

# CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PENEIRA VIBRATÓRIA UTILIZADA EM UNIDADE DE TRATAMENTO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Marcela Eduarda Domingos Silva<sup>1</sup>, Raquel Menezes Silva<sup>1</sup>, Fernando Superbi Guerreiro<sup>1</sup>, Aniel S. Morais<sup>2</sup>, e Rubens Gedraite<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFU, FEQUI, Uberlândia – MG, [marcellaed@hotmail.com](mailto:marcellaed@hotmail.com), [quel\\_msilva@hotmail.com](mailto:quel_msilva@hotmail.com), [fernando\\_guerreiro18@yahoo.com.br](mailto:fernando_guerreiro18@yahoo.com.br), [rgedraite@feq.ufu.br](mailto:rgedraite@feq.ufu.br)

<sup>2</sup>UFU, FEELT, Uberlândia – MG, [aniel@eletrica.ufu.br](mailto:aniel@eletrica.ufu.br)

**Resumo** - A recuperação do fluido de perfuração é importante na operação de perfuração de poços de petróleo, sob o ponto de vista ambiental e econômico. Este fluido é uma suspensão coloidal classificada de acordo com seus componentes. As propriedades físicas deste fluido devem ser monitoradas e corrigidas para carrear os cascalhos até a superfície; manter a estabilidade mecânica do poço; resfriar a broca; transmitir força hidráulica até a broca; manter os cascalhos em suspensão quando sem circulação; evitar oxidação entre outros. O entendimento do comportamento dinâmico dos diversos equipamentos que compõe esta planta de recuperação através de modelos matemáticos fenomenológicos, para fins de automação e controle do processo global, constitui um desafio pelo relativo grau de complexidade das equações de conservação e alto custo computacional na simulação. Como alternativa preliminar a esta abordagem, foi desenvolvida a análise dinâmica do processo de separação nas peneiras, através de modelos matemáticos simplificados obtidos a partir de dados experimentais. Na primeira etapa, o modelo da peneira foi desenvolvido com base na fundamentação teórica correspondente à visão sistêmica da inter-relação entre as entradas e as saídas do processo, com base em modelos aproximados correspondentes a sistemas de primeira ordem com tempo morto, quando for o caso.

**Palavras-Chave** - modelo matemático, peneira vibratória, simulação computacional.

## CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A SHALE SHAKER USED WITH DRILLING FLUID TREATMENT UNIT

**Abstract** - The recovery of drilling fluid is essential in the oil and gas drilling under the environmental and economical point of view. These fluids are basically

colloidal suspensions classified according to their base components in aqueous and non aqueous fluids. The equipment typically utilized in solid-liquid separation units are divided into three groups sequentially arranged: shale shakers, hidrociclones (desander and desilter) and centrifugal decanter. The comprehension of shale shaker dynamic behavior is very important to reduce the process load applied to the subsequent equipment. This paper presents a simplified analysis of the main process variables that affect the dynamic behavior of the shale shaker, in order to understand its importance for automation and process control purposes. The complexity of the conservation equations involved and the difficulty of representing the real dynamics of the process in a comprehensive way is the major challenge. As an alternative answer to the question, a preliminary approach was developed and consists in analyze the dynamics of the separation process in the shale shaker, through simplified mathematical models obtained from experimental data. In the first step, the shale shaker model was developed based on theoretical basis, corresponding to the systemic point of view of the inter-relationship between the inputs and outputs of the process, based on first-order with dead time approximate models, where applicable.

**Keywords** – mathematical model, shale shaker, computational simulation.

## I. INTRODUÇÃO

Uma das maneiras de se buscar a melhoria de desempenho de um sistema pode ser a identificação das dinâmicas das variáveis que participam do mesmo, através de modelos matemáticos pertinentes e de algoritmo de programação matemática, com a finalidade de maximizar ou minimizar uma função objetivo sem violar as restrições do referido sistema. Este processo pode ser denominado de otimização e ocorre em tempo real quando a solução deste problema, dita solução ótima, é obtida periodicamente e implementada de forma automática.

