 3.1: Representação do funcionamento de um controlador liga-desliga com bimetálico**  
 Fonte: CTISM

Esta é a ação de controle mais básica e, geralmente, o controlador é modelado por um relé, conforme o diagrama de blocos representado na Figura 3.2.



**Figura 3.2: Diagrama de blocos de um controlador liga-desliga**  
 Fonte: CTISM

O sinal de controle assume apenas dois valores, de acordo com um erro positivo ou negativo. Para evitar uma perturbação devida a ruídos para valores próximos a zero, utilizamos um controlador liga-desliga com histerese. O comportamento deste controlador é representado na Figura 3.3. Observe que é necessário que o erro fique abaixo de  $E_2$  para que haja um chaveamento de  $U_1$  para  $U_2$ . De forma similar, é necessário que o erro ultrapasse  $E_1$  para que haja um acionamento para  $U_1$ .



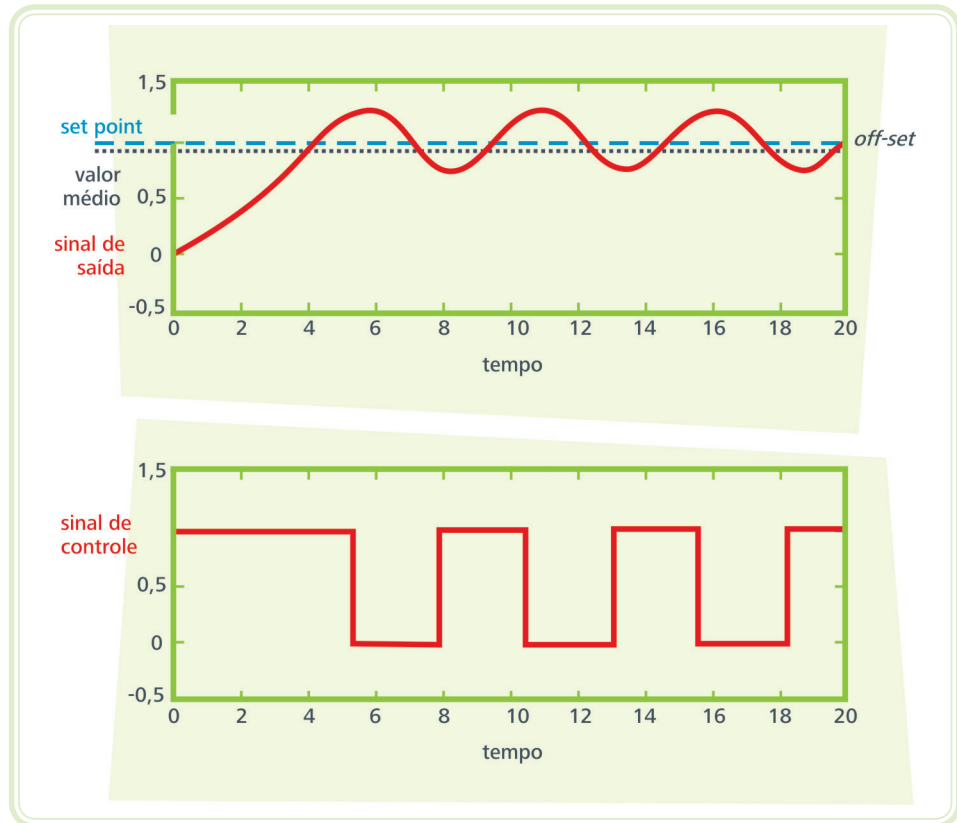
**Figura 3.3: Curva de histerese**

Fonte: CTISM

Para melhor entender a curva de histerese, considere o exemplo do forno. Imagine que o objetivo do controle é manter a temperatura constante em 175°C e que, devido a alterações na temperatura ambiente, seja introduzida uma pequena variação de temperatura, possivelmente entre 174°C e 176°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Nessa situação, a válvula seria constantemente acionada para ligar e desligar, o que pode ocasionar dano físico. A histerese retarda o sinal, e a válvula que controla o gás é acionada quando a temperatura cai abaixo da temperatura mínima estipulada, como 170°C e só desligará quando a temperatura ultrapassar a temperatura máxima, como 180°C.

A curva que representa a resposta em malha fechada com o respectivo sinal de controle para a ação liga-desliga com histerese é apresentada na Figura 3.4. Observe que no regime permanente o sinal de saída oscila em torno do *setpoint*. Essa oscilação varia em frequência e amplitude por causa do intervalo entre as ações e também pela variação da carga. Com isso, o valor médio da grandeza sob controle será sempre diferente do valor desejado, provocando o aparecimento de um desvio residual denominado *off-set*.

As vantagens deste controlador são a simplicidade e o baixo custo. A desvantagem reside na contínua oscilação da saída entre os limites de atuação do controlador conhecida como histerese. Esta inerente instabilidade é devida à inexistência de uma realimentação negativa para diminuir o seu ganho que, teoricamente, é infinito. A oscilação não garante precisão e pode desgastar o controlador e o atuador pelo excesso de partidas.



**Figura 3.4: Diagrama de blocos de um controlador liga-desliga**

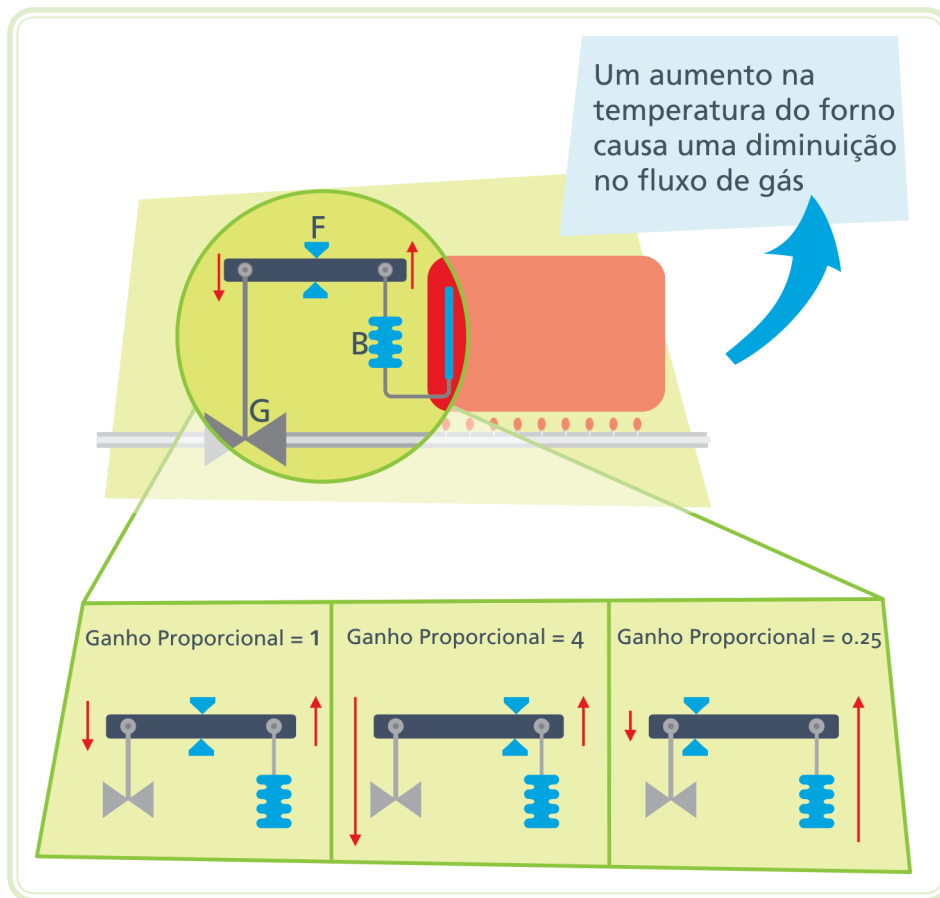
Fonte: CTISM

### 3.3 Ação proporcional (P)

A ação proporcional de controle pode ser considerada uma evolução do modo de controle liga-desliga.

Esse tipo de ação atua conforme o valor do erro. Voltando para o exemplo do forno descrito anteriormente, a Figura 3.5 apresenta um mecanismo para controlar a válvula de gás. Especificamente, adicionamos um controle proporcional.

O mecanismo é constituído por uma pequena haste de metal que faz a função de uma alavanca conectada em uma das extremidades a um bulbo com um fluido no seu interior. Na outra extremidade é conectada à válvula. Sempre que o líquido receber calor e se expandir alterará a posição da alavanca e o ajuste da válvula. Esse movimento é linear num intervalo definido na confecção do mecanismo, como comprimento da haste e dimensões do bulbo. Dito de outra forma, a válvula é ajustada proporcionalmente à amplitude do erro.



**Figura 3.5: Mecanismo de controle proporcional**

Fonte: CTISM

A palavra proporcional tem o mesmo significado que relação ou razão.

Se o ponto de apoio é posicionado no centro da haste de metal, a relação é de 1 para 1, ou seja, a variação do fluxo da válvula será igual a variação do erro. Em termos técnicos dizemos que o ganho proporcional é igual a 1.

Vamos considerar agora que o ponto de apoio é deslocado para a esquerda, a uma distância de  $\frac{1}{4}$  do comprimento total em relação à extremidade ligada à válvula. Nesse caso, a relação é de 1 para 4 entre a variação do erro e o ajuste da válvula, ou seja, o ganho proporcional é igual a 4.

Seguindo essa mesma lógica, quando o ponto de apoio é deslocado para esquerda a uma distância de  $\frac{1}{4}$  do comprimento total em relação a extremidade, a relação é de 4 para 1 e o ganho proporcional de 0,25.

Não é difícil concluir que a relação entre a variação máxima da grandeza a ser controlada, no caso a temperatura, e o curso total da válvula depende,

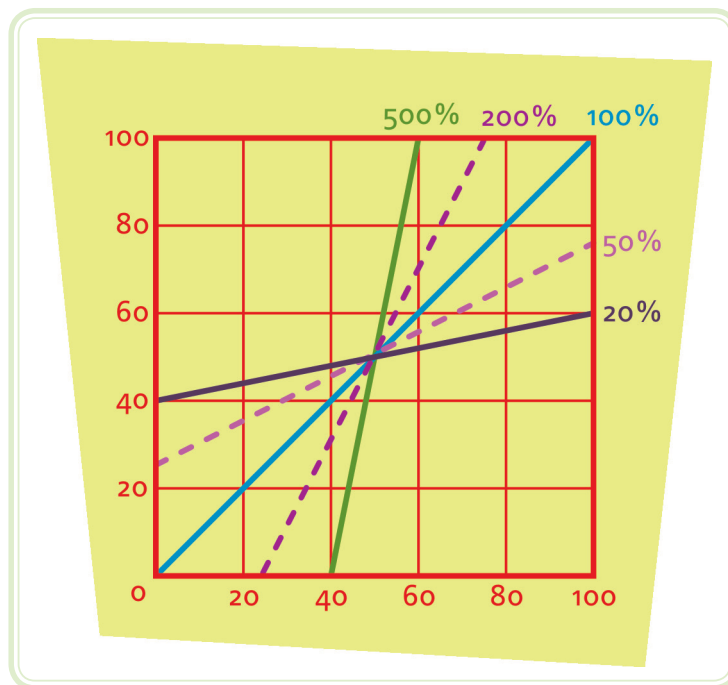
nesse caso, do ponto de apoio escolhido. Este ponto de apoio vai determinar uma relação de proporcionalidade.

Esse tipo de mecanismo pode parecer primitivo e antiquado, mas é necessário lembrar que os sistemas modernos usados atualmente utilizam os mesmos conceitos básicos.

Observe que existe uma faixa proporcional ou banda proporcional que é a faixa na qual a proporcionalidade é mantida. Neste exemplo é representado pelo deslocamento máximo da alavanca. A saída de um controlador proporcional pode assumir qualquer valor, desde que compreendido entre os limites de saídas máxima e mínima.

Mais formalmente, a faixa proporcional é a porcentagem de oscilação da variável controlada capaz de produzir abertura ou fechamento total da válvula. Para uma faixa proporcional de 20%, uma variação de 20% no desvio em relação ao *setpoint* levará a válvula a um dos extremos, ou seja, ficará totalmente aberta ou totalmente fechada, quando o erro variar em 20% da faixa de medição.

O gráfico da Figura 3.6 mostra a relação entre a abertura da válvula e a variável controlada (temperatura).

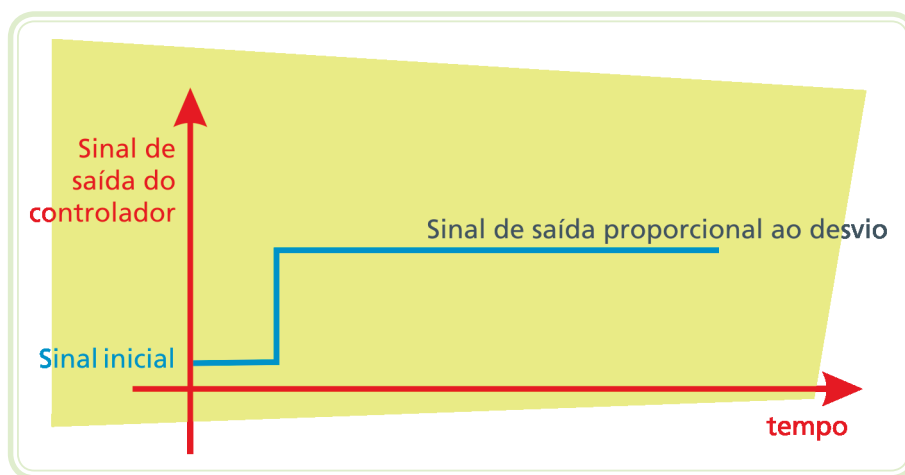


**Figura 3.6:** Faixas de proporcionalidade com os respectivos ganhos  
Fonte: CTISM

É possível observar que, em um dos casos, quando a abertura da válvula varia de 40% a 60% da capacidade total, a correspondente oscilação na variável controlada é de 0% a 100% respectivamente. Essa relação corresponde a um ganho de 500%. De forma semelhante, observamos que, quando a abertura da válvula varia de 0% a 100%, e a variação na variável controlada é de 40% a 60%, o ganho é de 20%.

Observou-se que na ação liga-desliga, quando a variável controlada se desvia do *setpoint*, o controle oscila com um sinal brusco de liga (*on*) para desliga (*off*). O controle proporcional, foi desenvolvido para evitar essa oscilação e para produzir uma ação corretiva proporcional ao valor do desvio.

Para um melhor entendimento, a Figura 3.7 apresenta a resposta da ação proporcional em malha aberta, quando é aplicado um desvio em degrau no controlador.

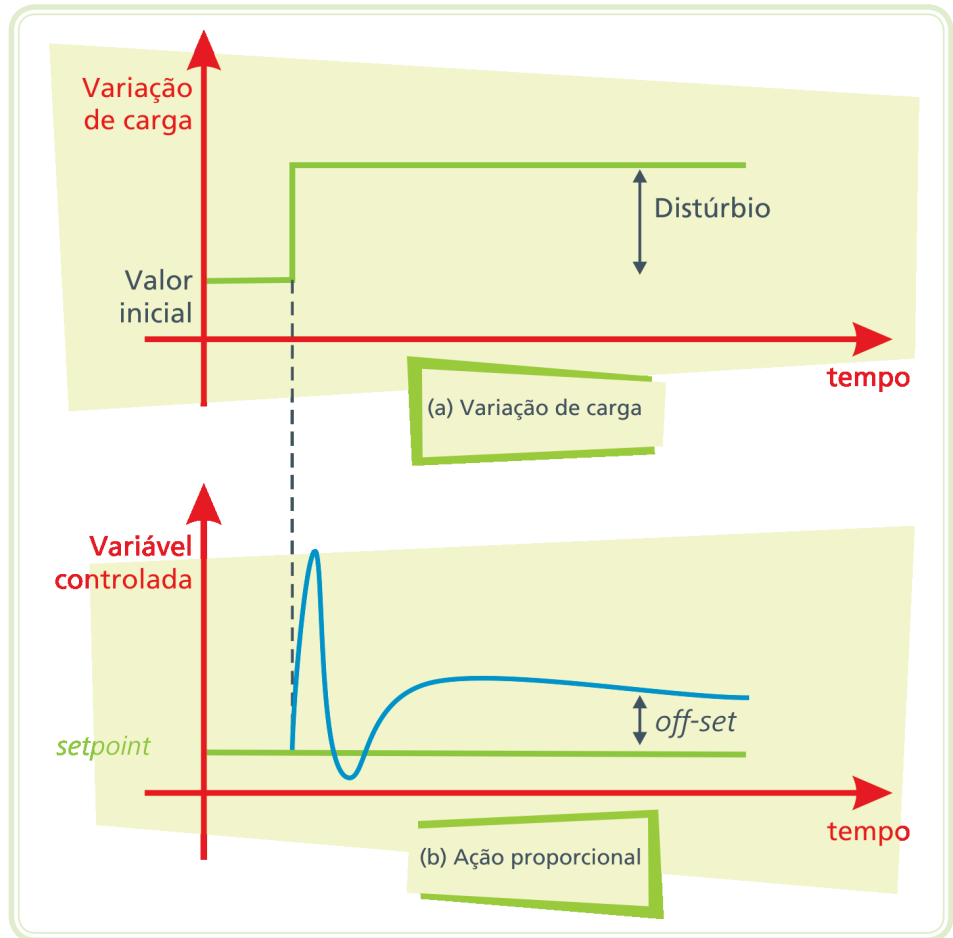


**Figura 3.7: Resposta da ação proporcional em malha aberta**

Fonte: CTISM

Observe que existe um sinal inicial do controlador mesmo com desvio zero cuja finalidade é a de manter a variável controlada no valor desejado (*setpoint*). Quanto ocorre um desvio repentino no valor da variável controlada (sinal degrau) o sinal de controle varia proporcionalmente ao desvio, ou seja, de acordo com o ganho.

