

Revisão Bibliográfica: controladores de processos

Literature review: process controllers

DOI:10.34117/bjdv7n8-136

Recebimento dos originais: 07/07/2021

Aceitação para publicação: 07/08/2021

Julia Lambert Andrade Duraes

Bacharelada em Engenharia de Computação (UFU)
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG
julialambertduraes@gmail.com

Aurea Messias de Jesus

Mestrando em Engenharia Química-UFU
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG
aurea.jesus@uemg.br

Emerson Carlos Guimarães

Mestrando em Engenharia Mecânica-UFU
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG
emerson.guimaraes@uemg.br

João Paulo Santos Felix

Bacharelado em Engenharia Elétrica-UEMG
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG
joaopaulo.felix@outlook.com

RESUMO

A pesquisa como tema controladores de processos, um equipamento alvo do controle, composto por diversos dispositivos responsáveis pela realização de uma atividade produtiva. Teve como objetivo uma revisão bibliográfica sobre tipos de controladores de processos que ajustam o comportamento da temperatura. Para cumprir tal objetivo, o procedimento foi uma revisão sobre controladores de processos, que ajustam o comportamento da temperatura durante o processo e obter o produto final dentro dos parâmetros de qualidade. Em linhas gerais, foi realizado uma revisão bibliográfica sobre a definição, características, funcionalidade e tipos de controladores de processos. É notável que os controladores também podem ser classificados de acordo com o tipo de potência empregado na operação, de três formas: Controladores Eletrônicos, Controladores Pneumáticos ou Controladores Hidráulicos. Os estudo sobre controladores se torna fundamental, pois são considerados um equipamento essencial em sistema de controle confiável permite operar próximo aos limites impostos pela segurança, pelo meio-ambiente e pelo processo (temperatura máxima, pureza mínima), o

que permite alterar as condições de operação normais (linha tracejada na figura) para uma condição mais favorável (linha contínua).

Palavra-chave: Controladores de Processos, Sistema de Controle Industrial.

ABSTRACT

The research theme is process controllers, a control target equipment, consisting of several devices responsible for carrying out a productive activity. The objective was a literature review on types of process controllers that adjust temperature behavior. To fulfill this objective, the procedure was a review of process controllers, which adjust the temperature behavior during the process and obtain the final product within quality parameters. In general terms, a literature review was carried out on the definition, characteristics, functionality and types of process controllers. It is noteworthy that controllers can also be classified according to the type of power used in the operation, in three ways: Electronic Controllers, Pneumatic Controllers or Hydraulic Controllers. The study of controllers becomes essential, as they are considered essential equipment in a reliable control system, allowing them to operate close to the limits imposed by safety, the environment and the process (maximum temperature, minimum purity), which allows changing the conditions of normal operation (dashed line in the figure) to a more favorable condition (solid line).

Keyword: Process Controllers, Industrial Control System.

1 INTRODUÇÃO

Um sistema pode ser visto como uma caixa preta com uma entrada e uma saída, já que não se sabe em que consiste o interior dessa caixa, mas somente a relação entre a saída e a entrada. Um sistema pode ser chamado sistema de controle quando sua saída é controlada para assumir um valor particular ou seguir uma determinada entrada (BOLTON, 1995).

Sistema de controle: disposição de componentes (elétricos, mecânicos, hidráulicos, pneumáticos, etc.), conectados entre si, de modo a controlar um processo ou sistema. Sendo um equipamento alvo do controle, sendo composto por diversos dispositivos responsáveis pela realização de uma atividade produtiva. Podemos citar como exemplos de sistema controlado, uma máquina de lavar roupas, um automóvel, um motor elétrico, uma planta industrial etc (BOLTON, 1995).

A sua complexidade depende do tipo equipamento ou processo em questão, e as técnicas e equipamentos utilizados variam de simples dispositivos eletromecânicos até sofisticadas sistemas de controle que utilizam as mais modernas estratégias de processamento digital e computacional disponíveis. Um sistema de controle é formado por uma série de instrumentos e mecanismos de controle, que se comunicam através de sinais elétricos, e que estão interligados sob a forma de malha de controle.

