



## CONTROLE EXPERIMENTAL EM TEMPO REAL PARA UMA PLANTA DE NÍVEL

Laura Ribeiro\*<sup>1</sup>, Gabriel Felipe Vieira de Sousa<sup>1</sup>, Gabriela Vieira Lima<sup>1</sup>, Aniel Silva de Morais<sup>1</sup>, Humberto Molinar Henrique<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

<sup>2</sup>FEQUI – Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** – Este trabalho demonstra a implementação experimental de um controlador para uma planta de nível. A planta é operada através de um módulo de aquisição, responsável por estabelecer a comunicação entre a estação de operação e os atuadores do processo. O artigo está dividido em etapas, onde são descritos os processos realizados para a implementação do sistema de controle. Inicialmente a curva de calibração foi obtida, fundamental para o bom desempenho do compensador. Sequencialmente, apresenta-se as etapas de identificação experimental e desenvolvimento do controle. O desempenho do controlador foi verificado através de comparações entre as simulações e ensaios experimentais.

**Palavras-Chave** – Curva de Calibração, Identificação Experimental, Implementação de Controlador, Planta de Nível.

### EXPERIMENTAL CONTROL IN REAL TIME FOR A LEVEL PLANT

**Abstract** - This paper shows the experimental implementation of a controller for a level plant. The plant is operated through a module responsible for establishing communication between the operating station and process actuators. The article is divided into stages and they describe the processes performed for the implementation of the control system. Initially the calibration curve was obtained, fundamental for the good performance of the compensator. Sequentially, the stages of experimental identification and control development are presented. Controller performance was verified by comparisons between simulations and experimental tests.

**Keywords** - Calibration, System Identification, Controller Implementation, Level Plant.

### I. INTRODUÇÃO

É evidente que no atual setor industrial, técnicas inteligentes de controle vêm sendo aplicadas para a otimização de processos industriais.

\*lauraribeiroeng@gmail.com

As plantas industriais devem operar com segurança, de modo a preservar os seus equipamentos e o bem-estar de seus funcionários, bem como da comunidade local. Consequentemente, a segurança das instalações e dos processos é um quesito fundamental no desenvolvimento de projetos de controle industriais [1].

Os sistemas de controle devem proporcionar e garantir uma operação estável e suave, sem oscilações excessivas em variáveis chaves do processo, com garantia de segurança. É desejável que o controle tenha uma resposta rápida e não agressiva às mudanças dos pontos de operação (*setpoint*), e é necessário rejeitar o máximo de perturbações que possam existir [2].

Neste contexto, o nível é um importante parâmetro de controle em indústrias petrolíferas, químicas, metalúrgicas, dentre outras [3].

Os sistemas de controle de nível têm por objetivo melhorar a qualidade da produção. Visto que a planta apresenta uma dinâmica robusta, a utilização do controlador do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é considerada como eficaz [4].

A estrutura básica de um processo a ser controlado consiste em variáveis de entrada, divididas em variáveis manipuladas (que podem ser ajustadas) e perturbações (causadas pelo ambiente externo). As variáveis de saída são variáveis tipicamente associadas com correntes de saída ou com condições inerentes ao processo (composição, temperatura, nível, vazões, etc.). Um subconjunto das variáveis medidas é selecionado para ser controlado [2].

Figura 1: Variáveis Manipuladas e Controladas em Relação à Perturbações no Processo.



O PID é um controlador bastante comum, e segundo [5], é o mais utilizado na indústria. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros ajustá-los de uma forma simples e direta [6].

Dessa maneira, este trabalho almeja realizar a identificação experimental de uma planta de nível e seguidamente o projeto do controlador.