Embora a ação proporcional elimine as oscilações no processo do controle liga-desliga em malha fechada, não é possível eliminar o erro de *off-set*, visto que após um distúrbio qualquer no processo persiste uma diferença entre o *setpoint* e o valor medido. No exemplo do forno, um distúrbio de temperatura repentino provocado pela abertura de uma janela ou porta, causa uma reação de controle sobre o ajuste na válvula de gás. Na Figura 3.8 é apresentado o distúrbio inflingido ao sistema, no caso a variação de temperatura.



**Figura 3.8: Representação do controle em uma variação de carga pela ação proporcional**  
 Fonte: CTISM

O erro *off-set* ocorre devido às novas condições de equilíbrio que acontecem após o sinal do controlador proporcional atuar. Suponha que a válvula de gás esteja aberta em 80% e que a variável controlada (temperatura) esteja igual ao valor desejado, 175°C. Se ocorrer uma variação de carga fazendo com que a temperatura aumente, a válvula é fechada proporcionalmente a essa variação, até que o sistema entre em equilíbrio novamente. Como houve alteração na quantidade de temperatura cedida/recebida do ambiente e quantidade de gás enviada para os queimadores, as condições de equilíbrio sofreram alteração e ele será conseguido em outra posição. Este novo ponto de equilíbrio implica em uma diferença entre os valores medidos e desejados (*off-set*). Esta diferença permanece constante enquanto nenhum outro distúrbio ocorrer.

Neste exemplo, quando a variável controlada apresenta um valor maior do que o *setpoint*, ou seja, *off-set* positivo, a saída do controlador diminui, o que caracteriza ação de saída reversa.



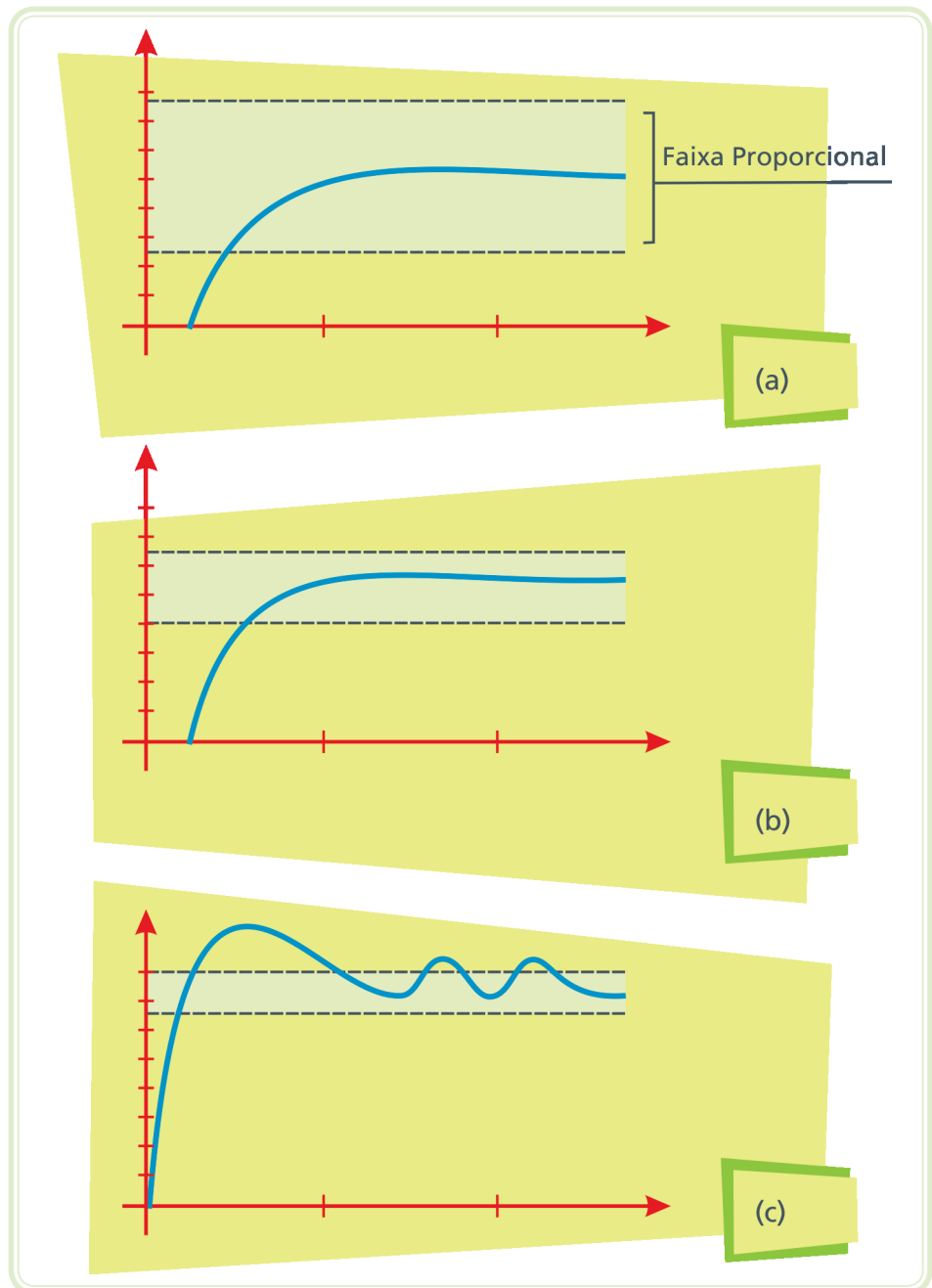
Em outros sistemas o controlador pode aumentar a saída para corrigir um *off-set* positivo, a isso denominamos ação de saída direta.

Em resumo:

Ação direta	<i>off-set</i> mais positivo → saída aumenta
	<i>off-set</i> mais negativo → saída diminui
Ação reversa	<i>off-set</i> mais positivo → saída diminui
	<i>off-set</i> mais negativo → saída aumenta



O valor do erro *off-set* depende diretamente da faixa proporcional e também do tempo morto inerente ao sistema. À medida que a faixa proporcional diminui o erro, tende a ser menor. No entanto, isso aumenta a possibilidade do aparecimento de oscilações semelhantes à ação liga-desliga. Veja o efeito da faixa proporcional na Figura 3.9.



**Figura 3.9: Efeito da redução da faixa proporcional no comportamento do *setpoint***  
 Fonte: CTISM

A principal vantagem deste controlador é a eliminação das oscilações provocadas pelo controle liga-desliga devido à correção proporcional ao desvio. Uma desvantagem é o aparecimento do erro de *off-set* sempre que ocorrer variação de carga. Esta ação é especialmente útil quando grandes variações de carga no processo são improváveis e podem-se tolerar pequenos erros de *off-set*. O controlador também é útil em processos com tempo morto pequeno

no qual o ganho do controle pode ser alto (faixa proporcional pequena) para gerar um menor erro de *off-set*.

O controle proporcional responde imediatamente quando detecta um sinal de erro e daí inicia sua ação corretiva. É um dos tipos de controle mais fáceis de serem utilizados, pois requer somente o ajuste do ganho.

## Resumo

Um sistema de controle tipo liga-desliga possui um elemento de atuação com apenas duas posições, ou seja, o dispositivo fornece apenas dois valores na saída. A grande utilização desse tipo de controlador pode ser justificada pela simplicidade da sua construção e pelo seu baixo custo.

O controlador proporcional fornece energia ao processo com valor proporcional à diferença entre o *setpoint* e o valor da variável controlada. Em outras palavras, na presença de erro nulo a grandeza a ser controlada está estabilizada, não necessitando, portanto, de nenhuma atuação do controlador, e a partir do momento que houver diferença, o controlador atua, com valor tanto maior, à medida em que o erro for maior.

Esse tipo de controlador é ainda relativamente simples e de baixo custo, porém em alguns casos, dependendo do processo a ser controlado, pode apresentar o chamado erro de regime permanente (*off-set*), com a tendência do valor permanecer pouco abaixo do ponto de controle, prejudicando a precisão desta ação.

## Atividades de aprendizagem

1. Qual a importância da histerese em um controlador do tipo duas posições?
2. Exemplifique um controle duas posições sem histerese.
3. Quais as vantagens e desvantagens da ação de controle proporcional?
4. Assinale a alternativa correta para um sistema com ação de controle proporcional.
  - a) O valor do *off-set* não depende da faixa proporcional e do tempo morto.



- b) O erro tende a ser menor à medida que a faixa proporcional diminui.
  - c) À medida que a faixa proporcional diminui, a possibilidade do aparecimento de oscilações também diminui.
  - d) A principal vantagem deste controlador é a eliminação do erro no regime permanente.
5. Defina faixa proporcional.

# Aula 4 – Ação integral (I) e derivativa (D)

## Objetivos

Compreender o comportamento da ação de controle integral e derivativa.

### 4.1 Ação integral e derivativa

Como sabemos, ainda que a ação de controle proporcional não apresente oscilações no regime permanente, ela tem como característica o erro de *off-set*. Para entender como eliminar esse erro é necessário estudar a ação de controle integral.

Também é importante considerar mecanismos para corrigir o *off-set* antes que o seu valor se torne demasiadamente grande. Para tanto, vamos estudar a ação de controle derivativa.

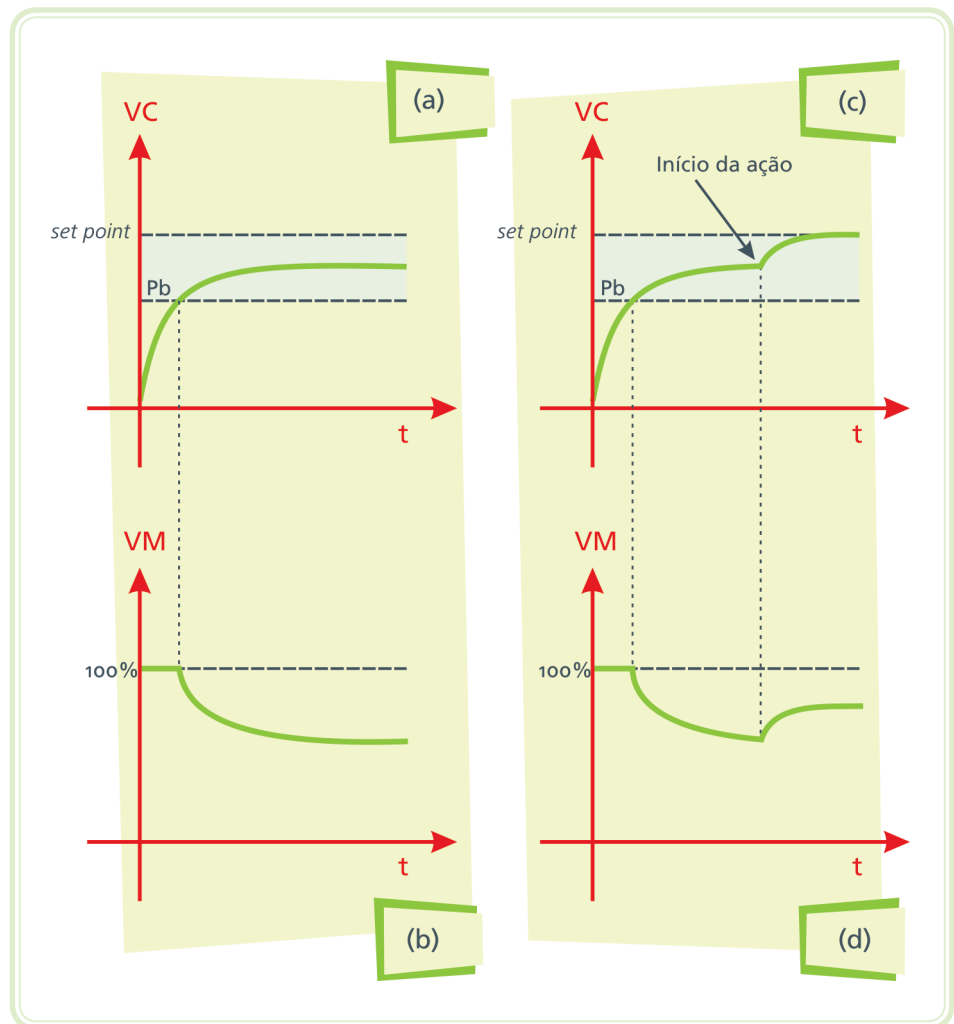
### 4.2 Ação integral (I)

Uma forma de eliminar o erro de *off-set* da ação proporcional é reajustar o valor do *setpoint*. Ainda no exemplo do forno, suponhamos que a temperatura, após a ação proporcional, está 10°C abaixo do valor desejado de 175°C. Uma forma de corrigir essa discrepância é ajustar o *setpoint* para 185°C, com o objetivo de aproximar o valor da variável controlada para 175°C. Obviamente, este processo é inexato e demorado, além de necessitar de um controle manual. O modo integral executa automaticamente o reajuste para eliminar o *off-set*.

A ação integral atua no processo ao longo do tempo enquanto a diferença entre o valor desejado (*setpoint*) e o valor mensurado persistir. Diferentemente da ação proporcional que corrige os erros instantaneamente, o sinal de correção age de forma lenta até eliminar por completo o *off-set*. Quanto mais tempo o desvio perdurar, maior será a saída do controlador.

A ação integral não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregada estando separada de uma ação proporcional.

Para compreender melhor, consideremos um processo estabilizado com um controle proporcional, conforme se apresenta na Figura 4.1.

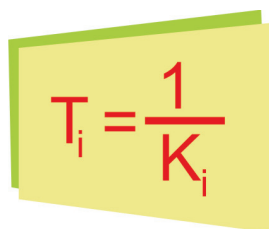


**Figura 4.1: Efeito da ação integrativa na redução do off-set**

Fonte: CTISM

Na Figura 4.1(b), observamos o efeito da ação proporcional na variável manipulada (VM) e o respectivo resultado na variável controlada VC (Figura 4.1(a)). Como já vimos, após a ação proporcional, um novo ponto de equilíbrio é obtido. Ainda na figura, a ação integral começa agir com o respectivo resultado representado em (c) e (d). Observemos que a resposta da ação integral aumenta enquanto o desvio estiver presente e, com menor intensidade, quando o desvio for pequeno. No exemplo do forno, o gráfico (d) representa um aumento do fluxo de gás para aumentar a temperatura do forno de modo a alcançar o valor desejado.

A ação integral corrige o valor da variável manipulada (Figura 4.1(b)) em intervalos regulares, somando a esta o valor do desvio em relação ao *setpoint*. Este intervalo de atuação se chama tempo integral, que pode também ser expresso por seu inverso, chamado ganho integral ou taxa integral. Matematicamente, a relação é expressa por:


$$T_i = \frac{1}{K_i}$$

Onde,  
 $T_i$  = tempo integral  
 $K_i$  = ganho integral

Dada esta relação, o aumento do tempo integral ocorre quando o ganho integral diminui, o que leva a uma atuação mais demorada do controle no processo.

A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro de *off-set* em regime permanente, e a adoção de um tempo integral excessivamente longo pode levar o processo à instabilidade. Por sua vez, a adoção de um tempo integral curto retarda em demasia a estabilização. Quanto maior o desvio, maior será a velocidade de correção. No entanto, como também depende do tempo, a resposta é lenta e, por isso, desvios grandes em curtos espaços de tempo não são devidamente corrigidos. Dá-se, portanto, a necessidade de associar esta ação à ação proporcional.