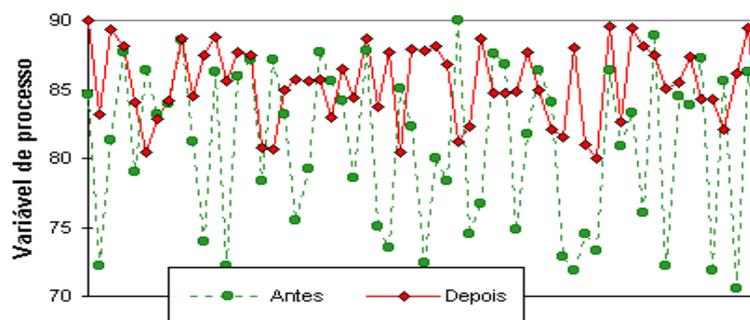
Existem duas formas básicas de sistema de controle: sistema em malha aberta e sistemas em malha fechada. Para um sistema em malha aberta, a entrada é escolhida com base na experiência, de tal forma que o sistema dê o valor de saída desejado. Essa saída, entretanto, não é modificada de forma a seguir as alterações nas condições de operação. Em um sistema em malha fechada, um sinal é realimentado da saída para a entrada e usado para modificar a entrada, de tal forma que a saída seja mantida constante mesmo com modificações nas condições de operação (BOLTON, 1995).

A ação de controle é realizada através de cálculos matemáticos que utilizam as equações para os diversos modos de controle. Para realizar a correção e estabelecer o controle dos processos, inicialmente é gerado o erro através da comparação entre o valor medido e o valor de referência estabelecido para o processo. Determinado o erro, é aplicada a equação conforme o modo de controle selecionado e calculada a saída de controle que irá manipular o elemento final de controle para corrigir os desvios apresentados (SENAI, 1999).

Os principais distúrbios que os controladores devem manipular se referem à: *Distúrbios de demanda* – quando há variação na grandeza do processo (grandeza controlada), decorrente de oscilações aleatórias (imprevisíveis) e normais dos processos produtivos. Este distúrbio é detectado pelos instrumentos medidores dos processos: *Mudanças de set-point* – quando por necessidade de alteração da característica controlada, deve-se mudar o valor alvo da variável controlada. Neste caso é alterado o valor de referência no controlador (SENAI, 1999).

Um sistema de controle confiável permite operar próximo aos limites impostos pela segurança, pelo meio-ambiente e pelo processo (temperatura máxima, pureza mínima), o que permite alterar as condições de operação normais (linha tracejada na figura) para uma condição mais favorável (linha contínua), como representa a figura 1.

Figura 1 - Ilustra a alteração de uma condição de operação



Fonte: Os autores, (2021).

Os ganhos associados a uma menor variabilidade se tornam ainda maiores em processos onde existem transições entre produtos com diferentes graus ou especificações, como ocorre frequentemente no refino do petróleo e em unidades de polimerização.

Inevitavelmente, durante a transição, haverá um período em que será gerado um produto fora de especificação, que será reciclado (maior gasto de energia) ou vendido (a preços mais baixos). A seleção de uma boa estratégia de controle permite reduzir o tempo de produção fora da especificação, e conseqüentemente melhora o resultado econômico do processo (SENAI, 1999). Assim, o objetivo desse estudo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre tipos de controladores de processos que ajustam o comportamento da temperatura durante o processo e obter o produto final dentro dos parâmetros de qualidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os controladores de processos apresentam diversos fins, principalmente na funcionalidade de automação industrial, pois são equipamentos fundamentais para o controle de processo industrial ou etapas dele por meio de códigos de controle específicos, tais como PID. De acordo com Senai (1999). Entre as principais funções desempenhadas pelos controladores de processos, estão:

- Segurança operacional e pessoal - HACCP - Sistema de Análise de Perigo e pontos Críticos de Controle
- Adaptação a perturbações externas
- Estabilidade operacional
- Especificação do produto
- Redução do impacto ambiental
- Adaptação às restrições inerentes (equipamento/ materiais/ etc.)
- Otimização
- Produção elevada do sistema
- Ritmo acelerado de produção
- Precisão requerida na produção
- Confiabilidade
- Redução de mão-de-obra
- Aumento da eficiência operacional das instalações
- Redução de custo operacional do equipamento

- Segurança, bem-estar pessoal.
- Atendimento de especificações
- Restrições operacionais. Temperatura em processos reacionais, NPSH de bombas, vazões adequadas em processos de escoamento, etc.
- Economia.

Componentes básicos

Os componentes básicos de um sistema de controle são os seguintes:

- Processo
- Sensores
- Linhas de transmissão
- Controlador
- Elemento final de controle

Ferramentas básicas

- Transformadas de Laplace
- Linearização de funções a uma ou mais variáveis
- Funções de transferência
- Diagramas de blocos

3 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTROLADORES

Os controladores industriais analógicos são classificados de acordo com a ação de controle que executam.

O controlador é o elemento no sistema de controle em malha fechada que tem como entrada o sinal de erro e gera uma saída que se torna a entrada para o elemento corretivo. A relação entre a saída e a entrada do controlador é freqüentemente chamada lei de controle. Existem três formas desta lei: proporcional, integral e derivativa (BOLTON, 1995).

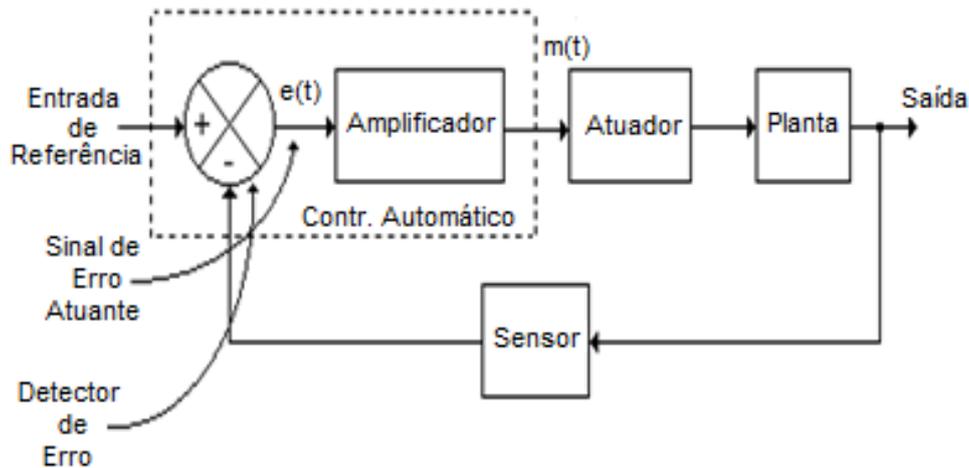
Esta classificação é mostrada a seguir.

- Controladores ON-OFF
- Controladores Proporcionais
- Controladores Integrais
- Controladores Proporcionais – Integrais
- Controladores Derivativos
- Controladores Proporcionais - Derivativos

- Controladores Proporcionais - Integrais – Derivativos

Estes controladores também podem ser classificados de acordo com o tipo de potência empregado na operação, de três formas: Controladores Eletrônicos, Controladores Pneumáticos ou Controladores Hidráulicos. Como fonte de potência utiliza-se a eletricidade, pressão ar e pressão de óleo respectivamente.

Figura 2 - Esquema de um sistema de controle

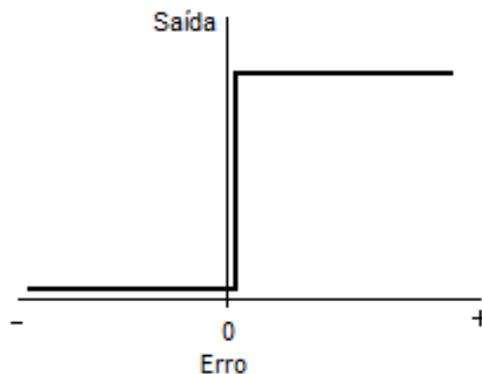


Fonte: Os autores, (2021).

