

COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES PID, PID FUZZY E PREDITIVO AVALIADOS A UMA PLANTA INDUSTRIAL DE NÍVEL E TEMPERATURA

GERONIMO BARBOSA ALEXANDRE^{1*}; JORDÂNIO INÁCIO MARQUES²;
THALYS DE FREITAS FERNANDES³; FRANCISCO DEILSON FREITAS R. B. DE SOUSA⁴

¹ Ms. Engenharia Elétrica, Professor EBTT, IFPE, Garanhuns - PE, geronimo.alexandre@ee.ufcg.edu.br

² Mestrando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande - PB, jordanioinacio@hotmail.com

³ Ms. Engenharia Química, UFCG, Campina Grande - PB, thalys.fernandes@yahoo.com.br

⁴ Especialista em Matemática, Professor EBTT, IFMA, Buriticupu - MA, francisco.barbosa@ifma.edu.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

RESUMO: Sistemas de controle são amplamente usados na indústria de transformação, com o intuito de mapear e operar no ponto ótimo. O controlador PID é o mais usual, pois pode ser facilmente implementado em um CLP. Com o avanço da tecnologia surgiram os controladores baseados em regras, sendo utilizados para operar e estabilizar processos não lineares, os chamados controladores *Fuzzy*. Quando se trata de um processo multivariáveis, não linear e com restrições usa-se os controladores preditivos. Neste cenário de discussão de técnicas de controle avançado, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dinâmico em malha fechada dos controladores industriais PID tradicional, PID *Fuzzy* e preditivo, quando aplicados no controle de nível e temperatura de uma planta industrial (tanque de aquecimento) em condições operacionais iguais. Diante das três estratégias de controle implementadas, o controlador PID *Fuzzy* foi o que apresentou melhor desempenho dinâmico (tempo de resposta de 30 e 36 segundos para as malhas de nível e temperatura respectivamente), acomodando a não linearidade do processo, o acoplamento das malhas e variações operacionais. Todas as simulações desenvolvidas neste trabalho foram implementadas usando o *Simulink Dynamics Systems*[®], do pacote MatLab, da MathWorks.

PALAVRAS-CHAVE: Controladores industriais, desempenho dinâmico, planta industrial.

COMPARATIVE CONTROLLERS PID, FUZZY AND PREDICTIVE EVALUATED TO INDUSTRIAL PLANT LEVEL AND TEMPERATURE

ABSTRACT: Control systems are widely used in the manufacturing industry, in order to map and operate at optimum. The PID controller is the most common because it can be easily implemented in a PLC. With the advancement of technology came the controllers based on rules, being used to operate and stabilize non-linear processes, called Fuzzy controllers. When it is a multivariate process and nonlinear constraints are used predictive controllers. In this technical discussion scenario advanced control, the objective of this study is to evaluate the dynamic performance of closed-loop industrial controllers traditional PID, PID Fuzzy and predictive, when applied at the level and temperature control of an industrial plant (heating tank) in the same operating conditions. Before the three implemented control strategies, the PID fuzzy controller showed the best dynamic performance (time of 30 and 36 seconds for level and temperature loops response respectively), accommodating not process linearity, coupling stitches and operational variations. All simulations developed in this work were implemented using *Simulink Dynamics Systems*[®], MatLab package from MathWorks.

KEYWORDS: Industrial controllers, dynamic performance, industrial plant.

INTRODUÇÃO

A maior parte dos controladores industriais é do tipo proporcional-Integral-Derivativo (PID) implementado basicamente pela programação de um Controlador Lógico Programável (CLP, do inglês *PLC – Programmable Logic Controller*). A presença de tecnologias computacionais sugere o uso de controladores PID digitais discretos, e com isso um controlador PID se transforma em apenas mais um

programa na memória de um computador. O sinal contínuo de erro na entrada do controlador é amostrado e convertido em sinais digitais, enquanto a saída digital do controlador é reconvertida num sinal analógico contínuo alimentado ao processo controlado. Controladores PID trabalham bem em processos lineares, onde uma mudança na entrada do processo gera uma mudança proporcional na saída do processo. Se a relação de entrada e saída do processo for levemente não linear, ajustes periódicos dos parâmetros do controlador são necessários. Há diversos métodos de sintonia do PID, como *Ziegler-Nichols* e *Cohen-Coon*, dentre outros. Entretanto, no caso de processos altamente não lineares ou quando são usados na malha de realimentação elementos de controle ou atuadores não lineares, ou quando a modelagem matemática do processo encontra dificuldades devido a conhecimento insuficiente ou complexidade da planta em geral, controladores PID tem um desempenho pobre. Nesses casos, o recurso é usar ou tipo de estratégia de controle ou utilizar operadores humanos especializados.