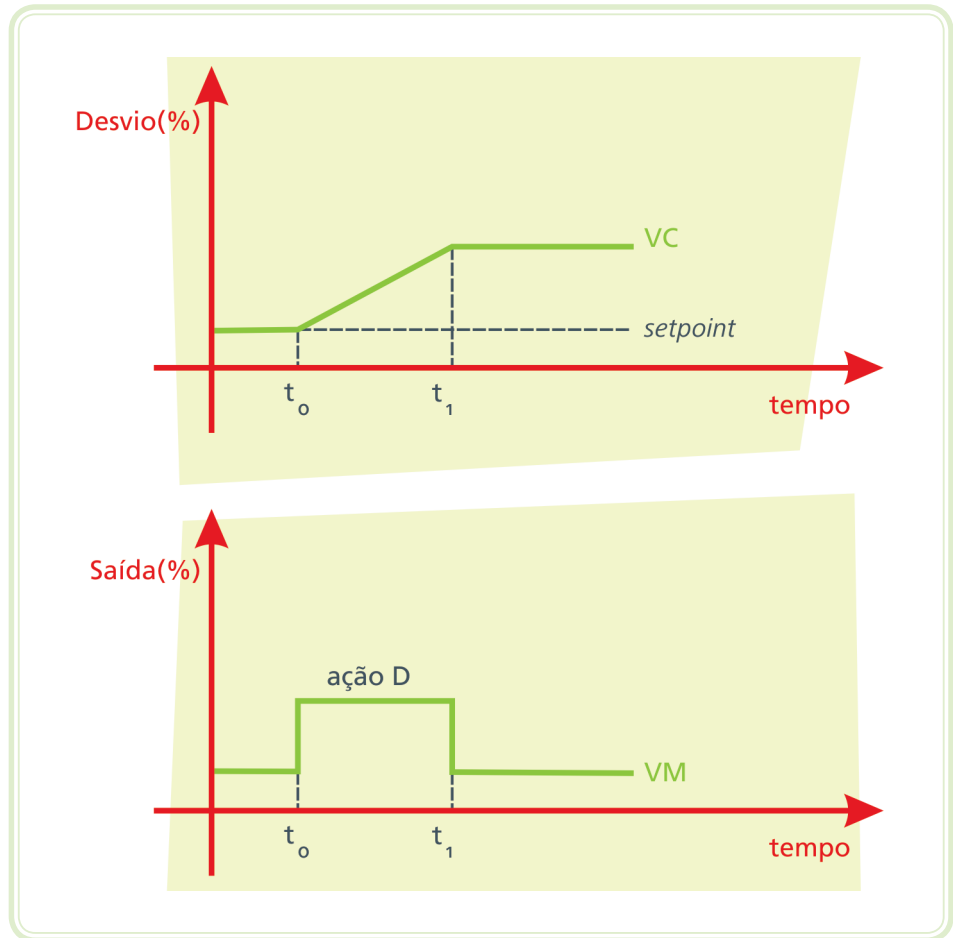
Outra característica que merece atenção é a de que, enquanto o desvio não mudar de sentido, a correção (no caso, o ajuste da válvula) não mudará de sentido, o que combinado com o tempo morto e o tempo integral pode levar o sistema à instabilidade.

### 4.3 Ação derivativa (D)

A ação derivativa não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregada separadamente de uma ação proporcional. A ação derivativa atua na variável manipulada proporcionalmente à velocidade de variação do desvio. O objetivo é diminuir a velocidade das variações de variável controlada, evitando que se eleve ou se abaixe muito rapidamente.

O princípio básico reside em proporcionar uma correção antecipada do desvio, isto é, na presença de uma tendência súbita de aumento no desvio, a ação derivativa atua de forma preventiva, diminuindo o tempo de resposta.

A ação derivativa calcula, a intervalos regulares, a variação do desvio do processo, somando o valor desta variação à variável manipulada. A intensidade da ação é ajustada variando-se o intervalo de cálculo da diferença. Este parâmetro é chamado tempo derivativo ou ganho derivativo. Quando o tempo derivativo aumenta, a velocidade de variação da variável controlada é reduzida. A Figura 4.2 apresenta gráficos que exemplificam o comportamento característico da ação derivativa no controle.

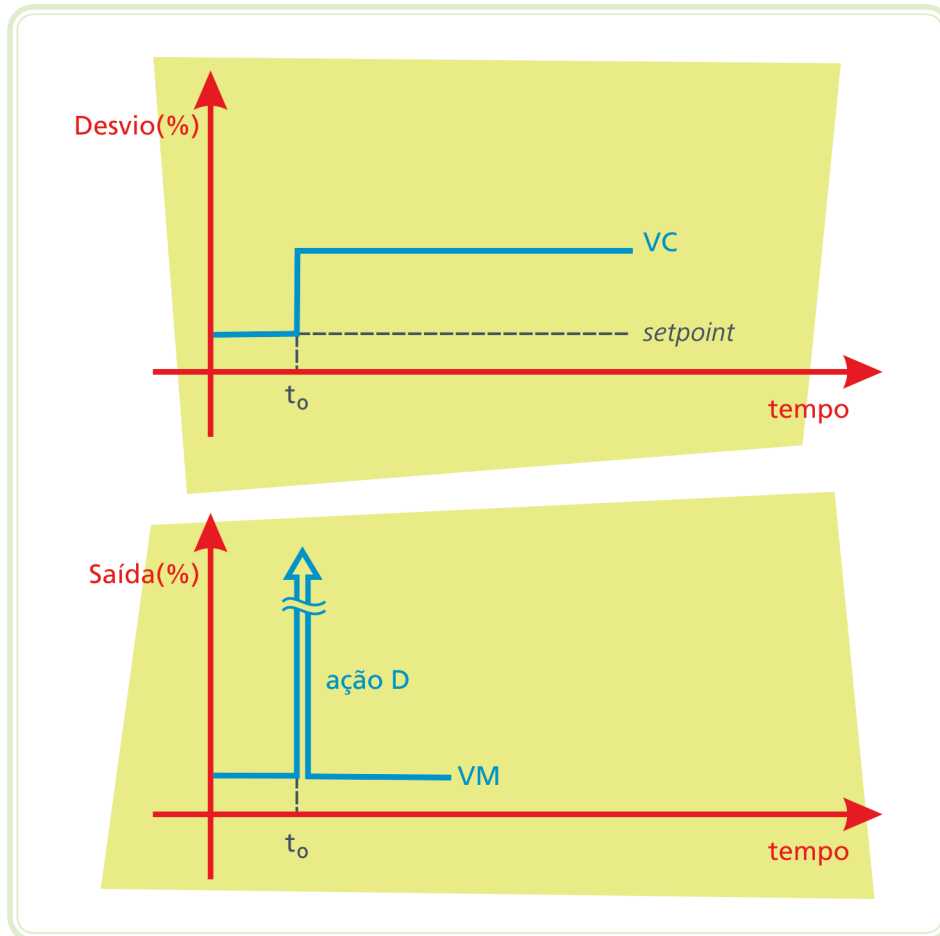


**Figura 4.2: Comportamento ação derivativa**

Fonte: CTISM

Quando ocorre uma variação em degrau, a velocidade de variação é praticamente instantânea. Nesse caso, a ação derivativa que é proporcional à velocidade desvio, causa mudança súbita na variável manipulada. A Figura 4.3 mostra a resposta da ação derivativa para essa situação.





**Figura 4.3: Resposta da ação derivativa a uma variação do tipo degrau**

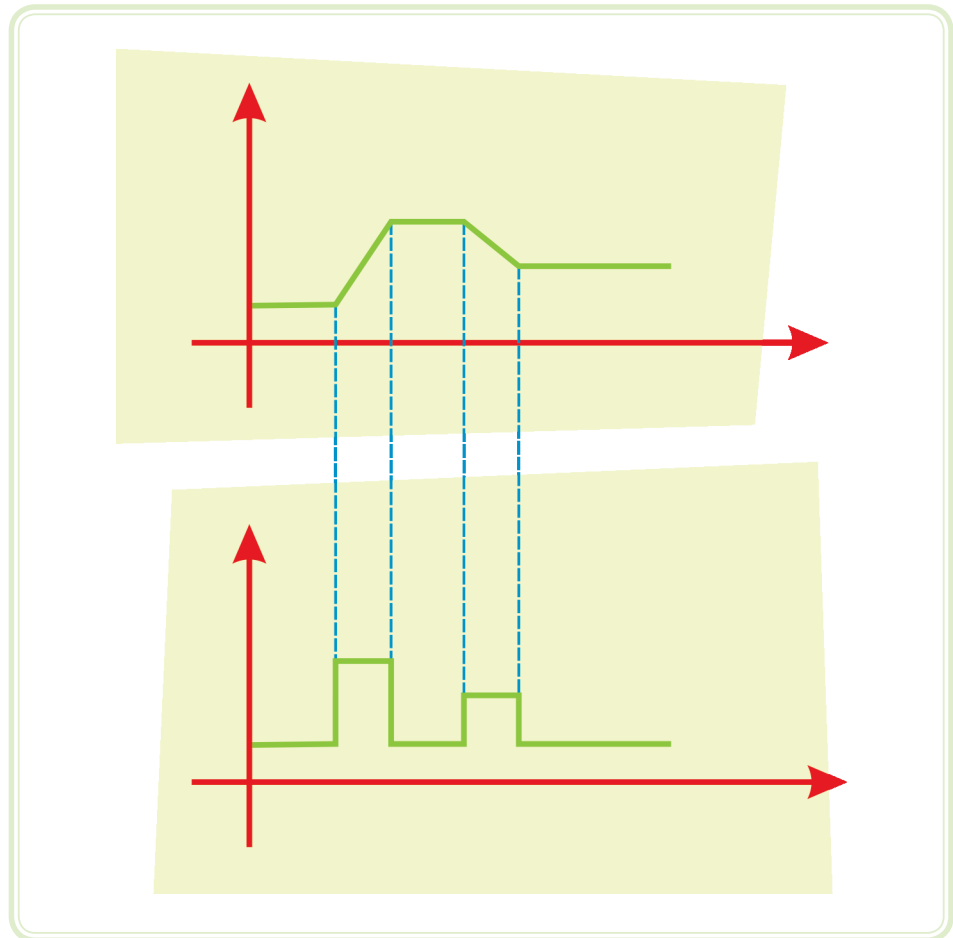
Fonte: CTISM

Esse exemplo demonstra que a ação derivativa não deve ser utilizada em processos com resposta rápida e, da mesma forma, não pode ser utilizada em processos que apresentem ruídos no sinal de medição, pois a ação derivativa provoca mudanças súbitas na saída do controle, podendo levar o processo à instabilidade.

Observemos que esta ação só atua quando há variação no erro, caso contrário, quando o processo está estável, mesmo com *off-set*, seu efeito é nulo, conforme a Figura 4.4.



Assista a um vídeo sobre controlador PD em ação em <http://www.youtube.com/watch?v=hp3o2wyi3n8>

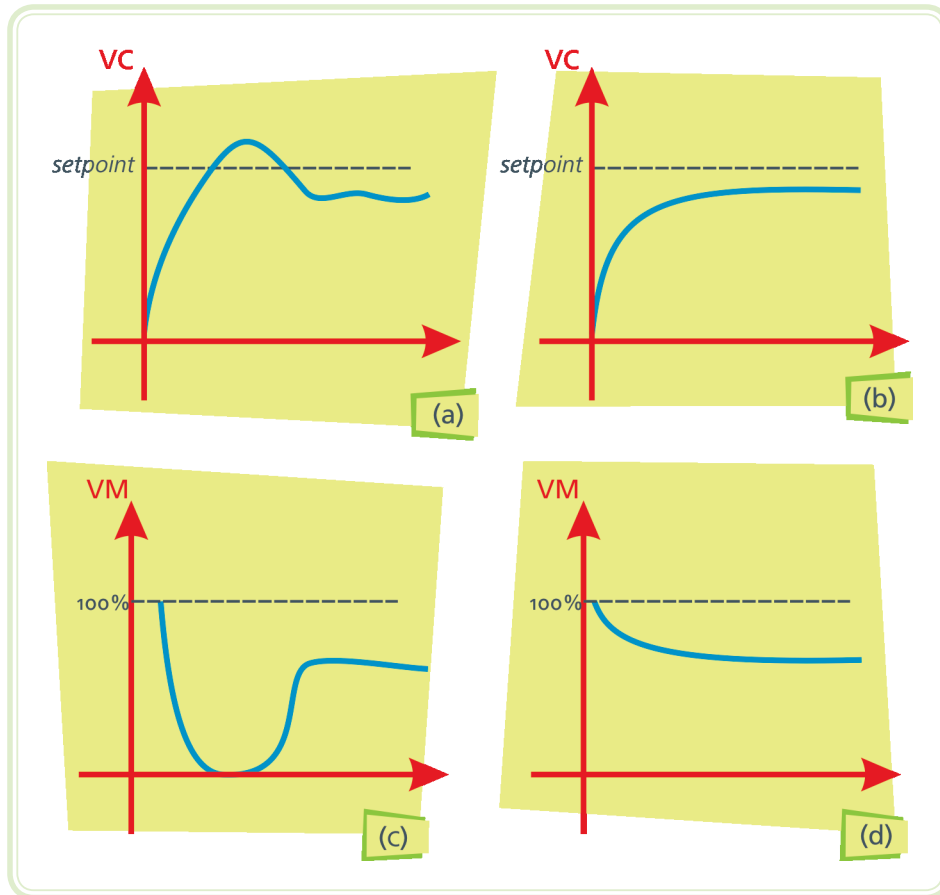


**Figura 4.4:** Ação de controle derivativa de acordo com a variação do desvio

Fonte: CTISM

Uma das principais funções da ação derivativa é melhorar o desempenho do processo durante o regime transitório, isto é, sempre que ocorrerem oscilações no valor da variável controlada antes da estabilização. Essas oscilações podem aparecer durante a partida do processo e também por outro tipo de perturbação.

A Figura 4.5 apresenta respostas características de um processo com controle P e PD.



**Figura 4.5: Comportamento característico do controle P e do controle PD**

Fonte: CTISM

Consideremos que a faixa proporcional do controle P representado em (a) e (c) é pequena. Com isso, o ganho proporcional é grande e, devido à rápida correção que esta configuração propicia, não é raro o valor da variável controlada ultrapassar o *setpoint*. Esta situação é denominada *overshoot*. Isso ocorre porque o ajuste da variável manipulada esteve no seu valor máximo por muito tempo. No exemplo do forno significa que o gás tem fluxo máximo, quando a válvula estiver totalmente aberta. A redução é iniciada muito proximamente do *setpoint*, quando já é tarde para impedir o *overshoot*. Uma solução é aumentar a faixa proporcional, mas nesse caso o erro de *off-set* também aumenta. O controle derivativo é utilizado para reduzir o valor da variável manipulada, quando o valor da variável controlada crescer muito rapidamente. Na Figura 4.5, em (d), observamos que o controle derivativo suaviza a variação do valor da variável manipulada, devido à variação acentuada do valor da variável controlada, com o respectivo resultado apresentado em (b). Deste modo, podemos dizer que este controle antecipa as variações excessivas reduzindo ou, até mesmo, eliminando o *overshoot* e as oscilações do regime transitório.

## Resumo

O controlador integral age como um somador ou acumulador, o qual examina o sinal de erro e continua mudando a saída do controlador até que o erro seja zero. Porém, ele aumenta as chances de ocorrerem oscilações indesejadas no sistema de controle. No caso de uma válvula, o modo proporcional age imediatamente e tende a passar o ruído de medição para a válvula. O modo integral pode ser utilizado para filtrar ou amortecer o ruído e permitir que a válvula seja manipulada gradualmente.

A ação derivativa é apropriada para processos que possuem grandes constantes de tempo, processos lentos. Porém, a ação derivativa é sensível ao ruído do sinal de medição, sensível às mudanças rápidas na entrada e no *setpoint*. Deve-se escolher o controlador com ação derivativa baseado na variação da variável do processo e não no erro. Além disso, a sintonia deste controlador é mais complicada.



## Atividades de aprendizagem

1. Quais são as características básicas de um controle integral?
2. Quais são as características básicas de um controle derivativo?
3. Qual é a saída do controlador PI quando o valor da variável controlada é igual ao *setpoint* ?
4. Marque a alternativa correta.
  - a) A ação de controle derivativa atua enquanto existir erro *off-set*.
  - b) Na ação de controle derivativa, quando ocorre uma variação em degrau, a velocidade da variação é praticamente instantânea.
  - c) A ação integrativa tem como objetivo antecipar os desvios e diminuir o tempo de resposta do controle.
  - d) A ação de controle pode ser utilizada isoladamente como técnica de controle.
5. Qual a relação entre o aumento da taxa integral e o ganho integral?
6. Cite um exemplo de sistema no qual não se deve utilizar a ação de controle derivativa.

# Aula 5 – Ação proporcional, integral e derivativa (PID)

## Objetivos

Compreender o comportamento das ações proporcional, integral e derivativa combinadas.

Conhecer as resposta das ações de controle P, I e D sozinhas ou combinadas.

## 5.1 Combinações de ações de controle

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa para gerar um só sinal de controle dá origem ao que denominamos de controlador proporcional-integral-derivativo ou simplesmente PID, como é mais comumente conhecido. O objetivo é aproveitar as características de cada uma dessas ações para obter uma melhoria tanto no comportamento transitório como no regime permanente do sistema controlado.