4 CONTROLADOR ON – OFF

Nos controladores On-Off, o sinal de erro, que é a entrada para o elemento de controle, ora é zero ora possui um determinado valor fixo, e a saída deste chaveia o elemento de correção, o chaveamento tem somente duas posições fixas, isto é, ligado e desligado, como mostra a figura 3 (BOLTON, 1995).

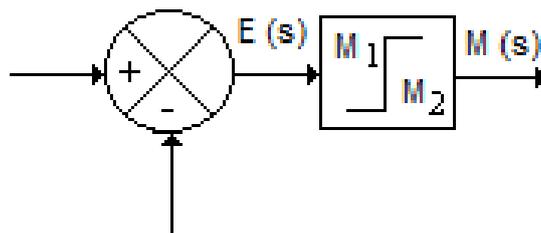
Figura 3 - Modo de controle de duas posições



Fonte: Os autores, (2021).

O controle de duas posições é relativamente de baixo custo e simples, por esta razão, extremamente utilizado em sistemas de controle industriais como domésticos.

Figura 4 - Diagrama de blocos de um controlador on-off

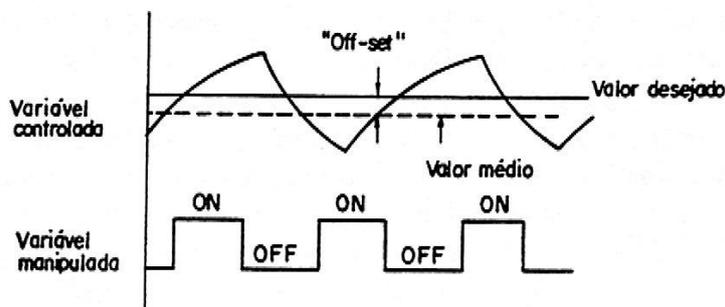


Fonte: Os autores, (2021).

Este controlador compara o sinal de entrada, que indica o valor atual da grandeza, com o valor determinado como ponto de controle, conhecido como Set Point, se o valor atual supera o Set Point, desliga o atuador, se o Set Point supera o valor atual, liga o atuador, considerando, por exemplo, um controle de aquecimento.

Neste tipo de controle, a variável manipulada é rapidamente mudada para o valor máximo ou valor mínimo, faz-se com que a variável controlada oscile continuamente em torno do valor desejado, esta oscilação varia em frequência e amplitude, com isto, o valor médio da grandeza sob controle será sempre diferente do valor desejado, provoca-se o aparecimento de um desvio residual denominado erro de “off-set”, mostrado na figura 5.

Figura 5 - Erro de off-set



Fonte: Os autores, (2021).

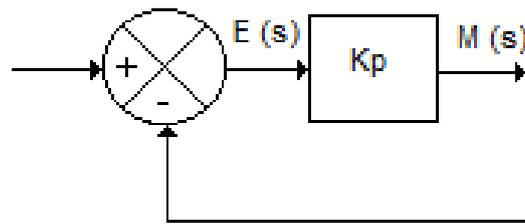
5 CONTROLADOR PROPORCIONAL (P)

Para um controlador com ação de controle proporcional, a saída do controlador é diretamente proporcional a sua entrada, sendo esta o sinal de erro e , que é uma função do tempo. Assim, a relação entre a saída do controlador $m(t)$ e o sinal erro atuante $e(t)$ é $m(t) = K_p e(t)$ ou em transformada de Laplace,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p$$

onde K_p é denominado sensibilidade proporcional ou ganho (OGATA, 1982).

Figura 6 - Diagrama de blocos de um controlador proporcional



Fonte: Os autores, (2021).

O controlador é apenas um amplificador com um ganho constante. Um grande erro em algum instante de tempo acarreta um valor alto na saída do controlador nesse instante de tempo. O ganho constante tende a existir somente para uma certa faixa de erros, chama-se banda proporcional, quanto menor a banda proporcional, mais eficiente será a ação proporcional (BOLTON, 1995).