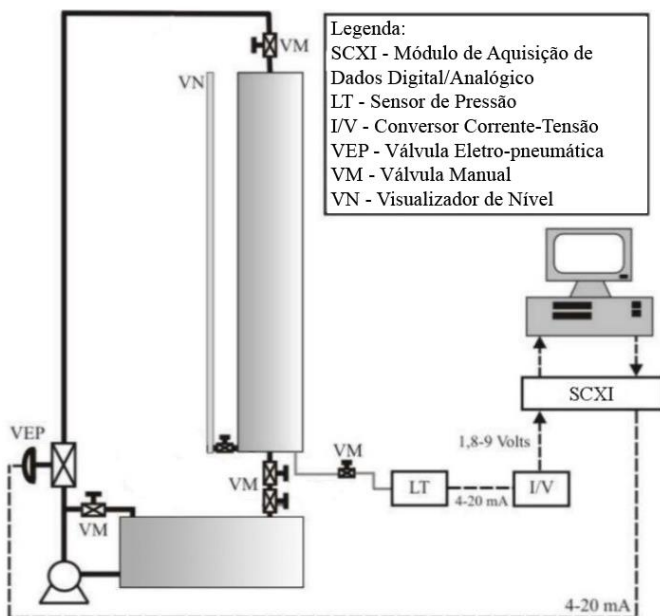
## II. PLANTA DE NÍVEL

O processo a ser controlado consiste em um sistema de tanques de armazenamento de líquidos disponível no Laboratório de Automação, Sistemas Eletrônicos e Controle, localizado na Universidade Federal de Uberlândia.

O sistema é composto por dois tanques construídos em PVC. O tanque a ser controlado é formado por um tubo de 150 cm de altura e 20 cm de diâmetro

O sistema de aquisição de dados é composto por um módulo SCXI-1000 fabricado pela *National Instruments*™ responsável pela interconexão entre as válvulas e o transmissor com a estação base (computador). A Figura 2 descreve a representação esquemática do sistema.

Figura 2: Representação Esquemática da Planta de Controle de Nível.



O sinal de abertura e fechamento da válvula segue o padrão de 4 a 20 mA. Analogamente, o sensor transmissor de pressão diferencial responsável por receber a medida da altura da coluna de líquido, também opera com o padrão de 4 a 20 mA. Deve ser ressaltado que o sistema de aquisição de dados não realiza leitura em unidades de corrente, sendo necessário acoplar um resistor para a conversão. A relação linear é mantida [7].

## III. CURVA DE CALIBRAÇÃO

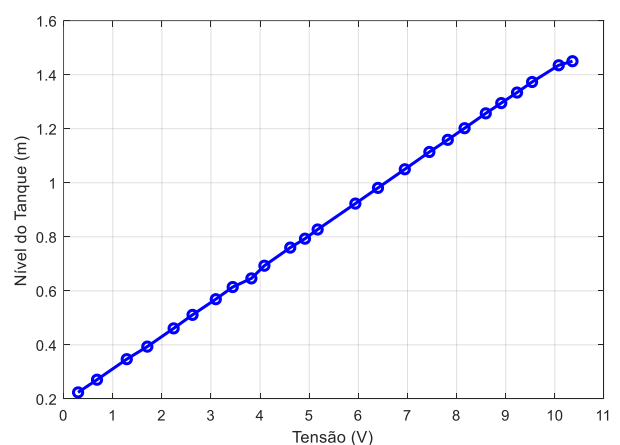
Uma etapa necessária e essencial para os procedimentos de medição em geral, é a calibração do instrumento. A calibração é um conjunto de operações que estabelece a relação entre a saída do sistema de medição e os valores aceitos dos padrões de calibração. Normalmente é envolvido a preparação de um conjunto de padrões contendo uma quantidade conhecida da variável de interesse, medindo a resposta do instrumento para cada padrão e a tentativa de estabelecer a relação entre as variáveis analisadas – saída e entrada [8]. Determinados métodos analíticos em sua grande maioria, exige a realização da calibração de um instrumento, para a garantir a estabilidade e funcionamento do equipamento em questão.

A análise de regressão demonstra e descreve a relação entre uma variável dependente e outras variáveis independentes. Essa relação é representada por um modelo matemático, onde este modelo é designado por um modelo de regressão linear simples que define uma relação linear entre a variável dependente e uma variável independente [9].