Os controladores PID são largamente utilizados, uma vez que são capazes de solucionar a grande maioria dos problemas de controle que surgem em processos industriais. Essa expressiva utilização deve-se ao fato desse controlador ser de fácil implementação, baixo custo e versátil na capacidade de estabilizar os comportamentos transitório e de regime permanente dos processos sob controle. Assim, além da ação proporcional que atua conforme o valor do erro, temos um compromisso entre a velocidade de atuação (diferenciador) e erro nulo no regime permanente (integrador). Em outras palavras, o controlador PID pode ser visto como uma ação que considera o presente, o passado e o futuro do erro levado em consideração.

## 5.2 Ação proporcional, integral e derivativa

Como vimos, devemos utilizar a ação PID quando desejamos rapidez na correção do erro com ausência de *off-set*, aliado a um desvio máximo reduzido. No entanto, a combinação dessas três ações nem sempre é a melhor opção. Por exemplo, no caso de controle de vazão, podemos utilizar somente o modo

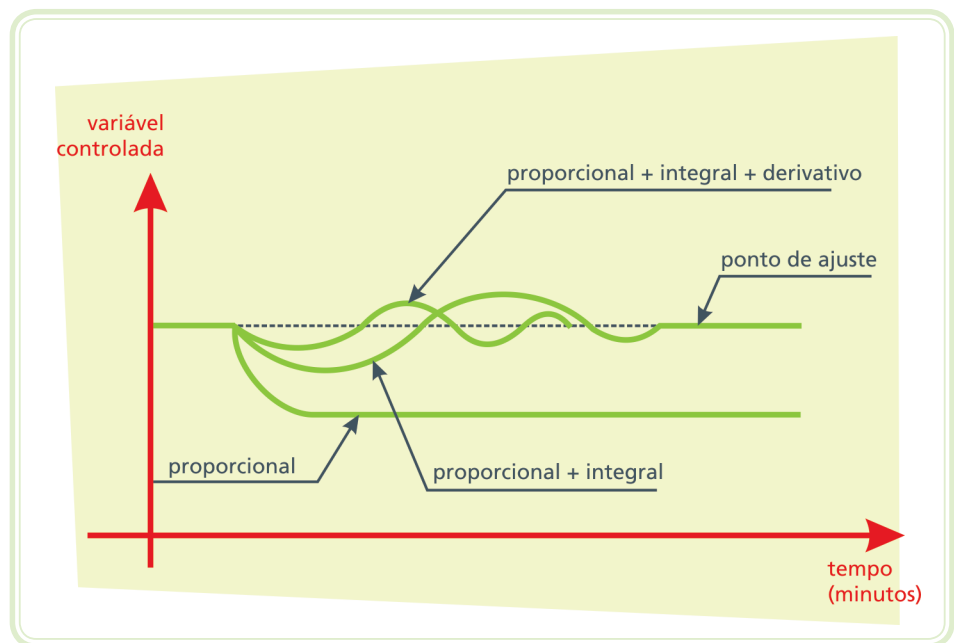


Assista a um vídeo sobre controlador PID em ação em: <http://www.youtube.com/watch?v=lab52fqalijg&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=inpwgcrmc4&feature=related>

proporcional e integral, uma vez que associar o modo derivativo em vazão não é vantajoso. O modo derivativo é adicionado normalmente no controle de temperatura por ser considerado uma variável de reação lenta.

A Figura 5.1 apresenta uma comparação das respostas do comportamento típico de um sistema controlado após a introdução de uma perturbação externa em degrau. O controlador proporcional torna a resposta mais rápida e reduz o erro. A adição da ação integral elimina o erro estacionário, mas tende a fazer com que a resposta fique mais oscilatória. Quando introduzimos a ação derivativa e consideramos a resposta da ação, ocorre a redução tanto da intensidade das oscilações, como do tempo de resposta.



**Figura 5.1: Comparação das ações P, I, D e PID**

Fonte: CTISM

De uma forma mais simples, os efeitos das ações, com os parâmetros devidamente ajustados, na resposta do controle em malha fechada são listados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Efeitos na resposta de um controle para as ações P, I e D				
Resposta controle	Tempo de subida	Overshoot	Tempo de estabilização	Erro no regime estacionário
P	Diminui	Aumenta	Não altera	Diminui, mas não elimina
I	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
D	Não altera	Diminui	Diminui	Não altera

A Figura 5.2 ilustra as formas de resposta das ações de controle sozinhas ou combinadas, considerando um distúrbio em degrau, pulso, rampa e senoidal, quando um sistema se encontra em malha aberta.

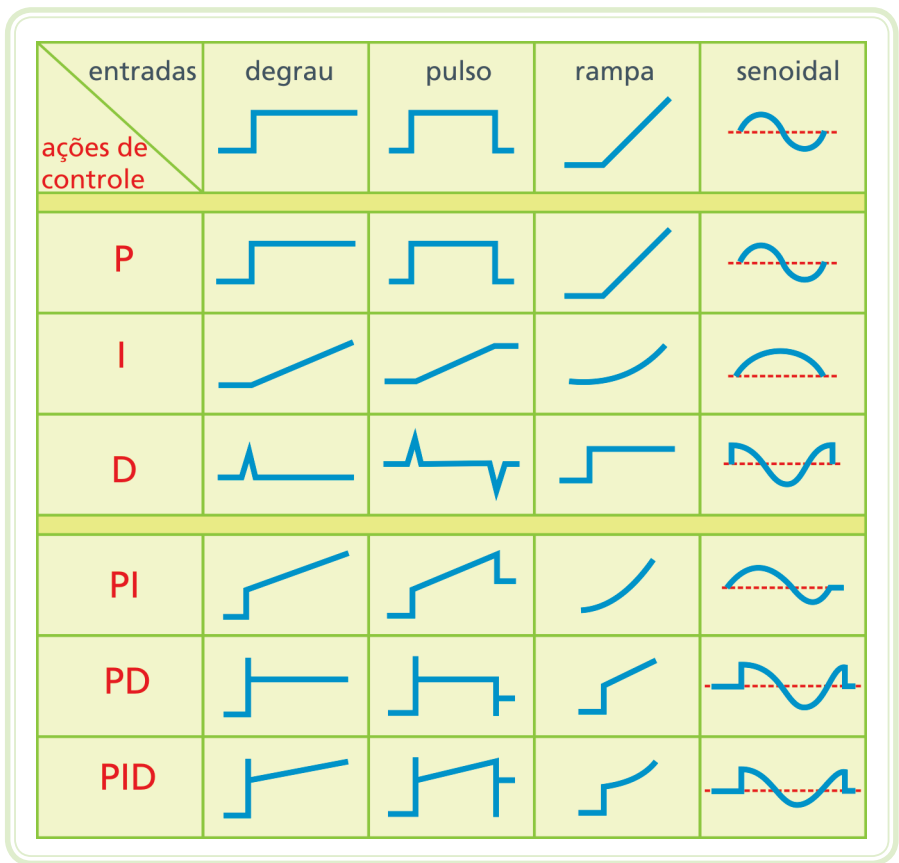


Figura 5.2: Sinais de saída das ações de controle em respostas a diferentes distúrbios em malha aberta

Fonte: CTISM

## Resumo

A ação de controle PID combina as ações proporcional, integral e derivativa e gera um único sinal que aproveita as características de cada uma dessas ações.



Fábula do regulador PID. A adaptação da fábula do regulador PID tem por objetivo ilustrar os conceitos que estudamos. Esta fábula foi contada pela primeira vez aos professores da Universidade Técnica de Bruxelas. Para saber mais sobre esta fábula, acesse: [http://www.cti.furg.br/~santos/apostilas/fabula\\_pid.pdf](http://www.cti.furg.br/~santos/apostilas/fabula_pid.pdf)

São largamente utilizadas e conseguem solucionar a grande maioria dos problemas de controle. No entanto, é necessário observar que, embora o controlador PID permita obter os melhores resultados em geral, na prática existem processos em que, devido às suas características dinâmicas, não é aconselhável a utilização da ação derivativa (D). É o caso, por exemplo, do controle de vazão.



## Atividades de aprendizagem

1. Qual o efeito de cada modo do controlador PID sobre o *off-set* em regime permanente para uma entrada degrau?

Proporcional	<input type="checkbox"/> sem efeito <input type="checkbox"/> reduz mas nunca = 0 <input type="checkbox"/> <i>off-set</i> = 0
Integral	<input type="checkbox"/> sem efeito <input type="checkbox"/> reduz mas nunca = 0 <input type="checkbox"/> <i>off-set</i> = 0
Derivativo	<input type="checkbox"/> sem efeito <input type="checkbox"/> reduz mas nunca = 0 <input type="checkbox"/> <i>off-set</i> = 0

2. Marque a alternativa correta:

- a) A resposta da ação de controle P diminui o *overshoot*.
  - b) A resposta da ação de controle D elimina o erro no regime estacionário.
  - c) Em um controle PID, a ação de controle D reduz o desvio máximo.
  - d) Em um controle PID, a ação de controle D aumenta as oscilações, bem como o tempo de resposta.
3. Cite um exemplo em que a combinação das ações P, I e D não é a melhor opção.
4. Cite as principais características que um controle deve possuir.
5. Caracterize a ação PD e PI.



# Aula 6 – Sintonia de controladores PID

## Objetivos

Diferenciar as metodologias de sintonia de controladores PID.

### 6.1 Parâmetros de ajuste

As principais razões para a baixa performance de processos automatizados estão relacionadas ao mau funcionamento de válvulas, aos sensores e ao ajuste incorreto dos controladores PID.

O ajuste é o trabalho de determinar valores adequados para parâmetros de um controlador, de tal modo que o processo exiba as propriedades desejadas. Apesar de extensivos estudos sobre esse assunto, ainda não existe um método único para proceder a este ajuste.

Muitos controladores possuem uma função denominada autoajuste (*self-tune*). Durante a inicialização do controlador, essa função, a partir de um sinal de saída e da resposta obtida, calcula os parâmetros do controle PID e memoriza os respectivos valores.

O controlador PID possui três parâmetros de ajuste:

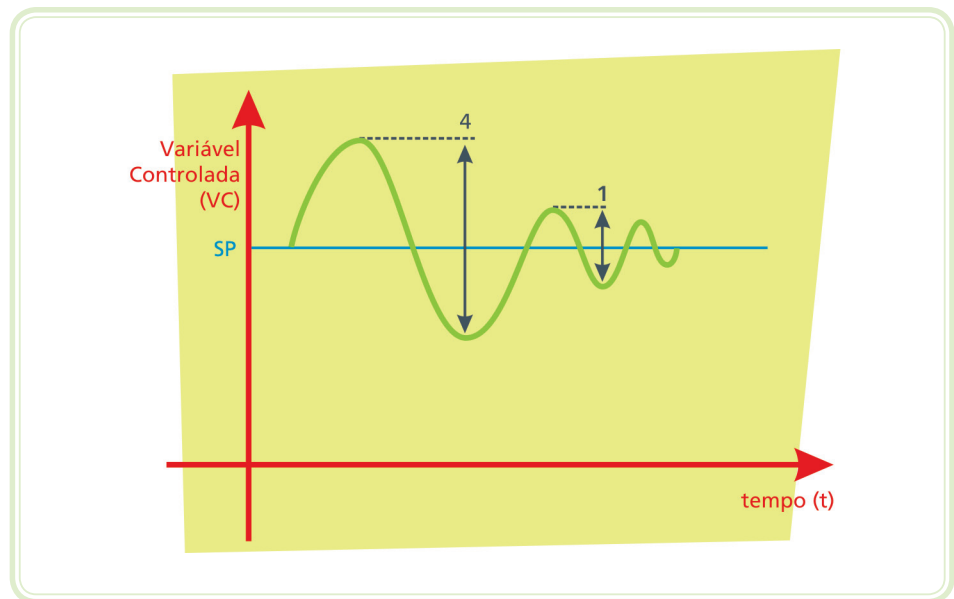
- Ganho ou faixa proporcional –  $K_C$
- Tempo integral –  $T_I$
- Tempo derivativo –  $T_D$

### 6.2 Ajuste manual de controladores PID

O projeto de um controlador nem sempre é suficientemente completo, e os métodos de autoajuste, por serem genéricos, muitas vezes fornecem ajustes que podem ser melhorados. Em alguns casos, nos quais os requisitos de

desempenho não são críticos, técnicos experientes podem fazer o ajuste manualmente a partir de métodos práticos de sintonia.

Existem vários métodos para ajustar controles em malha fechada. O mais conhecido e utilizado até hoje foi originalmente descrito formalmente por J. G. Ziegler e B. B. Nichols em 1942. Para esses autores, um ajuste ótimo apresenta um caimento de  $\frac{1}{4}$  durante o regime transitório, conforme Figura 6.1. Deve-se observar que essa definição de ajuste ótimo pode não ser adequada para todas as aplicações possíveis.



**Figura 6.1:** Curva característica de um controlador com caimento de  $\frac{1}{4}$

Fonte: CTISM

### 6.3 Sintonia por tentativa e erro

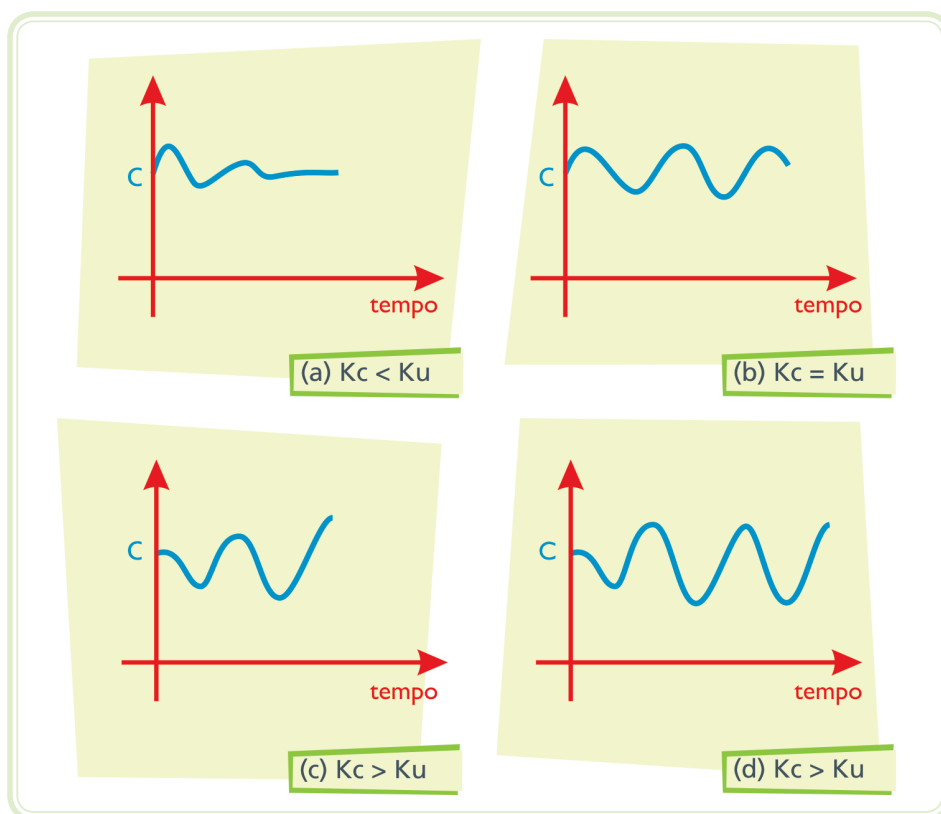
A sintonia dos controladores no campo é freqüentemente realizada por meio de um processo de tentativa e erro sugerido pelo fabricante do controlador. Um procedimento típico de sintonia de controladores PID realizado em malha fechada é o seguinte:

- a) Eliminar os termos integral e derivativo escolhendo  $T_i$  com seu valor máximo e  $T_d$  com seu valor mínimo.
- b) Atribuir a  $K_c$  um valor baixo e colocar o controlador no modo automático.
- c) Aumentar o ganho  $K_c$ , em pequenos passos, até que ocorra uma oscilação estável, ou seja, com amplitude constante.

- d) Reduzir então  $K_C$  pela metade.
- e) Diminuir  $T_I$  gradualmente até observar novamente a ocorrência de uma oscilação continuada. Fixe então  $T_I$  em 3 vezes este valor.
- f) Aumentar  $T_D$  também gradualmente até que ocorra novamente uma oscilação mantida. Faça então  $T_D$  igual a 1/3 deste valor.

O valor de  $K_C$  que se obtém no passo 3 é chamado de ganho supremo, denotado por  $K_U$ .

Ao realizar o procedimento anterior, é importante que a saída do controlador não se sature. Se houver saturação, pode ocorrer uma oscilação estável ainda que  $K_C > K_U$ .



**Figura 6.2: Resultado do procedimento tentativa e erro**

Fonte: CTISM

Se  $K_C < K_U$ , a resposta de malha fechada normalmente é superamortecida ou levemente oscilatória. O aumento de  $K_C$  até atingir o valor  $K_U$  leva a uma oscilação mantida, conforme mostra o gráfico (b).

Se  $K_C > K_U$ , o sistema em malha fechada é instável, e teoricamente, deverá apresentar uma resposta de amplitude ilimitada se a saturação do controlador for ignorada, conforme o gráfico (c).