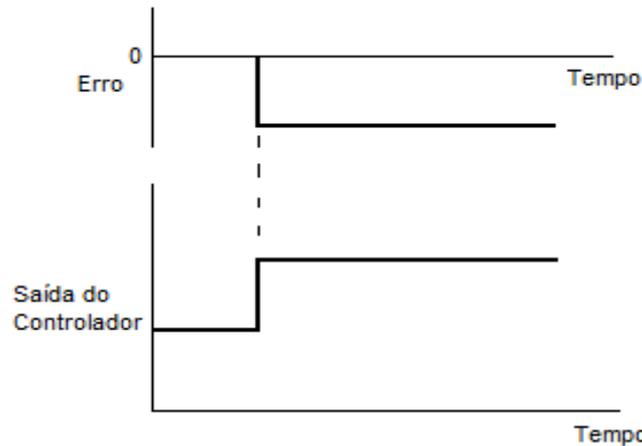
De acordo com Bolton (1995), é comum exprimir-se a saída do controlador como uma porcentagem da saída total do controlador. Assim, uma variação de 100% na saída do controlador corresponde a uma mudança no erro de um extremo da banda proporcional a outro.

Pode-se concluir que existe uma relação entre a banda proporcional e o ganho proporcional. Esta relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$K_p = \frac{100}{\text{Banda Proporcional}}$$

Portanto, a saída é proporcional à entrada, se a saída do controlador é um erro em degrau, então a saída é também um degrau, de mesma forma da entrada, sendo demonstrado na figura 7.

Figura 7 - Sistema com controle Proporcional



Fonte: Os autores, (2021).

O controle proporcional não consegue eliminar o erro de off-set, em função das mudanças nas condições do processo, pois quando ocorre um distúrbio qualquer no processo a ação proporcional não consegue eliminar totalmente a diferença entre o valor desejado e o valor medido. A amplitude do erro, e a estabilidade do sistema, dependem da constante K_p adotada no sistema (SENAI, 1999).

Com o valor do erro off-set menor, a banda proporcional diminui, tendo-se uma constante K_p maior. No entanto, à medida que a banda proporcional diminui, aumenta-se a possibilidade de oscilações no processo, resultando em um sistema tendendo a instabilidade.

Com o valor do erro off-set maior, temos o inverso, a banda proporcional aumenta, tendo-se uma constante K_p menor, com isto, torna-se o sistema mais estável.

6 CONTROLADOR INTEGRAL (I)

Em um controlador com a ação de controle integral, a saída do controlador $m(t)$ é proporcional à integral do sinal de erro $e(t)$ com o tempo, isto é:

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{ou} \quad m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

onde K_i é uma constante chamada ganho integral [2].

A função de transferência do controlador integral é:

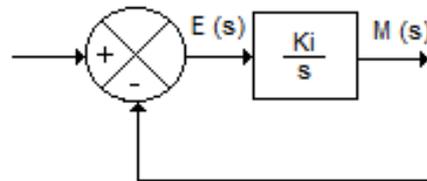
$$G(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Se o valor de $e(t)$ é dobrado, então o valor de $m(t)$ varia duas vezes mais rápido, ou seja, quanto maior o erro maior velocidade de correção na saída (OGATA, 1982). Para erro atuante nulo, significa que a taxa de variação do sinal de saída do controlador é nula,

portanto, o valor de $m(t)$ permanece constante. Por outro lado, como a saída não pode variar instantaneamente, a ação integral afeta a dinâmica do sistema, visto que, como o sinal de correção é integrado no tempo, quando ocorre um distúrbio em degrau, a ação integral vai atuar de forma lenta até eliminar por completo o erro.

A ação integral foi introduzida principalmente para eliminar o erro de off-set deixado pela ação proporcional.