O controle preditivo (do inglês, *MPC- Model Predictive Control*), como o próprio nome diz, é um controlador baseado no modelo da planta a ser controlada (modelo interno). De posse deste modelo o controlador pode inferir predições sobre o estado futuro da planta em função das entradas manipuladas pelo controlador. Na maioria dos casos, tais modelos internos são simplificações lineares do processo, portanto uma primeira etapa da implementação de controladores MPC tradicionais é a obtenção do modelo linear da planta, utilizando técnicas de identificação para plantas lineares. Em cada instante de amostragem, o MPC soluciona *on-line* um problema linear quadrático (LQ), usando o estado atual da planta como estado inicial (Alexandre e Lima, 2013).

Controladores *Fuzzy* baseados em regras apresentam vantagens práticas, tornando-os de fácil configuração em *softwares* especialistas, dentre elas rápido processamento em paralelo. Esta estratégia de controle é inerentemente confiável e robusto, resistente a perturbações externas e desgastes ao envelhecimento de componentes internos. Ao se utilizar um controlador PID *Fuzzy* possibilita-se um a deformação na superfície parametrizada (curva de parametrização dos ganhos do controlador

,
□□□, □□□

, que determina o desempenho do transitório do PID), que compensa as não linearidades do sistema. Algoritmos *Fuzzy* podem emular praticamente qualquer função não linear. Uma curva de saturação, típica de atuadores eletromecânicos pode ser emulada por algoritmo *Fuzzy*, onde uma função de entrada e saída pode ser definidas em termos heurísticos, tais como positivo ou negativo (Adaptado de Simões e Shaw, 2007).

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dinâmico dos controladores PID, PID *Fuzzy* e preditivo, na estabilidade e mapeamento dos *set-points* de temperatura e nível de uma caldeira industrial (tanque de pré-aquecimento), esta planta é caracterizado por ser um processo não linear, multivariável e convencional na indústria. Mudanças operacionais são constantes na operação e controle da planta industrial, avaliar o comportamento do controle preditivo diante de tais situações se faz necessário. Discutir estratégias que podem ser implementadas pelo operador diante de uma anormalidade na operação do processo se faz presente entre os objetivos deste documento. Propõe-se também uma bateria de testes para avaliação do controlador projetado a fim de verificar se realmente a solução é ótima, fazendo variar as referências (*set-points*) das saídas controladas, a exemplo o tipo de sinal aplicado, a variação da frequência do sinal de referência, a influência de ruídos nos sinais medidos e a presença de falhas nos equipamentos do processo.

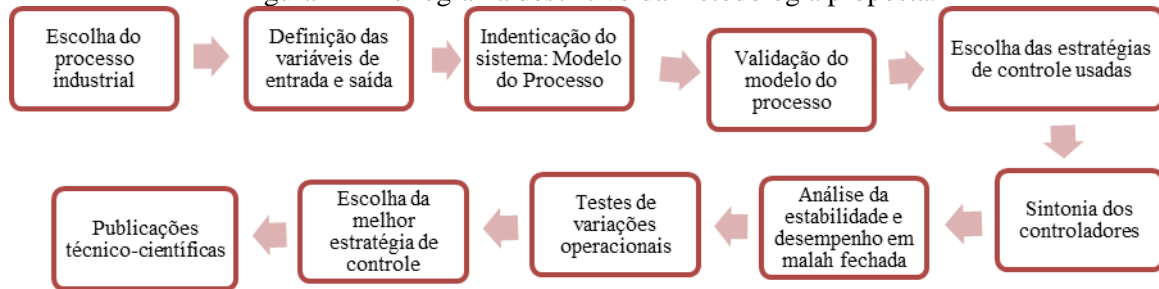
MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta para consecução dos objetivos estabelecidos, consiste na implementação do diagrama de blocos da Figura 1. Para consecução dos objetivos traçados durante a fase de planejamento estratégico utilizou-se a planta virtual de nível e temperatura, computadores, *softwares* dedicados e a *expertise* dos profissionais envolvidos. Ainda que a planta piloto esteja sendo direcionada para planta experimental específica, pode ser projetada para escala industrial, não dispensando uma consultoria técnica e projeto específico para cada unidade pela equipe projetista.