Utiliza-se a planta de controle de nível com um tanque de armazenamento e um sensor de pressão diferencial para a construção de uma curva de calibração de nível. Em um primeiro momento, foi verificado se as válvulas do tanque com área irregular estavam fechadas e se a válvula manual de saída do tanque também estava fechada. A válvula manual de ar comprimido é ligada e o sangramento da válvula eletropneumática foi executado, ligando a bomba centrífuga e abrindo a válvula de controle, logo depois, “preenchendo” o tanque até o máximo possível. Por conseguinte, o sinal de saída do sensor no *software LabVIEW*™, foi adquirido e o valor do nível foi coletado. A válvula manual de saída do tanque foi aberta, escoando um volume de água, sendo possível novas coletas de dados.

O procedimento descrito foi executado cerca de 25 vezes, resultando nos valores adquirido das variáveis de saída e entrada, Nível do Tanque (m) e Tensão (V), respectivamente. A Figura 3 apresenta a relação entre o nível e tensão, com base nesses valores.

Figura 3: Relação do Nível em Função da Tensão.



A curva de calibração obtida pode ser vista na equação a seguir, que possui semelhança a uma equação reduzida da

reta, com característica linear, onde a variável manipulada é o nível e a variável controlada é a tensão.

$$N(V) = 0,12409V + 0,18534 \quad (1)$$

Sendo:

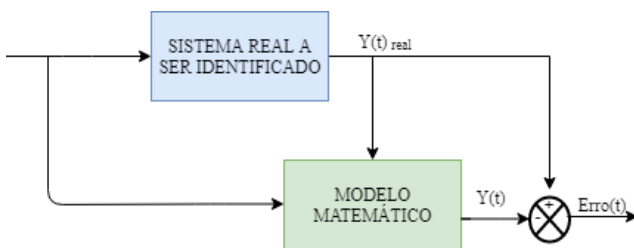
- $N$  - Nível do Tanque.
- $V$  - Tensão aplicada.

#### IV. IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

O processo experimental de identificação de sistemas se propõe a obter um modelo matemático que explique, pelo menos em parte e de forma aproximada, a relação de causa e efeito presente entre os dados de entrada  $u(t)$  e de saída  $y(t)$  de um sistema real qualquer. A identificação do sistema é feita através da relação de tensão nominal aplicada à válvula (entrada) e a vazão resultante (saída) [10].

Objetivando-se utilizar uma técnica de controle baseada em modelo, é necessário conhecer as equações de modelagem da planta, de modo a comparar o sistema identificado com o modelo teórico, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Esquemático da identificação do sistema.



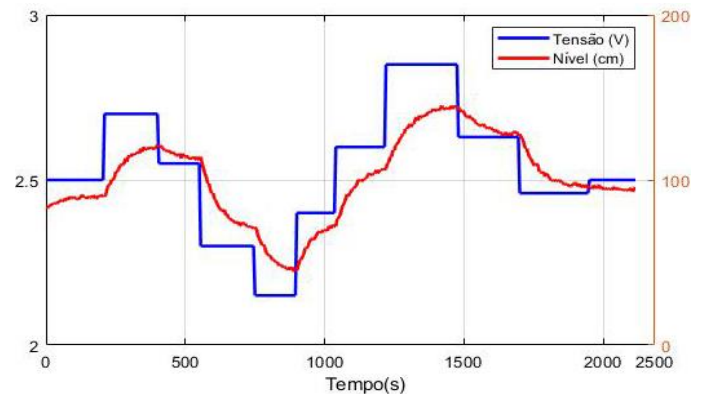
O modelo é obtido respeitando as seguintes premissas:

- Densidade do líquido é constante;
- Área de seção transversal do tanque é constante.

Através da equação do balanço de massa global (considerando o acúmulo de energia e/ou massa determinado pela variação da vazão), é possível identificar que a tensão máxima da válvula é aproximadamente 3V e a tensão mínima é 2V. O tempo coletado em minutos é o tempo de duração entre o início e o fim, onde o fim é quando há a entrada no estado estacionário.