Figura 8 - Diagrama de blocos de um controlador integral

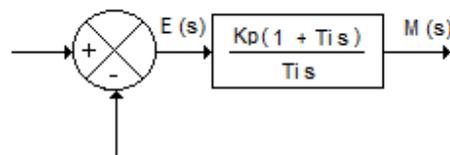


Fonte: Os autores, (2021).

7 CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL (PI)

Ação de controle resultante da combinação da ação proporcional e a ação integral.

Figura 9 - Diagrama de blocos de um controlador proporcional - mais – integral



Fonte: Os autores, (2021).

Esta combinação tem por objetivos principais, corrigir os desvios instantâneos (proporcional) e eliminar ao longo do tempo qualquer desvio que permaneça (integral), por exemplo, erro de off-set (BOLTON, 1995). Para esta combinação, a saída do controlador é:

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

sendo $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, assim:

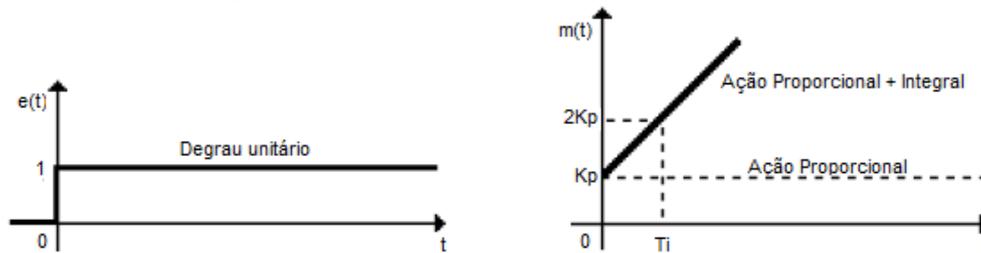
$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Aplica-se Laplace, obtendo a função de transferência do controlador:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

onde K_p representa a sensibilidade proporcional ou ganho e T_i representa o tempo integral, tanto K_p como T_i , são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_p afeta tanto a parte proporcional como a parte integral da ação de controle. O inverso do tempo integral T_i é denominado taxa de restabelecimento (reset). A taxa de restabelecimento é o número de vezes por minuto que a parte proporcional da ação de controle é duplicada (OGATA, 1982).

Figura 10 - Comparação entre a ação proporcional e a ação proporcional-integral



Fonte: Os autores, (2021).

A figura 10 mostra que a ação integral elimina o erro estacionário, como já foi dito anteriormente, por outro lado aumenta o atraso de transporte do sistema produzindo grandes oscilações piorando a estabilidade, podendo tornar o sistema instável em malha fechada. Entretanto, se o sistema for estável, o controle proporcional - integral eliminaria o erro de regime.

8 CONTROLADOR DERIVATIVO (D)

Na forma de controle derivativo a saída do controlador é proporcional à taxa de variação do erro atuante e com o tempo, isto é:

$$m(t) = K_d \frac{de}{dt}$$

onde o K_d é o ganho derivativo e tem a unidade de s.

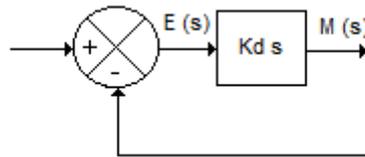
A função de transferência do controlador derivativo é:

$$G(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_d s$$

Com o controle derivativo quando ocorre o sinal de erro, a saída do controlador pode torna-se grande, visto que a saída do controlador é proporcional à taxa de variação do sinal do erro e não do erro propriamente dito. Isto pode ocorrer uma grande ação corretiva antes que um sinal de erro realmente ocorra. Se o erro é uma constante, então não existe ação corretiva, mesmo que o erro seja grande. O controle derivativo é

insensível a sinais de erro constantes ou de variação lenta, e por esta razão, não é usado sozinho, sendo combinado com outras formas de controle (BOLTON, 1995).

Figura 11 - Diagrama de blocos de um controlador derivativo

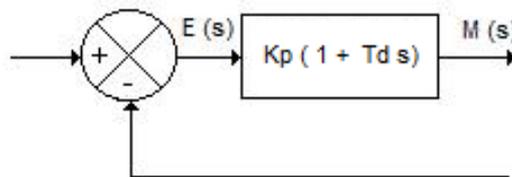


Fonte: Os autores, (2021).