Processos industriais que envolvem controle de nível e temperatura são muito comuns no setor de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, como por exemplo, em tanques de aquecimento ou de misturas, colunas de destilação, caldeiras, fornos entre outros. Outro setor comumente encontrado é nas

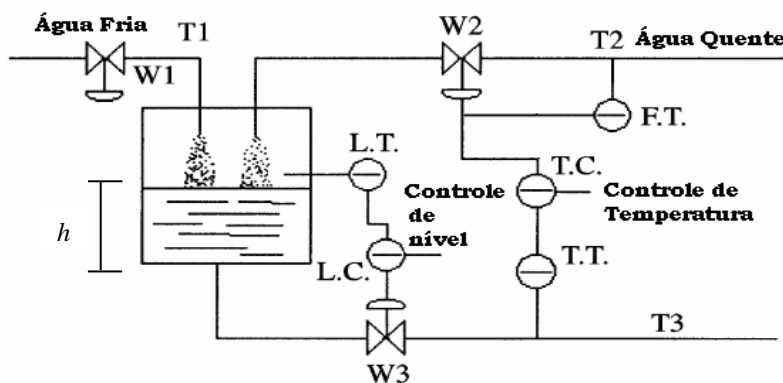
indústrias alimentícias. Neste setor é muito comum à necessidade de manter a temperatura em um reservatório ao mesmo tempo em que os fluxos de entrada e de saída são determinados pelos processos anteriores e posteriores. Na Figura 2 ilustra-se um exemplo de uma planta industrial para controle de nível e temperatura, um tanque de pré-aquecimento de água para uma caldeira de vapor.

Figura 1 – Fluxograma descritivo da metodologia proposta.



Essa planta é um sub-processo que deve fornecer água a uma temperatura especificada para um sub-processo seguinte. A vazão de saída é dada a partir de um reservatório cujo nível é mantido constante devido à ação de controle. A temperatura da água no interior do reservatório é determinada a partir da mistura de água quente e fria de dois outros reservatórios. O elemento L. C. (*Level Control*) é responsável pelo controle de nível atuando sobre a válvula W3. O elemento T. C. (*Temperature Control*) é responsável pelo controle da temperatura de saída T3 e atua sobre a válvula de água quente W2. Os controles das válvulas W1 e W2 são complementares de forma a manter a vazão de saída constante.

Figura 2 – Esquemático da instrumentação e controle da planta de nível e temperatura.



Fonte: Adaptado de Alexandre & Lima (2013)

O modelo matemático deste processo é obtido pelo balanço de massa e de energia e por leis da hidrodinâmica (escoamento nas válvulas), tratando-se de um sistema não linear, cuja representação em espaços de estados após linearização e substituição dos dados constantes nas equações dinâmicas, é dada por:

O tanque de pré-aquecimento, por ter múltiplas entradas
 ($\square 1$
 - vazão de entrada de água
 fria, $\square 2$
 - vazão de entrada de água
 quente,

□3

- vazão de saída de água morna) e múltiplas saídas
(

- nível do
tanque,

□3

– temperatura da água morna, vazão de saída), pode ser considerado como um sistema multivariável.
A lei de controle de um controlador PID discretizado dada por,

onde

□□

é o ganho
proporcional,

□□

é tempo de amostragem por se tratar de um sistema discretizado,
□□

constante do ganho integral,
□□

é a constante de tempo do ganho
derivativo,

□

é o sinal de erro. A lei de controle de um PID *Fuzzy* é dada pela expressão (3),

Onde

□2□

é a variação do erro. Logo o controlador apresenta três entradas

,

e

□2□

, e uma saída

governada por regras da forma:

“SE erro = E_i E variação do erro = dE_i E variação da variação do erro = d^2E_i ENTÃO variação do controle = dU ”.