O processo de identificação consiste em preencher o tanque com água completamente e então realizar a respectiva leitura da tensão para o instante momento. Em seguida, envia-se um sinal de tensão inferior ao transmissor e é aguardado o tempo necessário para a planta entrar novamente em regime permanente. O procedimento de variar a tensão até obter-se o regime permanente foi feito cerca de 11 vezes – cerca de 400 dados foram coletados. Houve a aquisição dos valores de tensão em função do nível, variando a tensão nominal aleatoriamente, enviada para a válvula. A Figura 5 apresenta a curva obtida durante o processo de identificação do sistema feita no software LabVIEW™.

Figura 5: Relação Temporal entre Nível e Tensão.



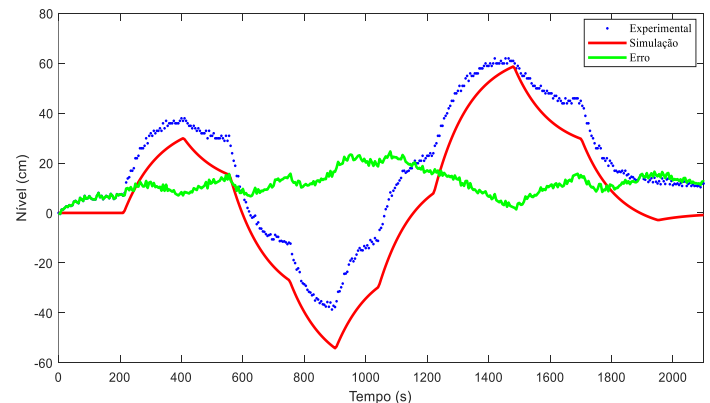
Partindo dos dados obtidos, a transformação dessas informações para variáveis desvio foi executada. Ou seja, subtraiu-se dos elementos o estado estacionário da planta a fim de não obter *offsets* (bias) nos resultados dos gráficos. Com os dados da tensão (entrada) e de nível (saída) em variáveis desvio, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados Lineares para obter a função de transferência que representasse a planta.

Dessa forma, através do método de mínimos quadrados não lineares foi possível obter a função  $G(s)$  - função de transferência do sistema – que é apresentada na Equação 2.

$$G(s) = \frac{2,626}{s+0,02499} \quad (2)$$

A Figura 6 apresenta a comparação entre os dados experimentais e o modelo identificado.

Figura 6: Comparação entre o modelo experimental e a planta real.



Assim, observa-se que o modelo obtido consegue reproduzir o comportamento dinâmico da planta de maneira satisfatória.

#### V. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR

Com a obtenção do modelo do processo, esse mesmo modelo pode ser interpretado como um modelo dinâmico matemático que será usado para o projeto do controlador [7].

### A. Algoritmo de Controle

Para o controle da planta de nível, foi utilizado o algoritmo PID do tipo ISA (ideal), cuja expressão está representada na Equação 3 [11].

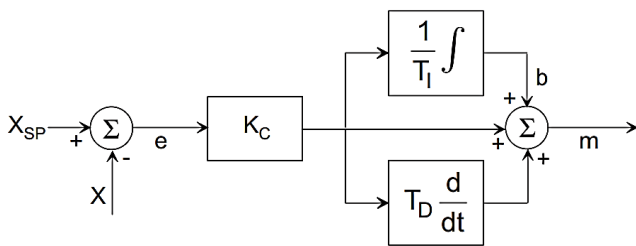
$$m = K_c \left( e + \frac{1}{T_I} \int e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (3)$$

Sendo:

- $m$  - Saída do controlador.
- $K_c$  - Ganho do controlador.
- $e$  - Sinal de erro entre a referência e a saída do processo.
- $T_I$  - Ganho integrativo.
- $T_D$  - Ganho derivativo.

A Figura 7 indica a representação em diagrama de blocos de um controlador PID ideal.

Figura 7: Representação em Diagrama de Blocos do Controlador PID Ideal.



O PID é formado por três coeficientes diferentes, sendo eles o proporcional, integral e derivativo, que são variáveis. Isto é, seus valores podem ser alterados para obter a resposta idealizada.