Entretanto, na prática, a saturação do controlador normalmente impede que a amplitude da resposta cresça indefinidamente, produzindo-se então uma oscilação mantida, conforme mostra o gráfico (d).

O processo de sintonia baseado na tentativa e no erro apresenta alguns inconvenientes:

- Se é necessário um número grande de tentativas para determinar  $K_U$ ,  $T_I$  e  $T_D$  ou se o processo tem dinâmica lenta, esse é um processo um tanto demorado.
- Pode-se dizer que esse procedimento é arriscado, porque o sistema é levado até o seu limite de estabilidade. Assim, por exemplo, se, durante o procedimento de sintonia, houver a ação de uma perturbação externa ou uma mudança qualquer no processo, poderá ocorrer a instabilidade do sistema que provocar a uma situação perigosa.
- Alguns processos simples não apresentam um ganho supremo.

## 6.4 Método de Ziegler-Nichols

O método de otimização *Ziegler-Nichols* consiste em determinar um ganho e um período denominados ganho crítico e período crítico, respectivamente. Para isso, devemos seguir algumas etapas:

- a) Transformar o controlador PID em um controlador tipo P, eliminando-se as ações integral e derivativa.
- b) Aumentar gradativamente o valor do ganho proporcional  $K_C$  até a variável controlada oscilar. Para isso, é necessário que, para cada  $K_C$ , o sistema seja submetido a uma variação de *setpoint* do tipo degrau. O valor da constante  $K_C$  que faz com que a resposta do sistema oscile é o ganho crítico  $K_U$ , ver Figura 6.3.
- c) Determinar o período crítico  $P_U$ , que é o período de oscilação do sinal obtido com  $K_U$ .

- d) Usar equações de ajuste do controle PID de *Ziegler-Nichols* conforme apresentadas na Tabela 6.1, considerando os valores encontrados para  $K_U$  e  $P_U$ .

Tabela 6.1: Equações de ajuste de Ziegler-Nichols para controladores PID			
Tipo do controlador	$K_C$	$T_I$	$T_D$
P	$0,5 \cdot K_U$	–	–
PI	$0,4 \cdot K_U$	$0,8 \cdot P_U$	–
PID	$0,6 \cdot K_U$	$0,5 \cdot P_U$	$0,125 \cdot P_U$

Fonte: CTISM

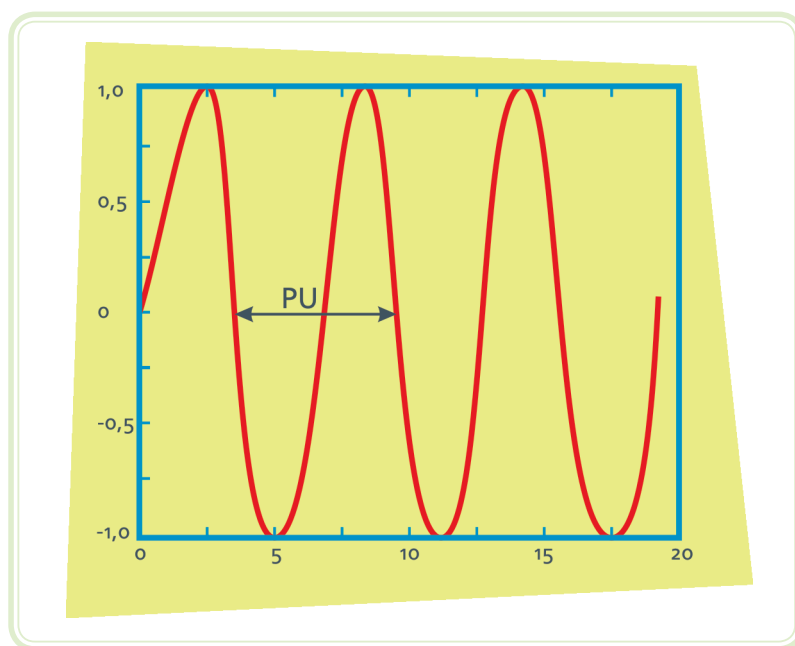


Figura 6.3: Oscilação da variável controlada e o respectivo período crítico PU

Fonte: CTISM

Embora sejam largamente empregados, os métodos de *Ziegler-Nichols* têm algumas das desvantagens do método por tentativa e erro, dado que não conhecemos de antemão o valor inicial do ganho, sendo necessário ajustá-lo em um nível baixo. Com isso, o aumento gradativo do ganho proporcional pode ser uma tarefa demorada. Ainda o método se baseia em identificação de formas de onda, o que pode ser problemático na prática, particularmente em aplicações com baixa relação sinal-ruído. No entanto, o método é adequado para grande número de processos industriais.

Note que o método de *Ziegler-Nichols* determina para o ganho proporcional do controlador P um valor que é metade do ganho limite de estabilidade,

o que significa que a margem de segurança nesse caso é razoável. Quando o termo integral é adicionado, o ganho proporcional é reduzido de  $0,50K_u$  para  $0,45K_u$ , o que denota o caráter desestabilizante da ação integral. Por outro lado, quando o termo derivativo é incluído em seguida, o ganho proporcional é aumentado para  $0,60K_u$ , o que indica a natureza estabilizante da ação derivativa.

Dependendo da aplicação, a oscilação resultante desses ajustes de ganhos pode ser insatisfatória para mudanças de *setpoint*. Nesse caso, recomenda-se utilizar o método de *Ziegler-Nichols* modificado, com os ajustes indicados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Equações de ajuste do método <i>Ziegler-Nichols</i> modificado			
	$K_c$	$T_i$	$T_D$
<b>Z – N</b>	$0,60 K_u$	$P_u / 2$	$P_u / 8$
<b>Com overshoot</b>	$0,33 K_u$	$P_u / 2$	$P_u / 8$
<b>Sem overshoot</b>	$0,20 K_u$	$P_u / 2$	$P_u / 3$

É importante mencionar que os ganhos indicados nas duas tabelas anteriores devem ser considerados apenas como uma primeira aproximação para o processo de ajuste. Normalmente eles devem ser seguidos de um processo experimental de sintonia fina por tentativa e erro.

O Quadro 6.1 resume os procedimentos necessários para fazer um ajuste fino. Observe que as variações efetuadas nos parâmetros devem ser pequenas. Variações muito acentuadas podem aumentar o tempo para atingir o regime permanente e eventualmente levar à instabilidade.

Quadro 6.1: Ajuste manual de parâmetros de um controlador PID segundo os problemas apresentados	
Problema	Ajuste
Resposta muito lenta	Aumentar o ganho proporcional
Resposta com oscilação excessiva	Aumentar tempo derivativo
<i>Overshoot</i>	Reduzir taxa integral
Resposta excessivamente rápida e depois muito lenta	Aumentar taxa integral

## Resumo

O ajuste de controladores determina valores adequados de parâmetros para que o processo exiba as propriedades desejadas. Apesar de extensivos estudos sobre esse assunto, ainda não existe um método único adequado para todas as situações encontradas na prática.

O ajuste por tentativa e erro frequentemente é de acordo com um processo sugerido pelo fabricante do controlador.

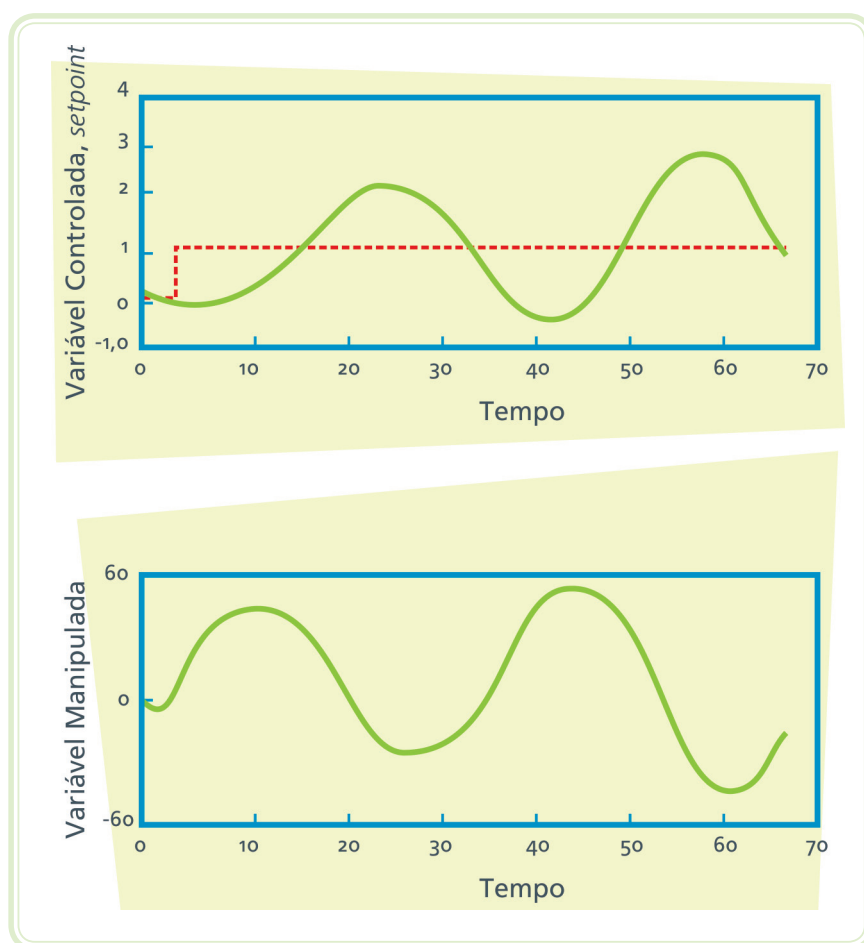
O método de otimização *Ziegler-Nichols* consiste em determinar um ganho e um período denominados ganho crítico e período crítico, respectivamente.

Os métodos de ajustes estudados não necessariamente correspondem ao ajuste ótimo e devem ser considerados como uma aproximação do processo de ajuste.

## Atividades de aprendizagem



1. Faça o diagnóstico do desempenho de controle de malha da Figura 6.4 a seguir e assinale as recomendações que devem ser dadas a um operador para proceder à minimização da variabilidade do controle e da saída, em termos da sintonia de um controlador PD.



**Figura 6.4: Questão 1**

Fonte: CTISM

( ) O controlador está bem sintonizado e nenhuma mudança é necessária.

( ) Aumente o ganho proporcional do controlador.

( ) Diminua o ganho proporcional do controlador.

( ) Aumente o tempo integral do controlador.

( ) Diminua o tempo integral do controlado.

2. No método sintonia de tentativa e erro, o que ocorre se  $K_C > K_U$ ?

3. Cite algumas desvantagens do método de sintonia de *Ziegler-Nichols*.

4. Em que situação se deve utilizar o método de sintonia de *Ziegler-Nichols* modificado?

5. Marque a alternativa incorreta.

a) Quando a resposta do controle é muito lenta, deve-se aumentar o ganho proporcional.

b) Quando os requisitos de desempenho são críticos, o ajuste manualmente a partir de métodos práticos de sintonia, é o mais indicado.

c) Segundo *Ziegler e Nichols*, um ajuste ótimo deve apresentar um caimento de  $\frac{1}{4}$  durante o regime transitório.

d) Dentre as principais razões para baixa performance de processos automatizados estão: mau funcionamento de válvulas e ajuste incorreto de controladores.



# Aula 7 – Simulação de sistemas – modelagem

## Objetivos

Compreender as bases da simulação de sistemas e sua importância.

Conhecer os principais métodos e programas de simulação.

## 7.1 Simulação

Simulação ou simular consiste em estudar um sistema através da análise de um modelo simplificado que “imita” o sistema real, com o objetivo de compreender seu funcionamento e avaliar seu desempenho.

Com o aumento da complexidade dos sistemas atuais, torna-se cada vez mais difícil analisar todos os seus detalhes, e, principalmente, a interação entre os seus diversos componentes. Partindo disso, a simulação apresenta-se como uma saída muito vantajosa para o projeto de sistemas de controle, pois permite avaliar o sistema antes mesmo de sua construção e analisar as condições de funcionamento em uma quantidade quase ilimitada de situações, inclusive a simulação de situações-limite, onde uma planta real poderia ser danificada.

### Quando usar a simulação?

- **No projeto de sistemas ainda não existentes**, onde se podem obter ganhos otimizando o sistema antes de sua construção.
- **Quando a experimentação com o sistema real é impossível ou indesejável**, como testar o comportamento em seu limite de capacidade, ou mesmo acima dele, o que danificaria o sistema real.
- **Na compressão ou na expansão da escala de tempo**, em processos demasiadamente lentos que demandariam longos períodos de testes práticos.
- **Na avaliação do desempenho de sistemas**, permitindo verificar se ele pode atingir os objetivos esperados.



Para saber mais sobre simulação, acesse <http://pt.wikipedia.org/wiki/simulacao>

<http://www.erlang.com.br/simulacao.asp>



- **No treinamento e na instrução**, possibilitando a operação “virtual” dos sistemas.



### Limitações da simulação

- **Precisão e qualidade da modelagem**: a simulação é feita normalmente considerando-se um modelo simplificado do sistema, o qual, se não for bem elaborado e suficientemente preciso, pode levar a resultados errôneos.
- **Desenvolvimento de bons modelos pode ser muito caro e demorado**, necessitando de pessoal altamente especializado. Atualmente, existem empresas especializadas em modelagem e em simulação de processos que normalmente são contratadas para prestar esse tipo de serviço.
- **Resultados são dependentes dos estímulos**, portanto as variáveis de entrada do sistema devem ser perfeitamente conhecidas.

A simulação por definição dá-se através de **modelos** do sistema, que podem ser classificados como:



- **Modelos físicos**
- **Modelos matemáticos**
- **Modelos lógicos**
- **Modelos de sistemas discretos**
- **Modelos computacionais**



Para saber mais sobre modelos físicos, acesse [http://pt.wikipedia.org/wiki/modelos\\_fisicos](http://pt.wikipedia.org/wiki/modelos_fisicos)

## 7.2 Modelos físicos

O modelo físico é um protótipo do sistema que se pretende estudar, normalmente com dimensões diferentes do original, porém conservando relações físicas conhecidas com o modelo real. Podemos citar como exemplos, maquetes de edificações, veículos em escala para estudos em túnel de vento e plantas de processamento químico pequenas que simulam grandes instalações industriais.

No desenvolvimento de modelos físicos, devemos observar alguns conceitos importantes:

**Similaridade** – consiste em obedecer a um escalonamento entre as grandezas correspondentes ao criar o modelo físico, de forma a garantir uma correspondência ao sistema real que se quer estudar.

**Escalonamento** – é o processo de se reduzirem os parâmetros de um modelo. Pode ser efetuado seguindo critérios geométricos, cinemáticos ou dinâmicos entre as variáveis independentes.

**Análise dimensional** – estuda os grupos de parâmetros que influem no comportamento de um sistema e de seu modelo e permite estudar o efeito da quebra das relações físicas no modelo sobre os fenômenos que se querem estudar. Através da Análise Dimensional, consegue-se definir o Escalonamento correto para o modelo que permita manter a Similaridade desejada com o sistema real.



## 7.3 Modelos matemáticos

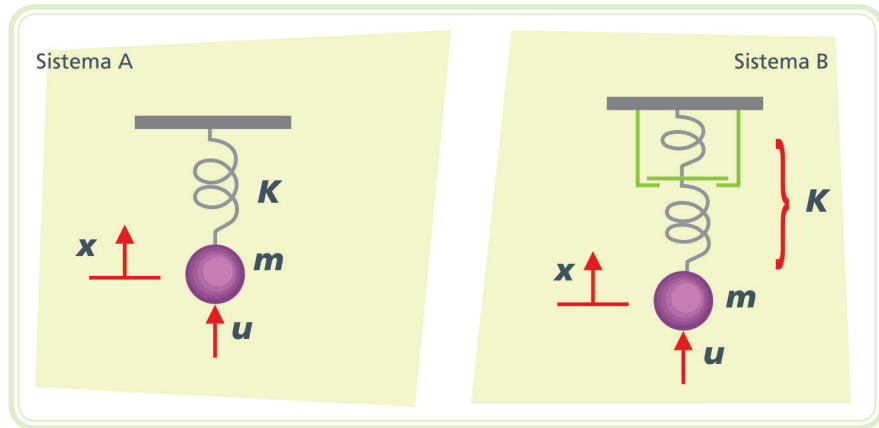
É um modelo simbólico cujas propriedades são expressas em símbolos matemáticos e em suas relações. Para o desenvolvimento de modelos matemáticos, é importante analisar algumas propriedades fundamentais desses sistemas que têm consequências diferentes sobre o tipo de modelo. Partindo disso, os modelos matemáticos podem ser basicamente classificados da seguinte forma:



Para saber mais sobre modelo matemático, acesse [http://pt.wikipedia.org/wiki/modelo\\_matemático](http://pt.wikipedia.org/wiki/modelo_matemático)

### 7.3.1 Linear ou não linear

Sistemas lineares são aqueles em que a saída do sistema respeita uma proporcionalidade com o valor da entrada. Já nos sistemas não lineares, não há essa relação direta, ou há momentos em que esta relação se altera. Nos exemplos da Figura 7.1, temos um sistema massa-mola que é linear e um sistema massa-mola onde a mola possui dois estágios, tornando-se, portanto, um sistema não linear.