A tecnologia de otimização em tempo real é uma ferramenta poderosa na busca contínua das condições operacionais mais rentáveis de um processo. Ela pode ser uma tarefa difícil e complexa, porém seus benefícios são relevantes, podendo proporcionar, em conjunto com o emprego de sistemas de controle avançado, uma redução



XII CEEL – ISSN 2178-8308  
13 a 17 de Outubro de 2014  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU  
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

significativa dos custos de operação da referida unidade. Estudos recentes apontam para a necessidade de uma visão global do negócio, bem como a escolha apropriada das restrições do processo para o sucesso de um projeto de otimização em tempo real.

Os benefícios da otimização estão associados à maximização da produção do poço de petróleo e à minimização no consumo específico de energia e de insumos e dependem de fatores, tais como:

- Disponibilidade da unidade de processo para aumento da capacidade de produção;
- Diferença de preços entre os insumos;
- Consumo específico de energia;
- Número de variáveis manipuladas e restrições;
- Precisão do modelo do processo.

A otimização faz a conexão entre as tarefas de planejamento e programação da produção e as executadas pelo controlador multivariável. A Figura 1 ilustra a estrutura tradicional para a otimização em tempo real de um sistema de múltiplos controladores multivariáveis, com seus componentes inter-relacionados. Seus principais componentes são:

a) Modelagem do processo em estado estacionário

O modelo matemático deve representar o sistema numa ampla faixa de operação com elevado grau de precisão, de forma que a lucratividade máxima prevista pela função objetivo seja efetivamente a lucratividade potencial do processo real e que, quando implementada na planta a solução do otimizador, não seja violada nenhuma das restrições do processo.

b) Reconciliação de dados e estimativa de parâmetros

Os modelos rigorosos necessitam de um grande número de informações medidas, as quais apresentam incertezas. Este assunto é tratado pela reconciliação de dados. A primeira fase da reconciliação de dados consiste na detecção de erros grosseiros. Nesta etapa são identificadas e tratadas as medições inválidas decorrentes do inadequado funcionamento da instrumentação. Posteriormente, os pequenos erros dos balanços de massa e energia são distribuídos entre as medições, através do modelo do processo, das incertezas estatísticas dos medidores e das medições redundantes.

Os modelos rigorosos são assim chamados porque se espera que os mesmos reproduzam com fidelidade o processo real em ampla faixa de operação. Para que isso se concretize, é necessário ajustar seus parâmetros para compensar perturbações não medidas e mudanças no desempenho do processo provocadas por fatores tais como: alterações nas propriedades de transporte do fluido de perfuração, entupimento das telas das peneiras etc. Por analogia aos controladores tradicionais, o ajuste do modelo através da atualização de seus parâmetros a partir de dados da planta, corresponde à retroalimentação do processo.

c) Algoritmo de otimização

Após o ajuste do modelo com os dados reais da planta é efetuada a otimização. Para tanto, utiliza-se um algoritmo de programação não linear (PNL) que obtém a solução ótima do problema de otimização, a qual corresponde à máxima lucratividade da unidade dentro de uma região operacional limitada pelas restrições do processo. O algoritmo de PNL

normalmente utilizado em aplicações industriais é o SQP (*Successive Quadratic Programming*).

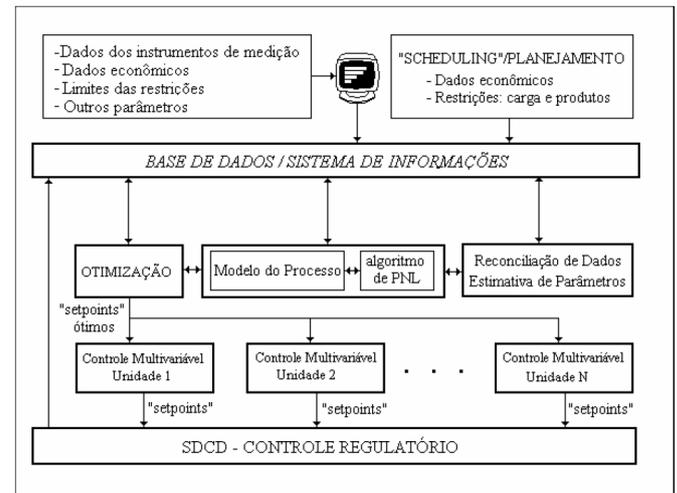


Fig. 1 Estrutura tradicional para otimização em tempo real

A identificação da dinâmica de um sistema consiste na determinação da sua estrutura dinâmica através da análise da relação entre as entradas e as saídas do mesmo. A Figura 2 representa um sistema constituído por um processo multivariável com  $n$  entradas e  $m$  saídas [1].