Um controlador proporcional, onde há apenas o efeito do coeficiente proporcional, de ganho  $K_c$  tem a capacidade de diminuir o tempo de resposta do sistema, mas o erro do estado estacionário ainda é visualizado nesse tipo de controlador. O controlador integral, que leva em consideração apenas o efeito do coeficiente integral, de ganho  $K_I = 1/T_I$  consegue eliminar o erro do estado estacionário, mas provoca um comportamento lento na resposta do sistema. Agora, levando em consideração apenas o efeito do controlador derivativo, o ganho  $K_d$ , é comumente aplicado para se obter uma resposta mais ágil, aumentando a estabilidade do sistema. Nesse último caso, o *overshoot* na resposta transiente é reduzido, porém o seu uso tende a ser caótico em casos de sistemas com sensores com algum nível de ruído, devido a presença do fator derivativo [12].

### B. Sintonia do Controlador

Para a sintonia do controlador, foi aplicado o Método da Síntese Direta - proposto por Garcia e Morari (1982) e Tiviera et al. (1986), seguido de um ajuste fino nos parâmetros.

O Método da Síntese Direta (MSD), em poucas palavras, é um método de imposição. Ele é capaz de impor uma

dinâmica ao processo controlado através da síntese de um controlador. Este controlador impõe à malha de controle fechada uma resposta desejada [2].

Em outras palavras, há a especificação de um comportamento desejado para o sistema, e com este método, a função de transferência em malha fechada é definida para alcançar esse comportamento [13].

Para encontrar a resposta desejada e utilizar o MSD, verifica-se a realização do controlador. De outro modo, é necessário verificar se o controlador resultante do MSD é realizável – não seja causal.

A principal desvantagem do MSD é de não ser aplicável diretamente em processos que contenham zeros no semiplano direito (SPD).

Sendo assim, a Tabela I apresenta os ganhos definidos para o controlador.

Tabela I: Ganhos do compensador

$K_c$	$T_I$	$T_D$
$9,5 \times 10^{-3}$	19,8	0

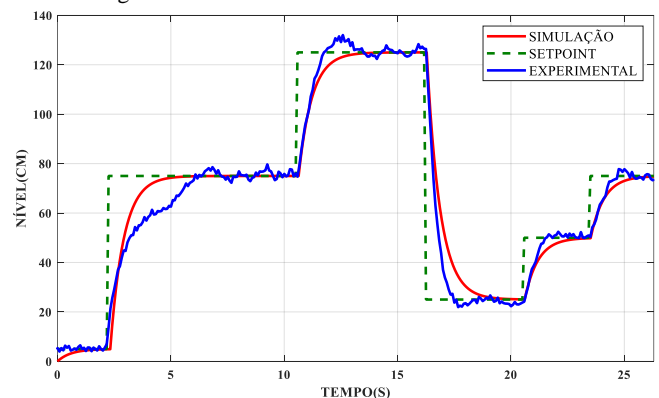
## VI. RESULTADOS

A verificação dos resultados foi efetuada por meio de comparações entre ensaios experimentais e as simulações do modelo dinâmico.

Para os resultados aqui descritos, a taxa de amostragem foi de aproximadamente 100 milissegundos e o tempo de execução da simulação foi de 26,3 segundos.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos tanto no ensaio experimental como na simulação. No tempo de 2 a 10 segundos o *setpoint* foi definido como 75 cm. Entre os instantes 10 e 16 segundos, o sistema foi submetido a um *setpoint* de 125cm. Já entre os instantes de 16 a 26 segundos, foi feita uma variação crescente no *setpoint* a fim de verificar o desempenho do sistema em diferentes situações.

Figura 8: Controle da Planta em Malha Fechada.



Analisando os resultados obtidos, é possível observar que o sistema apresentou um comportamento estável e que o controlador foi capaz de eliminar o erro em estado estacionário, tanto na simulação quanto na planta real.

No sistema experimental, é possível verificar a presença de um pequeno sobressinal (*overshoot*), resultante de distúrbios e perturbações que afetam diretamente a planta.

## VII. CONCLUSÕES

Este artigo demonstrou a implementação experimental de um controlador para uma planta de nível. A curva de calibração obtida foi validada estatisticamente bem como o modelo matemático, via *software*. O modelo identificado do sistema foi a base dos ensaios computacionais.