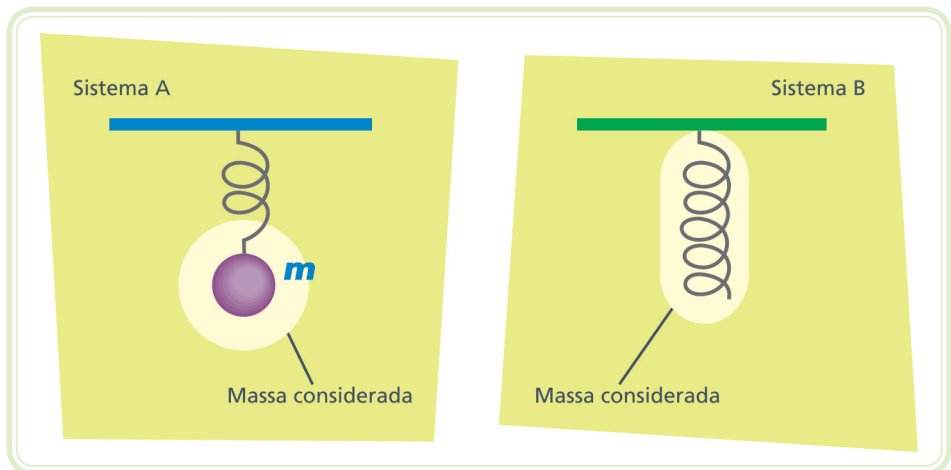


**Figura 7.1: Sistema linear e sistema não linear**  
 Fonte: CTISM

### 7.3.2 Concentrado ou distribuído

Os sistemas são considerados concentrados quando podemos analisar as variáveis isoladamente, como se estivessem concentradas em um ponto. Em sistemas distribuídos, precisamos analisar as variáveis, considerando a sua distribuição no espaço, o que torna a modelagem muito mais complexa.

No exemplo da Figura 7.2, vemos um sistema concentrado, onde se considera toda a massa do sistema concentrado na esfera e um sistema distribuído onde temos a massa distribuída na própria mola.



**Figura 7.2: Sistema com parâmetros concentrados (Sistema A) e sistema com parâmetros distribuídos (Sistema B)**  
 Fonte: CTISM

### 7.3.3 Estacionário ou não estacionário

Se os parâmetros de um sistema variam com o tempo (ex. massa de um foguete), o sistema é classificado como não estacionário ou variante no tempo; caso contrário, ele é chamado estacionário ou invariante no tempo.

Observe a Figura 7.3:

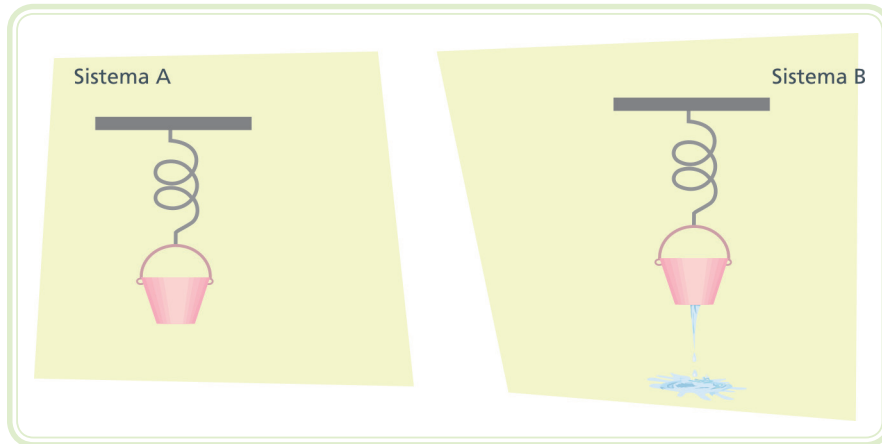


Figura 7.3: Sistema estacionário e sistema não estacionário

Fonte: CTISM

### 7.3.4 Determinístico ou aleatório

Se as variáveis são bem definidas a cada instante, com um degrau ou senóide, o sistema é determinístico. Se o valor de cada variável é dado em uma base probabilística, o sistema é classificado como aleatório. Veja a Figura 7.4:

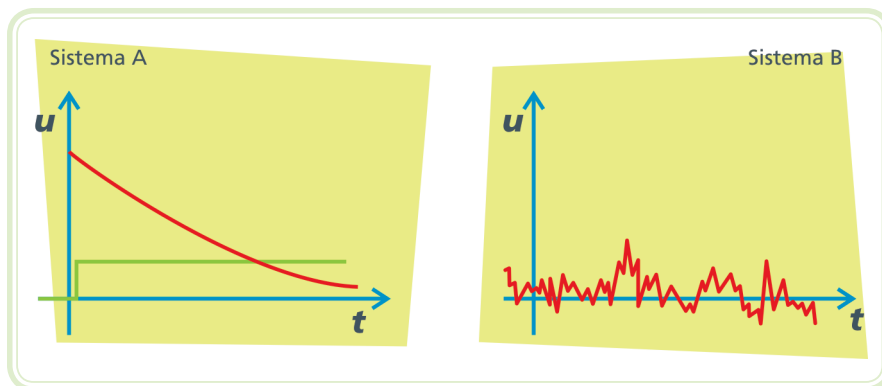
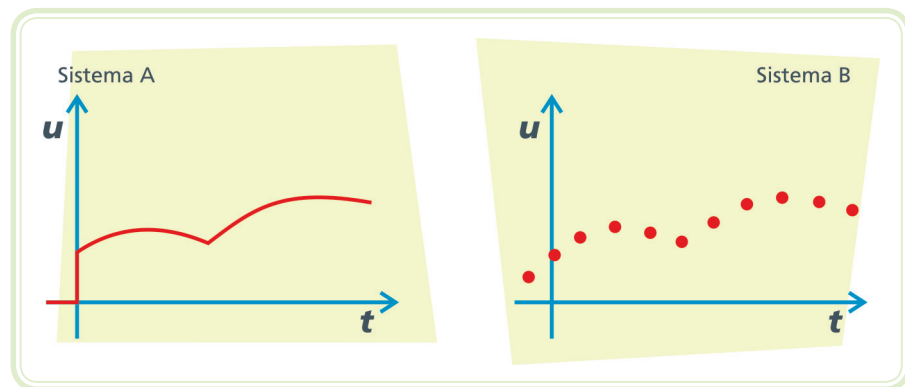


Figura 7.4: Sistema determinístico e sistema aleatórios

Fonte: CTISM

### 7.3.5 Contínuo ou amostrado

Usualmente, as variáveis mudam continuamente no tempo e então o sistema é classificado como contínuo. Mas essas variáveis podem ser intermitentes ou amostradas, e o sistema é considerado amostrado. Quando há um controle digital do sistema ou em simulações computacionais, utilizam-se principalmente modelos amostrados.



**Figura 7.5: Dados contínuos e dados amostrados**  
Fonte: CTISM

## 7.4 Representação de modelos matemáticos

De acordo com a representação, os modelos matemáticos podem ser classificados em:

### 7.4.1 Equações

As equações matemáticas que representam o modelo podem ser classificadas segundo os mesmos princípios utilizados para classificar os sistemas: lineares ou não lineares, equações ordinárias ou parciais (parâmetros concentrados ou distribuídos), de parâmetros variantes ou invariantes no tempo, determinísticas ou estocásticas e contínuas ou discretas no tempo (a diferenças finitas).

### 7.4.2 Tabelas

Quando temos grandes dificuldades de extrair relações algébricas entre os dados que queremos modelar, o recurso da representação por tabelas matemáticas é importante. Isso é bastante verificado em sistemas não lineares com mais de duas dimensões, como modelamento de motores e desempenho de aeronaves.

### 7.4.3 Gráficos

Os recursos gráficos são muito importantes para a compreensão da estrutura dos sistemas e apresentam as categorias que seguem:

### 7.4.3.1 Gráfico da função

Mesmo conhecendo a função matemática que representa uma relação, podemos substituí-la pela sua representação gráfica, para maior facilidade de interpretação do usuário ou para economia de tempo de processamento quando implementamos este modelo em um computador.

### 7.4.3.2 Diagramas de blocos

É uma das formas que mais facilitam a compreensão de sistemas complexos. Existem operações que nos permitem definir uma função de transferência total a partir das funções de transferências mais simples de blocos menores. Veja a Figura 7.6 que representa o diagrama de blocos de um sistema.

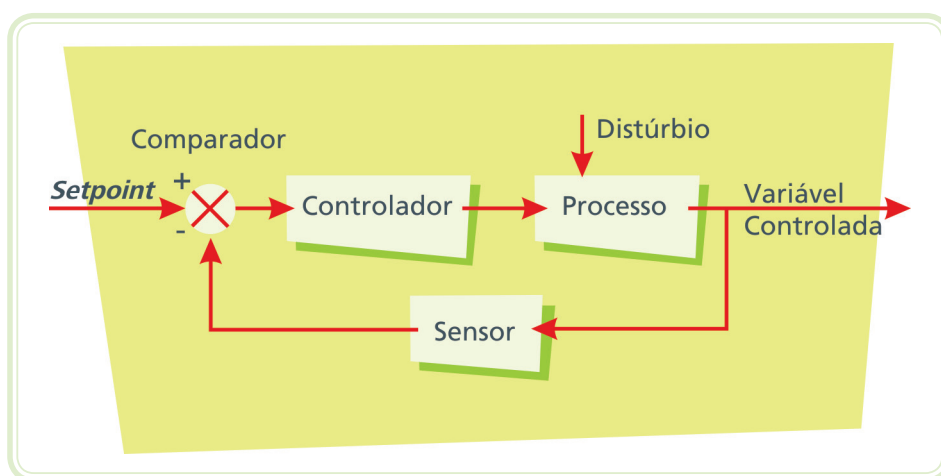


Figura 7.6: Diagrama de blocos de um sistema

Fonte: CTISM

### 7.4.3.3 Diagramas de fluxo de sinal (Signal Flow Graphs)

Existe uma representação equivalente à efetuada por diagrama de blocos, mas baseada no fluxo de sinais através do sistema. Também apresenta uma lógica para a composição das relações do sistema.

É bem menos usada que a representação de diagrama de blocos porque é menos intuitiva e suas operações são mais complexas.

### 7.4.3.4 Diagramas de ligação (Bond Graphs)

É uma representação de cada elemento baseada no fluxo de energia, através do sistema. Permite o acoplamento dos elementos modelados, pois o conceito de carga já é modelado intrinsecamente. Pode ser estendido para incluir fluxo de sinais.

## 7.5 Modelos lógicos

A álgebra lógica foi desenvolvida por Robert Boole, no século XIX, e é aplicada a circuitos comutadores. Ela provê uma ferramenta teórica para trabalharmos com variáveis, que apresentam somente dois valores (0 ou 1).

Os modelos lógicos podem ser representados por:



**Álgebra booleana** – as relações entre as variáveis do sistema são representadas por equações lógicas ou booleanas.

**Tabelas lógicas** – as relações entre as variáveis do sistema são representadas por mapas de *Karnaugh*.

**Gráficos lógicos** – as relações entre as variáveis do sistema são representadas por gráficos, com portas lógicas representando as três operações fundamentais: *NOR*, *OR* e *AND*.

**Máquinas de estado** – é a representação gráfica da dinâmica de um sistema lógico cujas variáveis apresentam um número finito de estados.

## 7.6 Modelos de sistemas discretos

Os sistemas discretos baseados em eventos são aqueles cujas variáveis de estado mudam somente em pontos específicos do tempo. Isso ocorre nos sistemas representados por modelos lógicos. Entretanto é feita uma separação didática por ser uma área do conhecimento ampla, bem definida, com toda uma bibliografia e nomenclatura próprias.

## 7.7 Modelos computacionais

É a tradução dos modelos matemáticos ou lógicos em/para a linguagem computacional.

As linguagens e tecnologias (*software*) disponíveis, nos dias de hoje, nos permitem uma tradução do modelo matemático para o modelo computacional de forma automática e praticamente transparente aos olhos dos usuários.

Entretanto, como princípio fundamental, todo modelo computacional é um modelo lógico, pois o fundamento de um computador digital é a lógica binária. Em alguns casos, há diferenças importantes entre esses modelos e essas



Para saber mais sobre modelagem computacional, acesse:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/modelagem\\_computacional](http://pt.wikipedia.org/wiki/modelagem_computacional)



diferenças podem acarretar erros graves nos resultados obtidos, caso não se configurem corretamente os parâmetros de simulação.

Por exemplo, em um modelo computacional, podemos ter a simulação com intervalo de integração de 1 segundo (o modelo matemático é calculado pelo computador a cada segundo). Nesta situação, qualquer alteração no sistema que seja mais rápida do que este intervalo, não será considerada, podendo causar um erro no resultado final.

## Resumo

A simulação consiste em estudar um sistema através da análise de um modelo simplificado que “imita” o sistema real, com o objetivo de compreender seu funcionamento e avaliar seu desempenho.

A utilização da simulação é cada vez mais comum, sendo vantajosa durante as fases de projeto e análise dos sistemas, permitindo confirmar a viabilidade dos mesmos e estimar a sua performance. Pode também ser utilizada para os sistemas existentes em condições de trabalho que não seriam seguras em uma instalação real.

Os modelos utilizados na simulação podem ser classificados como:

- **Modelos físicos**
- **Modelos matemáticos**
- **Modelos lógicos**
- **Modelos de sistemas discretos**
- **Modelos computacionais**



## Atividades de aprendizagem

1. Em que consiste a simulação de sistemas?
2. Em quais condições é vantajoso o uso de simulação?



3. Quais as principais limitações da simulação?
4. O que é um modelo físico?
5. O que é um modelo matemático?
6. O que é um modelo computacional?

# Aula 8 – Simulação de sistemas

## Objetivos

Conhecer softwares comerciais de simulação.

Fixar os conhecimentos da disciplina através da utilização de um sistema de simulação.

## 8.1 Software de simulação

Nesta aula, conheceremos alguns softwares comerciais de simulação e suas características e utilizaremos um sistema de simulação baseado em planilhas de cálculo para analisar o funcionamento e as respostas de um sistema de controle de temperatura de um forno, quando controlado por sistemas *on-off* e PID.

Como vimos na aula anterior, há uma infinidade de formas de realizarmos a modelagem e a simulação de sistemas. A escolha do tipo de modelagem a ser utilizada depende principalmente da natureza do sistema a ser simulado.

A simulação de um sistema contínuo nos levará à modelagem matemática, normalmente utilizando blocos de funções para modelar as variáveis e suas relações. Pode-se também utilizar a modelagem diretamente na forma de equações matemáticas, resolvendo o problema de forma analítica, ou através da discretização, utilizando métodos numéricos.

Já a simulação de uma linha de produção ou de montagem nos levará a utilização de modelos lógicos discretos os quais necessitam de softwares específicos para serem resolvidos. Nesse tipo de simulação, existe uma gama de softwares disponíveis, que permitem modelar o problema de forma gráfica diretamente na tela.

#### Quadro 8.1: Exemplos de software para simulação

C++, Pascal...	Todas as linguagens de programação podem ser utilizadas, porém dependem do desenvolvimento de algoritmos específicos.
Matlab	Simulação através da solução numérica de sistemas.
Matlab+Simulink	Possui uma interface gráfica que permite a modelagem e simulação do sistema através de diagramas de blocos.
Maple	Permite a solução algébrica dos sistemas, os quais precisam ser modelados em forma de equações matemáticas.
Microsoft Excel / BrOffice Calc	Permitem a simulação de sistemas simples baseando-se na formulação matemática do problema
CHEMCAD <a href="http://www.chemstations.com/">http://www.chemstations.com/</a>	Software de simulação de processos químicos.
ARENA	Software de simulação de sistemas discretos. Permite a modelagem do sistema de forma intuitiva, diretamente na tela, através de sua interface gráfica.