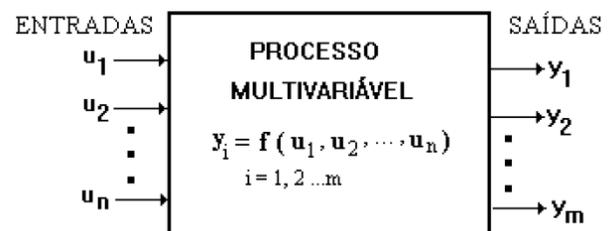


Fig. 2. Representação típica de um sistema

A estrutura dinâmica de um sistema consiste de um modelo matemático do mesmo, o qual pode ser:

**Modelo teórico:** obtido através de equações algébricas e diferenciais envolvendo balanço de massa, energia e momento. Nesta categoria estão os modelos dinâmicos utilizados para treinamento operacional; e

**Modelo empírico:** construído por intermédio de métodos estatísticos. São obtidos dados experimentais de operação da unidade de processo, através dos quais são ajustados os parâmetros do modelo. A quase totalidade dos controladores preditivos multivariáveis utilizados em aplicações industriais possuem um modelo linear do processo, obtido através de testes efetuados na planta. Outro exemplo de modelo empírico é o obtido através de redes neurais.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar as premissas de projeto para a análise e obtenção de modelos lineares tipicamente utilizados em sistemas de controle preditivos aplicados a peneiras vibratórias. A ênfase será dada nos procedimentos para efetuar os testes na planta visando a obtenção futura de modelos paramétricos do tipo ARX (autoregressive model with exogenous inputs).

## II. A UNIDADE DE TRATAMENTO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração típica [2].

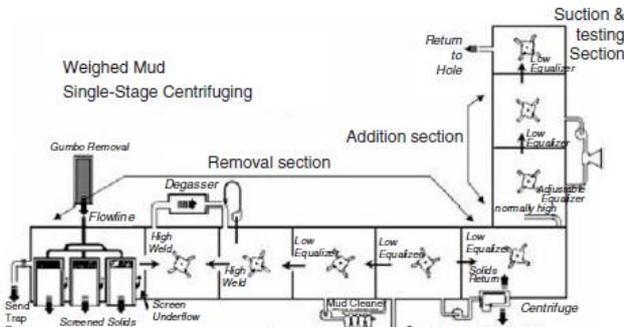


Fig. 3 Representação simplificada de unidade de recuperação de fluido de perfuração

A eficiência de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração pode ser avaliada de duas maneiras, a saber: (i)- eficiência de sólidos removidos propriamente dita e (ii)- eficiência na conservação de líquido. Quanto maior a fração de sólidos removidos, maior a eficiência. Quanto maior a fração de sólidos no efluente de descarte, melhor é a eficiência de remoção. Ambos os aspectos devem ser considerados. Tipicamente, a eficiência de um sistema de controle de sólidos pode ser referenciada a partir da comparação do volume final acumulado de fluido de perfuração quando se utiliza o sistema de separação com o volume de fluido que se utilizaria para se conseguir o mesmo teor de sólidos por meio de diluição.

Um bom projeto de sistema de separação de sólidos leva em conta a instalação de vários tipos de equipamentos em série, como mostrados na Figura 3. É de suma importância observar que cada estágio de processamento possui um elevado grau de dependência com o seu predecessor, ou seja, para que um dado equipamento tenha uma eficiência adequada, o equipamento em série imediatamente antes deve estar operando de acordo com a sua capacidade. Caso contrário, haverá uma sobrecarga para o equipamento seguinte e assim por diante, ocasionado uma perda de eficiência global da unidade de recuperação.