O controlador preditivo resolve o problema de programação quadrática na ação de controle, dado de forma geral por,

Sujeito a

Onde

□□ = □□□

, é o vetor de tomada de decisão,

é a matriz Hessiana,

é matriz linear dos coeficientes das restrições,

e
são vetores. As matrizes
e
são matrizes constantes. O controlador calcula estes durante a inicialização e recuperá-los da memória do computador quando necessário. Ele calcula os vetores
e
que variam no tempo, no início de cada instante de controle (adaptado de Schmidt e Biegler, 1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para exibir o desempenho dos controladores projetados para controle do nível e temperatura do fluido no interior do tanque de aquecimento foram realizadas diversas simulações computacionais. A simulação foi feita no *Simulink*[®]- *Dynamics Systems*, do ambiente *MatLab*[®] versão 7.9 (versão 2011), usando passo de integração fixo, tolerância de , método de integração *ODE45-Dormand-Prince solver*, duração de segundos. As Figuras 3 e 4 ilustram a ação de controle das leis de controle implementadas (PID, PID Fuzzy e Preditivo).

Figura 3 – Desempenho dos Controladores industriais na malha de nível.

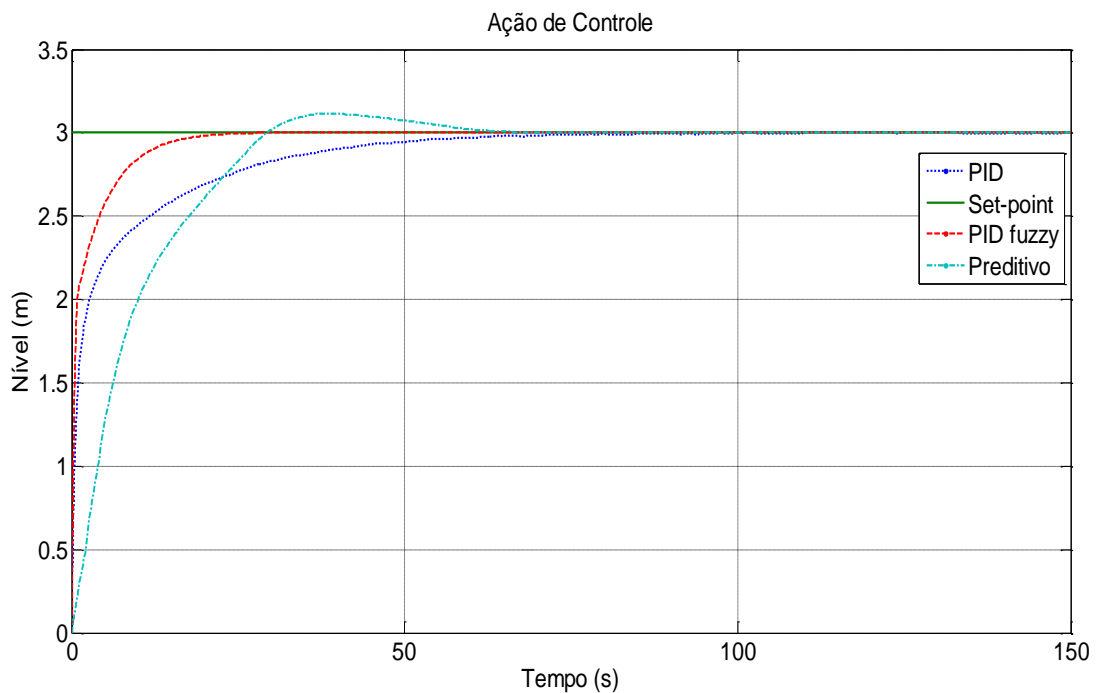
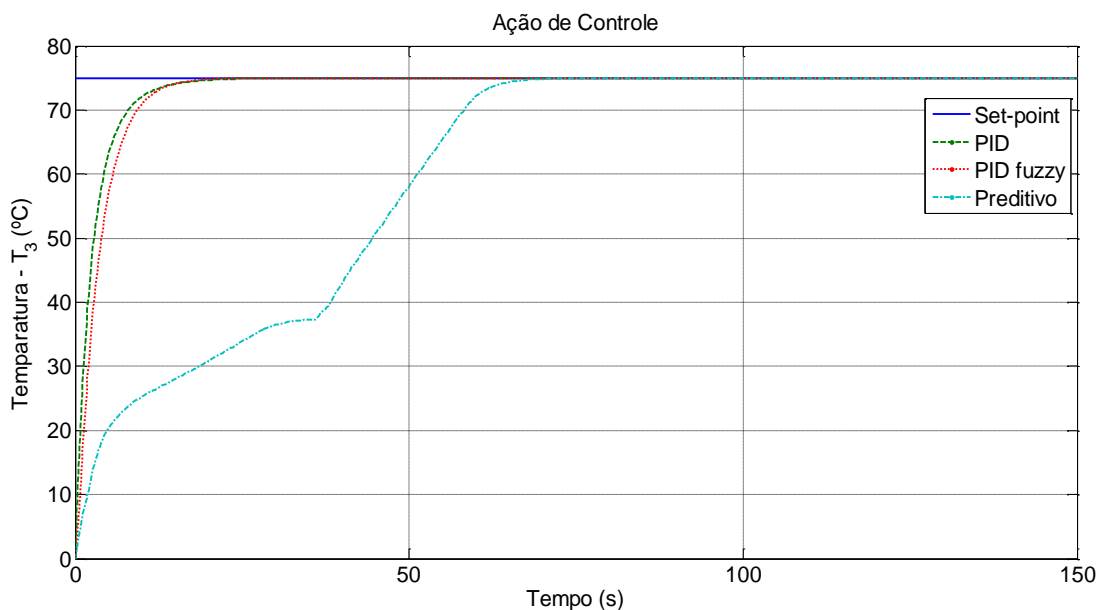