Através dos resultados obtidos é possível afirmar que o controlador PID apresentou bom desempenho e encontra-se sintonizado.

Ademais, conclui-se que a implementação de um controlador através do modelo matemático é vantajosa pois permite sintonizar de maneira otimizada os ganhos do compensador.

Futuros trabalhos consistirão em implementar uma estratégia de controle cascata ao processo, de modo a otimizar ainda mais a redução de perturbações que afetam o sistema.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio e pelo empréstimo do espaço físico do Laboratório de Automação, Sistemas Eletrônicos e Controle (LASEC), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), para a realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. S. G. d. Almeida e R. F. Cagnin, “A Indústria do Futuro no Brasil e no Mundo,” Março 2019. [Online]. [Acesso em 28 Julho 2019].
- [2] H. M. Henrique, *Uso de Modelos de Sistemas Dinâmicos em Controle e Automação Convencional de Sistemas Industriais*, Uberlândia, 2019.
- [3] S. Janarthanan, K. N. Thirukkuralakani e S. Vijayachitra, “Performance analysis of non-integer order PID controller for liquid level control of conical tank system,” *International Conference on Information Communication and Embedded Systems*, pp. 1-5, 2014.
- [4] H. C. e. Z. Chen, “Implement of a Cascade Integral Sliding Mode Controller for a Water Tank Level,” *2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control*, p. 162, 2008.
- [5] K. Aström e T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, United States of America: Instrument Society of America, 1995.
- [6] National Instruments, “Explicando a Teoria PID,” 5 Março 2019. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>. [Acesso em Agosto 2019].
- [7] H. M. Henrique, “Projeto e Sintonização de Controlador Feedback para Malha de Controle de Nível,” Junho 2018. [Online]. Available: [https://www.moodle.ufu.br/pluginfile.php/691074/mod\\_resource/content/3/Pratica%20n.04b%20-%20Projeto%20e%20Sintoniza%C3%A7%C3%A3o%20de%20Controlador%20Feedback%20para%20Malha%20de%20Controle%20de%20Nivel.pdf](https://www.moodle.ufu.br/pluginfile.php/691074/mod_resource/content/3/Pratica%20n.04b%20-%20Projeto%20e%20Sintoniza%C3%A7%C3%A3o%20de%20Controlador%20Feedback%20para%20Malha%20de%20Controle%20de%20Nivel.pdf). [Acesso em Julho 2019].
- [8] V. Barwick, *Preparation of Calibration Curves*, Reino Unido: LGC, 2003.
- [9] H. M. Henrique, “Calibração de Transmissor Diferencial de Pressão para Medida de Nível,” Junho 2018. [Online]. Available: [https://www.moodle.ufu.br/pluginfile.php/611388/mod\\_resource/content/7/Pratica%20n.02b%20-%20Calibra%C3%A7%C3%A3o%20de%20Transmissor%20Diferencial%20de%20Press%C3%A3o%20para%20Medida%20de%20N%C3%ADvel.pdf](https://www.moodle.ufu.br/pluginfile.php/611388/mod_resource/content/7/Pratica%20n.02b%20-%20Calibra%C3%A7%C3%A3o%20de%20Transmissor%20Diferencial%20de%20Press%C3%A3o%20para%20Medida%20de%20N%C3%ADvel.pdf). [Acesso em Julho 2019].
- [10] M. V. Corrêa, *Identificação de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares Utilizando Modelos NARMAX Racionais - Aplicação a Sistemas Reais*, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (Dissertação de mestrado, PPGEE), 1997.
- [11] H. L. Wade, *Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application*, ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2004.
- [12] S. R. Muniz, “Resumo sobre controladores PID,” 2017. [Online]. Available: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4132451/mod\\_resource/content/0/Resumo\\_controladores\\_PID.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4132451/mod_resource/content/0/Resumo_controladores_PID.pdf). [Acesso em Agosto 2019].
- [13] S. C. P. Gomes, *LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES INCREMENTAL E SUA APLICAÇÃO NA SINTONIA DE CONTROLADORES PID*, São Caetano Sul, 2009.