Deve ser ressaltado o fato de que as peneiras têm um papel fundamental na eficiência global do sistema, pois são os primeiros equipamentos que entram em contato com o fluido de perfuração quando este retorna do poço. O dimensionamento adequado da quantidade e qualidade das peneiras evita a sobrecarga dos hidrociclones (desareidores e dessiltadores) e dos equipamentos seguintes.

No contexto da operação de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração típica, as variáveis de processo que devem ser monitoradas e/ou controladas, são: distribuição do tamanho das partículas, densidade do fluido, viscosidade do fluido, vazão de fluido, variação de volume do fluido na unidade de tratamento.

Algumas destas variáveis já são medidas com relativa facilidade. Dentre elas podem-se citar a densidade, a

viscosidade e a variação de volume. Outras ainda requerem o emprego de elementos sensores não totalmente consolidados para medição contínua e em tempo real, tal como o analisador de tamanho de partículas [3].

## III. A IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS

Os modelos dos processos podem ser divididos em: (i)- físicos: protótipos e plantas-piloto e (ii)- matemáticos: representando os fenômenos físicos através de equações [4].

A primeira fase de qualquer estudo sistemático do controle de um determinado processo deve ser o modelamento matemático. Este pode basear-se na modelagem fenomenológica clássica, ou seja, as equações diferenciais que regem o processo, Outra forma de se obter a função de transferência é através da relação entrada-saída, obtida a partir dos testes diretamente na planta.

Na prática, os processos industriais apresentam comportamentos que muitas vezes não podem ser incorporados no modelo, porque estes fenômenos são desconhecidos ou os modelos matemáticos são extremamente complexos. Neste contexto, pode afirmar que muitos modelos são aproximações dos processos reais, podendo ser representados pela combinação de quatro elementos tipicamente encontrados em processos industriais, a saber: (i)- ganho, (ii)- atraso de transporte, (iii)- atraso de transferência e (iv)- elemento integrador [5].

A aproximação de sistemas superamortecidos de ordem 2 ou superior por atraso de transferência mais tempo morto pode ser representada pela função de transferência apresentada na Equação (1).

$$G(s) = \frac{K.e^{-\theta.s}}{1 + \tau.s} \quad (1)$$

na qual  $\theta$  é o tempo morto,  $\tau$  é o atraso de transferência e  $K$  o ganho do sistema. O tempo morto foi incluído para considerar os elementos de ordem mais alta que não devem ser desprezados [6].

O valor do ganho  $K$  pode ser obtido dividindo-se a amplitude da variação da saída do processo pela amplitude  $A$  do degrau aplicado, como apresentado na equação (2).

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{\infty}}{A} \quad (2)$$

Existem diversos métodos para se determinar os parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto, a saber: (i)- Método da Tangente, (ii)- Método de Miller, (iii)- Método de Smith e (iv)- Método de Sundaresan e Krishnaswamy. Neste trabalho optou-se por utilizar o Método de Miller [7].

## IV. O MODELO DA PENEIRA

Foi utilizada como base para o desenvolvimento dos modelos apresentados neste trabalho a unidade experimental mostrada na Figura 4, a qual é formada por uma peneira vibratória com 1,65 m de comprimento, 0,81 m de largura e 1,0 m de altura, equipada com dois motovibradores e uma tela de separação, podendo esta última ser trocada quando necessário; um tanque de 500 L com agitação para

alimentação da suspensão à peneira; um tanque de descarga de 200 L para coleta do material passante e uma bomba centrífuga para transportar este líquido passante de volta ao tanque de alimentação.



Fig. 4 Unidade de recuperação de fluido de perfuração

O modelamento matemático da peneira foi desenvolvido a partir das seguintes hipóteses simplificadoras:

- Modelo a parâmetros concentrados;
- Valores médios globais das propriedades;
- Trabalhou-se com variáveis desvios;
- Simulação aproximada de alguns fenômenos.

O modelo estudado neste trabalho considerou as funções de transferência apresentadas na sequencia para o sistema estudado.