## 8.2 Exemplo de simulação

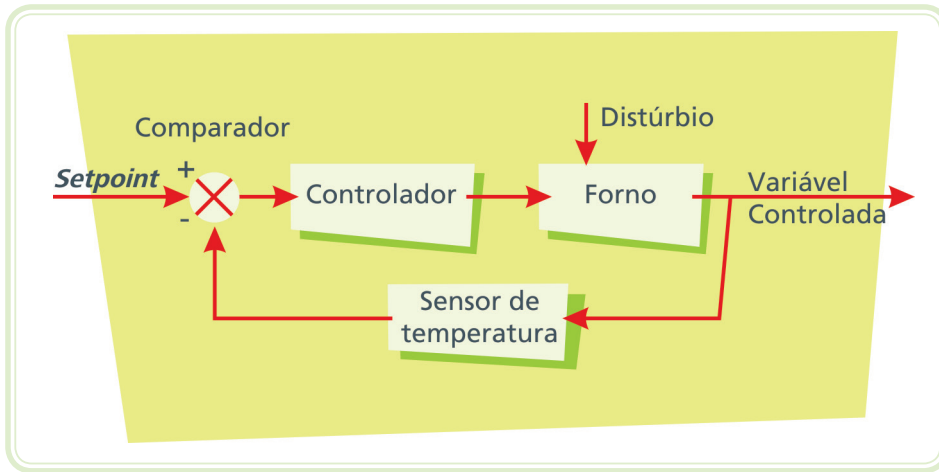
Neste exemplo, usaremos uma planilha de cálculo como Microsoft Excel ou o BrOffice Calc, para realizar algumas simulações simples.

O sistema a ser simulado é o controle automático de um forno a gás. O sistema de controle será composto por um controlador eletrônico que atuará sobre uma válvula proporcional que controlará o volume de gás e, portanto, a potência de aquecimento.

Iremos simular duas situações:



- Controle do tipo *on-off*.
- Controle PID.



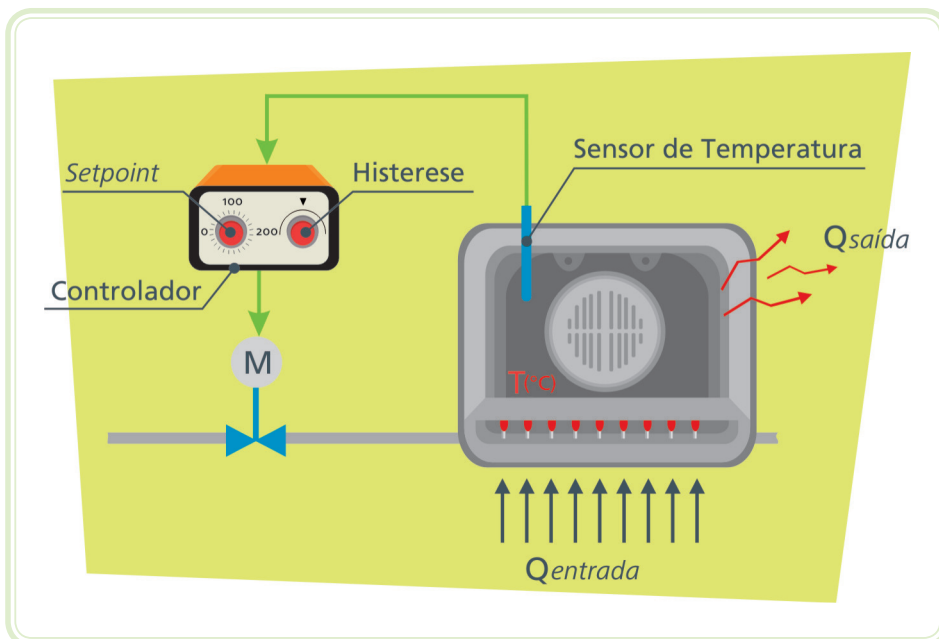
**Figura 8.1: Diagrama de blocos do sistema de controle**

Fonte: CTISM

### 8.3 Simulação de um controle *on-off*

O primeiro passo para realizar uma simulação é analisar o sistema, compreendendo o seu funcionamento e construindo o modelo simplificado que será utilizado.

Na Figura 8.2, temos a representação do nosso sistema.



**Figura 8.2: Simulação de um controle *on-off***

Fonte: CTISM



$Q_{\text{entrada}}$  = Calor fornecido pela chama, com potência constante

$Q_{\text{saída}}$  = Calor perdido do forno para o ambiente

$T$  = Temperatura medida pelo sensor

$M$  = motor que controla a abertura da válvula de gás, neste caso apenas com duas posições: aberto e fechado

Vemos que a nossa variável controlada será a temperatura do forno, e nossa variável manipulada será a abertura da válvula de gás que, neste caso, terá apenas duas posições: aberto e fechado (obviamente consideramos que o queimador possui um sistema de acendimento automático).

Temos então a modelagem do sistema apenas como duas condições lógicas:



- **Se  $T < (\text{Setpoint} - \text{Histerese}) \rightarrow$  Abre a válvula**

- **Se  $T > (\text{Setpoint} + \text{Histerese}) \rightarrow$  Fecha a válvula**

Exemplo:

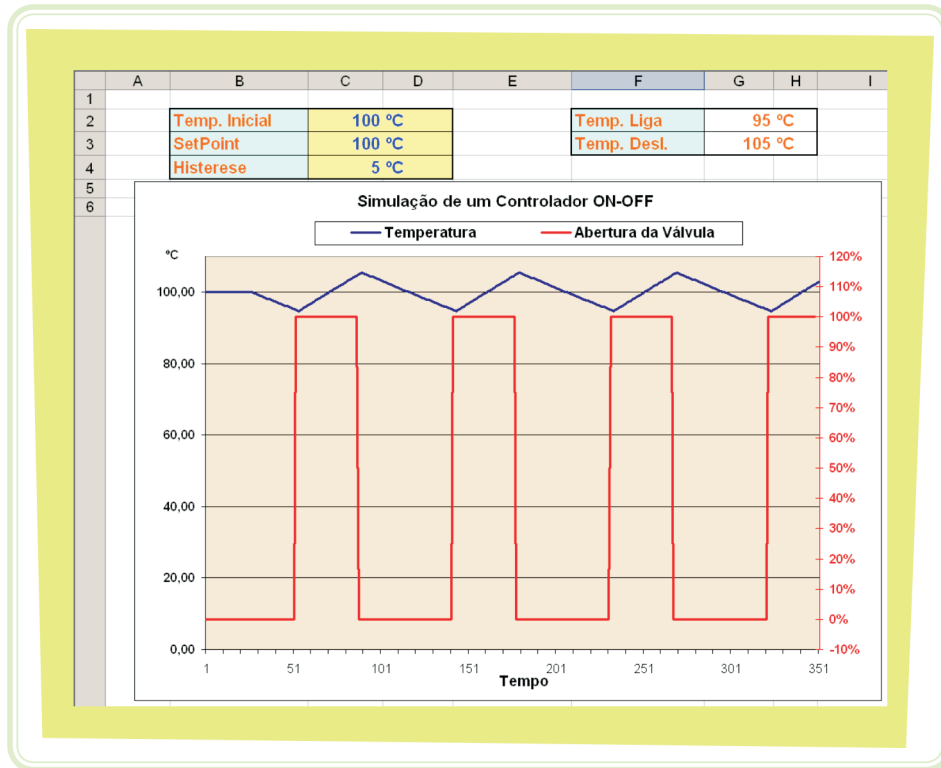
$\text{Setpoint} = 100^\circ\text{C}$

Histerese =  $5^\circ\text{C}$

Se  $T < 95^\circ\text{C} \rightarrow$  Liga o aquecedor

Se  $T > 105^\circ\text{C} \rightarrow$  Desliga o aquecedor

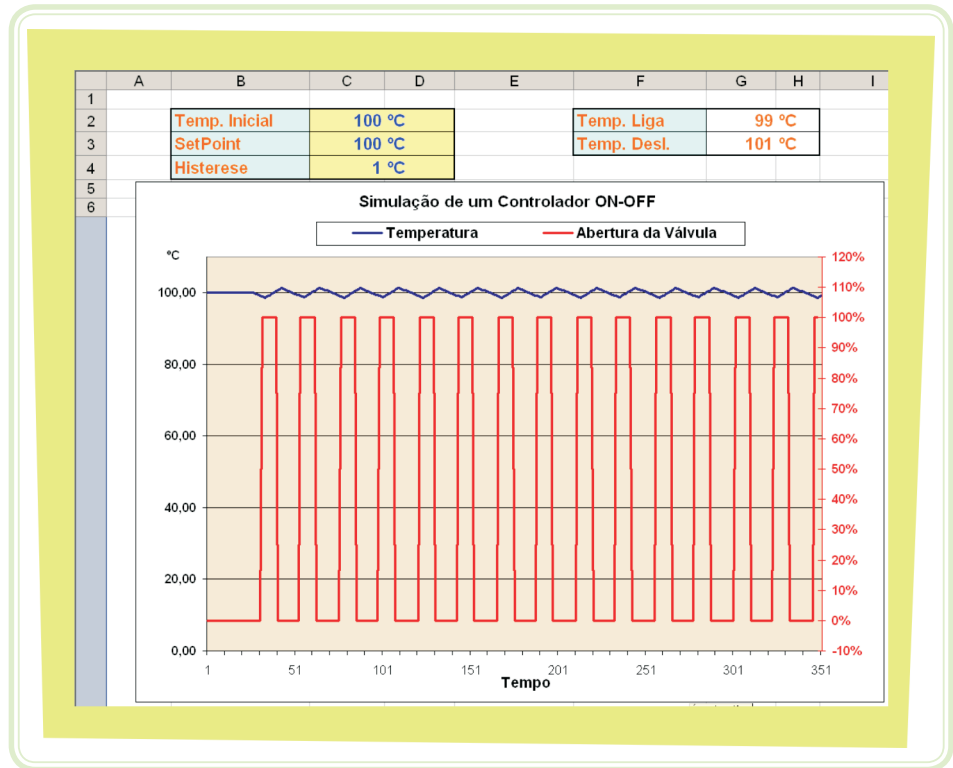
Configurando esses dados na planilha, podemos verificar o comportamento do sistema através dos gráficos de temperatura (em azul) e de acionamento da válvula (em vermelho) mostrados na Figura 8.3.



**Figura 8.3: Simulação do sistema on-off com histerese de 5°C**

Fonte: CTISM

Para verificar a função da histerese no controle, podemos simular o sistema alterando a histerese para 1°C, condição em que teremos o gráfico conforme a Figura 8.4.



**Figura 8.4: Simulação do sistema on-off com histerese de 1°C**

Fonte: CTISM

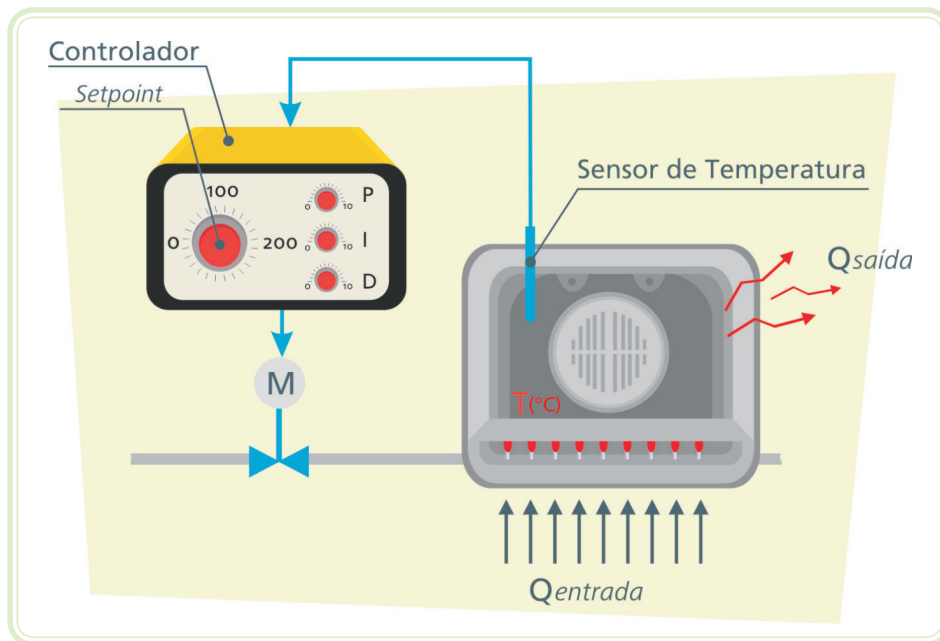
Analisando os gráficos, podemos verificar o comportamento do sistema em cada uma das configurações. Com um valor alto na histerese, temos também uma grande variação de temperatura, mas um menor número de ciclos de liga-desliga. Com uma histerese baixa, temos baixa variação de temperatura, porém com um grande número de ciclos que podem desgastar o sistema, caso ele não seja adequado a isto.

Com base nestes dados, podemos estabelecer o melhor ajuste para o sistema, ou verificar se ele é viável, pois, caso se necessite manter uma pequena variação na temperatura, podemos concluir que será mais adequado um aquecimento elétrico, pois este teria uma resposta mais rápida e menos desgaste com os ciclos.

## 8.4 Simulação de um controle PID

Na Figura 8.5 que segue temos a representação do nosso sistema.





**Figura 8.5: Simulação de um controle PID**

Fonte: CTISM

$Q_{\text{entrada}}$  = Calor fornecido pela chama, proporcional à abertura da válvula de gás

$Q_{\text{saida}}$  = Calor perdido do forno para o ambiente

$T$  = Temperatura medida pelo sensor

**Setpoint** = Temperatura configurada pelo operador

**P** = Ganho proporcional

**I** = Ganho integral

**D** = Ganho derivativo

Nesse sistema, temos uma modelagem mais complexa. Na prática, o que o controlador fará é controlar o grau de abertura da válvula de gás e, portanto, a potência da chama, tentando manter a temperatura a mais próxima possível do *setpoint*. A válvula de controle do gás, neste caso, é do tipo proporcional, ou seja, possui um motor que permite comandar qualquer valor de abertura desde 0 (fechada) até 100% (aberta).



Esse controle é baseado principalmente no ERRO, que é a diferença entre a temperatura atual do forno e a temperatura de *setpoint*. Em nossa simulação, esse erro será calculado a cada décimo de segundo e calculados os valores derivativos e integrais. Esses dados serão utilizados para ajustar a chama naquele instante. Para testarmos a resposta do sistema, o método mais usado é aplicar uma mudança brusca no *setpoint*, o que chamamos de um degrau.

Após a mudança do *setpoint*, o controlador tentará levar a temperatura para o novo valor o mais rápido possível. Como sabemos, pode-se ajustar esta reação do controlador através dos parâmetros P, I e D.

### 8.4.1 Controle proporcional

Ao zerarmos o parâmetro I e D, temos um controlador puramente proporcional, como mostrado na Figura 8.6.

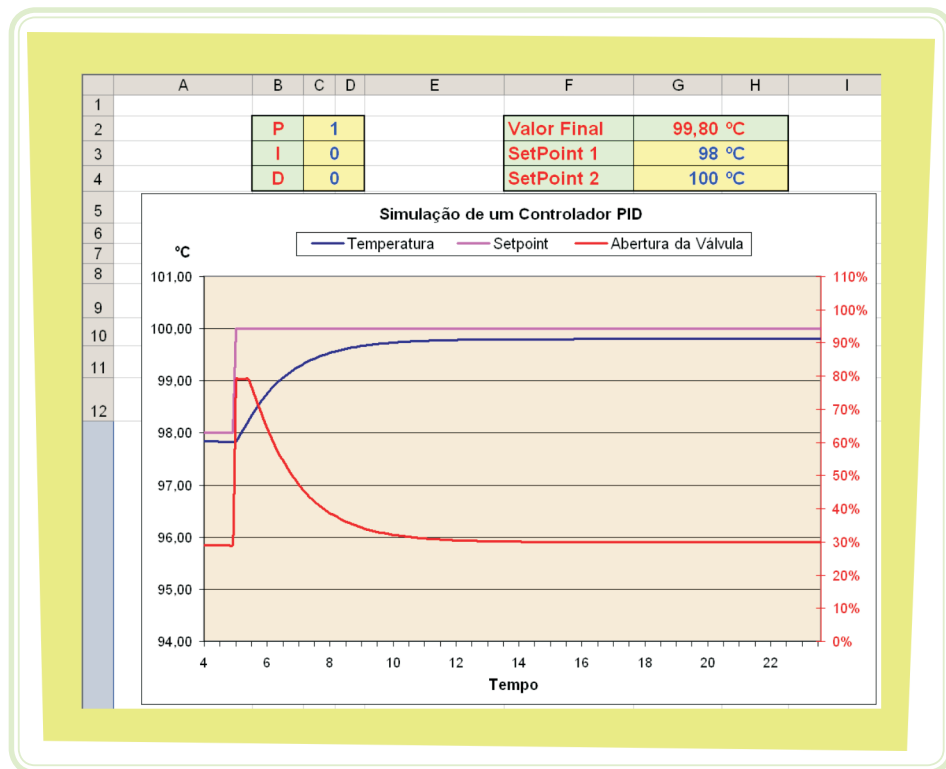


Figura 8.6: Controlador proporcional

Fonte: CTISM

Como se espera, o sistema reage à mudança do *setpoint*, abrindo a válvula para aumentar a temperatura, porém, após estabilizar, mantém-se um erro, ou seja, o valor real não chega exatamente ao valor definido no *setpoint*.

Aumentando-se o ganho proporcional, temos uma melhora no tempo de resposta e uma redução no erro final. Porém, apenas até o limite em que o sistema começa a oscilar.