9 CONTROLADOR PROPORCIONAL - DERIVATIVO (PD)

Ação de controle resultante da combinação da ação proporcional e a ação derivativa.

Figura 12 - Diagrama de blocos de um controlador proporcional - mais – derivativo



Fonte: Os autores, (2021).

Esta ação de controle reage em função da velocidade do desvio, atua-se fornecendo uma correção antecipativa do desvio, ou seja, no instante em que o desvio tende a acontecer ela fornece uma correção de forma a prevenir o sistema quanto ao aumento do desvio, diminuindo com isto o tempo de resposta. Esta ação de controle só apresenta influência nos transitórios. Para esta combinação, a saída do controlador é:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{k_p^2}{K_d} \frac{de(t)}{dt}$$

sendo $K_d = \frac{K_p}{T_d}$, assim:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

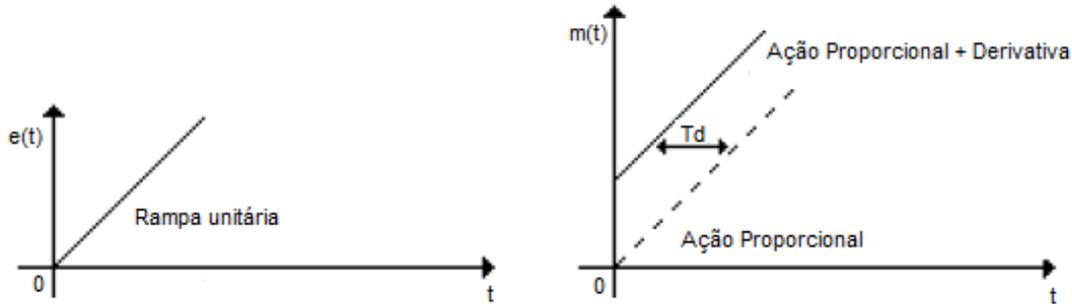
Aplica-se Laplace, obtendo a função de transferência do controlador:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

onde K_p representa a sensibilidade proporcional ou ganho e T_d representa o tempo derivativo, tanto K_p como T_d , são ajustáveis. A ação de controle derivativa, algumas vezes denominada controle de taxa, é onde a magnitude da saída do controlador é proporcional

à taxa de variação do erro atuante. O tempo derivativo T_d é o intervalo de tempo que a ação de controle derivativa antecede a ação de controle proporcional (OGATA, 1982).

Figura 13 - Comparação entre a ação proporcional e a ação proporcional-derivativo



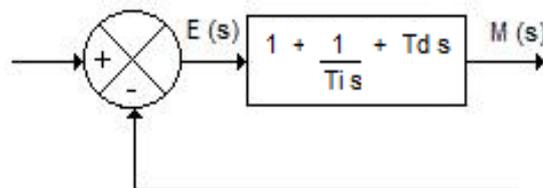
Fonte: Os autores, (2021).

Na figura 15, faz-se a comparação entre a ação proporcional e a ação proporcional-derivativo. Enquanto ação de controle derivativa possui a vantagem de ser antecipatória, tem as desvantagens de amplificar os sinais de ruído e causar um efeito de saturação no atuador, provocando oscilação.

10 CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL - DERIVATIVO (PID)

Ação de controle resultante da combinação da ação proporcional, ação integral e ação derivativa. Esta ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais (OGATA, 1982).

Figura 14 - Diagrama de blocos de um controlador proporcional - mais - integral - mais - derivativo



Fonte: Os autores, (2021).