O nível de material sobre a tela da peneira, a vazão de fluido passante e de fluido retido foram modeladas com base nas Equações (3), (4) e (5), respectivamente.

$$G_H(s) = \frac{K_H}{1 + \tau_H \cdot s} \quad (3)$$

$$G_F(s) = \frac{K_F}{1 + \tau_F \cdot s} \quad (4)$$

$$G_R(s) = \frac{K_R \cdot e^{-\theta_R \cdot s}}{1 + \tau_R \cdot s} \quad (5)$$

A intensidade e frequência de vibração da tela da peneira foram modeladas com base no sinal de saída gerado por um controlador proporcional que atua diretamente sobre a intensidade e a frequência de um sinal senoidal que representa o movimento oscilatório considerado neste trabalho. A Equação (6) apresenta o modelo usado.

$$G_C(s) = K_p \cdot H(s) + \text{Constante} \quad (6)$$

O movimento vibratório da tela da peneira foi modelado de maneira simplificada por meio da função senoidal identificada por *freq*, conforme apresentado no diagrama de simulação.

O diagrama de simulação do modelo, implementado no ambiente Simulink® do aplicativo Matlab® é apresentado na Figura 5. Os blocos que representam o controlador estão representados na cor vermelha.

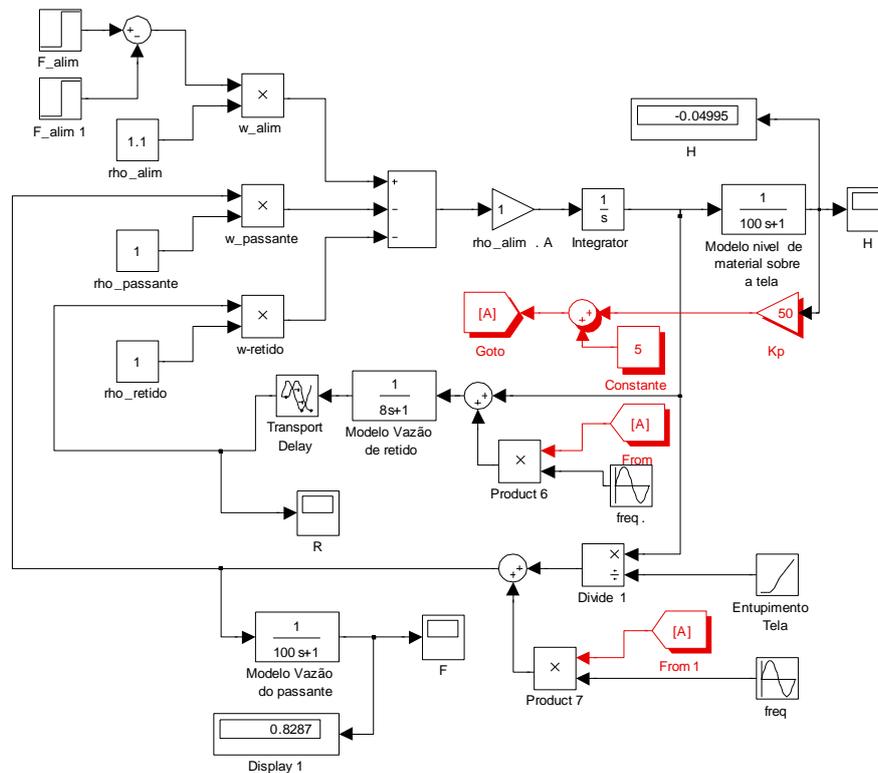


Fig. 5 Diagrama de simulação da peneira vibratória estudada

## V. RESULTADOS OBTIDOS & DISCUSSÃO

Com base nas simulações feitas, pode-se constatar que o comportamento temporal das variáveis de processo consideradas neste trabalho foi adequado e coerente. A vazão alimentada à peneira recebeu uma perturbação brusca em degrau, de amplitude igual a 2 L/s. Todas as variáveis foram representadas como variáveis desvio. O sistema de controle atuou na variável manipulada (frequência de vibração da tela da peneira), readequando por consequência as vazões de passante e de retido. As Figuras 6, 7 e 8 ilustram o comportamento do sistema estudado em resposta ao degrau imposto na vazão de alimentação.