Figura 4 – Desempenho dos Controladores industriais na malha de temperatura.



Observando as respostas das malhas de controle de nível e temperatura, percebe-se que o controle PID *Fuzzy* apresentou desempenho dinâmico no mapeamento rápido e estável da variável controlada, diante de uma planta multivariável e não linear. Na malha de nível o PID *Fuzzy* conseguiu mapear a referência em 36 segundos, já o PID tradicional obteve um tempo de resposta em 125 segundos e o controle preditivo teve tempo de assentamento de 76 segundos, mas com um *overshoot* de 0.12 de amplitude. Na malha de temperatura o PID tradicional e PID *Fuzzy* obtiveram uma resposta rápida e bem análoga, embora o PID seja mais rápido (27 segundos, frente aos 34 segundos do PID convencional), já o controlador preditivo conseguiu mapear a saída frente ao *set-point*, mas com uma resposta lenta (tempo de acomodação de 80 segundos).

Para o estudo de caso o controle preditivo obteve um desempenho superior ao PID tradicional, mas inferior ao PID *Fuzzy*, pois esta estratégia de controle é amplamente usada em processos multivariáveis, com acoplamento entre malhas e com restrições nas entradas, saída e no processo, o que não acontece com o tanque de aquecimento.

CONCLUSÃO

As estratégias de controle implementadas conseguirão rastrear/mapear com eficácia as referências (*set-points*) frente às saídas controladas com bom desempenho dinâmico e estabilidade em malha fechada. Contudo o controlador PID *Fuzzy* mostrou-se robusto, acomodando a não linearidade do processo e o acoplamento entre as malhas de nível e temperatura. Como o processo apresenta poucas restrições de entrada e saída, o controle preditivo apresentou desempenho moderado, mas superior ao PID tradicional. Como trabalhos futuros sugere-se a implementação do chamado *Hardware-in-the-loop*, onde a planta industrial é virtual e controlador é real (no caso o PID *Fuzzy*).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, G. B. & Lima, A.M.N. *Diagnose de Falhas e Gestão de Alarmes em Sistemas de Instrumentação e Controle Industrial*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2013, Campina Grande, Brasil.
- Simões, M. G. & Shaw, I. S. *Controle e modelagem Fuzzy*. 2ª Edição, Editora Blucher – FAPESP, São Paulo, 2007.
- Schmidt, C. and Biegler L.T. Quadratic Programming Methods for Reduced Hessian SQP. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 18, Number 9, 1994, pp. 817–832.