O controle proporcional associado ao integral e ao derivativo, é o mais sofisticado tipo de controle utilizado em sistemas de malha fechada. Para está combinação a saída do controlador é:

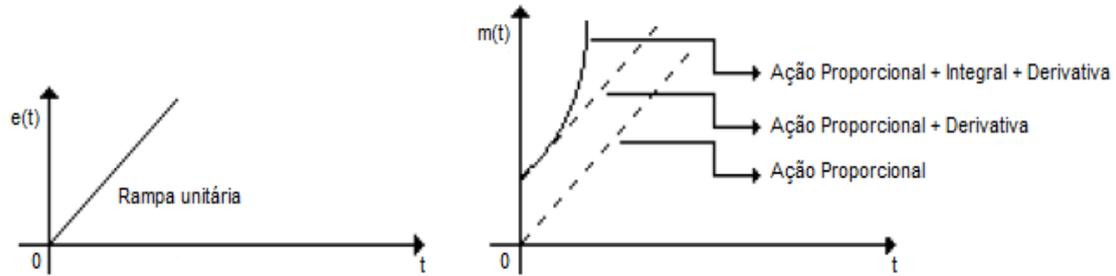
$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Aplica-se Laplace, obtendo a função de transferência do controlador:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

onde K_p representa a sensibilidade proporcional ou ganho, T_d representa o tempo derivativo e T_i representa o tempo integral. A figura 17 mostra a ação das três ações de controle.

Figura 15 - Diagramas indicando a entrada da rampa unitária e a saída do controlador



Fonte: Os autores, (2021).

A associação das três ações de controle permite-nos obter um tipo de controle que reúne todas as vantagens individuais de cada um deles e por isto, virtualmente ela pode ser utilizada para controle de qualquer condição do processo.

A proporcional nada mais é do que um ganho. Este, é utilizado em situações quando uma resposta transitória e uma resposta em regime são satisfatórias simplesmente adicionando-se um ganho ao sistema, sem a necessidade de compensação dinâmica, com isto elimina as oscilações. A integral, é utilizada para melhorar a resposta de Regime Permanente, resultando na eliminação do erro de off-set. Enquanto a derivativa fornece ao sistema uma ação antecipativa evitando previamente que o erro se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do erro, assim melhorando a resposta transitória de um sistema. Portanto a combinação das três ações de controle resulta em um controle utilizado para melhorar tanto a resposta transitória, como a resposta de Regime Permanente (SENAI, 1999).

Na prática, no entanto, esta associação é normalmente utilizada em processo com resposta lenta (constante de tempo grande) e sem muito ruído, tal como ocorre na maioria dos controles de temperatura.

11 CONCLUSÃO

No início da pesquisa, tinha a necessidade de realizar uma pesquisa bibliográfica sobre controladores de processos, uma vez que, eles apresentam diversos fins, principalmente na funcionalidade de automação industrial, pois são equipamentos fundamentais para o controle de processo industrial ou etapas dele por meio de códigos de controle específicos, tais como PID. Assim, o objetivo desse estudo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre tipos de controladores de processos que ajustam o

comportamento da temperatura durante o processo e obter o produto final dentro dos parâmetros de qualidade.

Em linhas gerais, o objetivo da pesquisa foi alcançado, uma vez que foi realizado uma revisão bibliográfica sobre a definição, características, funcionalidade e tipos de controladores de processos. É notável que os controladores também podem ser classificados de acordo com o tipo de potência empregado na operação, de três formas: Controladores Eletrônicos, Controladores Pneumáticos ou Controladores Hidráulicos.

Os estudo sobre controladores se torna fundamental, pois são considerados um equipamento essencial em sistema de controle confiável permite operar próximo aos limites impostos pela segurança, pelo meio-ambiente e pelo processo (temperatura máxima, pureza mínima), o que permite alterar as condições de operação normais (linha tracejada na figura) para uma condição mais favorável (linha contínua).

REFERÊNCIAS

BOLTON, W. **Engenharia de Controle**. São Paulo: MAKRON Books, 1995. 497p.

OGATA, Katsuhiko, Universidade de Minnesota. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro – RJ, Editora Prentice/Hall, 1982. 824p.

SENAI. **Fundamentos de Controle de Processos**, Apostila de Instrumentação. Espírito Santo, 1999. 72p.