No início, o nível de fluido de perfuração sobre a tela da peneira tendeu a aumentar. Contudo, o sistema de controle modelado atuou e fez com que o mesmo retornasse ao valor original. É oportuno ressaltar que está sendo usado o conceito de variável desvio e que neste cenário o set-point foi assumido igual a zero. Na medida em que o sistema de controle atuou, a vazão de passante foi gradativamente aumentada, como pode ser constatado na figura 7. De maneira análoga, a vazão de retidos apresentou oscilação em torno de 1,0 L/s, não sendo afetada de maneira significativa pelo distúrbio na vazão alimentada. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que o controlador, ao promover o aumento da vazão de passante, acabou por contribuir para que a vazão de retidos não sofresse interferência significativa. Os valores dos parâmetros da peneira foram estimados teoricamente, com base em informações disponíveis na peneira existente na unidade experimental e também em testes exploratórios preliminares.

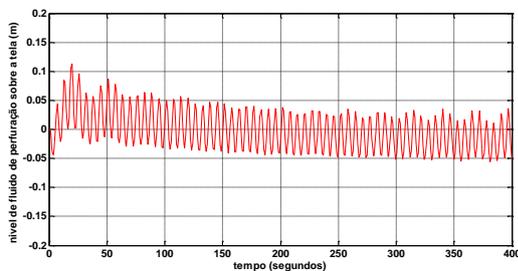


Fig. 6 Comportamento temporal do nível sobre a tela da peneira

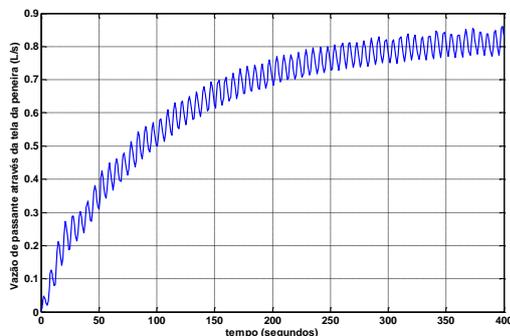


Fig. 7 Comportamento temporal da vazão de passante através da tela da peneira

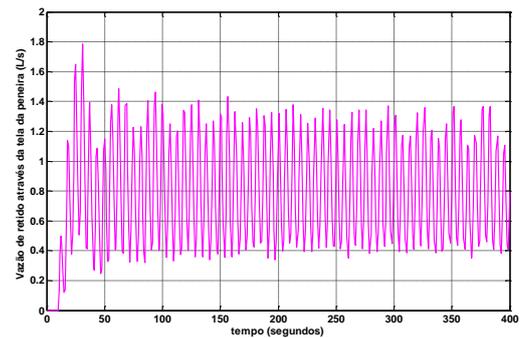


Fig. 8 Comportamento temporal da vazão de retido através da tela da peneira

## VI. CONCLUSÕES

O modelo simplificado desenvolvido serviu para que fosse alcançado um entendimento básico sobre o comportamento dinâmico do sistema em estudo, haja vista a inexistência na literatura de publicações especializadas no assunto, em virtude de se tratar de tema bastante específico.

A unidade experimental montada será fundamental para a etapa de análise e validação do modelo matemático proposto, contribuindo principalmente para os estudos de otimização que se pretende desenvolver na sequência.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFU e à Petrobrás pelo apoio em pesquisas no projeto *Solid*.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SIMSCI-ESSCOR - Connoisseur™ On-Line Performance Suite User's Guide, August 1, 2005.
- [2] ASME, *Drilling fluids processing handbook*, Gulf Professional Publishing, USA, 2005.
- [3] Ronaes, E., Vik, S. E., Taugbol, K., Sjaholm, A. & Kaageson-Loe, N., *Remote real-time monitoring of particle size distribution in drilling fluids during drilling of a depleted HTHP reservoir*, in *Proc. of SPE/IADC*, pp. 1-11, Manama, Bahrain, 26-28 October 2009.
- [4] Garcia, C. *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e Eletromecânicos*, EDUSP, 2ª Edição, São Paulo, 2005.
- [5] Åström, K.; Hägglund, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. : ISA, North Carolina, USA, 1995.
- [6] Aguirre, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG, 3ª Edição, Belo Horizonte:, 2007.
- [7] Miller, J. R. Miller, J. A.; Lopez, A. M.; Smith, C.L. & Murrill, P W. *A comparison of controller tuning techniques*. *Control Engineering*, vol.14, n. 12, pp. 72-77, Dec. 1967.