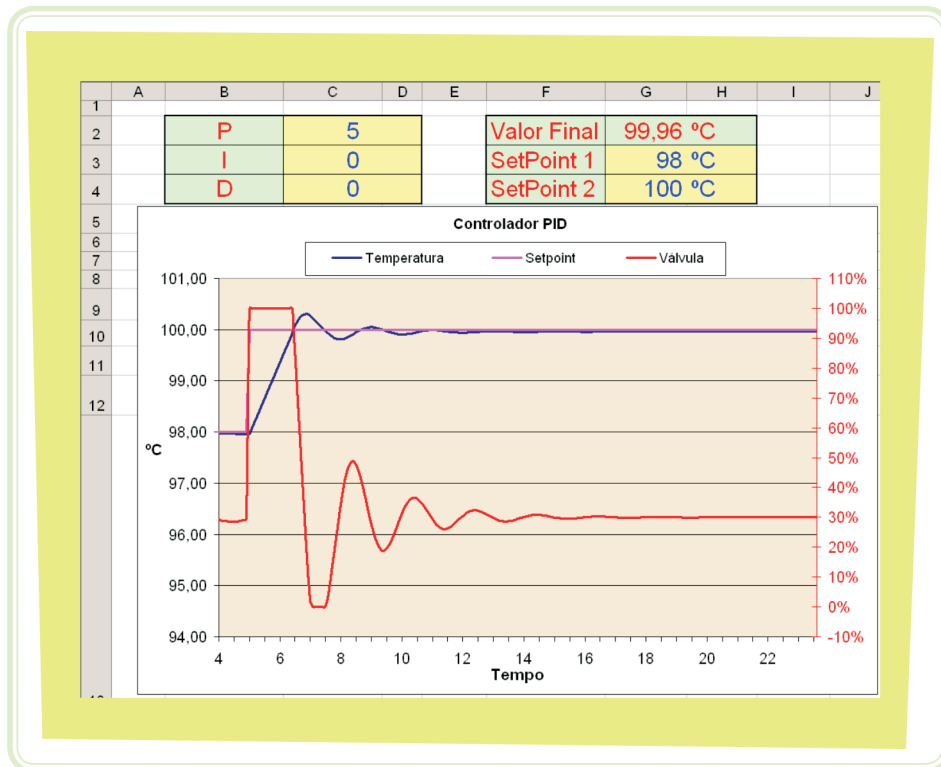
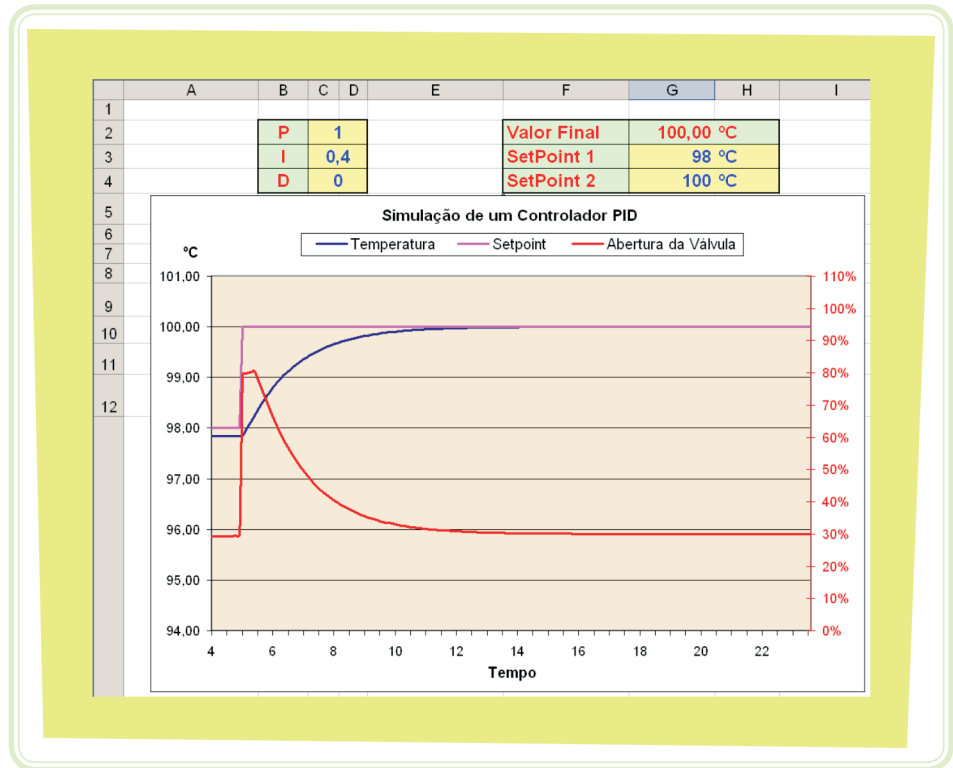


Figura 8.7: Controlador proporcional iniciando a oscilação  
 Fonte: CTISM

### 8.4.2 Controle proporcional-integral

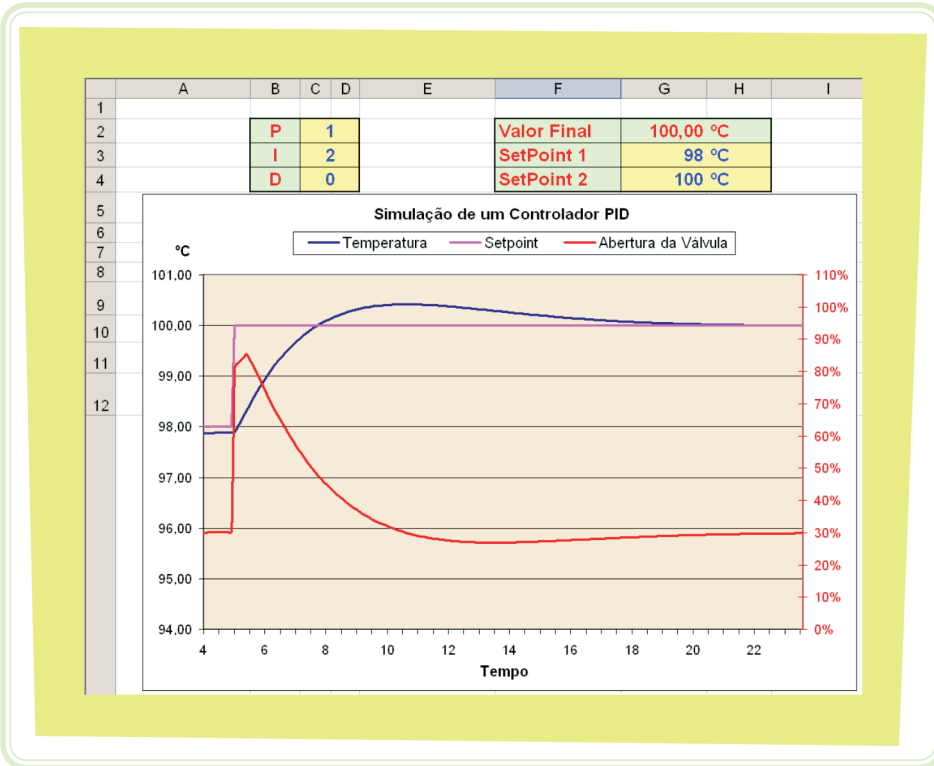
Podemos perceber que o controle proporcional age de maneira rápida, porém tem sempre um erro residual (*off-set*). Quando necessitamos de maior precisão, introduz-se um controle integral.



**Figura 8.8: Controle PI eliminando o off-set**

Fonte: CTISM

Porém, se aumentarmos demais o valor do ganho Integral, vamos notar que a tendência é haver um pico, onde a variável controlada ultrapassa o valor do *setpoint*, para depois estabilizar. Este é o *overshoot*. Na Figura 8.9, podemos ver esta situação em nosso simulador.

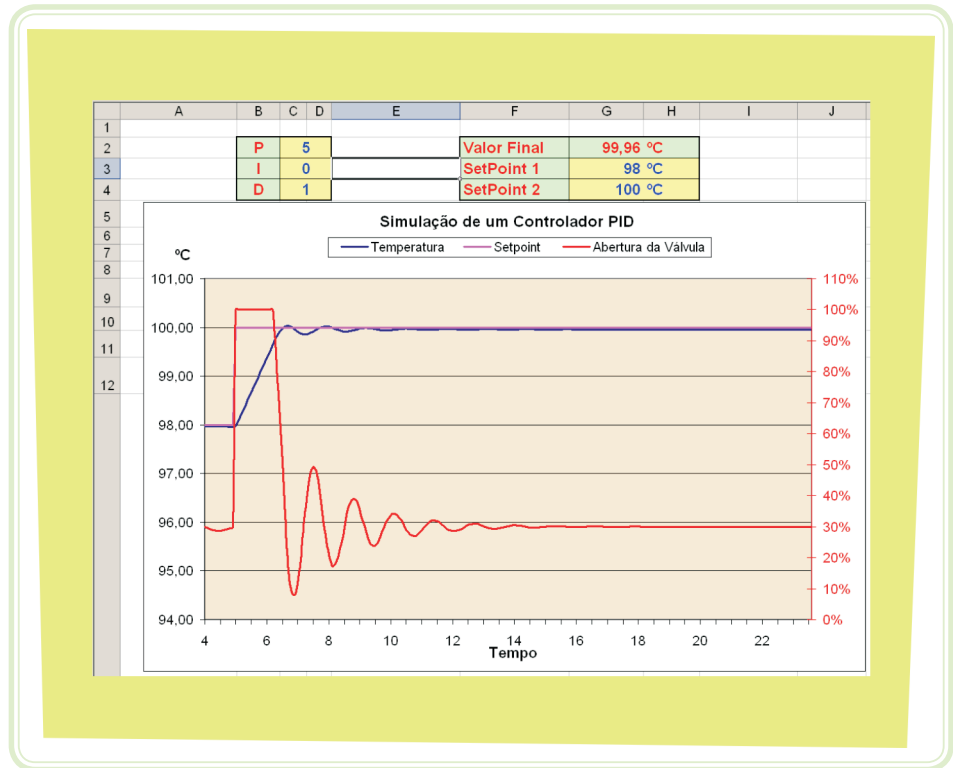


**Figura 8.9: Ação Integral causando overshoot**

Fonte: CTISM

### 8.4.3 Controle proporcional-derivativo

A ação derivativa tem o objetivo de estabilizar o sistema quando há variações bruscas nas condições de controle. Com isso, consegue-se utilizar ganhos proporcionais maiores, melhorando o tempo de resposta do sistema.



**Figura 8.10: Ação derivativa estabilizando o sistema (compare com a Figura 8.7)**  
 Fonte: CTISM

Porém, um ganho derivativo muito alto também leva o sistema à instabilidade. Pode-se verificar isso aumentando-se o valor do ganho derivativo na simulação.

#### 8.4.4 Controle proporcional-integral-derivativo

Para obter o desempenho máximo do sistema de controle, normalmente se utiliza um sistema com os 3 tipos de estratégias de controle somadas, ou seja, um controle PID.



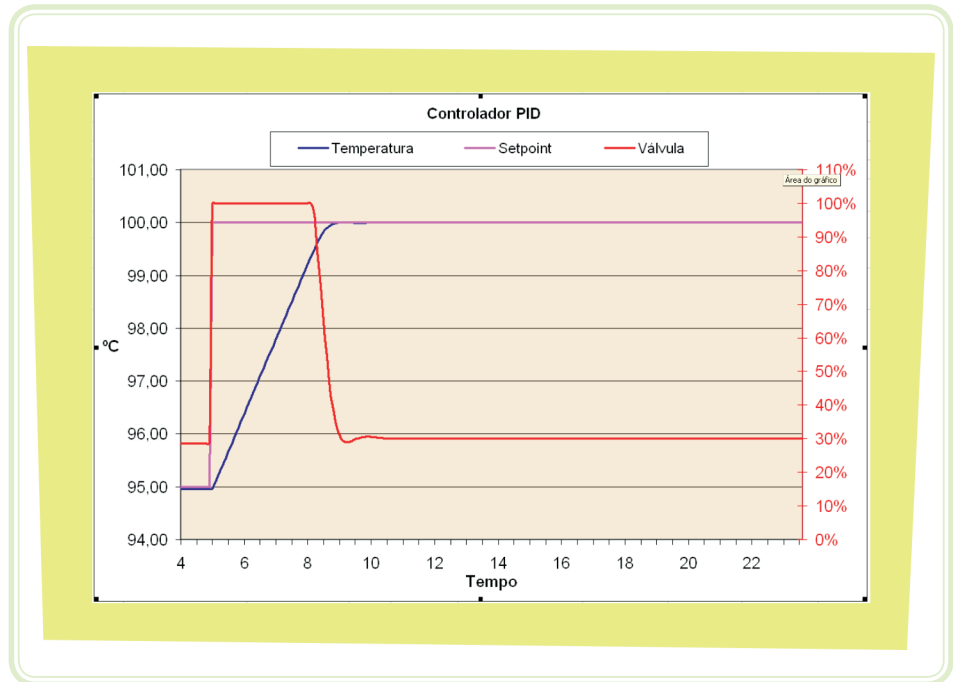
**Figura 8.11: Sistema com controle PID**

Fonte: CTISM

Na Figura 8.11, podemos ver a simulação de nosso sistema, utilizando um sistema PID como controle. O objetivo é sempre obter a correção da temperatura da forma mais rápida possível, com o menor erro e ainda assim mantendo-se estável.

Nessa figura, podemos perceber que temos ainda um tempo de regime transitório bastante longo devido a uma oscilação no sistema. Isso também é um sinal de que o sistema se encontra próximo à instabilidade.

Portanto, devem-se utilizar as técnicas de ajuste estudadas anteriormente para corrigir os parâmetros, levando-se em conta a influência de cada um deles na resposta do sistema. Na Figura 8.12, podemos ver um exemplo da resposta do sistema com os ajustes otimizados. Fique à vontade para fazer esses testes na planilha.



**Figura 8.12: Controle PID ajustado para uma resposta rápida e estável**

Fonte: CTISM

## Resumo

Atualmente, podemos contar com uma infinidade de softwares de simulação. A melhor opção para a solução de certo problema depende principalmente do tipo de modelo que escolhemos para representar o sistema.

Como um exemplo de simulação de sistemas de controle, realizamos a simulação do controle de temperatura de um forno, utilizando um modelo matemático/computacional que foi resolvido utilizando uma planilha eletrônica.

Esta simulação, apesar de simples, nos permite analisar o sistema de controle em diversas condições, desde um sistema *on-off* até um sistema PID completo. Além disso, permite analisar o impacto da variação de cada um dos controles na resposta do sistema.



## Atividades de aprendizagem



1. Em um controle *on-off*, qual o motivo do uso de uma histerese? (Faça a simulação do sistema, configurando a histerese para 0°C e analise o resultado).
2. Na planilha de simulação, temos um exemplo de controle PID para uma onda senoidal. Procure o melhor ajuste possível no sistema, ou seja, fazendo a curva de temperatura acompanhar o mais proximamente possível a curva de *setpoint*.
3. Como na questão anterior, procure o melhor ajuste possível para o exemplo da curva em rampa na planilha.

## Referências

ALVES, J. **Instrumentação, Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

CAPELLI, A. **Automação Industrial: Controle do Movimento e Processos Contínuos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2004.

DORF, R.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 2. ed. Rio de Janeiro: Printice-Hall do Brasil, 1993.

OLIVEIRA, A. L. L. **Fundamentos e Controle de Processos**. Vitória: SENAI-ES, 1999.

PHILIPS, C. L.; Harbor, R. D. **Sistemas de Controle e Realimentação**. Rio de Janeiro: Makron, 1997.

Revista Mecatrônica Atual nº 3 – Abril de 2002.

SIGHIERI, L.; NISHIARI, A. **Controle Automático de Processos Industriais: Instrumentação**. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

SILVEIRA, P. R. da; SANTOS, W. E. dos. **Automação e Controle Discreto**. 2. ed. São Paulo: Érica, 1999.

VISIOLI, A. **Practical PID Control** (Advances in Industrial Control). 1. ed. Springer, 2006.

## Currículo do professor-autor

**Fernando Mariano Bayer** possui formação como Técnico Mecânico pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (1992), graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria (2000) e mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2004). Atualmente ocupa o cargo de Professor Assistente no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Projeto e Controle de Sistemas de Produção, atuando principalmente nos seguintes temas: projetos, automação e programação.



**Olinto César Bassi de Araújo** possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade da Região da Campanha (1991), especialização em Ciências da Computação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1994), mestrado em Matemática pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (1998) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2006). Atualmente ocupa o cargo de Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Colégio Industrial de Santa Maria – Universidade Federal de Santa Maria. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional. Atua principalmente nos seguintes temas: Programação Inteira, Otimização Combinatória, Heurísticas e Meta-Heurísticas. Possui artigos publicados em periódicos como Journal of Heuristic, Pesquisa Operacional e Revista da Associação Brasileira de Engenharia de Produção.



